



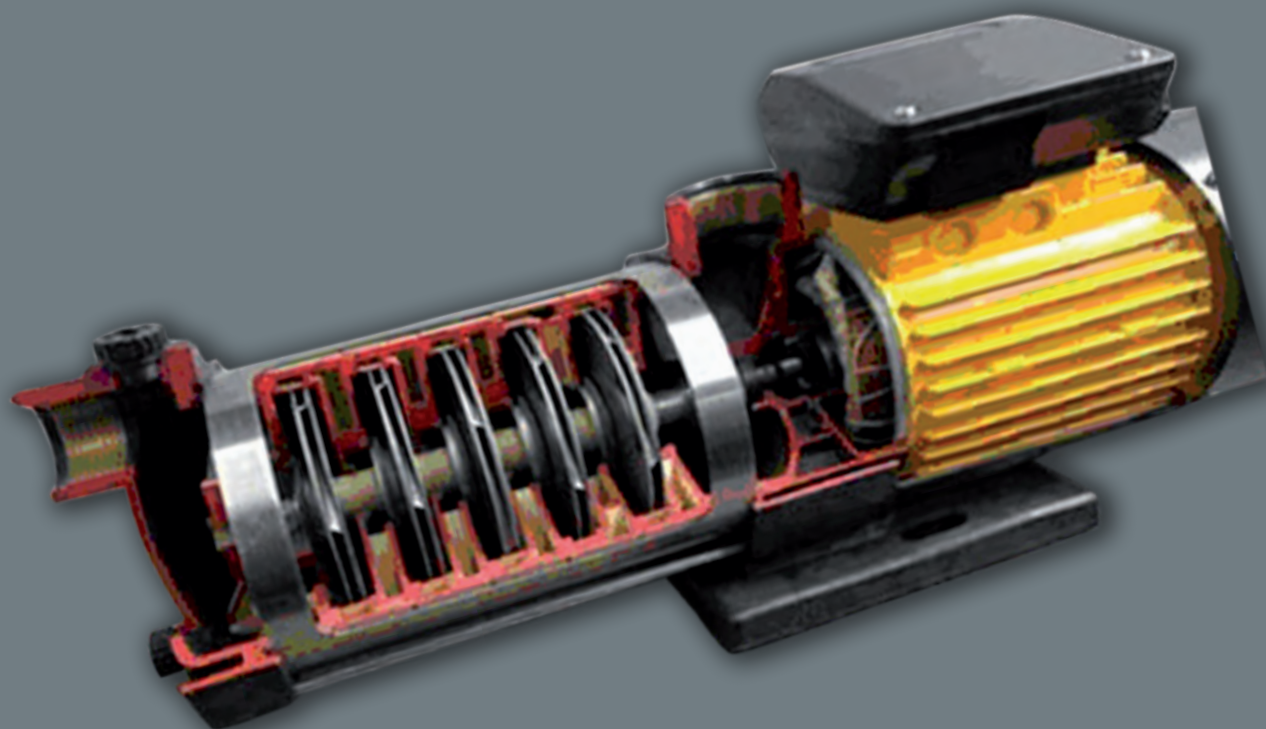
Feliz año nuevo

DYNA

ingeniería e industria #1

www.revistadyna.com

Año 92 | Nº1 | Enero - Febrero 2017



El difusor en bombas centrífugas multietapa

Evaluando la erosión del suelo por fotogrametría

Reconocimiento por el iris

El bruñido con bola: tecnología en desarrollo

Historia del sector eléctrico



Revista de Ingeniería Multidisciplinar con factor de impacto en JCR

ISSN 0012-7361 | DOI: 10.6036/DYNAII | SICI: 0012-7361(20170101)92:1<>1.0.TX;2-U | CODEN: DYNAU



MANTÉNTE INFORMADO

con **DYNA**

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

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

- **Noticias** sobre Ingeniería y Tecnología
- **Artículos científicos** auditados por expertos
- **Colaboraciones monográficas** sobre temas de interés
- **Boletín mensual** por correo electrónico
- **Encuestas** para escuchar tus opiniones e ideas
- **Foros** de discusión
- **RSS** para estar informado de lo último publicado
- **Alertas** configurables por correo electrónico.
- **Acceso a DYNAs digitales:** Energía y Sostenibilidad, Management y New Technologies

Publicamos la actualidad en Ingeniería desde 1926.

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: José Esteban Fernández Rico (Asociación de Asturias - Oviedo)

Secretario-no consejero: Carlos López de Letona Ozaita (Asociación de Bizkaia - Bilbao)

Vocales:

José Antonio Arvide Cambra (Asociación de Andalucía Oriental - Granada), 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

Ramón Larrinoa Barreda (Colegio de Alava), Gabriel Egaña Uranga (Colegio de Gipuzkoa), Carlos Izkué Montejo (Colegio de Navarra), Francisco J. Marrodán Esparza (Asociación de La Rioja), Jesús María Mirat Celdrán (Asociación de Extremadura), 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 Urueña Cuadrado (Asociación de León).

CONSEJO DE REDACCIÓN

Presidente: Ignacio Fernández de Aguirre Guantes (Instituto de Fundación 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 Girot (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 (Consellería de Industria Comercio e Innovación - Valencia), Allan Joseph Wailoo (Universidad de Sheffield - Sheffield, UK), Blas Hermoso Alameda (Universidad Pública de Navarra - Pamplona), Fernando Guijarro 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. Fernández 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. Dirijase 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 Behoko 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(20170101)92:1<>1.0.TX;2-U

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 Hernandez, Universidad Rovira i Virgili, Universidad de Huelva, Universidad Sancti Spiritus.

ORGANIZACIONES COLABORADORAS

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

ORGANIZACIONES AMIGAS DE DYNA

Bodegas Muriel y Structuralia

DIRECCIÓN

José María Hernández Álava

Miembro de:

- Council of Science Editors
- Asociación Española de Comunicación Científica

Suscripción anual Institucional

España 190,00 €
 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 200x60 pixels (mín. 7 dd).....	15 €/día	
Banner web superior de 520x95 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 (Bibliotecas Universitarias 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. Pais Oficina

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

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

Remitir este boletín de suscripción o sus datos por:

CORREO POSTAL: Publicaciones DYNA SL Alda. Mazarredo 69 - 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

Enero - Febrero 2017

48

LA PLANIFICACIÓN DE REPUESTOS EN EL EJÉRCITO DE TIERRA. IMPLANTACIÓN DEL MÉTODO DISPONIBILIDAD BASADA EN LA ESCASEZ (RBS)

SPARE PARTS PLANNING IN THE SPANISH ARMY: READINESS BASED SPARING METHOD (RBS) IMPLEMENTATION

63

EFFECT OF DIFFUSER INLET WIDTH ON CANTILEVER MULTISTAGE CENTRIFUGAL PUMP

EFECTO DEL ANCHO DE LA ENTRADA AL DIFUSOR EN BOMBA CENTRIFUGA MULTIETAPA EN VOLADIZO

76

STATISTICAL APPROACH BASED IRIS RECOGNITION USING LOCAL BINARY PATTERN

ENFOQUE ESTADÍSTICO PARA EL RECONOCIMIENTO DEL IRIS USANDO PATRONES BINARIOS LOCALES

89

TRANSIENT CHARACTERISTICS AND OPTIMAL CONTROL STRATEGY OF SUPERCONDUCTING CONTROLLABLE REACTOR

CARACTERÍSTICAS TRANSITORIAS Y ESTRATEGIA ÓPTIMA DE CONTROL DE UN REACTOR CONTROLABLE SUPERCONDUCTOR

106

MÉTODO PARA CALCULAR LA POTENCIA ELÉCTRICA ÓPTIMA A CONTRATAR EN ESPAÑA

METHOD FOR CALCULATING OPTIMUM CONTRACTED ELECTRIC POWER LEVELS IN SPAIN

55

EMPLEO DE LA FOTOGRAMETRÍA DIGITAL PARA LA EVALUACIÓN DEL SUELO CON RIESGO DE EROSIÓN EN OLIVAR

USING DIGITAL PHOTOGRAMMETRY FOR EVALUATING SOIL EROSION RISK IN OLIVE ORCHARD

71

VALORIZACIÓN DE LODOS PROCEDENTES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE. UNA APUESTA POR LA ECONOMÍA CIRCULAR Y SOSTENIBILIDAD

VALORIZATION OF SLUDGE FROM DRINKING WATER TREATMENT PLANTS. A COMMITMENT TO CIRCULAR ECONOMY AND SUSTAINABILITY

82

PERITAJE DE FALLOS EN TURBOCOMPRESORES DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS

FAULT EXPERTISE IN INTERNAL COMBUSTION ENGINE TURBOCHARGER

97

DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLOS EN SENSORES DE TEMPERATURA EN UNA COLUMNA DE DESTILACIÓN FRACCIONADA

FAULT DETECTION AND DIAGNOSIS IN TEMPERATURE SENSORS OF A FRACTIONAL DISTILLATION COLUMN

113

DESARROLLO DEL CONCEPTO DE ÁRBOL MULTITECNOLÓGICO: UNA APLICACIÓN EN LA INDUSTRIA AUXILIAR DEL AUTOMÓVIL

DEVELOPMENT OF THE MULTITECHNOLOGICAL TREE CONCEPT: AN APPLICATION TO THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

■■■ **nuestras cosas**

4 Hitos de la ingeniería industrial

5 Editorial

120 Estadísticas

■■■ **perspectivas**

6 Sistemas de monitorizado continuo para el almacenaje, distribución y empleo seguros del hidrógeno como energía para el transporte

8 Reciclado económico de los LED

10 ¿Cuánto durará la actual especie humana? Una aproximación probabilística

12 Tras el acuerdo de París

■■■ **notas técnicas**

15 Diseño de un Laboratorio Remoto de Impresión 3D

16 La gestión ágil y concurrente de proyectos con incertidumbre

18 Propuesta de mejoramiento en la toma de decisiones: integración de OTSM-TRIZ y AHP

19 Renovación de instalaciones de alumbrado público con nulo consumo energético

20 Identificación con estimación de secuencias

21 Visibilidad del emprendimiento femenino en el contexto industrial

■■■ **colaboraciones**

22 Una hoja de ruta hacia los servicios inteligentes en la asistencia sanitaria

28 El proceso de bruñido con bola: estado del arte de una tecnología en desarrollo

34 Bases metodológicas para una nueva plataforma de medida del comportamiento humano en entornos virtuales

39 Liderazgo y cultura de seguridad laboral: revisión del estado de la cuestión

43 El sector eléctrico desde su inicio hasta la segunda guerra mundial

LOS PRIMEROS PASOS DE LA INDUSTRIA DE AUTOMOCIÓN ESPAÑOLA

En el número de enero de 1926 de nuestra Revista DYNA, primero de ese año, se publicó un artículo con el título “*EL AUTOMÓVIL C.E.Y.C. 3-10 caballos de fabricación Nacional*”, exponiendo las razones que habían llevado a su diseño por el Ejército, detallando sus características y presentando los acuerdos tomados para la próxima fabricación y puesta en el mercado.

Quedaban ya muy lejanos los tiempos en que, simultáneamente por varios inventores alemanes, se habían hecho realidad práctica anteriores y variopintos intentos de conseguir “locomóviles” con diferentes propulsiones que pudiesen transitar por las calles y caminos de la época: Karl Benz (desde 1885) en Manheim, su hija Berth (1888), Gottlieb Daimler y Wilhelm Maybach (durante 1889) en Stuttgart dieron el paso definitivo. Desde 1900, la producción industrial de automóviles con motores de combustión, era un hecho, no solo en Alemania, sino también en Francia y Estados Unidos.

De esos primeros vehículos, algunos habían llegado a España. Según algunas fuentes, hacia 1898 pudieron llegar a Madrid los primeros vehículos, pero debido a la falta de normativa legal es difícil fijar fechas concretas hasta que no fue exigida la matriculación municipal. Por ella sabemos que el primer coche matriculado en España fue un *Clément* en Palma de Mallorca el año 1900 y el también primero de Madrid, un *Renault* descapotable en 1913. Pero sin duda que habrían circulando bastantes más por toda la península en ese intervalo.

La fabricación autóctona tampoco tardaría mucho en arrancar, bien que inicialmente por medios relativamente artesanos. *Emilio de la Cuadra*, con el técnico suizo *Marc Birkigt* la comienzan en Barcelona entre 1898 y 1899 con la “*Cía. General Española de Coches Automóviles*”, quebrando al poco tiempo. Sin embargo *Birkigt*, primero con *José María Castro* y finalmente con *Damián Mateu* y *Francisco Seix*, culminan en 1904 la puesta en marcha de “*La Hispano-Suiza*”, que marca realmente el definitivo impulso a una industria de fabricación de automóviles que alcanzó elevado prestigio en toda Europa.

¿Cómo se explica la aparición de la propuesta del automóvil C.E.Y.C en este artículo de DYNA, en aquel tiempo publicada por la Agrupación de Ingenieros Industriales de Bilbao, y qué desarrollo tuvo el proyecto?

El Centro Electrotécnico y de Comunicaciones del Ejército, venía adaptando desde 1921 varios tipos de camiones de diferentes marcas como vehículos blindados. Uno de sus ingenieros, el capitán Antonio Hernández, autor del artículo, decidió diseñar un pequeño automóvil de enlace, que se construyó en ese mismo centro entre 1923 y 1924. Viendo sus excelentes resultados, no terminó ahí el intento, sino que con un diseño cada vez más perfeccionado, se llegó a un acuerdo con la “*Cía. Euskalduna*” de Bilbao para la fabricación comercial en los talleres de la “*Sdad. Española de Construcciones Metálicas*” de Madrid, que estaba gestionada por la primera. La acogida por el mercado del CEYC fue muy buena por su calidad y prestaciones, pero discrepancias empresariales y el traslado de la fabricación a otra factoría, también en Madrid, hicieron que hubiese de cesar definitivamente en 1927. Se habían elaborado un total de 1.116 unidades.

Antonio Hernández diseñó un nuevo prototipo, con mayor potencia y capacidad, el *Diane*, que aun con pruebas satisfactorias, no llegó a fabricarse.

“*La Hispano-Suiza*” llegó hasta la guerra civil con un creciente nivel técnico y de calidad tanto en su planta española como en la francesa, entrando también en el campo de los motores para aviación. Tras ella se orientaron hacia la fabricación de camiones, siendo, tras diferentes etapas, integrada su marca “*Pegaso*” en la organización estatal ENASA. Pero esas son ya otras historias.



El automóvil CEYC de tres plazas

LA RECUPERACIÓN ECONÓMICA Y LA NECESARIA REINDUSTRIALIZACIÓN DEL SUR

Muchos analistas y expertos en economía consideran, desde diversas corrientes doctrinales, que los datos macroeconómicos indican que, si bien aún no está totalmente superada, la crisis económica que estamos padeciendo desde el año 2008, descrita en forma de "L" al dibujarse con una inicial caída vertiginosa hasta tocar fondo y una posterior evolución positiva extremadamente lenta, se encuentra en vías muy avanzadas de recuperación.

Nada hay más lejos de nuestra intención que generar dudas en torno a este aserto o poner palos en la rueda del optimismo; sin embargo, creemos que ningún análisis o diagnóstico puede olvidar determinados datos, como los del déficit y la deuda pública, que se sitúa en torno al 100% del PIB; el elevado déficit de la Seguridad Social, que registra una tendencia negativa sostenida; o la exigencia de la UE de un ajuste de 5.500 millones de euros en el próximo año 2017. Por tanto, la perspectiva antes descrita, sin ser puesta en duda, debe acompañarse de ciertos matices.

Si analizamos datos del INE, tanto sectoriales como por zonas geográficas, veremos que determinados índices esenciales dividen claramente la situación económica de las diversas regiones en España, dibujando una línea imaginaria que separa al sur del norte.

Para entender la situación, analicemos diversos ratios estadísticos que nos mostrarán el escenario descrito:

- 1) El PIB per cápita, en las regiones del norte de la Península, se encuentra en valores que oscilan entre el 1,09 y 1,36, tomando como referencia la media nacional, mientras que en las regiones del sur oscila entre 0,69 y el 0,79.
- 2) La tasa de paro se sitúa en el entorno del 10-12% en las regiones del norte, y del 25-28% en el sur.
- 3) En cuanto al número de empresas industriales por cada 1.000 habitantes, en las regiones del norte encontramos valores próximos al 5,5, mientras que en las del sur no llega a 3.
- 4) La tasa de ocupados en el sector industrial, con respecto a la población total, oscila entre el 8% y el 10% en el norte, frente a los índices muy inferiores en las regiones del sur, que oscilan entre el 2% y el 3%.

Debemos considerar, por último, que los puestos de trabajo generados en la industria son de mayor calidad, mejor retribuidos, más estables, menos sometidos a temporalidad y, por supuesto, requieren una formación superior a otros sectores, lo que, en última instancia, conduce a un círculo virtuoso que se realimenta a sí mismo.

Los datos y las consideraciones anteriores perfilan una situación que permite concluir que adoptar medidas estructurales que impulsen el crecimiento de las regiones del sur se presenta como una de las formas más acertadas de ayudar a la recuperación económica general y paliar efectos de la crisis o, cuando menos, evitar retrocesos. Se trata de impulsar políticas que acompañen a estas regiones hasta alcanzar ratios y valores similares a los de las más desarrolladas. A modo de primera aproximación, estúdiese el por qué y trasládense las mejores prácticas.

Como corolario, la reindustrialización del sur será, por consiguiente, una apuesta imprescindible para acompañar a la apreciada mejora de la situación económica en España y a su deseada consolidación. Como decía Thomas Hobbes, cuando el deseo se acompaña de la idea de satisfacerse, se denomina esperanza; despojado de tal idea, se convierte en desesperación.

Para ello, es necesario y urgente:

- 1) Implantar desde las Administraciones Públicas locales, autonómicas y nacionales, programas de desarrollo de las infraestructuras necesarias. Baste señalar aquí como ejemplo el denominado Corredor Mediterráneo, por el que incluso gobiernos de países asiáticos han mostrado interés, pero cuya finalización, ni está, ni se le espera.
- 2) Establecer políticas de desarrollo y apoyo a sectores de alto valor añadido, tales como el energético, y a las energías renovables.
- 3) Desarrollar políticas de I+D+i eficaces y centradas en aquellos sectores de resultados con previsión de futuro.
- 4) Fomentar el apoyo al emprendimiento.
- 5) Llevar a cabo la necesaria potenciación y mejora de la formación profesional, tanto desde el punto de vista técnico como de imagen ante la sociedad.

Podríamos continuar esta enumeración hasta un largo etcétera. Se trata, en fin, de campos y actuaciones, que, aun siendo conocidas y ampliamente comentada la necesidad de su desarrollo en ámbitos y sectores diversos, no terminan de arrancar. Acompañemos al deseo de que lo hagan y mantengamos la esperanza hobbesiana de la recuperación.

Sistemas de monitorizado continuo para el almacenaje, distribución y empleo seguros del hidrógeno como energía para el transporte

Malini Vieyra
TWI (UK)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8154>

TWI forma parte de un consorcio que ha llevado a cabo un proyecto de colaboración desarrollando con éxito una técnica de monitorizado para mejorar la seguridad de los tanques de almacenaje del hidrógeno como combustible.

Este proyecto, *SafeHPower*, financiado por la UE, ha cubierto la necesidad de desarrollar con éxito dos prototipos para tanques de almacenaje seguro de hidrógeno como combustible, basados en la tecnología de emisión acústica (AE) [1]. Los prototipos fueron diseñados para monitorizar continuamente los tanques durante las fases de almacenaje, distribución y empleo, en la actividad de transporte de hidrógeno, asegurando que cualquier defecto que pudiera ocasionar eventuales fugas, era detectado a tiempo para evitar fallos catastróficos.

El proyecto incluía también el desarrollo de un sistema de radiografía por neutrones para obtener imágenes de los tanques en todos los puntos de la cadena de suministro de hidrógeno. Sin embargo el prototipo no consiguió proporcionar imágenes de las fugas con una corriente de neutrones generados por un aparato portátil de deuterio-tritio y un sistema de imagen digital en tiempo real, por lo que fue excluido del estudio.

HIDRÓGENO: UN COMBUSTIBLE DE FUTURO

El hidrógeno es una alternativa prometedora a los combustibles fósiles, cuyas ventajas son su abundancia, eficiencia, baja huella de carbono y ausencia de otras emisiones contaminantes. Sin embargo, tiene problemas de seguridad para su uso, especialmente si se almacena a las elevadas presiones exigidas para hacerlo económicamente viable. Estas altas presiones significan un riesgo durante su almacenaje o transporte.

Este gas puede pasar fácilmente a través de los intersticios entre los átomos

de muchos materiales estructurales. En los metales, esto causa su degradación por un proceso denominado *fragilización* por hidrógeno. Los tanques experimentan también ciclos de carga continuos desde la presión del ambiente a la de almacenaje, lo que fatiga el material del mismo. Adicionalmente, puede también haber tensiones residuales de fabricación y esta combinación de sollicitaciones tiende a iniciar el desarrollo de grietas de fatiga. La combinación de grietas de fatiga y la fragilización por hidrógeno llega a ser significativa con el tiempo, originando un acelerado crecimiento de esas grietas. En tiempos pasados se han producido varios accidentes y daños importantes por defectos no detectados.

Los tanques de almacenaje hechos de materiales compuestos (*composites*) revestidos internamente con polímero (Tipo IV) o metales como acero o aluminio (Tipo III) se emplean generalmente en los vehículos, mientras que los tanques para almacenaje estacionario y transporte están fabricados comúnmente de acero (Tipo II)

ACTIVIDADES DEL PROYECTO SafeHPower

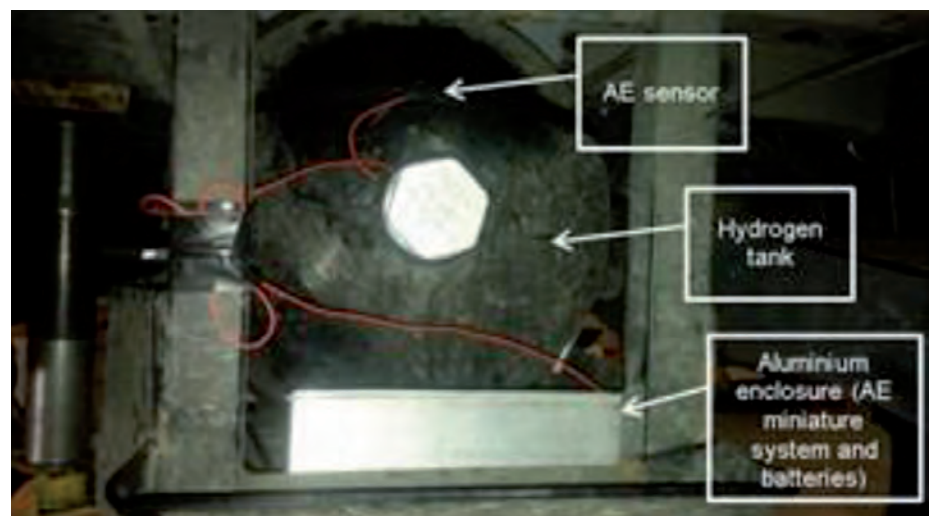
1 - Sistema de sensores AE miniatura para monitorizado continuo en tanques de compuesto (Tipo IV)

El proyecto *SafeHPower* ha desarrollado un sensor prototipo miniatura para el monitorizado y detección continua de

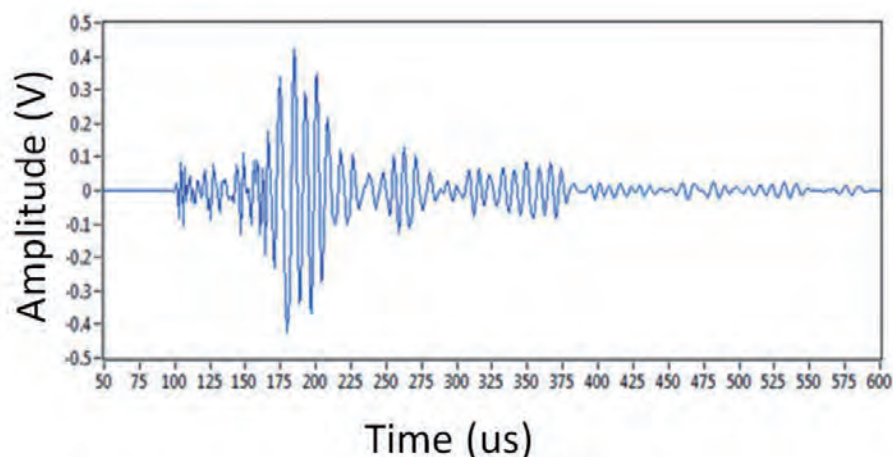
grietas de fatiga en este tipo de depósitos de combustible para vehículos. El equipo consiste en sensor AE, caja de control y software incorporado. El sistema ha sido diseñado y desarrollado de varios tipos para posibilitar su instalación en un vehículo, de forma que:

- Toda su necesidad energética pueda ser aportada por la batería del vehículo.
- La caja de control pueda actuar como *caja de Faraday* que aporte protección contra interferencias electromagnéticas producidas por componentes electrónicos externos, así como que sea resistente al agua y al polvo.
- Que el software embebido pueda monitorizar permanentemente todos los eventos del sensor AE y tome decisiones de SI/NO para activar el aviso en el panel de mandos del vehículo.

Se han llevado a cabo con éxito ensayos de laboratorio y de campo en depósitos de compuesto (Tipos IV y III) respectivamente. Durante las pruebas de campo, el sensor AE prototipo experimentó condiciones representativas de operación real en términos de temperatura y exposición al agua, polvo, humedad y vibraciones. Los resultados de estas pruebas mostraron que los ciclos de llenado del depósito generaban poca actividad en el sensor (porque el



Sistema de sensor AE instalado en el depósito bajo el vehículo



Señal típica de detección del sensor AE miniatura



Uno de los seis sensores AE en un gran depósito de almacenaje

depósito del vehículo no tenía defectos), comparado con los ensayos de laboratorio que mostraban significativa mayor actividad (porque en estos depósitos de habían incorporado manualmente grietas).

2 – Sistema de conjunto de sensores AE para monitorizar grandes tanques de acero (Tipo I)

El Proyecto también ha desarrollado un sistema general de sensores AE para el monitorizado permanente de grandes tanques de almacenaje y, en especial, para detectar la posición de cualquier defecto con alta precisión. Comprende un conjunto de tres o más sensores, una plataforma PXI (PCI eXtensions for Instrumentation) para dar apoyo al equipo de ensayo electrónico, de los sistemas automáticos y de los instrumentos modulares, y el *software* avanzado para procesado de las señales. El sistema es capaz de aportar una detección temprana de grietas de fatiga y daños por

el hidrógeno antes de que se conviertan en críticos.

La clave del sistema es la informática citada para procesado de las señales de los sensores AE, capaz de trabajar con un gran volumen de datos procedentes de ellos y sobre largos períodos con carga. Esta herramienta de procesado cubre diferentes aspectos del problema. El *software* desarrollado opera por etapas, realizando la incorporación de los datos, su normalización, el análisis, la valoración y la triangulación. Un interface gráfico de usuario permite al operador introducir varios parámetros, apreciar la señal de los diferentes sensores AE y localizar los defectos con gran precisión.

La validación en ensayos de laboratorio con agua, en lugar de hidrógeno, almacenada a presión de 220 bares en un tanque que tenía un defecto, mostró que el sistema desarrollado de sensores AE era capaz de detectar sucesos producidos por

grietas de 50x2x1 mm y 50x5x0,5 mm. El método de triangulación incorporado al *software* localizó la fuga con precisión.

Las pruebas de campo fueron realizadas instalando un conjunto de seis sensores durante un mes en un gran tanque estacionario de 50m³ de capacidad. Los resultados obtenidos en el ensayo fueron comparables con los del laboratorio realizados en una muestra con pérdidas.

TRABAJOS FUTUROS

Los prototipo de sensores AE son robustos, con una disponibilidad tecnológica de nivel cinco a seis (se ha llegado hasta la demostración práctica). Sin embargo están proyectadas varias mejoras y complementos que incluyen la comunicación entre los sensores AE y el sistema de control de los vehículos para aportar información cuando el depósito es presurizado. Eso haría el sistema más fiable y evitaría falsas alarmas originadas por los sensores diferentes de las originadas por la iniciación o la propagación de grietas. Las causas de esos falsos positivos incluyen vibraciones en los depósitos por impacto con otros componentes o con las gotas de lluvia que pueden generar señales parecidas al agrietamiento. Estos complementos podrían también facilitar información sobre el comienzo y final del llenado del depósito durante la carga, mostrando los resultados de monitorización durante el aumento de presión con un incremento normalizado.

El consorcio opina que tras un año más de pruebas de campo, los productos con sensores AE estarán listos para su comercialización en 2017. Las numerosas pruebas también aportarán datos que permitirán la identificación de modelos exactos de depósitos defectuosos y no defectuosos, lo que facilitará un ajuste del *software* que inicia el proceso de alarma con alto grado de precisión.

NOTA DEL TRADUCTOR

[1] Cuando se aplica una sollicitación a materiales estructurales se originan deformaciones y, eventualmente, defectos que producen emisiones de ondas elásticas que se mueven hacia las superficies y pueden ser detectados por sensores. Los sensores son transductores piezoeléctricos que transforman las ondas captadas en eléctricas, de manera similar a los sismógrafos. Con una amplificación posterior es posible valorar la magnitud de la señal original y su ubicación.

Reciclado económico de los LED

Se utilizan masivamente en televisión y en iluminación. También los LED están cada vez más presentes en los faros para automoción. Todavía no hay un procedimiento apropiado de reciclaje para los díodos emisores de luz. Los investigadores de FRAUNHOFER han desarrollado un método que separa los componentes de los LED por medios mecánicos.

Tobias Steinhäuser
FRAUNHOFER

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8148>



En los aparatos modernos de iluminación se incorporan diferentes materiales: vidrio o plástico en las carcasas, cerámica o aluminio en los cuerpos de refrigeración, cobre en contactos o cables, y los más valiosos en el interior de los díodos emisores de luz – los conocidos como LED (*Light Emitting Diode*): indio y galio en el diodo semiconductor y tierras raras, como europio o terbio en el luminiscente. La fabricación de los díodos es por eso apreciablemente cara y los márgenes son muy bajos.

"Ahora comienzan a aparecer para su reciclado los primeros productos LED, que hasta este momento se han vertido pues no disponen actualmente de un proceso de reciclaje. La meta será pues, recuperar los materiales de valor. Hay una pregunta por hacer: el tiempo que deberá transcurrir hasta que sea realidad la aplicación del reciclado de los LED", nos dice **Jörg Zimmermann**, del Grupo de Proyectos para Economía Circular y Estrategia de Recursos del Instituto Fraunhofer para Investigación del Silicio (ISC).

Disgregado de componentes con la ayuda de ondas de presión

Utilizando la fragmentación electrohidráulica, los investigadores desmenuzan las lámparas LED en sus componentes unitarios pero sin romper el elemento LED propiamente dicho. Los impulsos eléctricos de las ondas de presión tienen lugar en un baño de agua que mantiene esos componentes del mecanismo en su mismo estado previo a la rotura. Esas partes

tienen la posibilidad de separarse para su valorización. Los investigadores han comprobado que el proceso posibilita su reutilización en medios de iluminación. Son similares en su aspecto a las clásicas bombillas o lámparas de barra y pueden por ello ser fijadas correctamente a portalámparas comerciales. "El método ha funcionado también del mismo modo para otros tamaños – por ejemplo especialmente para LEDs de televisiones y faros de automóvil – o para distintos componentes electrónicos", aclara el experto.

Se debe conseguir una separación limpia

Para conseguir un proceso de reciclado económico hay que separar de antemano los componentes limpia y totalmente. "Para separar de forma eficiente todos los componentes de un elemento de iluminación basado en LED y reutilizarlos se necesita un concepto completamente distinto de fragmentación que el aplicado para grandes cantidades de semiconductores o aparatos de iluminación", expone Zimmermann. Si se fragmenta el residuo como un todo, resulta mucho más difícil seleccionar los diferentes materiales en una mezcla de pequeños trozos triturados. Mediante la separación en componentes unitarios, es también más fácil recuperar mayores cantidades de los materiales contenidos en ellos: esto se basa en seleccionar muchos componentes valiosos en los que la concentración de materiales concretos sea más alta. "Para el reciclador o el fabricante solo vale la pena una revalorización si se consigue en cantidades estimables", insiste Zimmermann.

"Ahora estamos ensayando si la fragmentación puede hacerse repetidamente hasta conseguir separar los elementos deseados" comenta Zimmermann. Los investigadores e investigadoras pueden establecer los parámetros de su proceso de ensayos – por ejemplo, el tipo y cantidad del medio fluido, el tamaño del recipiente o tensión que produce el impulso eléctrico

– de forma tan precisa como sea necesario en el equipo de fragmentación. "En especial definir el número de pulsos por cuya acción se separan los componentes", dice el experto.

La división electro-hidráulica debe ahora estudiarse con mayor detalle, mejorarse y ampliarse a otras aplicaciones. "Con nuestros trabajos de investigación hemos mostrado que este tipo de disgregación mecánica es un camino posible para conseguir un reciclado económico de los LED", concluye Zimmermann.

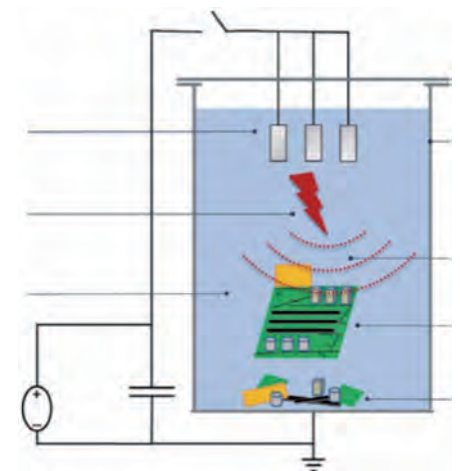
NOTA DEL TRADUCTOR

La fragmentación por ondas de choque o electrohidráulica (EHF) es aún poco utilizada en la industria. Es del tipo de energía pulsada, similar a la empleada en medicina para la litotricia o la ensayada para eliminar óxido y arena en procesos metalúrgicos o de fundición.

Este procedimiento utiliza el impacto mecánico de las ondas de choque creadas en un medio líquido para originar una energía que desacople los componentes de los productos que se desee fragmentar.

Un arco formado entre los electrodos crea un canal de plasma que genera ondas radiales de choque que se propagan por el fluido contenido en el recinto, impactando en los productos a disgregar: puede decirse que se trata de una fragmentación sin contacto.

El esquema gráfico nos aporta una idea del equipo y su funcionamiento, en el que se involucran tensiones de descarga que pueden llegar a los 50 kV.





TRESCA
ENGINEERING SOLUTIONS

BUENOS COMPAÑEROS DE VIAJE

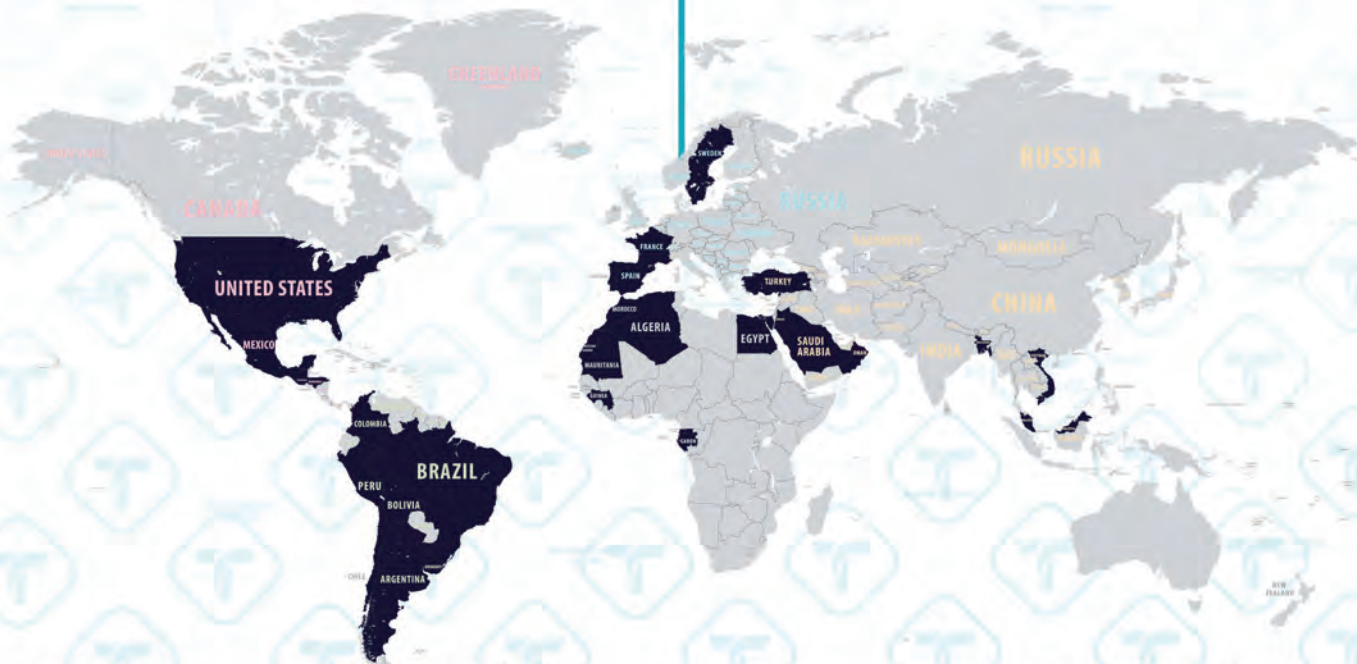
¿TE ACOMPAÑAMOS EN TU PRÓXIMO PROYECTO INTERNACIONAL?

> SECTORES

ENERGIA
PLANTAS INDUSTRIALES
MINERIA
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

CONÓCENOS EN:
www.tresca.es



¿Cuánto durará la actual especie humana?

Una aproximación probabilística

Ignacio F. de Aguirre
Asociación de Bizkaia

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8022>

ANTECEDENTES

Entre los años 70 a 90 del pasado siglo se produjo un amplio intercambio de hipótesis técnico-filosóficas sobre lo que podría ser el destino de la especie humana. Varias de ellas conformaron, bajo el epígrafe común de "Doomsday Argument", enconados debates a través de prestigiosas publicaciones, aunque posteriormente fueron quedando relegadas por asuntos de mayor actualidad. Sin embargo, recientemente se ha impreso de nuevo una exposición alrededor de ese tema, desarrollando argumentos basados en teorías probabilísticas bayesianas [1].

Es ya de general aceptación que el origen del Universo que conocemos se encuentra en el *Big-Bang* de una "singularidad" en el vacío existente, ocurrido hace unos 13.800 millones de años. Antes de ese momento no había materia, ni energía, ni gravedad, ni tiempo, resultando éste último la cuarta dimensión del recién nacido Universo. También se reconoce que el Sistema Solar se formó en nuestra galaxia, a partir de una nebulosa de gases, 4.500 millones de años atrás alrededor de una estrella y que la Tierra disponía de continentes sólidos en deriva permanente 3.000 millones de años después de su formación.

Parece posible que la vida en la Tierra, en forma microscópica y monocelular, estuviese presente desde casi los primeros tiempos, bien originada en el mismo planeta por las reacciones químicas entre gases diversos provocadas por intensas descargas eléctricas o procedente de otros cuerpos espaciales. Desde hace 1.000 millones de años es cuando puede decirse que ya existen macro-organismos vivos y



Evolución

la evolución hacia formas de vida superiores es una carrera imparable.

En un momento de esa evolución y a partir de alguna especie de primate, chimpancé o bonobo, se producen en la africana Gran Cuenca del Rift, entre hace 4 y 6 millones de años, los primeros casos de bipedestramiento y la aparición de especies diversas de homínidos, derivando algunas de ellas, un par de millones de años después, hacia otras nuevas, ya correspondientes al género *Homo*, dotadas de ciertas capacidades inteligentes: el *Homo Habilis*, y las que le siguieron posteriormente.

Pronto algunas de estas últimas, por causas climatológicas, alimenticias o poblacionales, iniciaron su salida del continente africano y se extendieron por Eurasia. Tanto las que salían como las que quedaban o bien se extinguían o bien evolucionaban hacia otras más avanzadas culturalmente. La nuestra, el *Homo Sapiens*, aparece en África hace poco más de 200.000 años y unos 100.000 años después también decide salir del continente. Fuera de él, coexiste con las pocas que aun perduraban, confirmándose cierto intercambio genético, al menos con una de ellas, el *Homo Neandertalensis*, para finalmente quedar como la única superviviente por extinción de las demás. Somos pues la más joven, dentro de un género cuyas restantes especies han tenido una vida relativamente breve, por desaparición o por evolución, y en general, más reducida que las de muchos otros animales.

REFLEXIONES

El *Homo Sapiens* es único en el sentido de poseer y ejercer la capacidad de observarse y reflexionar sobre sí mismo y en especial sobre su futuro como individuo y como especie. Casi siempre lo ha hecho históricamente más en el sentido filosófico o religioso que científico. Incluso *Darwin* [2, 3], que estableció la teoría del origen de las especies y su evolución, miró perspicazmente hacia atrás pero muy poco hacia adelante. Ha tenido que ser, avanzado el siglo XX y con unas sólidas teorías sobre la formación del Universo, de la vida y del género humano, cuando se ha conformado el debate científico acerca

de nuestro porvenir, anteriormente solo en manos de los escritores de ciencia-ficción.

Sin embargo, desde muy atrás, concretamente desde cuando el astrónomo polaco **Nicolás Copérnico** en el siglo XVI formuló su teoría *heliocentrista*, había ido calando la idea de que la Tierra, y por lo tanto el Hombre, no era ya el centro del Universo sino que nos debíamos considerar como una especie más de seres vivos, aunque con unas avanzadas características de comunicación e inteligencia.

El cosmólogo británico **Brandon Carter** [4] en 1973, precisamente conmemorando el 500º aniversario del nacimiento de Copérnico, expuso sus llamados "principios antrópicos" que suponían un cierto retorno al concepto de que el hombre sí supone un ser especial en el Universo, de que ha dispuesto para su asentamiento de un lugar con unas propiedades cosmológicas concretas e indispensables para permitir a la vida aparecer y evolucionar como lo ha hecho a lo largo de su historia. Hay quien ha visto en estos principios la sugerencia de un Creador con esa intención.

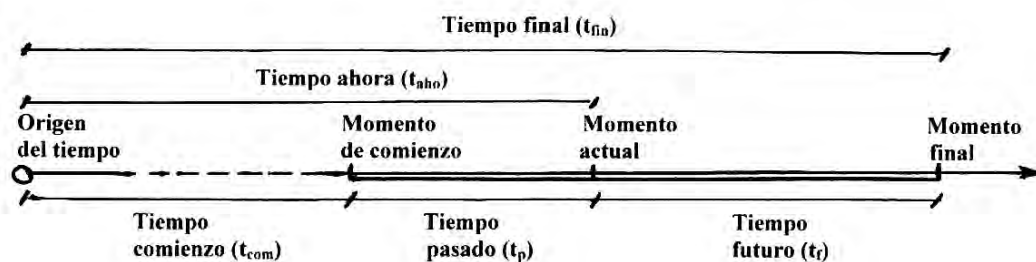


Nicolás Copérnico

Pero fue el astrofísico norteamericano **John Richard Gott** [5] el que presentó, en un artículo publicado en 1993, unos conceptos científicos para predecir la eventual duración de la actual especie humana, desarrollando una idea sobrevenida en 1969 durante su visita al muro de Berlín y contrastada, por la caída del mismo, 20 años más tarde.

Gott razona su primer argumento, que denomina Δt , basándolo en un enfoque muy próximo a nuestra mentalidad ingenieril, como sigue:

En la línea de tiempo originada en el *Big-Bang* se puede fijar con suficiente aproximación el *momento de comienzo*



Línea de tiempo para el desarrollo de un proceso entre su comienzo y su final

de la actual especie humana y el *momento actual*, que nos dan un *tiempo pasado* en la Tierra por nuestra especie t_p , de los aproximadamente 200.000 años comentados. Suponiendo que nuestra especie puede tener un *momento final*, éste nos daría una duración como *tiempo futuro* t_f , del que nos propone hacer su estimación probabilística.

Calculemos para ello el índice

$$r_1 = t_p / (t_p + t_f) \text{ [a].}$$

Será lógicamente $r_1=1$ si el tiempo futuro es $t_f=0$, es decir, si la especie humana se extinguiese en el momento mismo de hacer estas consideraciones. Por otra parte, resultará $r_1=0$ si suponemos que la especie humana no desaparecerá jamás, es decir que ese tiempo futuro $t_f \rightarrow \infty$. Tenemos, por lo tanto, el 100% de probabilidad de que el *momento final* de nuestra especie esté situado entre $r_1=1$ y $r_1=0$.

Para calcular ahora ese *tiempo futuro* con una probabilidad, por ejemplo, del 95% y estimando que la situación del momento final supone una centralidad en el intervalo de los r_1 , introduzcamos en la fórmula [a] los valores 0,025 y 0,975 y calculemos el *tiempo futuro*, dando al *tiempo pasado* el valor estimado de 200.000 años.

El resultado nos da, respectivamente $r_1=39x(t_p)$ y $r_1=1/39x(t_p)$.

Ello significaría que:

$$1/39x(t_p) < t_f < 39x(t_p)$$

y, si aceptamos los citados 200.000 años como *tiempo pasado*, se obtiene que $5.128 < t_f < 7.800.000$ años. La actual especie humana no parece que duraría más de 7.800.000 años con un 95% de probabilidad. Rehaciendo el cálculo con un 80% de probabilidad, nivel ya estimable, nos proporciona:

$22.222 < t_f < 1.800.000$ años como intervalo de existencia, siendo en ambos casos los límites máximos, superiores al ciclo de la mayor parte de las especies humanas (Homo) anteriores, pero finitos. Darwin ya sugería en "El Origen de las Especies" que es difícil que todas las especies actuales se perpetúen hasta un futuro muy lejano.

¿Se encuentra pues la especie humana actual en el comienzo de su andadura, y le esperan muchos miles de años de estabilidad? En este caso, ¿qué rumbo seguirá a muy largo plazo? El establecimiento de poblaciones extraterrestres en sistemas no solares con satélites habitables tiene una probabilidad bajísima, sobre todo dada la limitación de la velocidad de la luz; e incluso no resulta posible en el sistema solar, fuera de la Luna o Marte, y eso con amplias dificultades. Ello presupone con cierta lógica que en la Tierra se alcance de alguna manera y en un futuro no muy lejano, un equilibrio poblacional estimado entre 10.000 y 12.000 millones de habitantes.

CONCLUSIONES

Así como se dan por comúnmente reconocidas las etapas cubiertas por el Universo desde su generación, también lo son las que cubrirá nuestro sistema solar hasta su desaparición, tal como hoy lo vemos. En unos 1.000 a 1.500 millones de años, la luminosidad y tamaño del sol será un 10% mayor que la actual, haciendo prácticamente imposible la vida en la Tierra; este crecimiento continuará a medida que el sol consume su energía otros 4 o 5.000 millones de años más para convertirse en una gigante roja, que absorberá a los planetas más cercanos. Después, nuestro Sol cesará su actividad para convertirse en una enana blanca que al haber perdido gran parte de su masa en este proceso, distorsionará sin duda el equilibrio gravitatorio del sistema solar.

El corto ciclo de la especie humana actual, la exponencial velocidad de crecimiento y el desarrollo de la tecnología, la hacen aún más vulnerable a consideraciones catastróficas de extinción mucho más cercanas. A los riesgos naturales como vulcanismo, impacto de grandes cuerpos siderales, pandemias, destrucción de la capa de ozono, cambios climáticos, etc. y humanos como sobrepoblación, guerras o desastres nucleares, se pueden sumar otros todavía desconocidos y derivados de

avances tecnológicos, como de los nanomateriales, de las modificaciones genéticas o de la inteligencia artificial. El filósofo canadiense John A. Leslie [6] ha tratado estos temas en numerosas obras.

Cuando decimos "extinción" no significa exactamente una desaparición absoluta de la cadena de

especies con seres inteligentes que se ha venido sucediendo en la Tierra. Puede presentarse de muy diferentes formas, como reducción drástica de la población y reinicio de un posterior desarrollo, aparición de una nueva especie humana mutada de la actual con o sin conservación de la precedente, o transformación global a una super-especie mixta de entes vivos e inteligencia artificial.

Una prueba de que razonamientos de este tipo han pertenecido al campo de la ciencia ficción, tenemos la novela de H.G. Wells (1866-1946) "La Máquina del Tiempo", en la que la humanidad el año 802.701 se encuentra evolucionada en dos especies, los cultos y mutados *eloi* que viven en la superficie y los primitivos *morlocks* en los subterráneos, librando un enfrentamiento permanente.

Pero de manera absolutamente científica, la Universidad de Oxford (Reino Unido) dispone de un FUTURE OF HUMANITY INSTITUTE (<https://www.fhi.ox.ac.uk>), fundado y dirigido actualmente por el profesor de filosofía Nick Bostrom [7]. Tanto éste como el resto de participantes del Instituto son autores de numerosos libros y artículos sobre el expuesto y otros apasionantes argumentos, algunos de los cuales se encuentran a disposición del lector en su sitio web.

PARA SABER MÁS

- [1] Pérez Carballo, Alejandro. "¿Está cerca el final de la humanidad?". 2015-dic. y 2016-mar. (Investigación y Ciencia)
- [2] Darwin, Charles. "On the Origin of Species by Means of Natural Selection". 1859.
- [3] Darwin, Charles. "The Descent of Man". 1871.
- [4] Carter, Brandon. "Large number coincidences and the anthropic principle in cosmology". 1974 (IAU)
- [5] Gott III, J. Richard. "Implications of the Copernican principle for our future prospects". 1993 (Nature)
- [6] Leslie, John Andrew. "The End of the World: The Science and Ethics of Human Extinction". 1996.
- [7] Bostrom, Nick. "The Doomsday Argument: a Literature Review". 1998 (<http://www.anthropic-principle.com/preprints/lit/>)

Tras el acuerdo de París

Angel Arcos-Vargas
Universidad de Sevilla (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8229>

El pasado 4 de noviembre entró en vigor el primer acuerdo global contra el cambio climático. Esto ha sido posible gracias a la ratificación, durante la última cumbre del G20 del *Acuerdo de París*, de los dos principales contaminadores del mundo, Estados Unidos y China, superándose así las condiciones de ratificación por parte de más de 55 países que representen más del 55% de las emisiones globales.

El Acuerdo de París ha entrado en vigor gracias a la ratificación de Estados Unidos y China.

El Acuerdo de París, que se empezará aplicar a partir del 2020, se alcanza en la reunión de la 21ª Conferencia de las Partes (COP21), órgano máximo de representación de la *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático* (CMNUCC), que se celebró en París a finales del 2015.

El principal objetivo del Acuerdo (1), es "reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, en el contexto del desarrollo sostenible y de los esfuerzos por erradicar la pobreza" para lo que fija tres líneas de actuación:

- a) Mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2°C con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5°C con respecto a los niveles preindustriales, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático;
- b) Aumentar la capacidad de adaptación a los efectos adversos del cambio climático y promover la resiliencia al clima y un desarrollo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero, de un modo que no comprometa la producción de alimentos;
- c) Elevar las corrientes financieras a un nivel compatible con una trayectoria que conduzca a un desarrollo resiliente al clima y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero.

Artículo 2. Acuerdo de París. Naciones Unidas

El objetivo principal es limitar el calentamiento global a 2°C de forma compatible con el desarrollo económico.

El movimiento organizado contra el cambio climático comenzó en Nueva York en 1992 con la creación, en el seno de Naciones Unidas, de la Convención Marco sobre el Cambio Climático. El objetivo de esta organización era concienciar a los gobiernos de los problemas derivados del cambio climático. Como primer resultado concreto se alcanzó el Protocolo de Kioto de 1997 (2) que se materializó en un acuerdo internacional para la reducción de las emisiones de los responsables del efecto invernadero y, por lo tanto, del calentamiento global: dióxido de carbono (CO₂), gas metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), y los otros tres son gases industriales fluorados: hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆).

Con objeto de contribuir a la reducción de estos, se propuso a los países industrializados que aceptaran un compromiso de reducción de emisiones "a un nivel inferior en no menos del 5% al de 1990 en el período de compromiso comprendido entre el año 2008 y el 2012". Este acuerdo fue ratificado por 184 países, de los cuales 37 se impusieron metas vinculantes de reducción, no haciéndolo Estados Unidos y abandonando posteriormente Canadá, tras comprobar que su aplicación representaría "la transferencia de 14.000 millones de dólares de los contribuyentes canadienses a otros países, el equivalente de 1.600 dólares canadienses por cada familia".

Las primeras iniciativas en la lucha del cambio climático datan de 1992, y se plasmaron en el Acuerdo de Kyoto que sólo afectaba a las emisiones de los países industrializados. Estados Unidos no lo ratificó y Canadá lo abandonó posteriormente.

Aunque los esfuerzos realizados por los países superaron por mucho a los compromisos adquiridos, durante la Cumbre de París se concluyó que no eran suficientes para evitar los efectos del calentamiento global. Con objeto de analizar la evolución de las emisiones, así como la situación en

la que se encuentran los compromisos de cada país, desde 2010, *United Nations Environment* (UNEP) publica el informe anual *Emissions Gap Reports*, elaborado por científicos de reconocido prestigio, en el que se analizan las metas a largo plazo establecidas por la *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC).

La comunidad científica ha presentado evidencias de la aceleración en la elevación de temperatura., La UNEP realiza un informe anual sobre las emisiones de gases y la evolución de los planes nacionales.

Por otra parte, científicos de la NASA han encontrado evidencias que prueban que el calentamiento global es una realidad, y sigue una tendencia creciente desde mediados de los años 70. En particular 2016 ha sido el año más caluroso desde 1880 (del que se disponen registros) y los 10 años más calurosos de estos 136, han tenido lugar desde el año 2000. De continuar con el actual nivel de emisiones, las temperaturas en el 2030 superarían en más de 3° C la de los niveles preindustriales. Este hecho tendría consecuencias negativas para la vida en el planeta, lo que justifica una acción conjunta. Estas consecuencias han sido evaluadas en el *National Climate Assessment*, elaborado por el *U.S. Global Change Research Program*.

El séptimo informe de la UNEP (2), publicado el pasado mes de noviembre, plantea las siguientes cuestiones:

- 1) ¿En qué estado están las medidas de reducción previstas para el 2020?
- 2) ¿Cuál es la diferencia entre el nivel de emisiones mundiales en 2030 si se aplican todos los planes Nacionales y los objetivos de aumento de la temperatura de 2°C?
- 3) ¿Cómo se pueden reducir las emisiones y mejorar la eficiencia energética?
- 4) ¿Cómo se compatibilizan las medidas contra el cambio climático, con los objetivos de desarrollo económico?

La respuesta a las dos primeras preguntas la encontramos en la Figura 3, en la que se observa que la cantidad de emisiones en el 2030 compatibles con los objetivos del Acuerdo, resultan ser un 30%

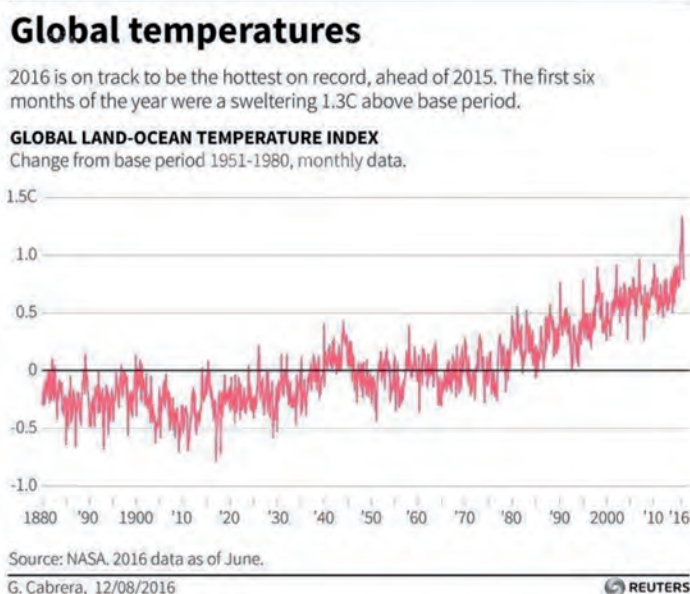


Figura 1: Evolución del calentamiento global respecto a los niveles pre industriales. 1880-2016
Fuente: World Economic Forum 2016

inferior de las proyectadas de continuar con las políticas climáticas actuales. De esta manera, para alcanzar los objetivos se deberían articular medidas para reducir 17 Giga Toneladas equivalentes de CO2 (de unas 60 a unas 43). Parte de esta reducción está ya identificada en las nuevas medidas que recientemente han comprometido los países, denominadas en la gráfica como *Intended Nationally Determined Contribution* (INDC), que aunque tienen un efecto positivo, consiguiendo una reducción de 3 GTe adicionales, no resultan suficientes para alcanzar el objetivo. En principio, los países disponen hasta el 2020 para habilitar estas medidas, aunque a la vista de lo comprometido del objetivo, la recomendación de Naciones Unidas es

adelantar su aplicación en la medida de lo posible.

Para poder limitar el calentamiento a 2°C, el nivel de emisiones debería ser un 30 % inferior que los niveles proyectados para 2030, lo que representa 17 GTe de CO2u. Las medidas propuestas por los países, a partir del 2020, no resultan suficientes para cubrir esta diferencia, por lo que se deben adelantar en la medida de lo posible.

Con el adelanto en las medidas INDC, ya tenemos parte de la respuesta a la tercera pregunta que nos hacíamos antes, aunque no es suficiente para alcanzar el objetivo. La propuesta que Naciones Unidas hace para poder alcanzar los niveles propuestos, se basa en conseguir compro-

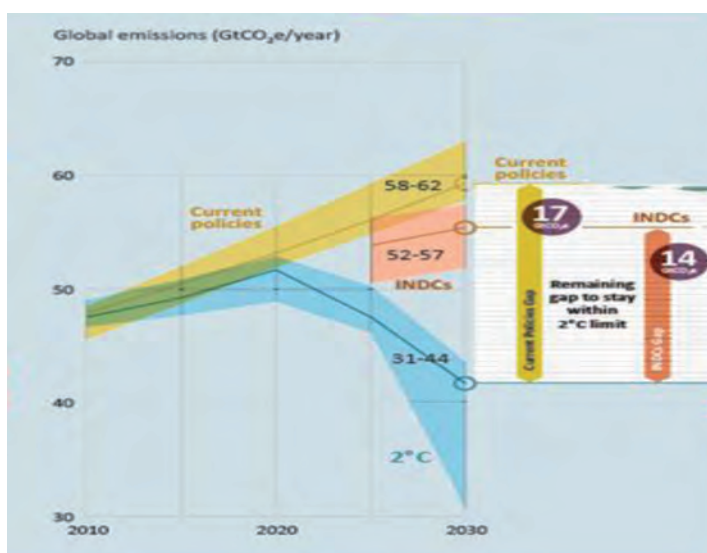


Figura 2: Valores esperados de emisiones aplicando las políticas actuales (marrón), con las medidas propuestas comprometidas por los países (en rojo) (Intended Nationally Determined Contribution (INDC) y volumen de emisiones necesarios para alcanzar el objetivo +2°C. Fuente: UNEP (2016). The Emissions Gap Report 2016. United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi

misos de reducción provenientes, principalmente, de ciudades, regiones y empresas, aunque también están adoptando compromisos inversores, organizaciones civiles y cooperativas. Actualmente se han recogido en *The Non-State Actor Zone for Climate Action* más de 11.000 compromisos, dirigidos principalmente en los sectores de la energía, transporte y agricultura. Aunque estas iniciativas resultan más difíciles de medir que las de los países, los estudios más optimistas las valoran en otras 4 GTe adicionales de CO2, lo que contribuye al objetivo, aunque sigue sin resultar suficiente.

Otra posible palanca identificada en el estudio es el papel de la eficiencia energética. Estas medidas por si solas pueden tener un retorno económico suficiente tanto para los gobiernos, como para empresas y familias. Las propuestas del informe se centran en la construcción, la industria y los transportes.

Con objeto de mejorar la eficiencia en la construcción, se recomienda la adopción de los Códigos Energéticos de Edificación, que ya están establecidos en más de 60 países, aunque en parte de ellos son de aplicación voluntaria. Otra línea de actuación que se está demostrando eficiente para la reducción de emisiones en este ámbito es el etiquetado energético del edificio, certificando así su comportamiento. Por último, la promoción de edificios altamente eficientes, también resulta de interés, entre los que destacan las construcciones pasivas "*Passivehaus*", que se iniciaron en Alemania con pilotos que perseguían el diseño de edificios de muy bajo consumos energéticos, en particular en climatización, basados en reducir sus niveles de pérdidas térmicas. Un paso más lo dan los edificios de "consumo cero", en los que se produce, en la misma vivienda, la misma cantidad de energía renovable que la que se consume, para terminar con los "*e+ buildings*" en los que se genera más energía renovables que la que consumen, pudiendo apoyar a sus vecinos.

La introducción de la eficiencia energética en el sector industrial resulta un factor de éxito en la consecución del objetivo, ya que las expectativas de crecimiento del sector superan el 1% acumulado hasta el 2030, centrado en los países emergentes, lo que resulta muy importante sobre todo a la hora de realizar la inversión de la planta. Para ello la supervisión de la gestión de la Energía en las plantas, monitorizada por la norma ISO 50001, permite ganancias de eficiencia de entre el 10 y el 20%. Este análisis de los procesos energéticos, unido al etiqueta-

do energético de equipos industriales y a la promoción de compañías de servicios energéticos (ESCOs), contribuirá a la consecución del objetivo de emisiones.

El aumento de la eficiencia en el sector del transporte es el que puede contribuir en una mayor proporción. La demanda de transporte aumenta con la renta y hasta ahora, se hace casi exclusivamente basado en combustibles fósiles. Por un lado, la fijación de estándares y monitorización del consumo de combustibles, expresados en litros o emisiones de CO2 por 100 km. y, por otro, la introducción del vehículo eléctrico para el transporte de pasajeros (un 70% más eficiente que los convencionales) junto con la creación de plataformas logísticas sostenibles, contribuirán al objetivo de emisiones, asegurando el desarrollo económico.

Por último, aparecen unas nuevas medidas a explorar como son el fomento de la economía circular, el uso compartido de activos (como coches, bicicletas, apartamentos, etc.), y el uso de las tecnologías de la información, que permiten un mejor uso de la energía, principalmente en calefacción, iluminación, ventilación, transporte por carreteras, etc.

Las expectativas de reducción con las medidas adicionales de ganancias de eficiencia deben poder llevarnos a la consecución del objetivo de reducir las 17 GTe de CO2 previstas para el 2030.

La forma de alcanzar los niveles propuestos, evitando así el sobrecalentamiento excesivo, es posible, pero se deben activar iniciativas de las ciudades, regiones, empresas, así como medidas de eficiencia, principalmente en la construcción, industria y transporte.

La cuarta pregunta es, quizás, la más comprometida. Todos podemos estar de acuerdo en los efectos perversos que puede provocar el cambio climático; pero, al mismo tiempo, millones de personas en el mundo se encuentran en situación de pobreza, sin acceso al agua, disponibilidad de energía ni a una educación adecuada y alguna de las medidas encaminadas a la reducción de emisiones pueden estar limitando este desarrollo. En este sentido, la Agenda para el Desarrollo Sostenible 2030, que aprobó la asamblea general de Naciones Unidas en el 2015, estableció las denominados "Objetivos para el desarrollo del milenio", en las que se definen 17 objetivos para el desarrollo sostenible (Ver Figura 2). Algunas de estas áreas están alineadas con las propuestas en la lucha del cambio climático, mientras que para otras

hay que encontrar una solución de compromiso entre el desarrollo y el calentamiento, que no siempre será fácil. Por poner algún ejemplo de necesidad de búsqueda de soluciones de compromiso, podemos citar la SG2 "Hambre cero" de alimentación donde el uso del territorio puede estar destinado a la generación de alimentos o a productos bio-energéticos o bosques, o la SDG8 y 9, que están dirigidas al crecimiento económico e industrialización. Cuanto más se puedan cuantificar el consumo de recursos y los efectos de cada posible aplicación, más fácil resultará alcanzar el óptimo.

El principal reto es conseguir la reducción de emisiones que propone el Acuerdo, con los objetivos de desarrollo sostenible que nos asegure a todos un mundo mejor.

En definitiva, el Acuerdo de París, nos propone unos objetivos exigentes en lo que se refiere a la reducción de emisiones para limitar el calentamiento global, evitando así desastres naturales que puedan tener mayores consecuencias a largo plazo. Las conclusiones previas es que es posible alcanzar estos niveles si se comienza ya y se involucran nuevos agentes como son las ciudades, las empresas, y los ciudadanos, mejorando al mismo tiempo la eficiencia en el consumo. Todas estas medidas deben ser compatibles con el desarrollo económico, para lo que, en aquellas áreas donde nos enfrentemos a la disyuntiva entre desarrollo y emisiones, seamos capaces de encontrar la combinación óptima de ambos.

No podemos dejar pasar el riesgo de abandono de algún país, en particular de Estados Unidos, que tras la elección del Presidente Trump, debe encontrar la forma de compatibilizar el cumplimiento del Acuerdo, con algunas declaraciones que ha publicado en los medios, como la que se muestra en la Figura 4. De cualquier



Figura 3: Los 17 objetivos para el desarrollo sostenible de Naciones Unidas.

Fuente: UN 2015.

<http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/news/communications-material/>



Figura 4: Declaraciones de Donald Trump sobre el concepto del cambio climático.

Fuente: Twitter @realDonaldTrump.

forma, en la última reunión en Marrakech de la Conferencia de las Partes (COP22), ante las incógnitas que aparecían tras el cambio de gobierno en el país con más altas emisiones, se presentó un manifiesto en el que se reforzaba el compromiso para alcanzar los acuerdos de París, poniendo las bases para la creación de un "Fondo verde" de 100.000 millones de Euros que, soportado por los países desarrollados, sirva para apoyar las políticas de reducción y mitigación acordadas.

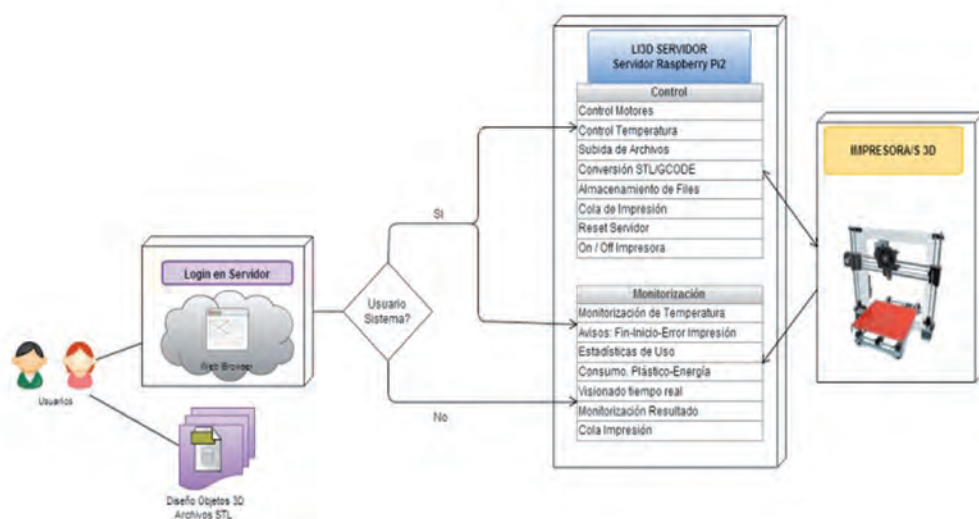
PARA SABER MÁS

- [1] Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) (2016) Acuerdo de París. http://unfccc.int/portal_espanol/items/3093.php
- [2] Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) (1998) Protocolo de Kyoto <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>
- [3] NASA (2016). Global Climate Change. Vital signs of the planet. <http://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>
- [4] U.S. Global Change Research Program (2016). National Climate Assessment. <http://nca2014.globalchange.gov/report>
- [5] UN (2015) A/RES/70/1 Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. <http://uneplive.unep.org/theme/index/13#egr>
- [6] UN (2015). Objetivos para el desarrollo sostenible. 17 objetivos para transformar el mundo. <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/news/communications-material/>
- [7] UNEP (2016). The Emissions Gap Report 2016. United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi
- [8] World Economic Forum (2016). Climate change. <https://www.weforum.org/es/agenda/archive/climate-change>.

Diseño de un Laboratorio Remoto de Impresión 3D

Joaquín Cubillo, Sergio Martín y Manuel Castro
UNED (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8044>



LI3D [1] es un laboratorio remoto de impresión y de monitorizado de bajo coste, que actúa directamente sobre las impresoras 3D, frente a otros sistemas de impresión en la nube, [2, 3, 4, 5] en los que, el usuario envía su fichero de impresión y obtiene el resultado, sin control del proceso. Al tratarse de un sistema libre se facilita su implantación, y portabilidad.

Los usuarios del LI3D, emplean las impresoras 3D en un entorno controlado, favoreciendo el aprendizaje y manejo de esta tecnología, eliminando el temor a causar averías o provocar fallos.

El sistema cuenta con: (1) Gestión de usuarios, (2) control de motores de impresión, (3) monitorización en tiempo real de temperatura, (4) visualización de los resultados obtenidos, (5) estadísticas de uso y energía del sistema de impresión, (6) notificaciones del estado de impresión.

La experimentación se ha realizado en un Centro Integrado de Formación Profesional, con estudiantes de grado superior. El LI3D surge tras comprobar que el tiempo de impresión de los objetos es elevado, resultando el horario de mañana de los alumnos, insuficiente, para imprimir las piezas necesarias para su proyecto: construcción de un mini-brazo robótico UARM, el cual consta de 36 piezas. La experiencia

se ha realizado con 2 impresoras 3D, Prusa i3 Mendel[®], y Prusa i3 Hephestos[®], ambas, impresoras RepRaps en formato kit.

Teniendo en cuenta que, en el proyecto de los alumnos, el tiempo medio de impresión de cada pieza es de 1 hora, el

impresas, debido a que la impresión está disponible durante el horario no lectivo de los alumnos, aumentando el número de piezas impresas y por lo tanto mejorando los tiempos de elaboración de proyectos relacionados con esta tecnología.

Existe una brecha digital entre los alumnos de un mismo aula: no todos cuentan con los mismos dispositivos ni la misma disponibilidad horaria. El LI3D permite igualar las condiciones de trabajo y disponibilidad de los alumnos, fomentando el trabajo colaborativo y la disciplina que se adquiere al respetar las normas de utilización del mismo.

REFERENCIAS

- [1] Cubillo J, Martín S, Castro M. LI3D. REMOTE LABORATORY OF 3D PRINTING. DYNA New Technologies, Enero-Diciembre 2016, vol. 3, no. 1, p.0. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT7941>
- [2] Baumann F, Roller D. 3D "Printing Process Pipeline on the Internet". Proceedings of the 8th ZEUS Workshop, Vienna, Austria, January 27-28, 2016, pp. 29-36.
- [3] Rayna T., Striukova L. and Darlington, J. (2015). "Co-creation and user innovation: The role of online 3D printing platforms". Journal of Engineering and Technology Management, 37, pp.90-102. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jengtecman.2015.07.002>
- [4] Mai J, Zhang L, Tao F, et al. "Customized production based on distributed 3D printing services in cloud manufacturing". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015: 1-13. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/S00170-015-7871-Y>
- [5] He L., C. B. Liu, H. D. Lu, Y. Peng, "Study and Application on 3D Printing Cloud Service Platform", Advanced Materials Research, vol. 940, pp. 445-448, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.940.445>

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al proyecto Gutenberg3D y sus miembros, por las experiencias realizadas y por su puesta en común. A Francisco Javier Zañafano, profesor de Sistemas Electrónicos, por sus conocimientos en la impresión 3D. También el soporte prestado por la Escuela de Ingenieros Industriales de la UNED en el proyecto 2016-IEE10 (AVANCES EN EL INTERNET DE LAS COSAS), así como los proyectos eMadrid (S2013/ICE-2715), IN-CLOUD (2015-1-IT01-KA202-00473), y Go-Lab (FP7-ICT-2011-8/317601).

La gestión ágil y concurrente de proyectos con incertidumbre

Luis Villar, María del Mar Espinosa, Manuel Domínguez
Ingeniería del Diseño. UNED (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8119>

Dos organizaciones referentes en la gestión de proyectos, como son *Project*

Management Institute (PMI®) y el Departamento de Defensa norteamericano (DoD), están modificando sus documentos de referencia, (instrucción 5000.02 del 2015 en el del DoD y PMBOK® en su futura sexta edición en el caso de PMI®), para introducir los entornos ágiles, iterativos, adaptativos e híbridos y no limitarse a la tradicional gestión en cascada.

Tras su consolidación en proyectos de

los sectores informáticos, las técnicas de gestión ágil y concurrente se están introduciendo en el industrial, impulsadas por la presión por alcanzar el mercado antes que la competencia, pero también para afrontar los cambios sobrevenidos en requerimientos y la complejidad de integrar sistemas de sistemas que aportan una gran incertidumbre a algunas actividades del proyecto.

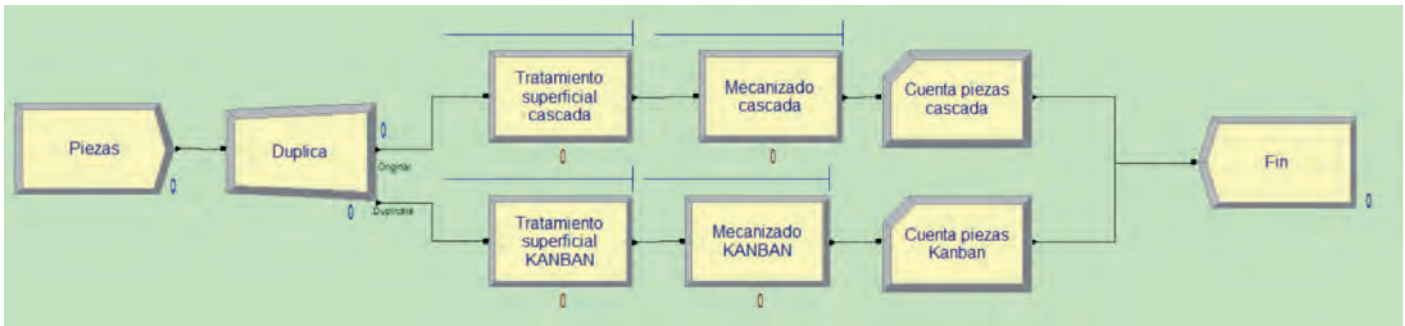


Figura 1: Modelo de Comparación

S	Scenario Properties			Controls					Responses				
	Name	Program File	Reps	media	Llegada	desv	Num Reps	Rep Length	Cuenta piezas cascada	Cuenta piezas Kanban	Comprador 1 y 2 Utilization	Comprador 1 Utilization	Comprador 2 Utilization
1	KAN_WAT	23 : KANBAN dyna.p	30	0.4000	1.1780	0.0500	30	300.0000	212	237	0.965	0.853	0.982
2	KAN_WAT	23 : KANBAN dyna.p	30	0.4000	1.1780	0.1000	30	300.0000	212	237	0.968	0.850	0.988
3	KAN_WAT	23 : KANBAN dyna.p	30	0.3000	1.1780	0.0500	30	300.0000	226	244	0.947	0.849	0.982
4	KAN_WAT	23 : KANBAN dyna.p	30	0.3000	1.1780	0.1000	30	300.0000	226	244	0.952	0.854	0.980
5	KAN_WAT	23 : KANBAN dyna.p	30	0.2000	1.1780	0.0500	30	300.0000	240	246	0.909	0.835	0.958
6	KAN_WAT	23 : KANBAN dyna.p	30	0.2000	1.1780	0.1000	30	300.0000	241	248	0.923	0.852	0.965
7	KAN_WAT	23 : KANBAN dyna.p	30	0.1000	1.1780	0.0500	30	300.0000	249	251	0.881	0.846	0.915
8	KAN_WAT	23 : KANBAN dyna.p	30	0.1000	1.1780	0.1000	30	300.0000	248	247	0.869	0.834	0.901
9	KAN_WAT	23 : KANBAN dyna.p	30	0.4000	1.2000	0.0500	30	300.0000	211	234	0.954	0.826	0.988
10	KAN_WAT	23 : KANBAN dyna.p	30	0.4000	1.2000	0.1000	30	300.0000	211	235	0.955	0.827	0.986
11	KAN_WAT	23 : KANBAN dyna.p	30	0.3000	1.2000	0.0500	30	300.0000	226	242	0.936	0.833	0.979
12	KAN_WAT	23 : KANBAN dyna.p	30	0.3000	1.2000	0.1000	30	300.0000	224	239	0.933	0.839	0.975
13	KAN_WAT	23 : KANBAN dyna.p	30	0.2000	1.2000	0.0500	30	300.0000	238	246	0.915	0.847	0.955
14	KAN_WAT	23 : KANBAN dyna.p	30	0.2000	1.2000	0.1000	30	300.0000	241	247	0.916	0.842	0.962
15	KAN_WAT	23 : KANBAN dyna.p	30	0.1000	1.2000	0.0500	30	300.0000	243	244	0.859	0.823	0.891
16	KAN_WAT	23 : KANBAN dyna.p	30	0.1000	1.2000	0.1000	30	300.0000	247	248	0.875	0.838	0.904

Tabla 1: Variables de control y resultado de la simulación

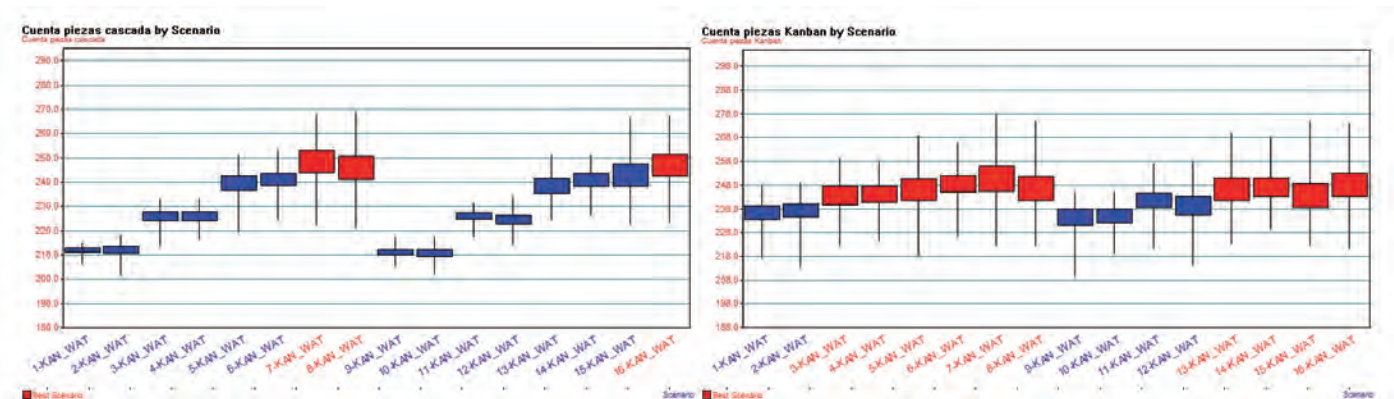


Figura 2: Sensibilidad a los cambios de las variables de control

La metodología ágil kanban[1] se adapta a proyectos industriales, tanto por su orientación a la eficiencia de los recursos, como por no requerir ciclos de duración determinada, inviabilidad de mantener por legislación, proveedores, etcétera. Si bien algunos autores han apostado por utilizar esta metodología directamente [2, 3], en nuestro caso defendemos el uso de esta metodología imbricada en una red PERT [4], alineándonos con el PMI® o DoD. Para ello proponemos una metodología que permite calcular para una actividad, que representa un proceso kanban, su duración y recursos, admitiendo también el uso de técnicas de valor ganado.

¿Qué actividades son susceptibles de ser tratadas de esta forma, con garantía de mejora sobre una planificación tradicional en cascada? Defendemos que es rentable aplicarlo en aquellas que gestionan numerosos elementos unitarios, implicando recursos limitados y de forma consecutiva: compras de materiales, reprocesado de piezas desmontadas, etcétera.

Podemos realizar un estudio cuantitativo de la mejora esperable modelando dos caminos, en los que representamos las mismas actividades según se observa en la figura 1. El superior emplea una metodología tradicional en cascada, en la que cada actividad cuenta con sus propios recursos. El inferior introduce un panel kanban que permite que los recursos se apoyen entre sí ante la saturación de uno.

Las distribuciones estocásticas, usadas para definir las duraciones de las actividades, son normales.

Las variables de control del ensayo son la media y desviación típica (*controls: media y desv*), pero siempre introduciendo los mismos valores en ambos caminos. También se ha estudiado la sensibilidad a la frecuencia con la que llegan las piezas. Ver datos en tabla 1.

Cuando el sistema está equilibrado, o los recursos no están saturados, no se aprecian diferencias.

Si introducimos desviaciones en la media de la duración de la actividad predecesora (y lo replicamos exactamente en ambos caminos), se producen colas cuando los recursos están saturados y el resultado variará dependiendo de la metodología de gestión:

- La eficiencia (mayor número de piezas procesadas en el mismo tiempo) del panel kanban aumenta frente al trabajo en cascada conforme a:
 - La mayor saturación de los recursos.
 - La mayor diferencia entre las me-

días de la duración de las actividades consecutivas que se apliquen a varios elementos.

- La frecuencia de llegada de piezas se altera menos con el kanban (ver fig. 2).

El valor de la desviación típica de la muestra no afecta significativamente a los resultados.

Este resultado induce a recomendar el uso de kanban en entornos con incertidumbre para actividades de proyectos que implican acciones sobre múltiples elementos unitarios, cuando determinados recursos puedan saturarse.

REFERENCIAS

1. ANDERSON, DJ. Agile management for software engineering: Applying the theory of constraints for business results. Prentice Hall Professional, 2003. ISBN 0-13-142460-2.
2. TURNER, Richard. Lean Software and Systems. Boston 2012 Proceedings. Consideration of a multilayer on-demand scheduling system for complex, rapid-response, system of systems development environments. Vol. 1. Boston. 2012.
3. TURNER, Richard and LANE, Jo Ann. Goal-question-kanban: Applying Lean Concepts to Coordinate Multi-level Systems Engineering in Large Enterprises. Procedia Computer Science 2013, vol. 16, p. 512-521.
4. VILLAR-FIDALGO, Luis, ESPINOSA ESCUDERO, M. Mar and DOMÍNGUEZ SOMONTE, Manuel. Cronogramas para toma de decisiones ágiles en entornos concurrentes con incertidumbre. Dyna Management, Enero-Diciembre 2016, vol. 4, no. 1, p.0. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/MN8027>

PREPARACION DE OPOSICIONES

COMUNIDADES AUTONOMAS

**INGENIERO INDUSTRIAL
INGENIERO TECNICO INDUSTRIAL
GRADUADO EN INGENIERIA**









www.oposicionesingeniero.es
info@oposicionesingeniero.es

Propuesta de mejoramiento en la toma de decisiones: integración de OTSM-TRIZ y AHP

Christopher Nikulin¹, Vicente Gonzalez-Prida PhD², Luis Barbera¹, Carolina Carreño¹

¹ Universidad Técnica Federico Santa María (Chile)

² Universidad de Sevilla. Escuela de Ingeniería. Departamento de Gestión Industrial. (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8120>

La toma de decisiones es esencial para la gestión de una empresa, más aun considerando las exigencias tanto a nivel económico y social que aumentan día a día. Este aumento de información, así como la complejidad de los problemas en sí mismo, puede causar que empresas tomen malas decisiones. Consecuentemente, una mala decisión puede causar pérdidas considerables y en el peor de los casos el quiebre de la empresa misma. En este contexto, la correcta toma de decisiones debe tener métodos y modelos que la apoyen de manera transversal en todos los niveles organizacionales administrativos. Algunas de las limitaciones del mejoramiento en la toma de decisiones emergen por ejemplo: no entender correctamente las actividades y procesos en el cual los trabajadores están inmersos, así como de considerar información parcial o no entender el impacto futuro de las decisiones. Según Altshuller (1998), toda decisión (solución) tiene una componente negativa, las cuales las empresas deben estar dispuestas a pagar, lo cual es denominado contradicción [1]. Con el objetivo de apoyar el proceso de toma de decisiones basado en contradicciones, se presenta una integración entre OTSM-TRIZ [2], que es la reciente evolución de TRIZ y el Análisis de Proceso Jerárquico. Por una parte, OTSM-TRIZ ayuda a generar un análisis completo de la situación bajo problema, simultáneamente, se identifican problemas y soluciones parciales para acometer el problema en estudio. Como resultado de este análisis se genera una Red de Problemas y Soluciones Parciales.

Por otro lado, AHP permite jerarquizar los problemas y soluciones parciales de manera de tomar decisiones con una perspectiva más completa y racional [3]. Con este objetivo, este artículo propone una

metodología de integración en 5 etapas esenciales que se muestran en la Figura 1. La lógica propuesta por los autores es focalizar las etapas iniciales (obtención de información) basándose en los problemas que aquejan a la empresa a través de la utilización de la Red de Problemas (RdP), Red de Contradicciones (RdC), utilización de AHP para establecer la jerarquización de los parámetros de las soluciones, establecer los rangos para las variables del problema y posteriormente evaluar el las soluciones conceptuales.

Para validar la propuesta metodológica, se realizó un caso estudio en la empresa *Agrosuper S.A.* (empresa chilena perteneciente a la industria alimenticia). El caso de estudio se relaciona con la mejora del proceso de cadena de suministro

a las características del proceso de automatización y su potencial impacto en la línea de producción. Durante este análisis se obtuvieron 3 soluciones conceptuales las cuales fueron jerarquizadas y evaluadas. Finalmente, este enfoque permitió tomar la decisión más plausible acorde las prioridades empresariales, factibilidad técnica y requerimientos de producción.

Respecto a los resultados, el caso de estudio permitió tener un enfoque más objetivo en el proceso de toma de decisiones, entre los beneficios más relevantes según los tomadores de decisión se encuentra: i) permitió identificar los principales problemas y sus causas en todas las etapas del proceso industrial; ii) permitió generar una lista de soluciones conceptuales a evaluar según los criterios técnicos y operativos de la empresa; iii) permitió visualizar de manera holística cuales son los problemas y recursos involucrados en todos los niveles empresariales asociados al problema; iv) permitió clarificar las direcciones más adecuadas para ejecutar el proceso de automatización. Finalmente, los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología propuesta permiten mejorar el proceso de análisis y toma de decisiones en el contexto empresarial.

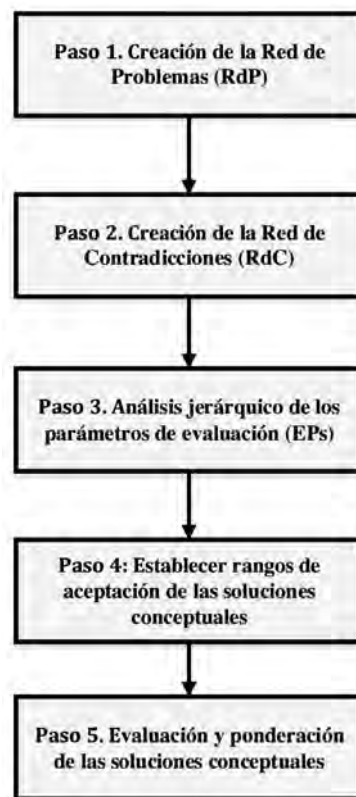


Figura 1: etapas de la propuesta metodológica

interna, más específicamente en la automatización del proceso de paletizado. Los problemas identificados durante la aplicación de la metodología están relacionados

REFERENCIAS

- [1] Altshuller, G. (1984). *Creativity as an Exact Science: The Theory of the Solution of Inventive Problems*. Rusia: Gordon and Breach Science Publishers.
- [2] Khomenko, N., De Guio, R., Lelait, L. and Kaikov, I. A framework for OTSM-TRIZ Based Computer Support to be used in Complex Problem Management. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 30(1-2), pp. 125-136, 2007. <http://dx.doi.org/10.1504/IJCAT.2007.015700>
- [3] Saaty, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences*, 1(1), pp. 83-98, 2008. <http://dx.doi.org/10.1504/IJSSci.2008.01759>.

AGRADECIMIENTOS

Al grupo de trabajo del Centro Científico Tecnológico de Valparaíso (CCTVal FB-0821) por el apoyo en este proyecto.

OTSM-TRIZ: *General Theory of Powerful Thinking-Theory of Inventive Problem Solving* (Teoría General del Pensamiento Poderoso-Teoría de la resolución de problemas inventiva)

AHP: *Analytic Hierarchy Process* (Proceso Analítico Jerárquico)

Renovación de instalaciones de alumbrado público con nulo consumo energético

Se plantea incluir el autoconsumo energético, implantando un sistema fotovoltaico, al renovar las instalaciones de alumbrado público para mejora de su eficiencia energética, con objeto de reducir su dependencia energética el máximo posible [1] [2].

Carlos de la Fuente Borreguero
Luz Madrid UTE (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8110>

RENOVACIÓN DE LA INSTALACIÓN DE ALUMBRADO

Se elige una vía con alumbrado de geometría y composición uniformes, sin

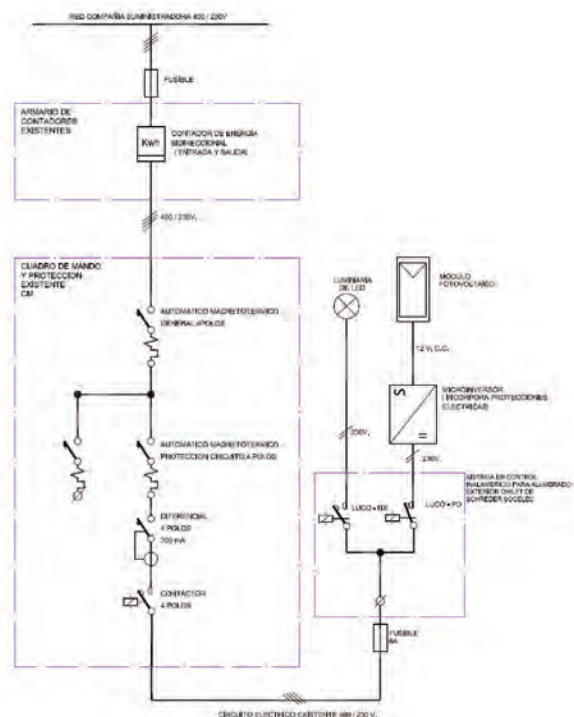


Fig. 1: Esquema del sistema fotovoltaico

Vía elegida y clasificación según REEIAE [3]

Alumbrado existente	44 columnas de 10 m, separadas 30 m en oposición, con VSAP de 250 W
Tipo de vía	Distribuidora local (acera 2,5 m, calzada 9 m, mediana 2 m, calzada 9 m y acera 2,5 m). ME3c
Clase de alumbrado	ME3c
Solución propuesta	
Luminancia media	1,17 cd/m ²
Uniformidad Global	85,3
Calificación energética	A [3]
Luminarias	De Schreder Socelec, modelo Teceo2 de 53 W, con 32 led RBNW500 de 4250K
Regulación de flujo	Régimen normal: nivel lumínico del 100%, desde encendido hasta las 24:00 y a partir de las 6:00 h, funcionamiento 2.109 h/año. nivel lumínico 50% del normal, de 24:00 a 06:00 h, funcionamiento 2.190 h/año. Punto a punto [4]
Régimen reducido:	
Sistema de telegestión	
Consumo anual de energía	
Régimen normal	4.918 kWh
Régimen reducido	3.084 kWh (potencia de las luminarias 32 W)
Total anual Caet	8.002 kWh

obstáculos que interfieran en la radiación solar que incide sobre los módulos fotovoltaicos. Estos requisitos suelen cumplirles el alumbrado de carreteras, vías distribuidoras y de circunvalación.

SISTEMA FOTOVOLTAICO PROPUESTO

Los soportes sometidos a las acciones del peso de las luminarias y módulos fotovoltaicos y a la acción del viento, han de resistir los esfuerzos de forma segura. Se calcula la superficie máxima que resisten y se eligen módulos que no la superen. Se opta por los A-150P de ATERSA [5], de 150 W de potencia nominal ($\pm 5\%$), con microinversores.

Los controladores LuCo-NX y LuCo-PD [4] conectan alternativamente a la red los módulos fotovoltaicos y las luminarias.

No se ha previsto ningún elemento de acumulación de la energía producida para después ser consumida por el alumbrado; no obstante, en instalaciones de autoconsumo se pueden instalar, cumpliendo con el Real Decreto 900/2015.

Para simplificar se opta por módulos fotovoltaicos con orientación e inclinación fijas, eligiendo las que proporcionan la máxima incidencia de la radiación solar para generar la máxima energía.

Se realizan los cálculos con el programa libre PVGIS [6]. Se obtiene la inclinación óptima y la producción total anual para un sistema fotovoltaico de 1,0 kW de potencia nominal (en el caso planteado 1.540 kWh).

CONCLUSIONES

Es posible el autoconsumo energético al renovar

Producción anual de energía

De cada módulo: 231 kWh
Del sistema fotovoltaico (44 módulos) Ept 10.164 kWh

Balance energético anual

Ept - Caet = 2.162 kWh → El sistema fotovoltaico genera más energía que la consume la instalación de alumbrado.

las instalaciones de alumbrado público, llegando a la autosuficiencia energética y cero emisiones de CO₂. En el modelo planteado se parte de una instalación de alumbrado situada en una vía sin obstáculos que interfieran en la radiación solar, se mejora la eficiencia energética ajustando los niveles lumínicos según REEIAE [3], se instalan luminarias de led, se reduce el flujo lumínico en horas de actividad reducida, se dota de un telecontrol punto a punto y se instala un sistema fotovoltaico compuesto por módulos con microinversores fijados a los soportes y la infraestructura eléctrica existente, obteniendo un balance energético positivo.

REFERENCIAS

- [1] de la Fuente Borreguero, C. "Estudio sobre la mejora de la eficiencia energética en instalaciones de alumbrado público existentes en un núcleo urbano de la comunidad de Madrid". (Tesis Doctoral). Universidad Alfonso X el Sabio, Escuela Politécnica Superior, 2014.
- [2] De La Fuente-Borreguero, C. (2016). ENERGY SELF-CONSUMPTION THROUGH PHOTOVOLACTIC ENERGY WHEN RENOVATING PUBLIC STREET LIGHTING FACILITIES. DYNA Energía y Sostenibilidad, 5(1). 0. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/ES7939>
- [3] España. Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus Instrucciones técnicas complementarias EA-01 a EA-07. Boletín Oficial del Estado, 19 de noviembre de 2008, número 279, p. 45988-46057.
- [4] Schreder Socelec. Soluciones inteligentes Owlet, <http://www.schreder.com/ess-es/AboutUs/Schreder-owlet-remote-management/Pages/default.aspx>
- [5] ATERSA. Módulos fotovoltaicos. 2015, <http://www.aterasa.com/datosproductos.asp?param=69>
- [6] Comisión Europea. Centro Común de Investigación (JRC). "PVGIS. Sistema de Información geográfica fotovoltaica", <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=es&map=europe>

Identificación con estimación de secuencias

Karen Alicia Aguilar-Cruz, María Teresa Zagaceta-Álvarez, José de Jesús Medel-Juárez
Instituto Politécnico Nacional (México)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8163>

Dentro de las técnicas convencionales de control, tales como el dominio de la frecuencia existe el filtrado, que funcionan como un mecanismo de seguimiento para describir de forma aproximada la relación entre las señales de entrada y salida del sistema modelado. El filtrado está compuesto por un identificador-estimador con adaptación dinámica que permite que sus parámetros sean calculados en línea, reajustándolos en cada iteración de acuerdo al método considerado de adaptación [1]; resultado que al ser aplicado a la identificación permite la convergencia a la señal del sistema. Esto no significa que se logra saber de manera real qué ocurre en el interior del sistema de referencia, pero de manera equivalente

el filtrado converge a la señal de referencia, sin siquiera tener la estimación significativo real [2].

Lo anterior presenta una problemática por resolver debido a que la secuencia de parámetros debe ser representativa del sistema ya que a través de ellos se conoce la estabilidad y las regiones de convergencia mínima y máxima [3-4], sobre los que se deberán incidir para lograr que el sistema llegue a una condición de operación en específico. Para ello se propone describir al sistema por medio de ecuaciones diferenciales afines (ecuaciones que describen en lo general qué ocurre en el sistema) y transformarlas a espacios de estados [10]; requiriendo de la estimación de la secuencia de parámetros y que serán ajustándolos de forma tal que maximice la convergencia del identificador dentro del mismo intervalo de tiempo de evolución del sistema, logrando así la adaptación paramétrica. Permitiendo resolver las dinámicas variantes en el tiempo por intervalos [5].

En los filtros FIR (*Finite Impulse Response*, por sus siglas en inglés) la estimación por secuencias está asociada al proceso de identificación [5] tanto en la ganancia del proceso de innovación como de la evolución interna del sistema de referencia, esto permite utilizarse en los sistemas de inyección de combustible en automóviles ajustando un grupo de parámetros casi de manera simultánea para generar una respuesta en cada intervalo de tiempo con respecto a la a las variaciones temporales que tiene el sistema en su operación dinámica variante y cuenta

con dinámicas que requieren el ajuste de la secuencia de parámetros con velocidades de cambio acotadas de acuerdo con restricciones temporales y con calidad de respuesta del filtro identificador, lo que permita realizar el proceso de adaptación de forma sincronizada y con ello en cada intervalo de tiempo lograr una mejor respuesta en esta segunda evaluación de convergencia [6].

REFERENCIAS

- [1] Kovačević, B., Banjac, Z., & Kovačević, I. K. (2016). Robust adaptive filtering using recursive weighted least squares with combined scale and variable forgetting factors. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2016(1), 1-22. DOI: <http://dx.doi.org/10.1186/s13634-016-0341-3>.
- [2] Hatun, M., & Koçak, O. H. (2016). Stochastic convergence analysis of recursive successive over-relaxation algorithm in adaptive filtering. *Signal, Image and Video Processing*, 1-8. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11760-016-0912-7>.
- [3] Yao, Z., Cheng, S., & Pan, T. (2015). UN MEJORADO CONTROL ADAPTATIVO SIN MODELO, APLICADO A SISTEMAS DE TRANSPORTE DE ENERGÍA EN CC (VSC-HVDC). *DYNA*, 90 (6), 653-661. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7741>.
- [4] Po-Ngam, S., & Sangwongwanich, S. (2012). Stability and dynamic performance improvement of adaptive full-order observers for sensorless PMSM drive. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27 (2), 588-600. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2011.2153212>.
- [5] Toto, E., Rundensteiner, E. A., Li, Y., Jordan, R., Shutkina, M., Claypool, K., & Zhang, F. (2016, September). PULSE: A Real Time System for Crowd Flow Prediction at Metropolitan Subway Stations. In *Joint European Conference on Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases*, pp. 112-128. Springer International Publishing. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-46131-1_19.
- [6] Zagaceta-Álvarez, M., Medel-Juárez, J. (2016). SEQUENCE ESTIMATION MATRICES. *DYNA New Technologies*, 3 (1). O. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT8059>.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolló con el soporte de los proyectos SIP-IPN 20160382, 242853 y CONACyT con número SIP-IPN 2015-RE / 007.

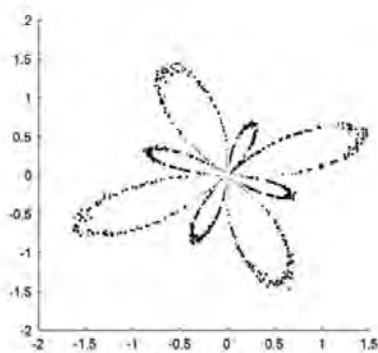


Fig. 1: Parámetros variantes, visto en gráfica polar

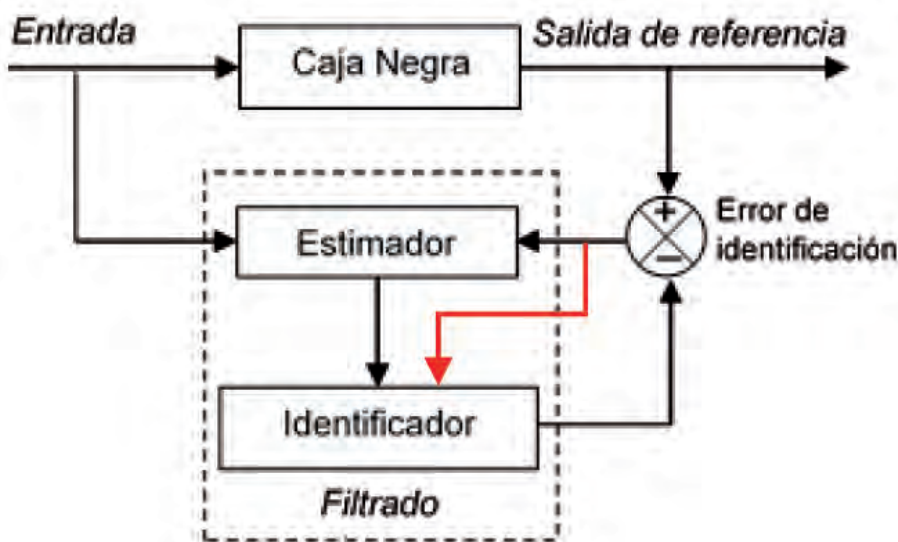


Fig. 2: Filtrado, basado en el error de identificación

Visibilidad del emprendimiento femenino en el contexto industrial

Jenny-María Ruiz-Jiménez
Universidad de Granada (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8165>

En los últimos treinta años, el número de empresas creadas por mujeres ha ido en aumento y el emprendimiento femenino se ha convertido en un elemento clave del crecimiento y desarrollo de las economías. Paralelamente al incremento de la participación femenina en la esfera económica y empresarial, el interés académico en el emprendimiento femenino ha crecido considerablemente. Sin embargo, los estudios que analizan el emprendimiento femenino comprenden menos del 10% del total de los estudios sobre emprendimiento (Brush y Cooper, 2012). Asimismo, pese a la gran contribución de las mujeres al progreso económico de los países, su peso en la actividad emprendedora es muy inferior al de los hombres. No obstante, el emprendimiento femenino ha mejorado según se desprende del Informe GEM (*Global Entrepreneurship Monitor*) España 2015, este informe señala que la tasa de actividad emprendedora (TEA) entre las mujeres se ha incrementado un 7% en 61 economías de todo el mundo en tan sólo dos años, y la diferencia que separa a mujeres y hombres emprendedores espa-

ñoles ha disminuido un 30% en los últimos diez años. Igualmente, cada vez más las mujeres tienden a trabajar y establecer sus organizaciones en sectores no tradicionales como el industrial o tecnológico, lo que representa un campo de investigación más interesante.

Según los datos del *Instituto Nacional de Estadística* (INE) sobre la población activa en el sector industrial en el segundo trimestre del 2016 en España el 16,4 % de los hombres activos laboralmente trabajan en este sector, frente al 6,3% de mujeres. En la Figura 1 se puede observar por comunidad autónoma la diferencia entre el porcentaje de hombres y de mujeres que trabajan en el sector industrial. Destacándose una mayor participación de los hombres en este sector en todas las comunidades autónomas, aunque, en algunas comunidades esa diferencia tiende a ser menor.

El trabajo publicado en DYNA Management, realiza un análisis del rol de la mujer emprendedora en las organizaciones industriales y tecnológicas, que hasta el momento no han sido lo suficientemente tratado por la literatura. Concluyendo en primer lugar, que cada vez más la mujer ocupa la misma posición que el hombre en las organizaciones e incluso emprende negocios en sectores con mayor presencia de los hombres como el sector industrial y

el sector tecnológico. Pero la segregación laboral por género sigue afectando el desempeño de la mujer en el mercado laboral, las mujeres suelen tener una situación laboral más desfavorable, con una tasa de empleo menor y con sueldos más bajos que los hombres. Para ciertas mujeres el emprender su propio negocio ha sido una manera de superar la discriminación que existía en las empresas, que no les permitía progresar en su carrera profesional. En segundo lugar, en estos últimos años, se ha producido un importante aumento en el nivel de formación y de cualificación de la mujer, lo que ha permitido un cambio en su perfil laboral y emprendedor. Por ello, el reto para las mujeres es romper los estereotipos que le impiden penetrar en un campo de la actividad monopolizado por los hombres y en la estructura de poder de las organizaciones. Por último, este estudio nos señala la importancia que los gobiernos diseñen políticas gubernamentales y programas específicos de formación destinados a potenciar el emprendimiento femenino en contextos industriales y tecnológicos, y para aumentar la participación de la mujer en los campos de la ingeniería y la tecnología desde su formación secundaria.

REFERENCIAS

- Ruiz-Jiménez, J. "Action female entrepreneur: A glance at the growth in the industrial context". DYNA Management. Enero-Diciembre 2016, vol. 4, no.1, DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/MN7850>
- Brush C, Cooper S. "Female entrepreneurship and economic development: An international perspective". *Entrepreneurship & Regional Development* 2012. Vol.24. p.1-6. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/08985626.2012.637340>

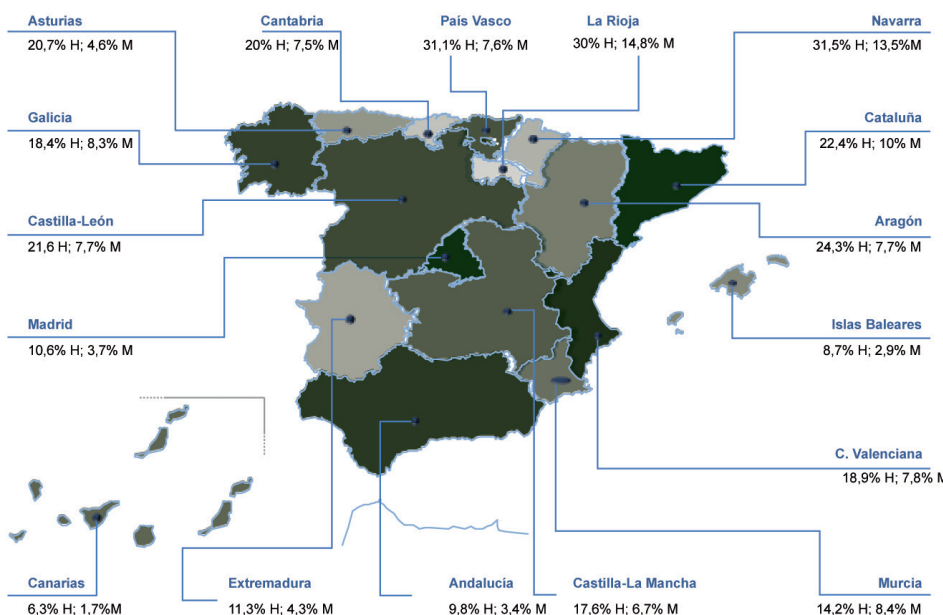


Fig. 1: Porcentaje de hombres y mujeres que trabajan en el sector industrial por comunidad autónoma, durante en segundo trimestre del 2016 en España. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del INE 2016

Una hoja de ruta hacia los servicios inteligentes en la asistencia sanitaria

Marco Opazo-Basáez¹, Sarfaraz Ghulam Muhammad², Daniel Arias-Aranda³, Valentín Molina-Moreno⁴

¹ Universidad de Granada (España)
² SRH Hochschule Berlin (Alemania)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7696>

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas los sistemas sanitarios se han visto afectados por el complejo panorama de la atención sanitaria a nivel mundial, el cual se ha visto agravado por las crecientes alzas en los costes operacionales, una creciente carga de enfermedades crónicas producto de una sociedad cada vez más longeva y una disminución radical en el número de profesionales de la salud [1]. Este complejo escenario ha influido ampliamente tanto en la gestión como en la prestación de los servicios sanitarios [2, 3]. En respuesta a este contexto, las instituciones sanitarias se han apoyado en la implementación de soluciones tecnológicas para respaldar, innovar y ampliar los servicios que impactan la forma en que se gestiona la salud de una persona. Técnicamente, la adopción de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) en el sector sanitario se denomina como sanidad electrónica (*e-Health*) [1]. Este concepto hace referencia a los procesos mediante los cuales los servicios sanitarios son suministrados, de forma directa a través del uso innovador de estas tecnologías [4], asegurando la comunicación y colaboración entre pacientes y profesionales sanitarios de forma efectiva, eficiente y asequible.

En la actualidad, *e-Health* está redefiniendo la forma en que la asistencia sanitaria ha sido suministrada durante décadas, a través de la adopción de avances tecnológicos emergentes tales como la *Internet de las Cosas* (IoT) y la Computación Pervasiva y Ubicua; tecnologías dotadas con inteligencia, capacidades de detección y comunicación inalámbrica, las cuales mediante la transmisión en tiempo real de datos vitales incrementan el impacto y alcance tradicional de la salud electrónica a través de la monitorización continua y remota de las condiciones de salud del pa-

ciente [5]. Una vez recolectados, estos datos son almacenados, organizados y analizados en una infraestructura de computación en la nube (*cloud*), posibilitando la disponibilidad de datos 24/7/365 para los organismos sanitarios sin restricciones de tiempo ni espacio [6].

La integración de estas tecnologías dará origen a una extensa gama de servicios asistenciales, capaces de transformar el actual sistema centralizado, basado casi en su totalidad en el tratamiento hospitalario hacia un modelo descentralizado de atención continua e individualizada en el que hospitales, organismos sanitarios y pacientes están estrechamente implicados a lo largo del proceso asistencial. Sin embargo, esta profunda transición requerirá indispensablemente de la implementación de estos nuevos avances en el campo de las TIC. Solo así las instituciones sanitarias podrán ser partícipes de estas innovadoras posibilidades de proporcionar atención y apoyo y, en consecuencia, expandir la prestación de servicios hacia nuevos horizontes [7]. El principal objetivo de este artículo es sintetizar la literatura científica existente sobre los requisitos tecnológicos claves para la prestación efectiva de servicios inteligentes en la asistencia sanitaria.

1. ELEMENTOS TECNOLÓGICOS Y SUS CARACTERÍSTICAS

1.1. E-HEALTH

Las tic en la asistencia sanitaria

La adopción, utilización y proliferación de las TIC ha beneficiado, transformado y revolucionado múltiples industrias en todo el mundo, incluyendo la práctica sanitaria [1]. En el campo de la asistencia sanitaria, la adopción de las TIC ha sido calificada a nivel mundial como un método para mitigar la brecha entre la creciente demanda de atención médica y el suministro efectivo de dicha atención [8]. Su desarrollo progresivo dentro del sector de la salud, junto con la irrupción de la *Internet* a principio de los años 90, ha dado lugar a la salud electrónica o *e-Health*; un concepto innovador que define un nuevo campo en la intersección de la informáti-

ca médica, la salud pública y los negocios, el cual hace referencia a los servicios de salud y la información entregada o proporcionada a través de la *Internet* y las tecnologías relacionadas. En un sentido más amplio, este término caracteriza no sólo un desarrollo técnico, sino también un estado mental, una manera de pensar, una actitud y un compromiso para el pensamiento en red, de forma global, dirigido a mejorar la atención de salud a nivel local, regional y mundial mediante el uso de las tecnologías de la información y la comunicación [9].

Durante las últimas décadas, *e-Health* se ha convertido en una vasta fuente de información para el asesoramiento y tratamiento en la asistencia sanitaria [4], beneficiando el cuidado de la salud a través de los servicios de atención a distancia en zonas remotas [3], promoviendo la investigación médica y su enseñanza [8]. A este respecto, la literatura existente sobre *e-Health* identifica dos líneas concretas sobre sus competencias en comunicación; por una parte, algunos estudios [10], afirman que *e-Health* facilita la colaboración *intraorganizacional* debido a que permite una comunicación fluida, reducción de obstáculos o retrasos durante este proceso y una retroalimentación apropiada para la creación y la rápida difusión de innovadoras prácticas y tratamientos de salud. Por otra parte, diversos estudios [4] afirman que *e-Health* promueve la comunicación *interorganizacional* en la práctica sanitaria a través de la generación y difusión de información relacionada con la salud, como son los registros médicos electrónicos (EMR) o historiales médicos, lo que permite la comunicación y colaboración instantánea entre instituciones de salud.

Sin embargo, en los últimos años los principales avances tecnológicos en el campo de *e-Health* se centran principalmente en la integración y la interconectividad entre tecnologías especializadas de computación ubicua, particularmente pequeños dispositivos de detección capaces de comunicarse entre sí y coexistir con la infraestructura de una organización, en torno a una nueva tecnología emergente denominada la *Internet de las Cosas* [2, 3, 11].

2. TECNOLOGÍAS FACILITADORAS ESENCIALES

2.1. LA INTERNET DE LAS COSAS (IOT)

Una nueva fuente de servicios sanitarios

Introducida por primera vez por el trabajo del Auto-ID Center del MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) [12], este nuevo paradigma anuncia una plataforma de red global de objetos interconectados (miles de millones de máquinas) que no sólo son capaces de recoger información de su entorno (capacidades de detección) e interactuar con el mundo físico que les rodea (accionamiento / mando / control), sino que además mediante el uso de estándares de internet son capaces de proporcionar servicios de transferencia, análisis, aplicación y comunicación de información [13], con este objetivo, el IoT incorpora procesos hombre-máquina (H2M) los cuales permiten la interacción humana con dispositivos /objetos [14], y procesos máquina-máquina (M2M) en los cuales los objetos son capaces de comunicarse entre sí, sin necesidad de ningún tipo de intervención o participación humana. Por lo tanto, la idea general detrás de este concepto es la presencia omnipresente en nuestro entorno de una variedad de cosas/objetos o máquinas potenciadas con capacidades de detección y que a través de esquemas de direccionamiento únicos, facilitan la cooperatividad entre tecnologías y personas con el fin de alcanzar objetivos comunes [15].

El paradigma de la IoT no es un avance aislado, sino más bien una combinación de aspectos y tecnologías procedentes de diferentes enfoques, tales como la computación ubicua y pervasiva, los protocolos de Internet, las tecnologías de sensores, las tecnologías de la comunicación, y los dispositivos embebidos, los cuales convergen para formar un ecosistema donde el mundo real y el mundo digital se unen y se mantienen continuamente en una interacción simbiótica [16]. En los dominios de la IoT, diferentes tipos de datos (ej. información sobre sonido, luz, calor, electricidad, mecánica, química, biología, ubicación, etc.) son adquiridos en tiempo real mediante diferentes tecnologías de detección, tales como la identificación por radiofrecuencia (RFID) y las redes de sensores inalámbricos (WSN), integrando la información del mundo real al mundo digital [13]. El rápido acceso a la información del mundo real o físico originará una gran variedad de servicios capaces de generar una mayor eficiencia y productividad en la economía global [17],

introduciendo nuevos modelos de negocio capaces de aprovechar sustanciales ventajas económicas y sociales [15-18].

Como resultado, con el tiempo los avances de la IoT darán lugar a una extensa variedad de Desarrollos Materiales de Detección (DMD) u objetos / estructuras cotidianas configurados / estructurados / constituidos incorporando tecnologías de detección para la adquisición y transmisión de datos, capaces de proporcionar tanto, las funciones convencionales para las cuales han sido desarrollados / diseñados / constituidos, como acceso a la información digital a través de atributos de comunicación. En consecuencia, la capacidad para realizar tareas de detección; recolección y transferencia de información sobre fenómenos ambientales, parámetros fisiológicos, o los hábitos del usuario, dará a luz a una gran variedad de aplicaciones y servicios personalizados, con independencia del campo de aplicación.

2.2. LA COMPUTACIÓN UBICUA Y PERVASIVA

2.2.1. Extendiendo los límites de la asistencia sanitaria

Tal como se ha descrito anteriormente, la IoT es una combinación de aspectos y tecnologías unificadas con el fin de crear un ecosistema capaz de generar servicios personalizados en múltiples campos de aplicación. Sin embargo, la esencia de estos enfoques tecnológicos incorporan principios provenientes de la computación ubicua y pervasiva como: (1) conectividad ubicua, es decir, la capacidad general de los objetos para comunicarse (en cualquier lugar y en cualquier momento), (2) computo pervasivo, es decir, el potenciamiento de objetos con el poder de procesamiento (el medio ambiente que nos rodea se convierte en el ordenador), y (3) la Inteligencia Ambiental (AmI), es decir, la capacidad de los objetos para registrar cambios en el entorno físico e interactuar activamente en estos procesos (entornos sensibles al contexto) [19]. Estos tres principios fundamentales desempeñan un papel clave para conseguir la materialización de la IoT, incorporando tecnologías de sensores inalámbricos en objetos cotidianos. Técnicamente, los objetos potenciados con este tipo de tecnologías se denominan como *objetos inteligentes* [13, 16, 20]. Por lo tanto, la IoT se puede describir como el modelo de Internet que se utiliza para la interconexión de objetos inteligentes los cuales se comunican entre sí bajo una red construida por cosas.

A medida que se expanda la IoT en los próximos años, traerá consigo nuevas

oportunidades e importantes beneficios para el cuidado de la salud. Una amplia gama de objetos inteligentes hará posible la obtención de datos en cualquier lugar y en cualquier momento a través de la monitorización en tiempo real de parámetros médicos (por ejemplo, temperatura, presión arterial, frecuencia cardíaca, nivel de colesterol, etc.) Facilitando el diagnóstico médico y el control de la salud sin la necesidad de la presencia física de un médico [20], introduciendo múltiples ventajas para determinadas categorías de personas con una fuerte necesidad de cuidados en el hogar, tales como: personas mayores, personas con discapacidad y personas con necesidades especiales. Estas categorías representan un segmento creciente de la población, el cual sufre de enfermedades crónicas, condiciones de largo plazo y deficiencias físicas que les impiden tomar un papel activo en la sociedad [11, 16]. A continuación, se introducen los principales avances tecnológicos que hacen posible la contribución de los objetos inteligentes en la asistencia sanitaria.

2.2.2. Identificación por radiofrecuencia (RFID)

RFID es una tecnología de rastreo inalámbrico que utiliza microchips y ondas de radio para identificar automáticamente objetos etiquetados y transferir información de dichos objetos, actuando como un código de barras electrónico [13, 15, 16, 20]. La composición básica de un sistema RFID consiste en lectores de etiquetas, etiquetas y servidores finales los cuales procesan los datos recogidos por los lectores desde las etiquetas [15, 21]. Básicamente, esta tecnología permite que cualquier dispositivo etiquetado sea móvil, inteligente y capaz de comunicarse con la infraestructura de TIC de una organización.

Esta tecnología fue adoptada principalmente por las instituciones de salud con el fin de agilizar los procesos basados en papel, la reducción de errores médicos y el tiempo de espera de los pacientes [22]. Rápidamente, su aplicación se propagó hacia nuevos servicios como son: la distribución de medicamentos entre pacientes hospitalizados, la identificación y trazabilidad de la sangre, y el seguimiento de material y equipo médico [23]. A lo largo de los años múltiples beneficios tales como: mejoras en la calidad de la información, fiabilidad y ahorro de tiempo conjuntamente con un mejor alineamiento de la información transmitida entre clientes y proveedores han influido en su implementación en diversos sectores industriales [13, 15, 21, 22].

2.2.3. Redes de sensores inalámbricos (WSN)

WSN son sistemas de redes inalámbricas de sensores inteligentes capaces de recoger, integrar y transmitir datos de forma autónoma mediante la incorporación de los últimos avances tecnológicos en microelectrónica, redes y comunicaciones [13, 15, 16]. Básicamente, el concepto de red viene de la interconexión de nodos de sensores distribuidos espacialmente. Por nodos nos referimos a un discreto, inalámbrico, ligero y miniaturizado hardware capaz de detectar, procesar y comunicar múltiples tipos de datos sobre un área específica de interés [6]. Además, estos nodos de sensores son capaces de trabajar en red con otros sistemas de sensores y basándose en procesos de decisiones locales intercambiar datos con usuarios externos [24].

En la práctica de la salud, cada nodo de una WSN posee una función diferente en la red, detectando diversos parámetros de salud de forma simultánea y continua. La detección de datos eléctricos, térmicos, ópticos, químicos, genéticos, entre otros, con un origen fisiológico, permite la estimación de características indicativas del estado de salud de una persona [25]. A continuación en la tabla 1, se describen algunos de los sensores que en la actualidad se utilizan en los centros médicos y su aplicabilidad en el sector de la sanidad.

2.2.4. red inalámbrica de área corporal (WBAN)

WBAN es una red de sensores inalámbricos portátiles que incorpora diferentes avances tecnológicos en el campo de los circuitos integrados, las comunicaciones inalámbricas y las tecnologías de detección que hacen posible la materialización de un sistema de gestión de salud [16]. De manera similar a una WSN tradicional, un WBAN consiste en múltiples nodos de sensores. Cada nodo es ampliamente capaz de (1) detectar señales fisiológicas, (2) procesar dichas señales, (3) almacenar los datos procesados, y (4) transmitir los datos a otros nodos y / o hacia un servidor [26]. El rápido crecimiento de estas tecnologías inalámbricas en entornos médicos implica un avance significativo hacia la superación de los problemas demográficos, sociales y económicos por los que atraviesa la asistencia sanitaria a nivel mundial.

Hoy en día es posible utilizar los teléfonos inteligentes o Smartphones como una plataforma para la monitorización de parámetros médicos, una nueva rama tecnológica de la sanidad electrónica llamada m-Health [1]. Esta innovación tecnológica aspira a ser el futuro de la me-

Nombre	Abreviación	Descripción
Electrocardiograma	(ECG)	Proporciona la actividad eléctrica del corazón, útiles para descubrir la arritmia cardiaca.
Electromiógrafo	(EMG)	Proporciona la actividad eléctrica de los músculos esqueléticos, útiles para detectar enfermedades neuromusculares.
Electroencefalograma	(EEG)	Proporciona la actividad eléctrica cerebral espontánea, útiles para detectar la epilepsia.
Fotopletismógrafo	(PPG)	Proporciona datos para medir la saturación de oxígeno en sangre, útil para detectar el volumen del flujo sanguíneo.
Monitor Continuo de Glucosa	(CGM)	Proporciona tendencias periódicas de azúcar en la sangre para determinar los niveles de glucosa.

Tabla 1: Tecnologías de sensores inalámbricos utilizados actualmente en la asistencia sanitaria

dicina estableciendo un nuevo escenario para el cuidado de la salud, más accesible a través del uso de dispositivos móviles y aplicaciones móviles, un paso sin precedentes hacia la descentralización de la asistencia sanitaria, que sin duda dará a luz a una plétora de nuevas oportunidades de tratamiento y control. Sin embargo, se debe tener muy en consideración el grado de seguridad adecuado para tal información; ya que los datos sanitarios son muy sensibles y por lo tanto, exigen el uso de protocolos eficientes para proteger a los pacientes de usuarios no autorizados o robos de información [1].

2.3. COMPUTACIÓN EN LA NUBE La asistencia sanitaria en la nube

La computación en nube (Cloud computing) no puede ser entendida simplemente como un fenómeno independiente

en el mercado de las TIC, sino más bien como un ingrediente base de la transformación más grande en esta industria, la cual modificará por completo este ecosistema [27]. Este nuevo paradigma está transformando rápidamente la manera en que la infraestructura de las TIC ha sido proporcionada y consumida, ofreciendo a los usuarios y las empresas recursos computacionales diseñados y gobernados en forma de servicios, re-clasificando las TIC desde una costosa "inversión de capital" en activos tecnológicos a un "pago por uso" de funcionamiento operativo [28], donde un proveedor de servicios cloud es el que mantiene y administra todos los recursos informáticos que se ofrecen al usuario final en forma de servicios [29]. Estos servicios en la nube se clasifican en tres categorías principales [27]. A continuación en la Figura 1; se resumen estos servicios.

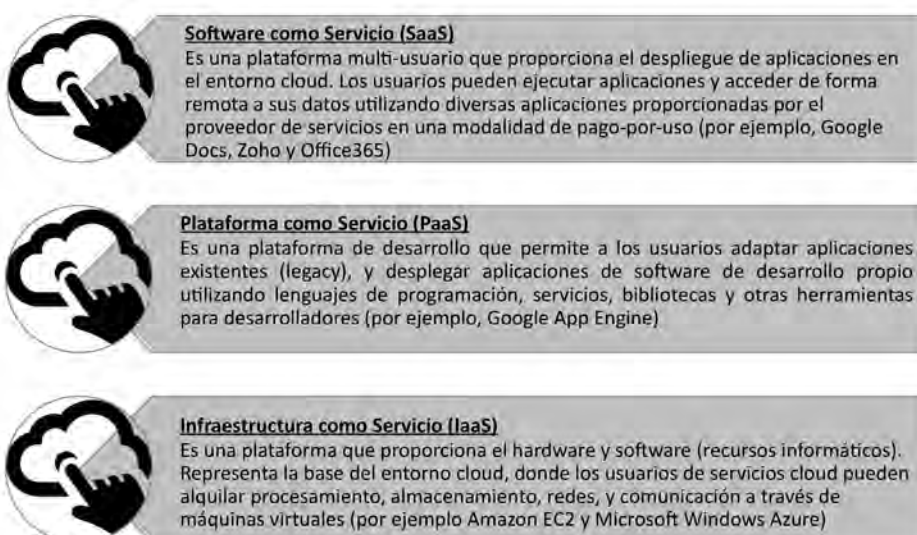


Figura 1: Modelos de servicios de computación en la nube



Figura 2: Modelos de implementación de computación en la nube

Todos los modelos de servicios en la nube anteriormente descritos se negocian entre los proveedores servicios cloud y los usuarios mediante un acuerdo de nivel de servicios (SLA) con el fin de garantizar la calidad del servicio (QoS) y asegurar la confidencialidad, integridad y disponibilidad de los datos [29]. Por otra parte, dependiendo de la estructura organizativa y las necesidades de los usuarios, se han establecido cuatro modelos diferentes de implementación y despliegue de la computación en la nube [27]. A continuación, la Figura 2 resume dichos modelos de implementación y despliegue.

La sanidad electrónica en la cloud proporcionará múltiples oportunidades en el

sector sanitario, esto significa soluciones de almacenamiento y software las cuales facilitaran las rutinas y los procedimientos cotidianos de una manera flexible y escalable [29]. Además, debido a su confinidad con otros avances tecnológicos como el Big data, una infraestructura cloud puede constituirse como la plataforma ideal para gestionar tanto el almacenamiento masivo de datos como la realización de complejos y minuciosos análisis de datos [1]. Estos son beneficios considerables para las pequeñas instituciones sanitarias, las instituciones de atención comunitaria y los consultorios médicos, los cuales serán capaces de implementar complejas infraestructuras de TIC y servicios avanza-

dos de datos para apoyar sus operaciones sin tener que hacer frente a los altos costos iniciales y operativos. Esto facilitará el intercambio (interna y externamente) de información y garantizará el acceso a los datos médicos en cualquier lugar y en cualquier momento por parte de las instituciones de la salud involucradas en el proceso asistencial [6].

3. RESULTADOS

3.1. LOS SERVICIOS INTELIGENTES EN LA ASISTENCIA SANITARIA

Una mirada hacia el futuro de la asistencia sanitaria

Los servicios inteligentes en la asistencia sanitaria pueden definirse como:

"El proceso de seguimiento y medición continua del estado de salud y las condiciones de vida de los pacientes, de forma remota, utilizando pequeños dispositivos capaces de reunir y distribuir datos vitales sin alterar la vida cotidiana."

Estos servicios permiten a los pacientes vivir sus vidas con normalidad mientras reciben una atención sanitaria ubicua y omnipresente de forma adecuada, oportuna y de alta calidad, sin limitaciones de tiempo o espacio. El objetivo principal es proporcionar datos de salud en tiempo real con el fin de facilitar la labor de los profesionales. Posteriormente, a través de dicha información los médicos son capaces de realizar una evaluación oportuna de la salud de un paciente y, si así lo requiere, proporcionar una pronta atención médica.

Con este fin, múltiples tecnologías de detección comprendidas en la forma de objetos inteligentes se despliegan (en cualquier lugar / en cualquier objeto / y



Figura 3: Proceso asistencial de los servicios inteligentes



Figura 4: Proceso de personalización de los servicios inteligentes

/ o en el cuerpo humano) con el fin de obtener datos biomédicos, físicos y ambientales del paciente. Una vez obtenidos, las instituciones de salud pueden utilizar estos datos para proporcionar estos servicios a lo largo de todas las aplicaciones dentro de su plataforma cloud de atención médica. Estas aplicaciones dan forma a un innovador proceso dividido en cinco etapas de atención; cada etapa representa un objetivo independiente para la prestación de servicios inteligentes. La Figura 3 muestra las aplicaciones y los resultados previstos a lo largo de este nuevo proceso asistencial.

La clave de estos servicios radica en su potencial para extraer valor de los datos recogidos. Así, los servicios inteligentes permiten a las instituciones de salud amasar enormes flujos de datos generados por los pacientes. Estos datos proporcionan información y directrices fundamentales para la implementación, diseño y rediseño de los servicios destinados a la atención del paciente. Así, los servicios inteligentes tienen la capacidad de transformar los datos en *información-personalizada-y-adaptativa* capaz de generar nuevas ofertas de servicios y capaz de adaptarse continuamente a las necesidades del paciente

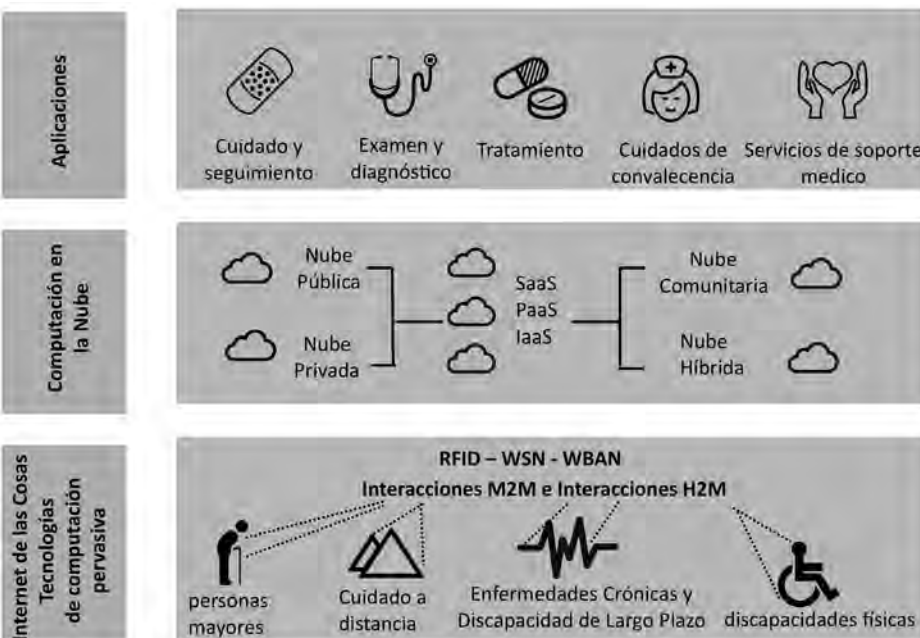


Figura 5: plataforma conceptual de los servicios inteligentes en la asistencia sanitaria

durante cada etapa del proceso asistencial, siguiendo un proceso de personalización continua. La figura 4 establece el proceso de personalización continua en los servicios inteligentes.

Durante este proceso, los datos sanitarios son recolectados, almacenados, organizados y analizados en el sistema de salud basado en la cloud, permitiendo tanto a médicos, pacientes y familiares el acceso a la información de forma segura y rápida, desde cualquier lugar y en cualquier momento. Por otra parte, el análisis de datos, a través del uso de big data, hará posible descubrir patrones ocultos, correlaciones otrora desconocidas, y tendencias significativas detrás de estos datos; cruciales en el desarrollo de modelos de análisis predictivo orientados a identificar las necesidades específicas de atención del paciente a lo largo del proceso asistencial. Por lo tanto, los datos inicialmente recogidos desde un paciente son devueltos nuevamente a ese paciente en la forma de un servicio (Información-como-un-servicio) personalizado capaz de satisfacer las necesidades y requerimientos particulares (por ejemplo, sugerencias customizadas relacionadas con comportamientos saludables, la ingesta de alimentos, regímenes de tratamiento, modificaciones en las rutinas de medicación, o en un plan de tratamiento). No obstante, a pesar del amplio potencial que poseen los servicios inteligentes para la innovación en los servicios sanitarios y la gestión de pacientes, su implementación representa un arduo desafío para las instituciones sanitarias, ya que estas deben hacer frente a una amplia gama de complejidades, incluyendo una completa transformación de la organización [30].

Con el fin de aclarar el papel de las tecnologías y los conceptos definidos anteriormente en este artículo, se propone una plataforma IoT-Cloud. La Figura 5 muestra la integración conceptual de estas tecnologías.

4. CONCLUSIONES

Se espera que los servicios inteligentes generen un nuevo modelo de prestación de servicios sanitarios, capaz de transformar la forma en que la asistencia sanitaria se ha proporcionado hasta el día de hoy; potenciando a las instituciones sanitarias con servicios más eficaces, basados en tecnologías de la información y la comunicación, extendiendo los servicios sanitarios más allá del ámbito de las instituciones de salud y acelerando la innovación de servicios destinada a mejorar la experiencia

del paciente y los resultados operativos. Esta transformación representa un avance radical hacia la democratización y customización del actual sistema de salud; dando lugar a una amplia gama de nuevas posibilidades para la innovación en el ámbito sanitario, y en consecuencia, beneficios sin precedentes en este sector. Sin embargo, es importante hacer hincapié en que se debe prestar especial atención a la transformación integral que requiere la innovación de servicios, así como, de los aspectos legales y éticos que conlleva la transmisión de los datos de salud, debido a la sensibilidad inherente de los mismos.

Este artículo ha revisado los requerimientos tecnológicos necesarios para la implementación efectiva de los servicios inteligentes en la asistencia sanitaria. Así mismo, el presente artículo proporciona tanto la información relevante como las características específicas de estos servicios a lo largo del proceso asistencial. Creemos que futuras investigaciones deberían examinar en detalle la adopción y el impacto de estos servicios en la asistencia sanitaria y categorizar los múltiples beneficios derivados de su aplicación.

PARA SABER MÁS

- [1] Solanas, Agusti, et al. "Smart health: a context-aware health paradigm within smart cities". *IEEE Communications Magazine*, 2014, vol. 52, no 8, p. 7481. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MCOM.2014.6871673>).
- [2] Joshi, Gyanendra Prasad, et al. "Smart solutions in elderly care facilities with RFID system and its integration with wireless sensor networks". *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2014, vol. 2014. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/713946>).
- [3] Tsiaras, H.; Giokas, K.; Koutsouris, D. "Internet of Things", an RFID-IPv6 Scenario in a Healthcare Environment. In: *XII Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing 2010*. Springer Berlin Heidelberg, 2010. S. 808-811. (DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-64213039-7_204).
- [4] Roberts, Anne, et al. "Transnational comparison: a retrospective study on e-health in sparsely populated areas of the Northern Periphery". *Telemedicine and e-Health*, 2010, 16. Jg., Nr. 10, S. 1053-1059. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1089/tmj.2010.0075>).
- [5] Stankovic, J. A., et al. "Wireless sensor networks for in-home healthcare: Potential and challenges". In: *High confidence medical device software and systems (HCMDSS) workshop*. 2005. S. 2-3.
- [6] Lounis, Ahmed, et al. "Secure medical architecture on the cloud using wireless sensor networks for emergency management". In: *Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA), 2013 Eighth International Conference on*. IEEE, 2013. S. 248-252. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/BWCCA.2013.142>).
- [7] Belvedere, Valeria; Grando, Alberto; Bielli, Paola. "A quantitative investigation of the role of information and communication technologies in the implementation of a product-service system". *International Journal of Production Research*, 2013, 51. Jg., Nr. 2, S. 410-426. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2011.648278>).
- [8] Ludwick, Dave A.; Doucette, John. "Adopting electronic medical records in primary care: lessons learned from health information systems implementation experience in seven countries". *International journal of medical informatics*, 2009, 78. Jg., Nr. 1, S. 22-31. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2008.06.005>).
- [9] Eysenbach, Gunther. "What is e-health?" *Journal of medical Internet research*, 2001, 3. Jg., Nr. 2. (DOI: <http://dx.doi.org/10.2196/jmir.3.2.e20>).
- [10] Pirnejad, Habibollah, et al. "Impact of a computerized physician order entry system on nurse-physician collaboration in the medication process". *International journal of medical informatics*, 2008, 77. Jg., Nr. 11, S. 735-744. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2008.04.001>).
- [11] Laranjo, Isabel; Macedo, Joaquim; Santos, Alexandre. "Internet of things for medication control: Service implementation and testing". *Procedia Technology*, 2012, 5. Jg., S. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.protecy.2012.09.086>).
- [12] Sarma, Sanjay; Brock, David L.; Ashton, Kevin. "The networked physical world". *Auto-ID Center White Paper MITAUTOID-WH-001*, 2000.
- [13] Gubbi, Jayavardhana, et al. "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions". *Future Generation Computer Systems*, 2013, 29. Jg., Nr. 7, S. 1645-1660. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>).
- [14] Minoli, Daniel. "Building the internet of things with IPv6 and MIPv6: The evolving world of M2M communications". *John Wiley & Sons*, 2013. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/9781118647059>).
- [15] Atzori, Luigi; Iera, Antonio; Morabito, Giacomo. "The internet of things: A survey". *Computer networks*, 2010, 54. Jg., Nr. 15, S. 2787-2805. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>).
- [16] Borgia, Eleonora. "The Internet of Things vision: Key features, applications and open issues". *Computer Communications*, 2014, 54. Jg., S. 1-31. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.comcom.2014.09.008>).
- [17] Bandyopadhyay, Debasis; Sen, Jaydip. "Internet of things: Applications and challenges in technology and standardization". *Wireless Personal Communications*, 2011, 58. Jg., Nr. 1, S. 49-69. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11277-011-0288-5>).
- [18] Turber, Stefanie, et al. "Designing Business Models in the Era of Internet of Things". In: *Advancing the Impact of Design Science: Moving from Theory to Practice*. Springer International Publishing, 2014. S. 17-31. (DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-31906701-8_2).
- [19] Dohr, Angelika, et al. "The internet of things for ambient assisted living". In: *Information Technology: New Generations (ITNG), 2010 Seventh International Conference on*. IEEE, 2010. S. 804-809. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ITNG.2010.104>).
- [20] Miorandi, Daniele, et al. "Internet of things: Vision, applications and research challenges". *Ad Hoc Networks*, 2012, 10. Jg., Nr. 7, S. 1497-1516. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.02.016>).
- [21] Mattern, Friedemann; Floerkemeier, Christian. "From the Internet of Computers to the Internet of Things". In: *From active data management to event-based systems and more*. Springer Berlin Heidelberg, 2010. S. 242-259. (DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-17226-7_15).
- [22] Chowdhury, Belal; Khosla, Rajiv. "RFID-based hospital real-time patient management system". In: *Computer and Information Science, 2007. ICIS 2007. 6th IEEE/ACIS International Conference on*. IEEE, 2007. S. 363368. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICIS.2007.159>).
- [23] Chen, Min, et al. "A 2G-RFID-based e-healthcare system". *Wireless Communications, IEEE*, 2010, 17. Jg., Nr. 1, S. 37-43. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MWC.2010.5416348>).
- [24] Yick, Jennifer; Mukherjee, Biswanath; Ghosal, Dipak. "Wireless sensor network survey". *Computer networks*, 2008, 52. Jg., Nr. 12, S. 2292-2330. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2008.04.002>).
- [25] Ko, Jeong Gil, et al. "Wireless sensor networks for healthcare". *Proceedings of the IEEE*, 2010, vol. 98, no 11, p. 1947-1960. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2010.2065210>).
- [26] Otto, Chris A.; Jovanov, Emil; Milenkovic, Aleksandar. "A WBANbased system for health monitoring at home". In: *Medical Devices and Biosensors, 2006. 3rd IEEE/EMBS International Summer School on*. IEEE, 2006. S. 20-23. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ISSMDS.2006.360087>).
- [27] Oredo, John Otieno; Njihia, James. "Challenges of Cloud Computing in Business: Towards New Organizational Competencies". *International Journal of Business and Social Science*. 2014.
- [28] Venters, Will; Whitley, Edgar A. "A critical review of cloud computing: researching desires and realities". *Journal of Information Technology*, 2012, vol. 27, no 3, p. 179-197. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1057/jit.2012.17>).
- [29] Garg, Saurabh Kumar; Versteeg, Steve; Buyya, Rajkumar. "A framework for ranking of cloud computing services". *Future Generation Computer Systems*, 2013, vol. 29, no 4, p. 1012-1023. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.future.2012.06.006>).
- [30] Bustinza, Oscar F., et al. "Servitization and Competitive Advantage: The Importance of Organizational Structure and Value Chain Position". *Research Technology Management*, 2015, vol. 58, no 5, p. 53-60. (DOI: <http://dx.doi.org/10.5437/08956308X5805354>).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen los comentarios y las sugerencias realizadas por el editor y tres revisores anónimos. También desean agradecer al Profesor Vladimir Stantchev de la SRH Hochschule de Berlín, el cual ha colaborado en el desarrollo de esta investigación. Daniel Arias Aranda reconoce el apoyo de [ECO-2014-58472 R]. Por último, Marco Opazo Basaez agradece al Departamento de Administración de Empresas de la Universidad de Granada. El mismo autor posee una beca predoctoral FPU con dicha universidad.

El proceso de bruñido con bola: estado del arte de una tecnología en desarrollo

Alberto Saldaña-Robles, José Ángel Diosdado-De la Peña, Antonio de Jesús Balvanti-García, Eduardo Aguilera-Gómez, Héctor Plascencia-Mora y Noé Saldaña-Robles
 Universidad de Guanajuato (Méjico)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7916>

1. INTRODUCCIÓN

El bruñido con bola (BB) es un proceso de acabado superficial de elaboración en frío, que consiste en generar pequeñas deformaciones plásticas en la superficie de una pieza por medio del movimiento de una bola que comprime plásticamente la superficie, mejorando sus propiedades físicas y mecánicas. Este proceso utiliza como elemento deformante una bola de alta dureza, para provocar un desplazamiento de material de las crestas a los valles de las irregularidades superficiales, a través de una fuerza normal de compresión uniforme [1, 2], (Fig. 1).

El BB es un proceso altamente conocido, sin embargo, recientemente se ha incrementado su implementación como proceso de acabado de piezas mecánicas. Esto debido a que es un proceso sencillo, rápido, de bajo coste y que genera superficies de alta calidad sin consumir grandes cantidades de energía y con poca contaminación ambiental, resultando una buena alternativa a los métodos tradicionales como el rectificado y los tratamientos térmicos. Las aplicaciones más comunes del BB son la fabricación de moldes de inyección de plástico, herramientas para el conformado de metales y numerosos

componentes para la industria automotriz, aeronáutica, ferrocarrilera, aeroespacial, etc. El proceso introduce tensiones residuales compresivas en la superficie de la pieza y, por lo tanto, se incrementa la resistencia al desgaste y fatiga de la misma. También, ofrece otras ventajas como: alta precisión dimensional, aumento de la vida útil de la pieza, elimina procesos secundarios costosos (rectificado, fresado de súper-acabado, etc.), incrementa la resistencia a la corrosión, corrige defectos de maquinado y es considerado como un proceso ambientalmente limpio al no generarse virutas.

Comúnmente, el elemento deformante es una esfera de diámetro entre 3 y 12 mm. La esfera tiene que ser de un material de alta dureza (diamante sintético, nitruro de titanio, acero de alta dureza, etc.) para lograr la compresión de la superficie, sin sufrir deformaciones. La profundidad óptima de penetración de la bola se encuentra entre 2 y 10 μm . En las últimas décadas, diversas investigaciones se han enfocado en el estudio teórico, numérico y experimental del proceso, con la finalidad de estudiar, predecir y analizar la influencia de parámetros específicos que permitan mejorar la comprensión del proceso, así como su optimización. La mayoría de las investigaciones científicas enfocadas al BB, se han centrado en estudios experimentales para determinar cómo los parámetros iniciales del proceso (la fuerza de bruñido, avance, velocidad, diámetro de bola, lubricante, material de la bola, número de pases del bruñidor, entre otros) influyen en propiedades físicas y mecánicas del

material (tensiones residuales, acabado superficial, dureza, redondez, reducción de diámetro, desgaste, etc.). En la mayoría de los trabajos revisados, por lo general, se buscó medir la integridad de la superficie mediante la rugosidad superficial media (R_a) y la dureza superficial.

El propósito de este trabajo es presentar el estado del arte basado en la revisión de diversos estudios experimentales del BB, proporcionando una visión general del avance en la investigación de este proceso de súper acabado y mejoramiento de propiedades físico-mecánicas. Se presenta la introducción al proceso, se hace un desglose de los materiales de estudio y se discuten sus principales parámetros, estableciendo los rangos de valores más utilizados por los diversos autores. Se analizan también otros parámetros relevantes del proceso, tales como: el tipo de herramienta (bruñidor), la geometría de la pieza de trabajo, los diseños de experimentos abordados, el tipo de lubricante y los efectos del proceso sobre la integridad de la pieza (rugosidad, dureza, tensiones residuales, redondez y resistencia a la fatiga). Adicionalmente, se exponen de manera general algunos puntos clave del proceso, así como algunas áreas de oportunidad para futuras investigaciones.

2. MATERIAL DE LA PIEZA DE TRABAJO

El BB se ha aplicado a una amplia gama de materiales para diversas aplicaciones industriales. Según los estudios revisados, el acero es el material más empleado en su estudio con un 54.3% de aplicación, le sigue el aluminio con 23.9%, después el latón con 10.9%, aleaciones de

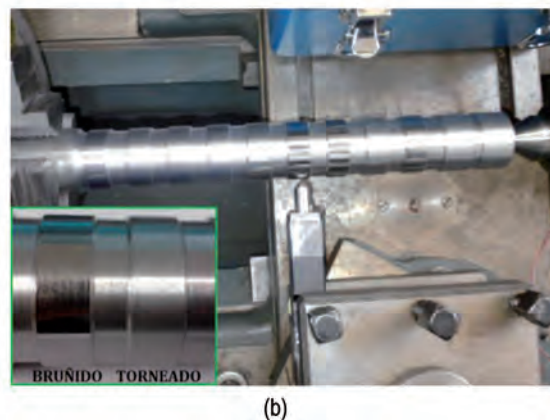
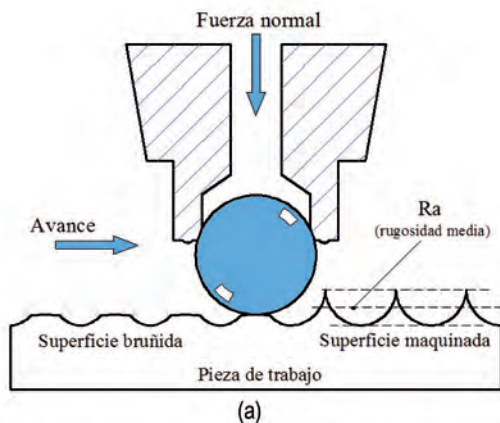


Fig. 1: Proceso de bruñido con bola, (a) esquema; (b) aplicado a una superficie torneada

titanio con 4.3% y en menor proporción, polímeros, níquel-cromo y cobre con 3.3, 2.2, 1.1%, respectivamente (ver Tabla A.1 del apartado material suplementario al final del artículo).

3. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DEL PROCESO

Los parámetros del proceso de BB que más se han estudiado, de acuerdo a Mahajan y Tajane [3] son la fuerza de bruñido (F_b), la velocidad (V) y el avance (f) se consideran los parámetros más estudiados en un 80% de los artículos científicos, en segundo lugar, el número de pases (n) de la herramienta (bruñidor) y el diámetro de la bola (D_b) con un 53%, después, el lubricante usado (I_l) con 47% y la profundidad de bruñido (P_b) con 20%; y en menor proporción (7%) el acabado superficial inicial (R_{ai}), la dureza superficial inicial (H_{si}), el material de la bola, el número de revoluciones (N_r) ligado al diámetro de la pieza de trabajo y la dirección de bruñido. En esta clasificación de parámetros presentada, los autores consideran como variables independientes la fuerza de bruñido y la profundidad de bruñido, aun cuando son parámetros dependientes y que pueden ser considerados como el mismo. Es importante mencionar que en el análisis realizado no se hace distinción sobre los parámetros del proceso de bruñido para las diferentes maquinas-herramientas utilizadas, considerando que parámetros como F_b , f , n , I_l , D_b , P_b , R_{ai} y H_{si} son comunes tanto para torno como para fresadora, siendo únicamente V y N_r parámetros exclusivos del torno. Aun cuando en el presente estudio se consideran dichos parámetros comunes, las características de las maquinas-herramientas utilizadas pueden influir en los resultados del proceso.

3.1. FUERZA DE BRUÑIDO

La carga aplicada (fuerza de bruñido, F_b), se presenta en cuatro diferentes unidades en la literatura (kilogramo-fuerza,

Newton, Pascal y Bar), de acuerdo al equipo de bruñido empleado (mecánico o hidrostático). En este trabajo, se aproximaron las unidades a Newton. Para la carga aplicada en kilogramo-fuerza, se estimó multiplicando por el valor de la gravedad. Para las cargas aplicadas como presión, diversos autores presentan expresiones para determinar la fuerza en función de algunos factores. La Ec.(1), relaciona la presión y la geometría de la bola del bruñidor [4-6]. Adicionalmente, algunos autores manifiestan que, las F_b reales son un 11% menores que las calculadas debido a pérdidas de presión entre la bola y el soporte, resultando la Ec.(2) [5, 6]. En otros estudios, se considera además de la reducción del 11% en la fuerza, que el sistema experimental tiene un ángulo de contacto de 15° entre la herramienta y la superficie normal de la pieza, la F_b puede determinarse mediante la Ec.(3) [7]. Las Ecs. (2) y (3) se usaron para obtener una estimación de la carga en Newtons, donde p , es la presión; r y d , son el radio y el diámetro de la bola.

$$F_b = \pi r^2 p \quad (1)$$

$$F_b = 0.89 \frac{\pi}{4} d^2 p \quad (2)$$

$$F_b = 0.89 \frac{\pi}{4} d^2 p \cos\left(\frac{\pi}{12}\right) \quad (3)$$

Las F_b aplicadas varían entre 7 y 1131 N, mientras que el 80% de los estudios se llevaron a cabo con fuerzas menores a 382N (ver Fig. A.1 del MATERIAL SUPLEMENTARIO). La fuerza es un parámetro que afecta a la rugosidad, en diversas investigaciones se puede apreciar que, si la fuerza incrementa, la rugosidad disminuye. Sin embargo, existe un valor límite de fuerza, que si se sobrepasa se genera una huella (deterioro plástico) del ancho de contacto de la bola con la superficie, ocasionando una mayor deformación plástica y acumulación o apilamiento de material, lo cual produce un incremento en la rugosidad final. El contraste en los resultados analizados puede atribuirse a características mecánicas del material que se está bruñendo, por ejemplo, el coeficiente de auto-endurecimiento, que determinará si el material se apila o se hunde y que además está relacionado con el ancho de pasada lateral [8]. Por otro lado, un incremento en la F_b aumentará la dureza.

En los estudios revisados se establece que F_b es un parámetro fundamental con la mayor contribución (42.9% y 71.6%, respectivamente) en la mejora de la calidad superficial (dureza y rugosidad) al ser comparada la fuerza con otros factores, ver Fig. 2.

En la literatura se corrobora lo anterior: altos valores de F_b producen menor rugosidad y mayores tensiones residuales de compresión en la superficie. Recientes estudios presentan el desarrollo de nuevos mecanismos tales como bruñidores asistidos por vibraciones [1], que permiten mejorar el control de F_b .

3.2. AVANCE DE BRUÑIDO

El avance de bruñido varía entre 0.01 y 0.80 mm/rev (ver Fig. A.1 del MATERIAL SUPLEMENTARIO). Sin embargo, más del 84% de los avances utilizados entran en el rango de 0.01 a 0.27 mm/rev. y por arriba del 95% se encuentran de 0.01 a 0.41 mm/rev. Diversos autores presentan que bajos avances generan una disminución en la rugosidad. Otros autores muestran el mismo comportamiento, pero manifiestan un valor límite de avance el cual ocasiona un aumento en la rugosidad (entre 0.1-0.25 mm/rev.). Este límite depende de las condiciones del proceso y del material. Con altos avances, el bruñidor crea marcas consecutivas con una distancia grande, en comparación con el área de contacto entre la bola y la pieza, y por lo tanto, se obtiene una mayor rugosidad de la superficie. Para evitar lo anterior, el valor del

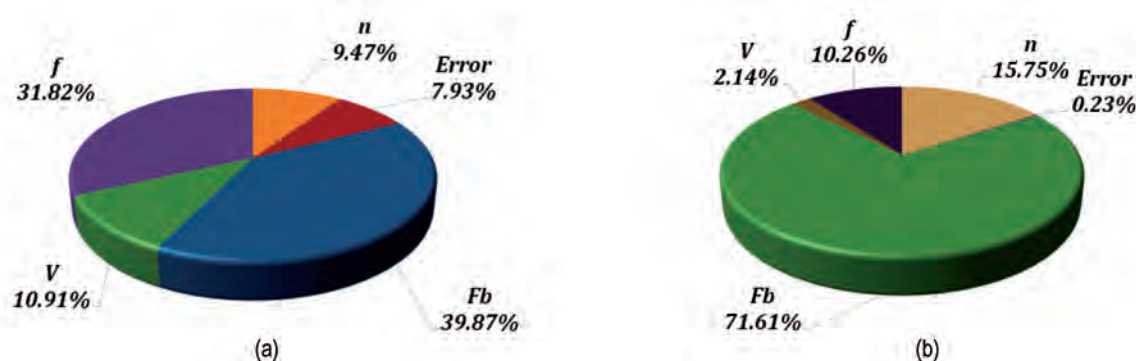


Fig. 2: Parámetros que contribuyen en la mejora de la calidad superficial; (a) [9]; (b) [10]

avance debe ser menor que la longitud de la zona de contacto, se recomienda superposición (traslape de la huella de bruñido) y bajas velocidades de avance en función del diámetro de la bola. Adicionalmente, utilizar F_b altas (cercasas al valor crítico) con bajos avances se reducirá la rugosidad superficial de la pieza de trabajo.

Hay autores que declaran que el avance es un factor que mejora la rugosidad, sin embargo, otros mencionan que la rugosidad es poco sensible a este parámetro, pero que su aumento reduce la eficiencia del bruñido.

En algunos estudios se afirma que al incrementar el avance la dureza disminuye, sin embargo, para otros autores este parámetro no es significativo. Lo anterior se debe a que avances altos en piezas cilíndricas producen una compresión no uniforme en la superficie, obteniendo un promedio de dureza de zonas bruñidas y no bruñidas.

3.3. VELOCIDAD DE BRUÑIDO

La máxima velocidad en que se llevó a cabo el proceso de bruñido en la literatura (velocidad rotacional de la pieza) fue de 158 m/min (ver Fig. A.1 del MATERIAL SUPLEMENTARIO). Aproximadamente el 70% de las velocidades presentadas en los distintos trabajos son menores a los 53 m/min. En algunos estudios, en lugar de la velocidad tangencial se reporta la velocidad angular de bruñido en revoluciones por minuto (rpm).

$$v = \omega r \tag{4}$$

La conclusión de varios estudios es que al incrementar la velocidad, la rugosidad disminuye. Sin embargo, por arriba de cierto valor la rugosidad tiende a incrementar. El valor límite presentado en la literatura varía entre 1.5 m/s hasta los 60.3 m/s. La variación presentada en este límite se debe al tipo de material y las

diferentes magnitudes de los parámetros utilizados.

Se ha encontrado que a medida que la velocidad aumenta, incrementa la rugosidad; sin embargo, en otros análisis este parámetro no representa un efecto significativo. Finalmente, en algunos estudios, se demuestra que, para cierto rango, al incrementar la velocidad la dureza incrementa, sin embargo, a más de 10 m/min la dureza superficial de la pieza bruñida comienza a disminuir. Dicho fenómeno es atribuible al proceso de descamación antes mencionado, ocasionado también por F_b y un excesivo número de pases.

3.4. DIÁMETRO DE LA BOLA Y MATERIAL

Los diámetros de bola (D_b) más empleados en los estudios analizados fueron 10 mm (20.5%), 6 mm (13.7 %) y 8 mm (9.6%), ver Fig. A.1 del MATERIAL SUPLEMENTARIO. Se analizaron D_b desde 3 hasta 20 mm, encontrando que el cambio del tamaño de la bola tiene un efecto sobre la rugosidad superficial y la dureza. Los diámetros grandes tienen una menor penetración sobre la pieza de trabajo en función de F_b . Por ejemplo, una bola de 10 mm proporciona una mejora de la rugosidad, debido a una mayor área de contacto sobre la superficie, generando un mayor traslape en la huella de bruñido en comparación con bolas de menor diámetro para las mismas condiciones del proceso. Una bola de 6 mm mejora la dureza debido a que con una misma fuerza de bruñido se tendrá una mayor penetración, lo que ocasionará una mayor compresión de la capa superficial del material. En algunos trabajos se analizaron diámetros de 10, 13, 16, 18 y 20 mm, encontrando que al disminuir D_b disminuye la rugosidad superficial e incrementa la dureza en la pieza.

Por otro lado, se encontró que a medida que aumenta D_b (de un valor de 3 a

6 mm) se obtiene una mejora en el acabado superficial. Del análisis realizado se puede determinar que el incremento en D_b requiere una mayor F_b para lograr valores de rugosidad aceptables.

3.5. NÚMERO DE PASADAS

Los números de pasadas (n) más estudiados son 2 y 3 en cerca de 40% de los estudios. El máximo n reportado fue de 7 (ver Fig. A.1 del MATERIAL SUPLEMENTARIO). A medida que aumenta n , la rugosidad superficial disminuye, proponiéndose generalmente de 1 a 4 pasadas. Existe un n óptimo que es dependiente del material estudiado y los parámetros del proceso (generalmente de 2 a 4 pases), que si se sobrepasa, la rugosidad incrementa nuevamente. Se atribuye este efecto al endurecimiento excesivo de la capa superficial debido a la compresión; sobrepasando el valor óptimo de pases se produce una descamación superficial de la pieza.

Diversos autores señalan que el incremento de n aumenta la dureza superficial. Los autores de la literatura revisada concuerdan que n es un factor importante que afecta la rugosidad y dureza de la superficie. Se establece que, una baja velocidad (15 m/min) o bajo avance (aproximadamente 0.015 mm/rev.) aunado a un alto n (entre 4 y 5) conduce a una mejora sustancial en la rugosidad. Mientras que una alta velocidad o alto avance combinados con un elevado n deteriora la rugosidad, debido a la descamación antes mencionada.

En la literatura se determina que n es el segundo factor con mayor influencia sobre el proceso con un 15.75%; afectando también significativamente la rugosidad.

4. TIPO DE BRUÑIDOR Y MATERIAL DE BOLA

Algunos autores de la literatura revisada reportan dos tipos de mecanismos

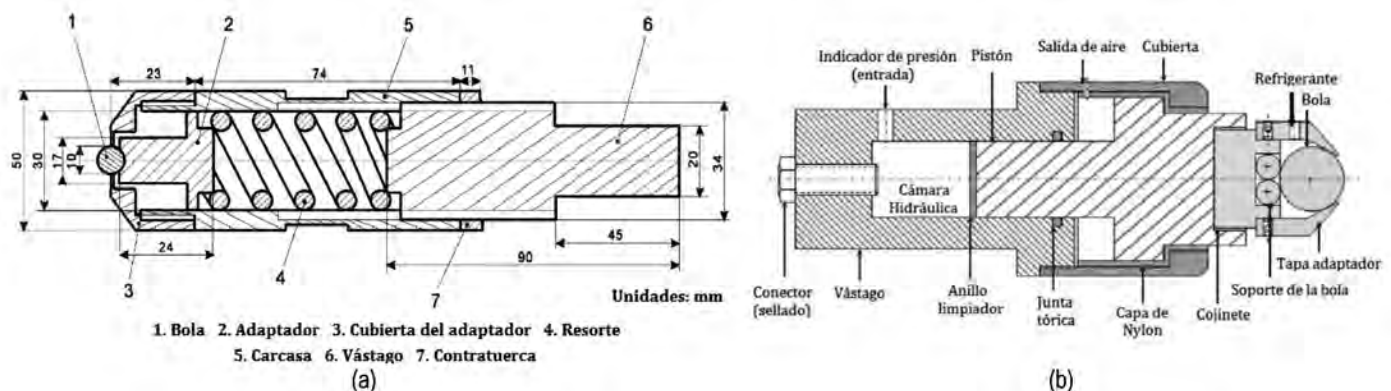


Fig. 3: Equipos para el bruñido con bola; (a) resorte mecánico [12]; (b) muelle hidrostático [13]

comúnmente usados para el proceso de bruñido con bola, el mecanismo por resorte mecánico, ver Fig. 3(a), así como el mecanismo de muelle hidrostático, ver Fig. 3(b). Siendo el equipo con resorte el más utilizado en aproximadamente un 59% de la totalidad de los estudios revisados.

En las investigaciones realizadas con muelle hidrostático, las herramientas más utilizadas incluyen diámetros de bola de 6 mm y 13 mm, mientras que en los estudios con resorte mecánico, los propios investigadores desarrollaron su herramienta de bruñido con bola. Autores como [9] emplearon una herramienta de bruñido especial, consistente en un arreglo circular de tres bolas independientes, orientadas a 120°; que pueden activarse para trabajar 1, 2 o 3 bolas a la vez. Actualmente, estudios del proceso de bruñido con bola proponen la utilización de nuevos desarrollos, como el uso de un bruñidor asistido por vibración [8], el cual tienen un mejor control de la fuerza de bruñido y un mejor desempeño con respecto al número de pases en comparación con el bruñidor convencional. También se ha desarrollado una herramienta de bruñido con doble bola que permite bruñir piezas cilíndricas a la par del proceso de torneado, es decir, realiza ambos procesos al mismo tiempo sin necesidad de cambiar las herramientas, lo que permite optimizar el tiempo del proceso de manufactura [11]. Este tipo de herramientas se han utilizado tanto en torno convencional y CNC, como en fresadoras-CNC. El material más empleado para la fabricación de la bola en los diversos estudios es el acero con recubrimiento de cromo, de nitruro de silicio (Si_3N_4) y nitruro de titanio (ver Tabla A.2 del MATERIAL SUPLEMENTARIO).

5. GEOMETRÍA DE LA PIEZA DE TRABAJO

El análisis del proceso de bruñido con bola se ha llevado a cabo en diferentes geometrías, siendo las barras cilíndricas las más estudiadas (ver tablas A.3 y A.4 del MATERIAL SUPLEMENTARIO). La rugosidad y la dureza son dos de los parámetros más utilizados para determinar la integridad superficial de la pieza. En el 58% de los estudios se utilizaron barras cilíndricas, en 9% bloques rectangulares y en 7% moldes; en menor porcentaje el bruñido se estudió en superficies convexas, cóncavas, inclinadas, etc. Para barras cilíndricas se emplearon diámetros y longitudes en los rangos de 12.4–80 mm y 40–400 mm, respectivamente. Las barras cilíndricas se seccionaron para llevar a

cabo las pruebas experimentales de bruñido a diversas condiciones.

6. TIPO DE LUBRICANTE

Los lubricantes más empleados en el proceso de bruñido son el aceite soluble, el keroseno y los aceites SAE (ver Tabla A.5 del MATERIAL SUPLEMENTARIO). En un estudio se analizó el efecto de cuatro lubricantes, encontrando que a diferentes valores de fuerza, velocidad y avance el keroseno brindó un mejor acabado superficial que el aceite SAE-30 puro y con 5 y 10% de grafito. En otros estudios se consideraron tres tipos de lubricantes, concluyendo que el bruñido empleando grasa permite obtener una mayor dureza que el keroseno y el lubricante mixto.

7. EFECTOS DEL PROCESO DE BRUÑIDO SOBRE LA PIEZA

7.1. TENSIONES RESIDUALES

Diversos investigadores presentan que las tensiones residuales después del proceso de bruñido con bola son del tipo compresivas. Estas tensiones de compresión son la clave para mejorar la resistencia al desgaste, fatiga y corrosión de las piezas bruñidas. En la mayoría de los estudios, las tensiones más altas se presentan en la superficie y disminuyen al incrementar la profundidad de la pieza, existiendo una profundidad en donde cambian de negativas a positivas. La Fig. 4a muestra el diagrama de la distribución de la tensión residual del bruñido, donde: 1) bola; 2) superficie antes del bruñido; 3) superficie después del bruñido; 4) tensión residual compresiva; A) región de presión; la bola entra en contacto con la superficie de la pieza y la presión incrementa de forma progresiva; B) región de deformación plástica; la presión de contacto excede el límite elástico del material y causa una deformación plástica local; C) región de suavizado; D) región de compresión; el material es comprimido por la acción de la bola; E) distorsiones elásticas; después de pasar la bola, el material sufre una recuperación elástica.

La técnica experimental más usada en los estudios de bruñido para cuantificar las tensiones residuales, es la técnica de difracción de rayos X (DRX). Ésta permite medir el campo de tensiones en la superficie o cerca de ella. Las tensiones residuales medidas, generalmente son axiales y tangenciales a diferentes profundidades de la pieza bruñida. La distancia en que se encuentran las tensiones residuales com-

presivas varía entre 0.4 y 2 mm desde la superficie. En la Fig. 4b, se muestra la tendencia típica de las tensiones residuales después del bruñido con bola.

7.2. PORCENTAJE DE LA MEJORA DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL Y LA DUREZA

El análisis de la literatura muestra que el proceso de bruñido con bola mejora la rugosidad de piezas pre-mecanizadas incrementando su dureza. En los diversos estudios analizados en este trabajo para el caso de metales se presentan mejoras en el acabado superficial entre el 40% y 95% de los mismos; mientras que para la dureza entre 17% y 60%. Sin embargo, en otras investigaciones se estudió la aplicación del proceso a diversos tipos de polímeros encontrando que la rugosidad superficial se ve afectada, mientras que la dureza es un parámetro poco afectado.

7.3. REDONDEZ DE LA SUPERFICIE

La redondez es una tolerancia geométrica relevante para el montaje de una pieza mecánica, obtenido como la diferencia entre el radio máximo y mínimo del perfil medido. El concepto de fuera de redondez depende de la tolerancia requerida, variando considerablemente para cada aplicación. Un error de redondez es considerado como uno de los errores geométricos más comunes en componentes cilíndricos, ya que tiene efectos negativos sobre la precisión y otros factores importantes como el desgaste en elementos rotativos. Además, se sabe que la deformación plástica tiene lugar en la superficie durante el proceso de bruñido, lo cual es una de las causas de la variación en la redondez.

En dos trabajos se midió la redondez antes y después del bruñido con bola, utilizando la media aritmética de 3 lecturas para obtener mejores resultados. En uno de estos trabajos, la combinación de parámetros que permitieron obtener la menor fuera de redondez (cercana a cero) fueron una velocidad de 1 m/s, un avance de 0.12 mm/rev. y una fuerza de bruñido de 150 N. Mientras que en el otro, se encontró que una disminución tanto en la velocidad de bruñido (15 m/min) como en el avance (0.58 mm/rev) conduce a una disminución (cercana a cero) de la fuera de redondez. Sin embargo, si la velocidad se mantiene constante y se incrementa el avance (2.32 mm/rev.), se tiene un incremento de la fuera de redondez (arriba de 20 μm). Por otro lado, la fuera de redondez cercana a cero se obtiene a partir de combinaciones de otros parámetros del proceso, tales como: el número de pases (4–5) y

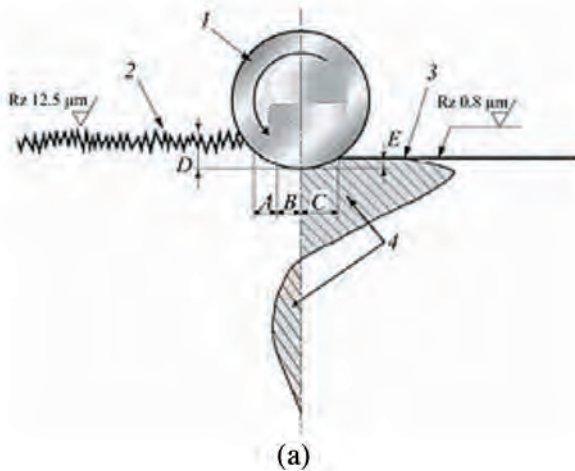


Fig. 4. (a): Diagrama de la distribución de la tensión residual del bruñido [14]; (b) comportamiento típico [5]

un avance de 0.015 mm/rev.; una profundidad de penetración de 0.025 mm y un avance de 0.015 mm/rev. Finalmente, un valor mínimo de fuera de redondez cercano a 10 μm se obtuvo con 4 pases y una profundidad de penetración entre 0.025 a 0.035 mm.

7.4. CARACTERÍSTICAS DE FRICCIÓN Y DESGASTE

En la literatura se propuso el diseño y construcción de un disco para pruebas de desgaste. En este estudio se reveló que al aumentar la velocidad de rotación del disco, se incrementa la pérdida de peso. Lo anterior, al considerar que la fuerza de contacto se mantiene constante. El mismo efecto se presenta si la fuerza de bruñido se incrementa y la velocidad se mantiene constante. Si se incrementa la fuerza o el número de pases de bruñido a ciertos límites, se obtiene una mayor resistencia al desgaste.

En otro estudio se realizaron pruebas tribológicas obteniendo una disminución sustancial en el coeficiente de fricción y la pérdida de peso bajo la condición de contacto lubricado. Los autores obtuvieron una reducción del 46% en el coeficiente de fricción cuando el deslizamiento se realizó en la dirección paralela a la orientación del bruñido.

Otros autores evaluaron las características de fricción en términos del coeficiente de fricción mediante el deslizamiento de dos polímeros, polioximetileno (POM) y poliuretano (PUR), sobre acero inoxidable. Se observó que el coeficiente de fricción disminuyó inicialmente con el aumento de la fuerza de bruñido, alcanzando hasta 33% y 29% de reducción para POM y PUR, respectivamente, ambos a una fuerza de bruñido de 124 N. Si se incrementa el valor de la fuerza de bruñido,

el coeficiente de fricción incrementa. Un comportamiento similar se presenta para la velocidad, el avance y el diámetro de la bola.

7.5. EFECTO SOBRE EL COMPORTAMIENTO A FATIGA

Diversos estudios han investigado el efecto del bruñido con bola sobre la resistencia a la fatiga, demostrando que el proceso incrementa esta característica. En la literatura, se manifiesta que el bruñido con bola provoca tres efectos principales que incrementan la resistencia a la fatiga (incremento de la dureza, tensiones residuales compresivas y acabado superficial de alta calidad). En uno de los estudios revisados, se realizaron pruebas de fatiga por flexión rotativa en probetas de acero AISI-1045. La resistencia a la fatiga en las probetas tratadas con bruñido mejora de 3×10^4 a 1×10^6 ciclos, el límite de fatiga por flexión incrementó en un 21.25%, se obtuvo un acabado superficial de alta calidad (reducción del 50% del tamaño de grano superficial) y un incremento entre el 20% y 25% de la dureza superficial HBN, todo esto en comparación con las probetas no bruñidas.

También se reporta la realización de pruebas de fatiga rotativa en aluminio AA5083 encontrando que el bruñido con bola mejora la resistencia a la fatiga del material hasta en un 100% (en aire y en ambiente corrosivo) respecto a una pieza sin tratamiento. De manera similar, se realizaron pruebas en probetas de acero inoxidable 15-5PH, donde el bruñido con bola incrementó la resistencia a la fatiga hasta un 25%, en condiciones de altas tensiones residuales y baja rugosidad.

En uno de los estudios revisados, se llevaron a cabo ensayos de fatiga a tracción en probetas de superficie plana de

acero AISI 1010, con y sin tratamiento de bruñido con bola. Los autores de este trabajo demostraron que, para las condiciones y el tipo de material empleado en el estudio, el bruñido con bola no presentó un efecto representativo sobre la resistencia a la fatiga. Adicionalmente, se realizaron pruebas a tracción de probetas bruñidas mejorando la ductilidad del material en un 49%. El aumento puede deberse a que el proceso de bruñido con bola mejora el acabado de la superficie, eliminando también microfisuras en los bordes de la muestra disminuyendo significativamente los defectos en la superficie en donde pueden iniciarse grietas.

De acuerdo a la literatura revisada, el proceso de bruñido con bola permite mejorar la resistencia del material en probetas sometidas a pruebas de fatiga rotativa; mientras que para pruebas de fatiga a tracción no puede hacerse la misma aseveración.

8. CONCLUSIONES

En este trabajo se llevó a cabo una revisión de diversos estudios experimentales del proceso de bruñido con bola. El análisis realizado proporciona una visión general del estado del arte de este proceso de mejoramiento de propiedades físico-mecánicas, así como de los parámetros y consideraciones utilizadas por diversos autores. Las investigaciones experimentales para materiales específicos se enfocan al estudio de como los parámetros de fuerza de bruñido, avance, velocidad, diámetro de bola, lubricante, material de la bola, número de pases, entre otros; influyen en el acabado superficial, dureza, redondez, reducción de diámetro, desgaste, etc., en función de optimizar el bruñido con bola. De manera general a continua-

ción se exponen algunos puntos clave del proceso de bruñido con bola, así como también algunas áreas de oportunidad para futuras investigaciones. Esto para los materiales, los parámetros y su rango de valores, el tipo de máquina-herramienta, etc., que fueron descritos en este trabajo.

1. El proceso de bruñido con bola puede mejorar el acabado superficial entre el 40% y 95%; mientras que la dureza puede incrementar entre el 17% y 60%.
2. Los parámetros de mayor influencia sobre la integridad superficial de piezas bruñidas con bola son la fuerza de bruñido, el avance y el número de pases.
3. Un análisis de las magnitudes de los parámetros de mayor influencia del proceso, de acuerdo a los autores de la literatura revisada, muestra que la integridad superficial de una pieza puede mejorar significativamente al utilizar fuerzas de bruñido menores a 382 N, avances entre 0.01 y 0.27 mm/rev, así como un número de pases entre 2 y 4.
4. Los autores del presente trabajo recomiendan utilizar combinaciones entre los parámetros de mayor influencia: fuerzas altas entre 288 N y 382 N, con bajas velocidades de avance de 0.01 mm/rev a 0.14 mm/rev y un número de pases entre 2 y 3. Lo anterior, para obtener una mejora sustancial en la integridad superficial de la pieza.
5. De acuerdo a los estudios revisados el parámetro velocidad de bruñido no contribuye significativamente en la mejora de la integridad superficial. Por lo que se pueden seleccionar altas velocidades (cuidando el aumento de temperatura por alta velocidad), de acuerdo al tipo de máquina-herramienta y materiales utilizados, de manera que disminuya el tiempo del proceso.
6. Aproximadamente el 80% de los estudios analizaron el proceso de bruñido con bola en diversos aceros y aleaciones de aluminio. Siendo las principales aplicaciones moldes de inyección de plástico, herramientas de corte y estampado, piezas automotrices, aeronáuticas y aeroespaciales. Sin embargo, la aplicación del proceso de bruñido con bola se ha extendido hacia otros materiales con creciente interés industrial tales como: aleaciones de titanio, níquel-cromo-molibdeno y diversos polímeros.

7. Generalmente, el bruñido con bola se lleva a cabo con mecanismos de resorte e hidrostáticos; sin embargo, recientemente se ha desarrollado nuevas herramientas que permiten mejorar el proceso tales como: el bruñidor asistido por vibración y bruñidores de bolas múltiples.
8. Los diversos estudios demuestran que el bruñido con bola permite inducir tensiones residuales compresivas; las cuales incrementan la resistencia a la fatiga de las piezas. La técnica más utilizada para cuantificar estas tensiones residuales, es el método de difracción de rayos X (DRX).

Se puede observar una discrepancia entre los resultados de diferentes autores, pero es importante mencionar que las diferencias se deben a los rangos de magnitud de los parámetros estudiados, a las diferentes propiedades mecánicas del material de estudio, así como al tipo de máquina-herramienta utilizada. Lo anterior, provee un área de oportunidad para la investigación experimental de este proceso, a través del diseño de nuevos equipos que permitan mejorarlo y reducir costos, así como, el estudio del proceso sobre nuevos materiales de interés industrial.

PARA SABER MÁS

- [1] Rodríguez-Ezquerro A, López de Lacalle LN. *Tratamientos mecánicos superficiales para mejora de piezas mecanizadas: Bruñido con Bola*. 1a-Edición. Editorial-Académica-Española,-2012.-ISBN:9783659064906.
- [2] Travieso-Rodríguez JA, Gomez-Gras G, Dessein G, et-al. "Effects of a ball-burnishing process assisted by vibrations in G10380 steel specimens". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.-May-2015.-Vol.81(9-12).pp.1757-1765. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-015-7255-3>).
- [3] Mahajan D, Tajane R. "A Review on Ball Burnishing Process". *International Journal of Scientific and Research Publications*.-April-2013.-Vol.3-4.pp.1-8.
- [4] Yen YC, Sartkulvanich P, Altan T. "Finite element modeling of roller burnishing process". *CIRP Annals-Manufacturing Technology*.-December-2005. Vol.54-1. pp.237-240.(DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60092-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60092-4)).
- [5] Sayahi M, Sghaier S, Belhadjsalah H. "Finite element analysis of ball burnishing process: comparisons between numerical results and experiments". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. July 2013. Vol.67-5. p.1665-1673. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-4599-9>).
- [6] Sartkulvanich P, Altan T, Jasso F, et-al. "Finite element modeling of hard roller burnishing: an analysis on the effects of process parameters upon surface finish and residual stresses". *Journal-of-Manufacturing-*

- Science-and-Engineering*.-February-2007.-Vol.129-4.pp.705-716.-(DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.2738121>).
- [7] Celaya AN, De Lacalle LL. "Modelo de elementos finitos del bruñido con bola". 9º Congreso-Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Las Palmas de Gran Canarias:2009.
- [8] Gomez-Gras G, Travieso-Rodríguez JA, Jerez-Mesa R. "Experimental Characterization of the Influence of Lateral Pass Width on Results of a Ball Burnishing Operation".-*Procedia-Engineering*.-December-2015.-Vol.132.pp.686-692.(DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.548>)
- [9] El-Taweel TA, El-Axir MH. "Analysis and optimization of the ball burnishing process through the Taguchi technique". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.-March-2009.-Vol.41-3.pp.301-310.-(DOI: <http://dx.doi.org/1007/s00170-008-1485-6>)
- [10] Esme U. "Use of grey based Taguchi method in ball burnishing process for the optimization of surface roughness and microhardness of AA 7075 aluminum alloy". *Materials and Technology*.-March-2010.-Vol.44-3.pp.129-135.
- [11] Chaudhari P, Awari GK, Khandare SS. "Investigation of effectiveness of combined turning and burnishing operations performed on lathe machine on an aluminium alloy for the modification of surface texture". *International Research Journal of Engineering and Technology*. September 2015. Vol.2. p.1316-1320.
- [12] Shiou FJ, Chen CH. "Freeform surface finish of plastic injection mold by using ball-burnishing process". *Journal of Materials Processing Technology*. September 2003. Vol.140-1. p.248-254. (DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00750-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00750-7)).
- [13] Low KO, Wong KJ. "Influence of ball burnishing on surface quality and tribological characteristics of polymers under dry sliding conditions". *Tribology International*. February 2011. Vol. 44-2. p.144-153. (DOI:10.1016/j.triboint.2010.10.005).
- [14] Akkurt A. "Comparison of roller burnishing and other methods of finishing treatment of the surface of openings in parts from tool steel D3 for cold forming". *Metal Science and Heat Treatment*. July 2011. Vol.53(3-4). p.145-150. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11041-011-9358-2>).

MATERIAL SUPLEMENTARIO

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/7916-1.pdf



Bases metodológicas para una nueva plataforma de medida del comportamiento humano en entornos virtuales

Javier Marín-Morales, Carmen Torrecilla-Moreno, Jaime Guixeres-Provinciale y Carmen Linares-Millán

Universidad Politécnica de Valencia, I3BH/LabHuman (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7963>

1. INTRODUCCIÓN

Al evaluar la funcionalidad de un espacio diseñado para el uso humano, como una tienda, un museo o un parque, el comportamiento de las personas es la principal fuente de información. Este conocimiento se ha medido tradicionalmente a través de encuestas y observación.

Las encuestas ofrecen valoraciones subjetivas sobre la experiencia de un sujeto cuando visita un lugar, sin embargo presentan importantes deficiencias debidas al propio condicionamiento humano a la hora de medir y expresarnos. Ya que la mayoría de estados cognitivos se producen a nivel inconsciente [1] es necesario ir más allá de las medidas subjetivas [2].

Por otro lado, se ha utilizado la observación para medir el comportamiento humano. Estos estudios se han realizado por contemplación directa [3], grabaciones de video y, en los últimos años, a través de GPS o *bluetooth* [4]. Sin embargo, la principal limitación de estas herramientas

es que no pueden emplearse para la pre-evaluación y optimización de un espacio antes de ser construido.

Para solventar este problema, la Realidad Virtual (RV) se presenta como una herramienta capaz de representar escenarios tridimensionales de forma realista, inmersiva e interactiva, permitiendo simular y evaluar entornos espaciales en condiciones controladas de laboratorio [5]. De forma rápida y económica permite aislar o modificar variables de un mismo espacio (color, iluminación...), algo inviable en el espacio real [6].

Ya se han realizado estudios que han utilizado la RV para recrear espacios con el objetivo de ayudar a los proyectistas en la toma de decisiones. Por un lado, algunos estudios se han basado en presentar el espacio virtualizado a los futuros usuarios y obtener sus valoraciones a través de encuestas [7]. Por otro lado, existen estudios que han desarrollado técnicas para evaluar el espacio a partir de datos comportamentales de navegación, interacción y exploración visual [8]. Sin embargo, se han basado en presentar los resultados a partir de representaciones gráficas y no se han definido métricas para analizar el rendimiento.

En este contexto, el objetivo del presente artículo es mostrar una nueva plataforma tecnológica de medida del com-

portamiento humano en entornos virtuales, para la ayuda en la toma de decisiones a través de la pre-evaluación de los espacios antes de ser ejecutados. Esta utilizará una metodología transversal a partir de la cual se obtendrán métricas con las que evaluar y optimizar la funcionalidad y el rendimiento de proyectos en diferentes ámbitos: comerciales, culturales, sanitarios, etc.

2. METODOLOGÍA

2.1. HUMAN BEHAVIOUR TRACKING

Human Behaviour Tracking (HBT), término que se ha asignado como nombre a esta plataforma, es una tecnología de análisis del comportamiento humano basada en la monitorización de la navegación, interacción y exploración visual de un conjunto de usuarios en un espacio. El flujo de información de un sistema HBT en RV engloba tres fases (*Figura 1*).

Fase experimental: en primer lugar, se modeliza el espacio en RV y se realiza una serie de pases experimentales a *n* usuarios. Estos pueden estar dentro del espacio al mismo tiempo o de manera separada, y pueden tener o no una tarea a realizar en función de las características que se quieren evaluar.

Fase de tratamiento: realizados los pases experimentales, se tendrá una serie de datos extraídos de la RV que es posible dividir en tres conjuntos: la navegación o posición del usuario en el tiempo, las

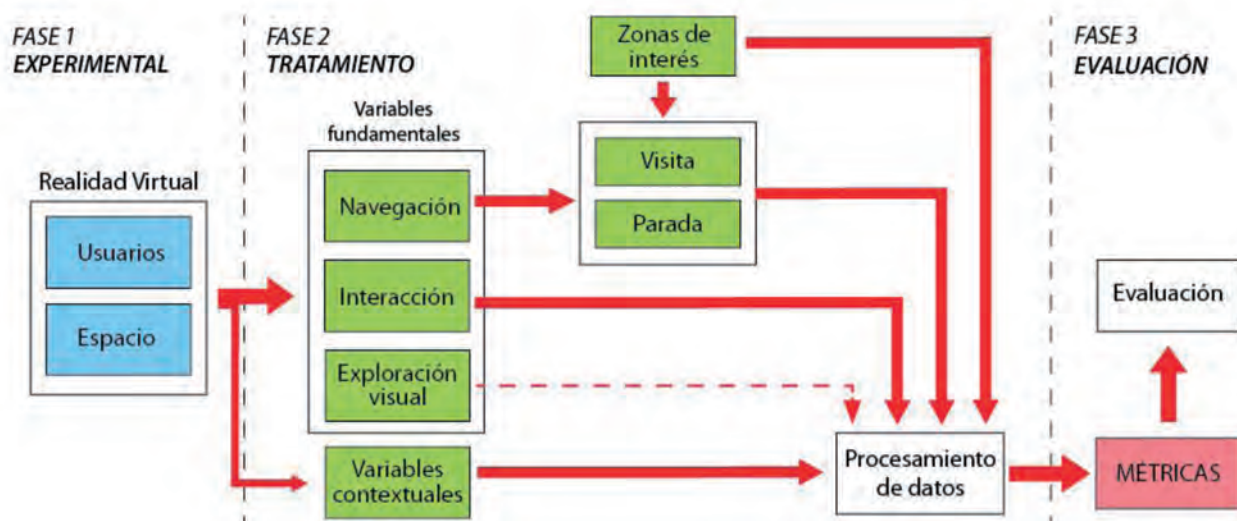


Figura 1: Esquema del flujo de información en un sistema de HBT en RV

interacciones que ha realizado con el espacio y la exploración visual. Este artículo se centra en el procesamiento de los datos de navegación e interacción, sin tener en cuenta la exploración visual. Además, también es necesario extraer las variables contextuales sobre las que se ha realizado el experimento. Esta información se procesará a partir de un software creado a tal efecto, cuyo resultado será toda una serie de métricas innovadoras almacenadas en una base de datos.

Fase de evaluación: a partir del conjunto de métricas contenidas en la base de datos, es posible analizar el rendimiento del espacio en función de diferentes variables. Aplicando análisis estadísticos, se realizará una evaluación final de la alternativa a estudio. También será crítico desarrollar nuevos tipos de representación gráfica de estas métricas facilitando al profesional la interpretación de los resultados obtenidos.

2.2. FASE EXPERIMENTAL

La principal ventaja de la RV es que permite replicar con alto grado de realismo el espacio a valorar, permitiendo alterar los elementos del diseño y de la experiencia sensorial de una manera controlada a través de características o variables específicas. Los nuevos avances en gráficos por ordenador permiten producir imágenes sofisticadas que no sólo son capaces de transmitir las características de un espacio futuro, sino que también evo-

can en los observadores los sentimientos y emociones que serán provocados por el espacio [9].

Existen diferentes soportes de RV que se pueden clasificar en sistemas no inmersivos, semi-inmersivos e inmersivos [10]. Cada uno tiene sus ventajas e inconvenientes, lo que implica la elección de la plataforma en función de las características a evaluar. También será necesaria la elección de la metáfora de navegación que influirá en el comportamiento del usuario. La implicación de estas elecciones es compleja y queda fuera del alcance del presente artículo.

Definida la plataforma y la metáfora de navegación, es necesario modelizar el futuro espacio. Si se pretende analizar un conjunto de alternativas, será necesario diseñarlas, realizar el proceso completo para cada una de ellas y, finalmente, comparar las evaluaciones. Estas soluciones que combinan el modelado CAD en 3D, las metáforas de navegación, la interactividad del escenario y las alteraciones posibles del espacio se desarrollan haciendo uso de un motor gráfico como, por ejemplo, *Unity* (Unity Technologies, EEUU).

Los pases experimentales serán diseñados también en función de las características que se quieren evaluar, pudiendo implantar tareas a tal efecto. Por ejemplo, si en un museo se quiere estudiar por qué una sala es poco visitada independientemente del contenido expuesto, se solicitaría a los sujetos que la busquen y se

evaluaría qué distribución del espacio es la que reduce el tiempo que necesitan los usuarios para encontrarla. Sin embargo, si se quiere estudiar la secuencia natural de visitas que hacen los usuarios en un supermercado, la tarea sería una compra abierta que puede tener un presupuesto límite asignado o no.

2.3. FASE DE TRATAMIENTO

2.3.1. Variables fundamentales y contextuales

La información del comportamiento de los usuarios es posible dividirla en dos grupos: las variables fundamentales y contextuales. Las **variables fundamentales** son la navegación, la interacción y la exploración visual. Para que éstas puedan ser recogidas es necesario tener una capa de medida en background en el sistema de RV que extraiga la información de interés por cada sesión de un sujeto en el espacio virtual para ser posteriormente tratada. Esta capa se insertará a través de scripts en el motor gráfico.

La **navegación** estará definida por la posición y orientación de los usuarios en el tiempo, a partir de un sistema de referencia cartesiano a través de sus coordenadas x e y . Para simplificar el posterior análisis, el sistema HBT analiza la navegación únicamente en planta. En caso de que el proyecto tenga diferentes plantas, se evaluará cada una de ellas por separado. De esta posición se obtendrán poste-

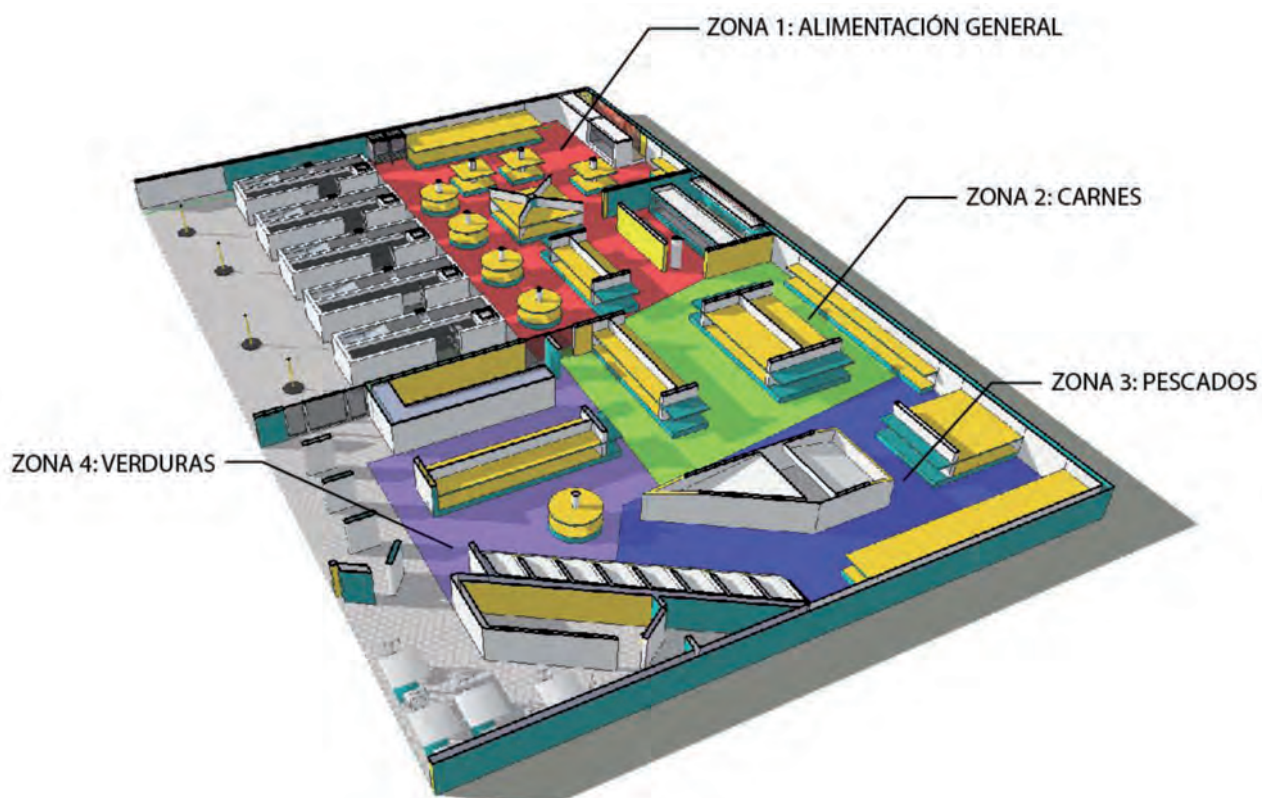


Figura 2: Ejemplo de esquema de zonificación de un supermercado con cuatro zonas de interés

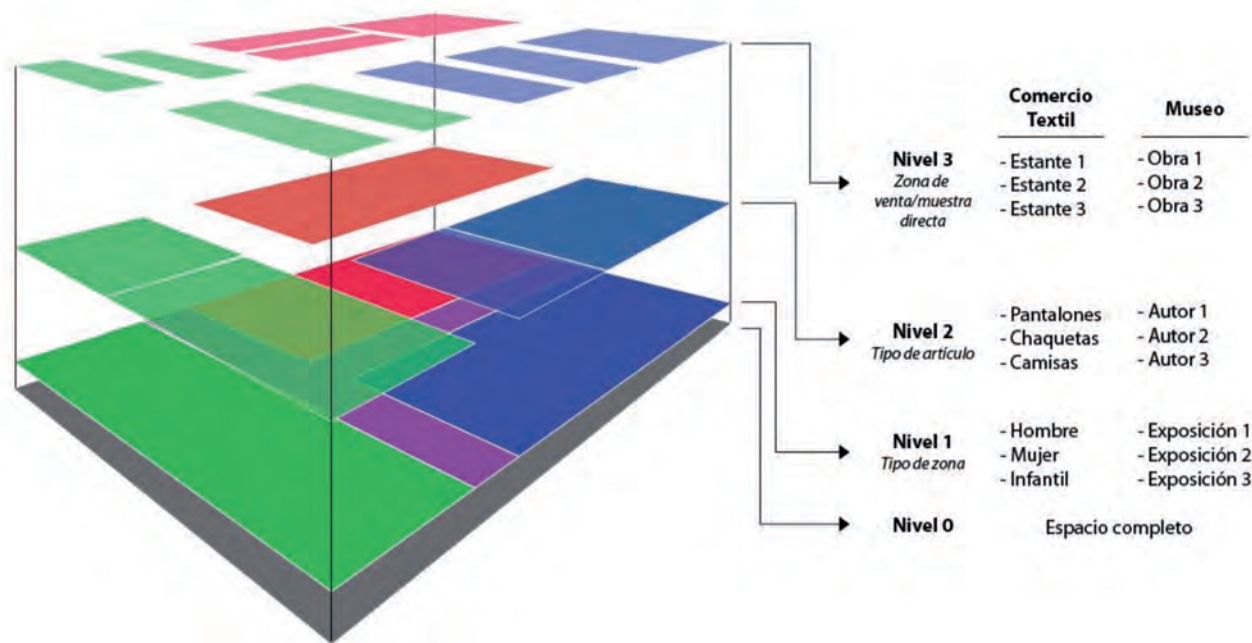


Figura 3: Ejemplo de un esquema de zonificación de un espacio comercial y un museo en tres niveles

riormente las visitas y las paradas con las que evaluar el proyecto.

La **interacción** del usuario con el espacio será otra de las variables fundamentales para obtener el rendimiento del espacio y dependerá del tipo de proyecto a analizar. Por ejemplo, en un supermercado podría ser la compra de un artículo y en un museo cuando el usuario pulsa el botón de información de una obra. Sin embargo, en función de las necesidades del estudio, se podrían habilitar diferentes interacciones más complejas dentro del espacio, como permitir al usuario que cambie diferentes parámetros del proyecto.

La **exploración visual** describe cómo y hacia dónde mira el usuario. Para poder medirla, la plataforma de RV debe incorporar sistemas de eye-tracking, que siguen la pupila del usuario para determinar hacia dónde apunta la mirada en cada instante. En este artículo nos centraremos en la navegación y la interacción.

Por otro lado, las **variables contextuales** contendrán la información de la muestra y de las condiciones experimentales. El perfil de los usuarios es uno de los datos más importantes al segmentar la muestra en función de la edad, el sexo o la personalidad. Estas se obtendrán a partir de un cuestionario previo donde las preguntas variarán en función del proyecto. También es necesario mantener el control de las condiciones experimentales, ya que una misma alternativa puede ser evaluada en función de diferentes características como una gama de color, y de las condiciones ambientales, como la temperatura, la iluminación o el sonido.

2.3.2. Zonas de Interés

Para analizar con profundidad el espacio es necesario dividirlo en zonas que tengan un interés analítico en el estudio. Para cada una de ellas se obtendrán diferentes métricas, permitiendo así evaluar el rendimiento de manera pormenorizada. Así, podremos por ejemplo dividir un supermercado en diferentes zonas en función del producto que se oferta y valorar la funcionalidad de cada una de las áreas (Figura 2).

Además, pueden aparecer diferentes niveles, que variarán en función del proyecto. Se podrán realizar los niveles de detalle que sean necesarios, por ejemplo en un supermercado se proponen tres: por tipo de zona, por tipo de artículo y por zona de venta/muestra directa.

En el ejemplo de un comercio textil (Figura 3), se haría una primera división en grandes áreas de venta (hombre, mujer, infantil, etc.). En un segundo nivel, estas áreas se dividirían en función de los artículos ofertados (pantalones, camisas, trajes, etc.). El tercer nivel consistiría en dividir el espacio lo máximo posible para estudiar el rendimiento de cada estante. De este modo podríamos estudiar qué rendimiento tendrá el estante nº2 de la zona de pantalones de hombre. Análogamente, en un museo se podría estudiar qué rendimiento tiene la obra nº3 de un autor que participa en la exposición nº1.

2.3.3. Variables de navegación

Las variables fundamentales de navegación necesitan de un pre procesamiento para ser calculadas. La primera de ellas es

la **visita**. Esta contabilizará cada vez que un sujeto entre a una zona de interés y salga de ella. De esta forma podremos analizar de manera cuantitativa cómo se comportarán y qué secuencia seguirán los usuarios en el futuro espacio. La Figura 4 muestra el recorrido de un usuario dentro de un espacio, observándose que en la zona 2 ha realizado cinco visitas.

La **parada** completa las variables de navegación. Esta es entendida como el conjunto de tiempo durante el cual un usuario se encuentra detenido para observar el espacio o interactuar con él. La definición plantea problemas técnicos, ya que se pueden encontrar dos tipos de paradas en las que técnicamente el usuario está detenido, pero que no se ajustan a la definición planteada.

La primera es la que se produce por realizar pequeños movimientos dentro de una misma parada (un paso adelante para realizar una interacción, un paso a la derecha para girar la cabeza, etc.). Así, podrían detectarse varias paradas debidas a estos pequeños movimientos cuando realmente sólo se ha realizado una. La segunda es la que tiene lugar durante un corto espacio de tiempo en el proceso de movimiento, en el que el usuario se ha detenido durante milisegundos, pero realmente no ha parado para observar o interactuar con el espacio. Si no tuviésemos en cuenta estos dos eventos, se obtendrían infinidad de falsos positivos que desvirtuarían el análisis.

Por ello, es fundamental calibrar un algoritmo de detección de paradas. En primer lugar será necesario indicar una

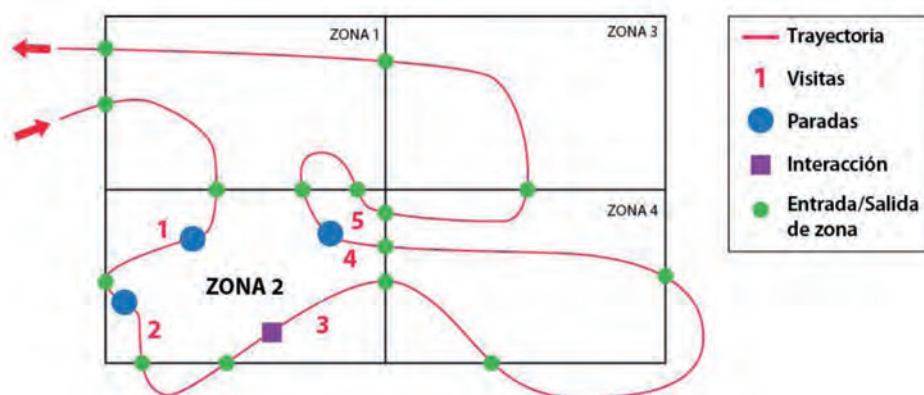


Figura 4: Esquema de las visitas y paradas realizadas por un usuario a la Zona 2

Por otro lado, las métricas de **zona**, definen el comportamiento de las áreas fijadas y serán las más utilizadas para la evaluación del espacio. Con ellas podremos evaluar posteriormente el rendimiento de cada zona del espacio, como por ejemplo mediante el número de visitas en cada zona, el porcentaje de personas que la han visitado, el número de paradas por zona, el porcentaje de personas que se han parado o el número de interacciones en cada zona. Con estas métricas podremos analizar pormenorizadamente el rendimiento de cada zona. Si una zona tiene un número alto de visitas, pero un porcentaje bajo de personas que han efectuado paradas, puede deberse a que está muy bien situada en el espacio, pero tiene un contenido que interesa poco al usuario. Al contrario, una zona con pocas visitas pero con un número alto de interacciones, indicaría que tiene un alto rendimiento pero debería mejorarse su accesibilidad.

Para poder analizar de manera más precisa cuando se producen las visitas, paradas o interacciones, estos contado-

velocidad mínima por debajo de la cual considerar las paradas y así descartar los pequeños desplazamientos. También se calibrará un umbral mínimo de tiempo en que el usuario está detenido a partir del cual se considerará parada y con ello excluir las del segundo tipo. Estos parámetros dependerán del sistema de RV utilizado y de la metáfora de navegación.

Por lo tanto se producirá una parada siempre que un usuario esté durante más de x segundos sin moverse, considerando que no tiene movimiento cuando vaya por debajo de la velocidad y.

nes que ha realizado cada usuario. Esta información será muy útil para valorar cómo ha respondido la muestra al espacio. Un número de visitas alto, por ejemplo, indicará que los usuarios han explorado mucho el espacio. Esta información será muy útil para valorar cómo ha respondido la muestra al espacio. Un número de visitas alto, por ejemplo, indicará que los usuarios han explorado mucho el espacio.

2.4. FASE DE EVALUACIÓN

2.4.1. Software

Una vez definidos los inputs, es necesario realizar un proceso de tratamiento de datos para obtener las métricas. Con este objetivo se ha diseñado un software informático en lenguaje *octave-matlab* (Figura 5), que realiza el proceso de manera automatizada hasta la exportación de la base de datos final con la que realizar la evaluación del proyecto. En los siguientes apartados se describirán los tipos y bloques de las métricas que se han diseñado, a la vez que se pondrán diferentes ejemplos y se explicarán algunas de ellas. En función del espacio, el proyectista deberá analizar cuáles son las que mejor explican el rendimiento a optimizar.

2.4.2. Métricas de contadores

En este bloque se incluyen las métricas que hacen referencia al número de veces que se realiza una visita, parada o interacción. Se pueden diferenciar entre métricas de usuario y métricas de zona.

Las de **usuario** caracterizan el comportamiento particular de un sujeto, por ejemplo, el número de visitas realizadas por usuario, el número de revisitas, el porcentaje de zonas visitadas, el promedio de paradas o el número total de interaccio-

FASE 2 TRATAMIENTO

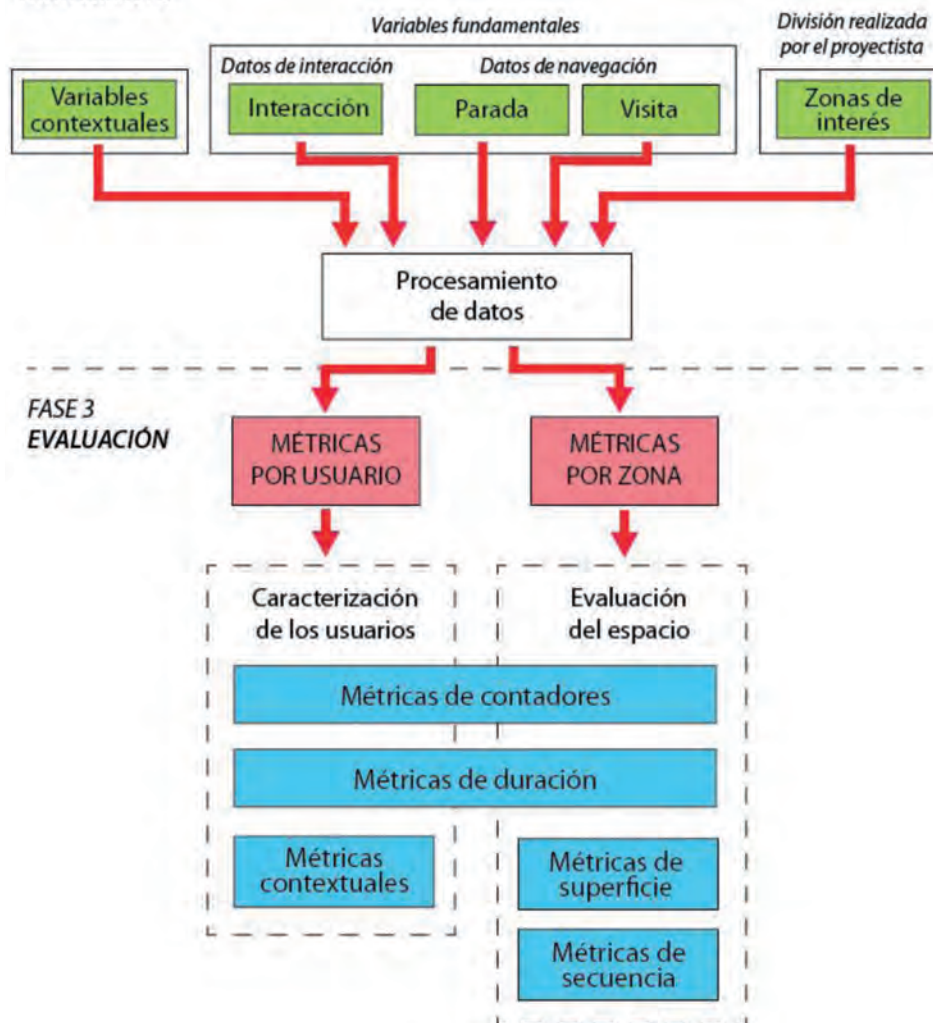


Figura 5: Esquema del software para la obtención de métricas

res también se exportarán asignando el tiempo de realización de la acción, para así poder analizar, por ejemplo, si las interacciones se concentran al principio o al final del recorrido de un usuario y el ratio visitas o paradas por hora.

2.4.3. Métricas de duración

Este bloque se centra en analizar las variables fundamentales de navegación, pero teniendo en cuenta su duración total. También se pueden clasificar atendiendo a usuario y zona.

Dentro de las de **usuario** aparecen la duración promedio de las visitas de un usuario o el tiempo total que ha estado parado. Con ellas analizaremos el comportamiento general de los usuarios, por ejemplo, si realizan muchas paradas pero de corta duración o pocas de larga duración. El primer caso implicará que los usuarios han explorado mucho el espacio, pero no les ha interesado demasiado, y el segundo podría deberse a usuarios muy selectivos, que realizan pocas paradas pero que han encontrado ciertos contenidos interesantes.

Con las métricas **por zona** evaluaremos el rendimiento de cada área del espacio. Este será explicado con métricas como la duración total de las visitas en cada zona, el porcentaje de tiempo en revisita o la duración total de las paradas en la zona. Resultan fundamentales ya que, por ejemplo, una zona puede haber obtenido muchas visitas pero que éstas durasen en total muy poco por ser un área de paso.

2.4.4. Otras métricas

En este apartado se describen tres nuevos bloques: métricas contextuales, de superficie y de secuencia.

Las **métricas contextuales** contendrán toda la información necesaria para caracterizar intrínsecamente a los usuarios. Normalmente ésta es recogida a través de encuestas e incluye edad, sexo y otras variables en función del proyecto. También se incorpora la información referente a las condiciones ambientales como humedad o luminosidad. Por último variables de tipo experimental, asociadas a condiciones experimentales del estudio, por ejemplo, si la tienda estaba con precios reducidos.

Las **métricas de superficie** incluyen las principales métricas contenidas en el bloque de contadores y de duración, pero ponderadas en función de la superficie de la zona. Es importante tener en cuenta que las zonas pueden tener diferente su-

perficie, lo que puede determinar la diferencia del número final de interacciones. Por ello, se analizarán los rendimientos por metro cuadrado.

Las **métricas de secuencia** analizan el orden en el que se han producido las visitas, paradas e interacciones. Con estos datos podremos ver qué patrón siguen los usuarios a la hora de moverse e interactuar con el espacio. El bloque será especialmente importante en los espacios donde el proyectista quiera fomentar trazados concretos, como en exposiciones culturales o comercios tipo IKEA.

3. CONCLUSIONES

El presente trabajo propone la base metodológica de una plataforma tecnológica, que permite evaluar proyectos antes de ser ejecutados. Para ello, a través de sistemas de RV y técnicas HBT, se han definido una serie de métricas con las que analizar y evaluar el comportamiento humano en el espacio, en función de tres variables fundamentales: visita, parada e interacción.

Con esta aportación transversal a diferentes sectores, junto a la previsible expansión de los dispositivos de RV, se abre una nueva ventana de oportunidades en la toma de decisiones, al disponer de una mayor información sobre las distintas alternativas, permitiendo elegir la que maximice el rendimiento, optimizando la funcionalidad y el coste/beneficio del futuro espacio. Los resultados serán de gran interés para cualquier tipo de espacio que tenga como elemento fundamental el tránsito de personas, ya sea comercial, cultural, gastronómico o de ocio.

Esta base metodológica plantea diferentes retos que serán desarrollados en futuras publicaciones. En primer lugar, es necesario aplicarla a un caso de estudio concreto para evaluar el alcance de la tecnología, e incluir la exploración visual a la plataforma. Por otro lado, también hay que analizar cómo influye en las métricas el soporte de RV, la metáfora de navegación y el número de usuarios simultáneos a través de avatares. También es importante mejorar y robustecer el algoritmo de detección de paradas, proponiendo una calibración particular para cada soporte y metáfora de navegación, y seguir ampliando las métricas asociadas a cada zona.

Al mismo tiempo, se plantean dos posibles líneas de investigación: combinar esta tecnología con señales neurofisiológicas y rasgos de personalidad para aumentar de manera cualitativa la com-

prensión del comportamiento humano en los espacios y desarrollar una métrica final tipo 'score', capaz de evaluar de forma global y cuantitativa el rendimiento de un espacio.

PARA SABER MÁS

- [1] G. Zaltman, "How customers think" *Cambridge Harvard Bus. Sch. Press. Harvard Univ.*, vol. 27, no. 3, p. 480, 2003.
- [2] R. P. Bagozzi, M. Gopinath, and P. U. Nyer, "The Role of Emotions in Marketing" *J. Acad. Mark. Sci.*, vol. 27, no. 2, pp. 184–206, 1999. DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/0092070399272005>
- [3] Y. Lu and H.-B. Seo, "Developing visibility analysis for a retail store: a pilot study in a bookstore" *Environ. Plan. B Plan. Des.*, vol. 41, pp. 95–109, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1068/b130016p>
- [4] P. Phua, B. Page, and S. Bogomolova, "Validating Bluetooth logging as metric for shopper behaviour studies" *J. Retail. Consum. Serv.*, vol. 22, pp. 158–163, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jretconser.2014.10.009>
- [5] J. Vince, "Introduction to virtual reality". New York: Springer, 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-0-85729-386-2>
- [6] M. Alcañiz, R. Baños, C. Botella, and B. Rey, "The EMMA Project : Emotions as a Determinant of Presence" *PsychNology J.*, vol. 1, no. 2, pp. 141–150, 2003.
- [7] M. Roupé and M. Gustafsson, "Judgment and decision-making aspects on the use of virtual reality in volume studies" no. Caadria, pp. 437–446, 2013.
- [8] L. Chittaro and L. Ieronutti, "A visual tool for tracing users' behavior in Virtual Environments," *Proc. Work. Conf. Adv. Vis. interfaces - AVI '04*, p. 40, 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/989863.989868>
- [9] C. Llinares and S. Iñarra, "Human factors in computer simulations of urban environment. Differences between architects and non-architects' assessments," *Displays*, vol. 35, no. 3, pp. 126–140, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.displa.2014.05.002>
- [10] N. Rangaraju and M. Terk, "Framework for immersive visualization of building analysis data," *Proc. Fifth Int. Conf. Inf. Vis.*, pp. 37–42, 2001. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IV.2001.942037>.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio de Economía y Competitividad. España (proyecto TIN2013-45736-R).

Liderazgo y cultura de seguridad laboral: revisión del estado de la cuestión

Beatriz Fernández-Muñiz, José-Manuel Montes-Peón y Camilo-José Vázquez-Ordás
Universidad de Oviedo (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7942>

La investigación sobre la cultura de seguridad ocupacional ha permitido conocer mejor la naturaleza de ésta y también constatar su influencia sobre las creencias, actitudes y comportamientos de los empleados en relación con la seguridad laboral. Pero desconocemos aún cómo promover una auténtica cultura de seguridad. No comprendemos tampoco la influencia de sus factores antecedentes, ni sabemos hasta qué punto los objetivos y las políticas aplicadas en otros ámbitos de la empresa (producción, recursos humanos) pueden moderar su influencia sobre la siniestralidad laboral.

Entre los factores antecedentes, susceptibles de ejercer una influencia crítica sobre la configuración de la cultura de seguridad y los resultados de la organización en este ámbito, cabe señalar al factor directivo. Ignorado durante mucho tiempo, la acumulación de evidencias sobre su importancia ha motivado un interés creciente por la investigación del papel del liderazgo de la alta dirección en materia de seguridad laboral y su influencia sobre la cultura preventiva de las organizaciones. En este artículo describimos el estado actual de la cuestión, organizando la revisión y síntesis de la literatura más reciente con arreglo a los tres objetivos siguientes:

- 1) Explicar cómo se conforma la cultura de seguridad laboral a partir de sus factores constitutivos (apartado 2), lo que nos llevará al factor directivo, antecedente último en la cadena causal de los accidentes.
- 2) Establecer un marco de análisis apropiado para entender su influencia basado en las teorías y estilos del liderazgo (apartado 3).
- 3) Identificar los principales gaps y cuestiones de investigación abiertas o sometidas aún a debate y controversia en los estudios sobre liderazgo y cultura de seguridad (apartado 4), proponiendo un mo-

delo explicativo de la conducta de seguridad que permita avanzar en su investigación (apartado 5). Estos últimos apartados del trabajo concentran sus principales contribuciones. En ellos se explicitan líneas futuras de investigación y se esbozan gráficamente las hipótesis que deben verificarse para contrastar el modelo explicativo propuesto.

La revisión bibliográfica realizada abarca un total de 54 artículos que incluyen como tema de estudio el liderazgo y la cultura de seguridad publicados desde el año 2000 en revistas especializadas (*Safety Science*, *Journal of Safety Research*, *Accident Analysis & Prevention*, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, *Journal of Cleaner Production* o *Journal of Occupational Health Psychology*, entre otras). Una búsqueda en la Web of Science muestra que ambos temas han sido tratados de manera conjunta en 129 artículos publicados entre 1995 y 2016, habiéndose publicado aproximadamente la mitad de ellos en los últimos 5 años.

Entre los estilos de liderazgo más tratados en la literatura destacan sin duda los modelos transaccionales y los transformacionales, que han sido tema de estudio en 2.524 artículos publicados en campos de conocimiento muy diversos durante los últimos 20 años (el 53% de ellos en los últimos 5 años). No obstante, el denominado liderazgo auténtico está adquiriendo especial relevancia en los últimos tiempos: se han publicado 247 artículos que tienen como tema de estudio este estilo

de liderazgo, el 73% de ellos en los últimos 5 años. Su incorporación al ámbito de la seguridad puede ayudar a comprender los mecanismos a través de los cuales la dirección es capaz de influir de manera más eficaz y positiva sobre la cultura de seguridad de las organizaciones.

1. LA CULTURA DE SEGURIDAD Y SUS ELEMENTOS INTEGRANTES

La investigación sobre la cultura de seguridad se ha centrado prioritariamente en identificar y medir sus componentes principales (Figura 1) con el propósito de explicar las conductas de seguridad de los empleados más que los resultados consecuencia de éstas.

Dos factores influyen en primera instancia sobre el comportamiento de seguridad: el sistema de gestión de la seguridad laboral y el clima de seguridad que impera en la organización. El sistema de gestión está integrado por las políticas, prácticas, planes y medios dispuestos por la empresa para eliminar o reducir los riesgos derivados del trabajo. Suele tomar como referencia normas o estándares internacionales, como la OHSAS 18001, que ofrecen la posibilidad de certificación y son auditables. El clima de seguridad puede entenderse como la actitud colectiva de una organización hacia la seguridad. Es un fenómeno psicológico, temporal y mutable, relativo a las actitudes, creencias y percepciones de los empleados sobre la seguridad.

La interacción de ambos factores, sistema de gestión y clima de seguridad, con la conducta de los empleados determina los resultados en materia de seguridad laboral observables en una organización. La investigación empírica ha permitido cono-

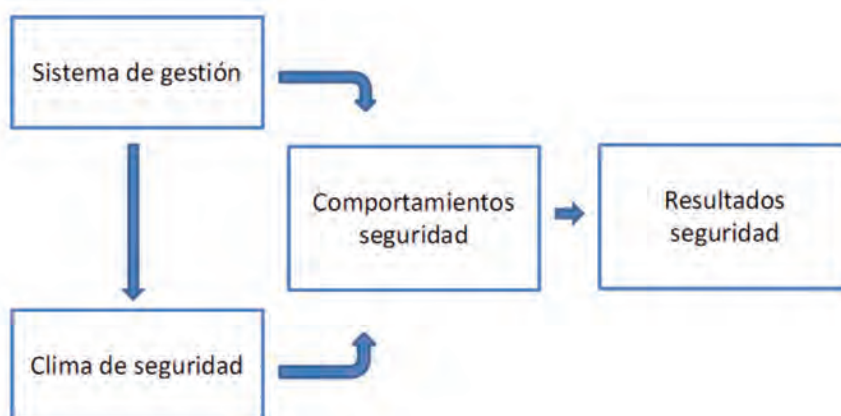


Fig. 1: Componentes de la cultura de seguridad laboral

cer mejor sus interrelaciones. Hoy sabemos por ejemplo que el clima de seguridad es un buen predictor de la conducta segura o insegura de los empleados [1].

Más recientemente, el interés se ha dirigido hacia los factores moderadores y antecedentes de estas relaciones, especialmente hacia el factor directivo, como anticipábamos en la introducción. Con este término nos referimos tanto a las habilidades directivas para dirigir y gestionar la seguridad de las operaciones y reducir los riesgos laborales, como al modo en que la dirección comunica su compromiso con la seguridad laboral e induce un elevado estado o nivel motivacional entre los empleados.

En el mundo anglosajón la importancia del factor directivo se resume en la conocida expresión "*setting the tone at the top*": la dirección tiene que marcar la pauta. Las teorías directivas y la literatura de gestión siempre han insistido en la importancia del liderazgo directivo para el éxito del cambio organizativo y para optimizar los resultados organizacionales. Pero, más allá de esta comprensión común sobre la importancia de la dirección, si queremos conocer cómo se produce su influencia, con qué eficacia y con qué resultados, necesitamos unos fundamentos teóricos adecuados. Las teorías psico-sociológicas del liderazgo y los estilos de liderazgo pueden realizar una valiosa contribución en este sentido.

2. LIDERAZGO Y CULTURA DE SEGURIDAD

El término liderazgo es de difícil e imprecisa conceptualización. Su definición depende del objetivo y del marco teórico en el que se sustenta la investigación de que se trate, ya sea éste la sociología, la psicología social, el estudio del comportamiento organizativo o la literatura directiva. Según el planteamiento original de Burns en su estudio sobre los líderes políticos, los líderes influyen sobre la conducta de sus seguidores a través de dos vías, la transaccional y la transformacional [2]. La perspectiva transaccional concibe la interacción líder-seguidor como un intercambio en el que cada parte intenta satisfacer sus intereses cumpliendo sus obligaciones. El líder transaccional opera con dos instrumentos básicos: 1) la normalización de procesos y/o resultados, para aclarar lo que hay que hacer a fin de ser recompensado, y 2) la retribución contingente, para incentivar su logro. Establece objetivos y define estándares, normas o comportamientos deseables; supervisa su

cumplimiento; analiza las desviaciones; proporciona retroalimentación correctora a los empleados, y, finalmente, retribuye los resultados o comportamientos observados.

El líder transformacional quiere ir más allá del cumplimiento logrado mediante instrumentos de motivación extrínseca. Dirige, actúa y comunica para concienciar a sus seguidores de la importancia de los resultados deseados. Estimula conductas innovadoras y creativas entre sus seguidores, que se ven impulsados a dar lo máximo de sí, más allá de lo esperado. Estos líderes consiguen transformar actitudes, creencias y valores, de modo que sus seguidores trascienden sus propios intereses por el interés superior del grupo.

La evidencia disponible en el ámbito de la investigación sobre seguridad ocupacional constata la influencia positiva del liderazgo transformacional. Así, los resultados de los estudios de Barling *et al.* [3] y Zohar [4], entre otros, permiten concluir que este estilo de liderazgo influye positivamente sobre el clima de seguridad, contribuye a concienciar sobre la importancia de la seguridad y reduce los accidentes y los daños en el trabajo.

Investigaciones más recientes, como las realizadas por Innes *et al.* [5] o Koster *et al.* [6], aportan evidencia adicional y ofrecen nuevas perspectivas sobre la influencia positiva del liderazgo transformacional, destacando que éste, además de fomentar el cumplimiento de las normas de seguridad, también genera conductas de ciudadanía organizacional: los empleados se conciencian de la importancia de la seguridad y la valoran como un bien en sí mismo (motivación intrínseca), responsabilizándose de su propia seguridad y también de la seguridad de los demás (motivación trascendente). La evidencia sobre la eficacia del liderazgo transaccional y los incentivos a la seguridad es, como veremos, más contradictoria.

3. CUESTIONES PENDIENTES

La investigación sobre liderazgo y seguridad ha ofrecido interesantes y valiosos resultados, pero quedan pendientes aún importantes cuestiones no resueltas, entre las que cabe reseñar aquellas que se centran en los dos temas siguientes.

EL LIDERAZGO AUTÉNTICO

Un gap importante en la investigación es el insuficiente conocimiento que aún tenemos sobre cómo induce el líder un nivel superior de motivación o concienciación hacia la seguridad, cuestión fun-

damental por sus consecuencias prácticas para las estrategias de intervención. La teoría del denominado liderazgo auténtico puede resultar útil a estos efectos [7]. De acuerdo con esta reciente corriente de la psicología positiva, el líder auténtico posee una clara conciencia de los principios y valores que orientan su decisiones, también del contexto en que las toma (perspectiva moral); procesa sistemática y equilibradamente la información relevante para decidir (explora alternativas, acepta la participación de los empleados, contrasta información y propuestas); expresa lo que realmente conoce, piensa o cree (transparencia relacional) y actúa con arreglo a todo ello. El líder auténtico es percibido así por sus seguidores como alguien que actúa con transparencia y de forma consistente con los valores y principios que sostiene.

El liderazgo auténtico induciría un nivel superior de motivación y compromiso con la seguridad a través de procesos de identificación personal y social: el seguidor se identifica con el líder y con la organización, desarrollando simétricamente el mismo nivel de concienciación y autorregulación de la conducta de seguridad que percibe en el líder. Además, un liderazgo auténtico promueve en los empleados una mayor perseverancia, resiliencia, optimismo y eficacia, elementos integrantes del denominado capital psicológico. Ese mayor, mejor o más positivo capital psicológico favorece también actitudes y conductas focalizadas en la prevención y una mayor concienciación sobre la importancia de los comportamientos seguros, contribuyendo igualmente a crear un clima de seguridad óptimo.

Hay similitudes entre el liderazgo auténtico y el liderazgo transformacional; pero también diferencias. El liderazgo transformacional apela a las cualidades carismáticas e inspiracionales del líder y a la atención que éste presta a las necesidades individuales de sus seguidores para lograr un rendimiento superior, mientras que el liderazgo auténtico confiere más relevancia a la autenticidad y a los aspectos éticos y morales del líder, que se manifiestan a través de una conducta ejemplar y transparente.

La eficacia del líder puede ser alta si su autenticidad también lo es, y ello con independencia de su carisma o potencia inspiracional. La autenticidad y la capacidad transformacional, además de ser rasgos o cualidades diferentes, también pueden influir de forma diferente sobre el capital psicológico, sobre la conducta individual y sobre los resultados organizacionales. Es-

tas cuestiones no tienen respuesta aun en la investigación empírica sobre liderazgo y seguridad laboral.

LA EFICACIA DEL LIDERAZGO TRANSACCIONAL

Los incentivos a la seguridad se han considerado tradicionalmente como una buena práctica en materia de seguridad laboral. Encontramos en la literatura casos de estudio sobre prácticas de gestión de la conducta (*behavioral safety management*) e incentivos a la seguridad en organizaciones concretas; pero apenas si se han realizado estudios a nivel agregado, con muestras multisectoriales, y en estos casos la evidencia sobre la eficacia de los incentivos es contradictoria [8]: algunos estudios indican que los incentivos económicos pueden aumentar la motivación y mejorar la seguridad, mientras otros no encuentran influencia o incluso encuentran una influencia negativa.

Dos posibles hipótesis podrían ayudar a comprender qué hay tras estas observaciones. La primera de ellas tiene que ver con la función de los incentivos a la seguridad. La segunda con posibles interacciones complejas de estos incentivos con las políticas y prioridades fijadas en otros ámbitos de la gestión y dirección empresarial.

Función de los incentivos a la seguridad. Esta hipótesis contempla la posibilidad de fallos en el funcionamiento de los incentivos o en los indicadores utilizados para medir los resultados de seguridad laboral. Es lo que típicamente se produce cuando se prima la ausencia de accidentes: los trabajadores optan por no informar sobre ellos para no perder sus primas y ocultan incidentes cuya evaluación puede ser crítica para evitar accidentes de mayor entidad. También hay un fallo cuando el

logro de una prima o bonus colectivo por buenos resultados de seguridad laboral depende de no superar un determinado umbral o número de accidentes. Superado éste, se pierde el bonus, y con él el incentivo a extremar la prevención o la supervisión mutua entre compañeros.

Los incentivos a la seguridad no deberían estar ligados a indicadores de resultados como el número de accidentes, sino a los comportamientos requeridos para lograr esos resultados, como la participación en actividades de formación de seguridad, en la identificación de riesgos o la realización de sugerencias viables para prevenir los riesgos. Debe destacarse además que hay poco desarrollo teórico y poca evidencia empírica sobre qué incentivos pueden ser más efectivos, bajo qué condiciones y sobre la propia sostenibilidad de sus efectos.

Interacciones complejas o falta de alineación entre las políticas y objetivos de la empresa. El comportamiento del trabajador está influido también por las políticas y objetivos de la empresa. Si tiene razones para creer que ésta no va a cumplir sus compromisos en materia de prevención, porque otorga mayor prioridad al logro de otros objetivos de producción, productividad o coste, ofreciendo incentivos de mayor poder al logro de los mismos, puede que no cumpla los procedimientos de prevención y se vea impelido por el contrario a cometer actos inseguros. Por ello es importante que exista una consistencia interna entre los incentivos de seguridad, los objetivos e incentivos en el área de producción y las políticas de recursos humanos (selección, formación, retribución, promoción).

El análisis integrado de la gestión de riesgos laborales y las políticas de personal es un campo de investigación relati-

vamente inexplorado y prometedor. Existe evidencia escasa y hasta cierto punto contradictoria. Así, la investigación de los años 90 sobre los denominados sistemas de trabajo de alto rendimiento ("*High-Performance Work Systems*") ofreció una amplia evidencia de sus efectos positivos sobre los resultados organizacionales. Sin embargo, pronto aparecieron otros estudios que mostraban que estas prácticas generaban inseguridad laboral, insatisfacción y estrés [9]. Por el contrario, Zacharatos *et al.* [10] concluyen que los sistemas de trabajo de alto rendimiento están asociados con una mejora de la seguridad laboral.

4. PROPUESTA DE UN MODELO EXPLICATIVO DE LA CONDUCTA DE SEGURIDAD LABORAL

Las cuestiones planteadas en el apartado anterior deben abordarse en un marco teórico más amplio, como el que se propone en el modelo representado en la Figura 2. Este modelo integra el conjunto de factores que constituyen la cultura de seguridad de una organización y aquellos otros que son susceptibles de influirla o condicionar sus resultados. Muestra las hipótesis básicas de investigación relativas a las relaciones existentes entre ellos. Estas hipótesis se han elaborado teniendo en cuenta la revisión de la literatura realizada.

El modelo pretende explicar la conducta de seguridad de los empleados diferenciando dos dimensiones del comportamiento relacionado con la seguridad laboral: cumplimiento y participación. La primera se refiere al grado en que los empleados cumplen las normas y procedimientos de seguridad. La segunda a su iniciativa o proactividad para mejorarla. El cumplimiento mejora la seguridad individual, mientras

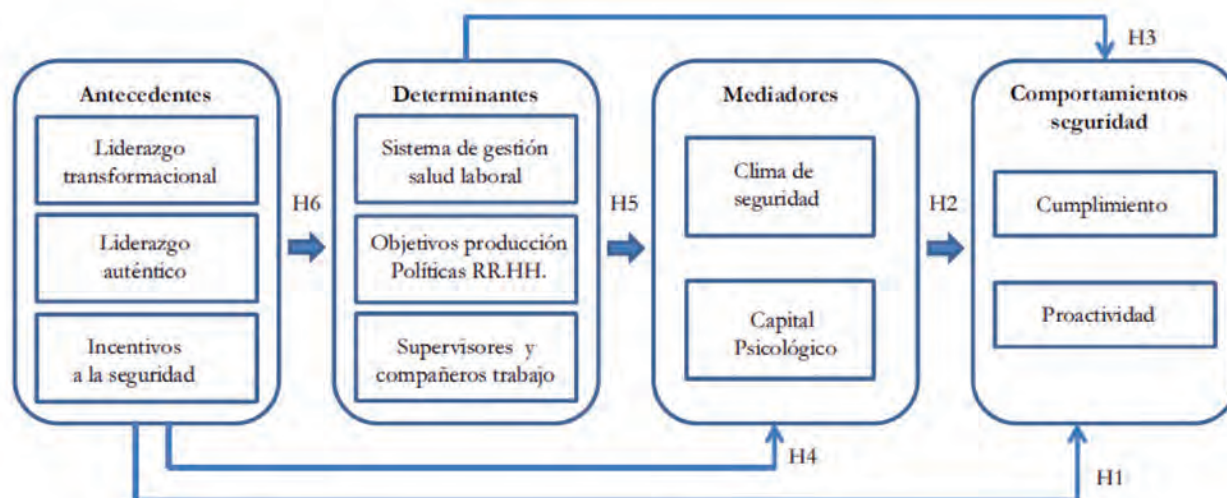


Fig. 2: Modelo explicativo-predictivo de la conducta de seguridad laboral

que la participación busca mejorar la seguridad de toda la organización. Cumplir supone desempeñar un rol de mínimos. Participar exige iniciativa, proactividad y voluntariedad para ir más allá del cumplimiento formal. La distinción es importante pues los factores antecedentes, mediadores y determinantes considerados en el modelo podrían afectar de forma diferente a ambas dimensiones del comportamiento de seguridad de los empleados.

En el modelo representado en la Figura 2 el liderazgo de la alta dirección se posiciona como antecedente último de la cultura de seguridad laboral actuando a través de tres vectores principales: capacidad transformacional del líder, autenticidad e incentivos. Por estas vías la dirección podría afectar directamente al comportamiento de seguridad de los empleados (hipótesis H1). Esta primera hipótesis puede subdividirse en cuestiones de investigación más específicas, para verificar si las diferentes dimensiones del comportamiento se ven influidas con signo e intensidad también diferente dependiendo del estilo de liderazgo. Otra cuestión que debe verificarse es la posible interacción o complementariedad existente entre los diversos estilos de liderazgo.

La hipótesis H2 se refiere a la influencia directa de factores cognitivos y psicológicos sobre el comportamiento de seguridad, factores que tienen que ver con la percepción del clima de seguridad existente en la organización y con el capital psicológico de sus miembros. La hipótesis H3 sostiene que el comportamiento de seguridad de los empleados está determinado también por factores situacionales objetivos tales como el nivel o la calidad del sistema de gestión de la salud y la seguridad laboral implantado, la coherencia interna entre las políticas de seguridad, producción y RRHH o el rol (control, información) que desempeñan supervisores y compañeros de trabajo.

Las hipótesis H4 y H5 se refieren al efecto moderador del clima de seguridad y del capital psicológico. El capital psicológico de los empleados y su percepción compartida sobre los factores determinantes y antecedentes modulan la influencia de éstos sobre sus actitudes y conductas de seguridad.

Finalmente, la hipótesis H6 hace referencia al efecto moderador de los factores situacionales objetivos sobre la influencia del estilo o de los instrumentos de liderazgo. Así, el efecto de los incentivos a la seguridad puede verse disminuido si éstos entran en contradicción con otras políticas u objetivos en el ámbito de la

producción. Por otra parte, la actuación supervisora de los mandos intermedios y la influencia de los compañeros de trabajo puede condicionar igualmente el efecto del estilo de liderazgo.

5. CONCLUSIONES

Los accidentes de trabajo no pueden atribuirse exclusivamente a aspectos técnicos o al error humano. Toda intervención para mejorar la seguridad laboral que no considere la relación interactiva entre liderazgo, factores situacionales (riesgos inherentes a las tareas, tecnologías y condiciones de trabajo; eficacia de los sistemas de gestión; influencia de supervisores y compañeros e interacción con otras áreas funcionales y ámbitos de dirección), psicológicos (clima de seguridad, capital psicológico) y conductas de seguridad (cumplimiento, proactividad) está condenada al fracaso. El estudio de las interacciones entre estos elementos es un campo aun hoy relativamente inexplorado, pero con mucho potencial y trascendencia en la prevención de riesgos laborales.

Este trabajo se ha elaborado a partir de una revisión de la investigación actual sobre cómo ciertas formas de liderazgo crean unas condiciones favorables e inculcan un sentido de responsabilidad por la seguridad en los empleados, reduciendo los riesgos y accidentes. La revisión de la literatura ha permitido identificar contradicciones en la evidencia disponible y cuestiones no resueltas, así como posibles líneas de investigación a seguir para avanzar en su estudio. Una de ellas pasa por incorporar nuevos conceptos al análisis de la conducta de seguridad, como el liderazgo auténtico o el capital psicológico, viendo si ello contribuye a mejorar la comprensión de los mecanismos a través de los cuales el liderazgo de la dirección es capaz de inducir un nivel mayor de cumplimiento y proactividad. Por otra parte, es igualmente relevante determinar cómo optimizar el funcionamiento de los incentivos a la seguridad, valorando su eficacia en el contexto de las políticas y objetivos dominantes en otros ámbitos de la organización (producción, recursos humanos).

El modelo propuesto proporciona un marco teórico apropiado para analizar estas cuestiones desde una perspectiva integral, que encuentre un contexto ideal para su contraste en aquellas actividades en las que la seguridad laboral o el control de los riesgos derivados del error humano son aspectos críticos (transporte, energía, servicios de urgencia o industrias de proceso, por ejemplo).

PARA SABER MÁS

- [1] Zohar D. "Thirty years of safety climate research: reflections and future directions". *Accident Analysis and Prevention*. 2010. Vol.42-5. p.1515-1522. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2009.12.019>.
- [2] Burns JM. *Leadership*. Harper Et Row. New York. 1978. Bass y Avoilo extendieron el trabajo original de Burns desarrollando los instrumentos psicométricos necesarios para medir y estudiar el estilo de liderazgo y su influencia sobre el comportamiento de los seguidores. Véase Bass BM, Bass R. *The Bass Handbook of Leadership: Theory, Research, and Managerial Applications*. Free Press. New York. 2008.
- [3] Barling J, Loughlin CA, Kelloway EK. "Development and test of a model linking safety-specific transformational leadership and occupational safety". *Journal of Applied Psychology*. 2002. Vol.87. p.488-496. DOI: <http://dx.doi.org/10.1037/0021-9010.87.3.488>
- [4] Zohar D. "The effects of leadership dimensions, safety climate, and assigned priorities on minor injuries in work groups". *Journal of Organizational Behavior*. 2002. Vol.23-1. p.75-92. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/job.130>
- [5] Inness M, Turner N, Barling J, et al. "Transformational leadership and employee safety performance: A within-person, between jobs design". *Journal of Occupational Health Psychology*. 2010. Vol.15-3. p.279-290. DOI: <http://dx.doi.org/10.1037/a0019380>
- [6] Koster RBM, Stam D, Balk BM. "Accidents happen: The influence of safety-specific transformational leadership, safety consciousness, and hazard reducing systems on warehouse accidents". *Journal of Operations Management*. 2011. Vol.29-7-8. p.753-765. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jom.2011.06.005>
- [7] Eid J, Mearns K, Larsson G, et al. "Leadership, psychological capital and safety research: Conceptual issues and future research questions". *Safety Science*. 2012. Vol.50-1. p.55-61. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2011.07.001>
- [8] Mattson M, Torbiörn I, Hellgren J. "Effects of staff bonus on safety behaviors". *Human Resource Management Review*. 2014. Vol.24-1. p.17-30. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.hrmr.2013.08.012>
- [9] Godard J. "A critical assessment of the high-performance paradigm". 2004. *British Journal of Industrial Relations*. Vol.42-2. p.349-378. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-8543.2004.00318.x>
- [10] Zacharatos A, Barling J, Iverson RD. "High-performance work systems and occupational safety". *Journal of Applied Psychology*. 2005. Vol.90-1. p.77-93. DOI: <http://dx.doi.org/10.1037/0021-9010.90.1.77>

AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha recibido financiación del Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto de investigación "La cultura de seguridad en las empresas españolas: análisis de la incidencia de los factores sociales, organizativos y de gestión en la siniestralidad laboral", Ref.: ECO2012-36469.

El sector eléctrico desde su inicio hasta la segunda guerra mundial

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

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7947>

Desde tiempos remotos, conforme evolucionaba su capacidad intelectual y con ello la tecnología disponible, el hombre ha tratado de utilizar diferentes fuentes de energía. La utilización de la electricidad, tras el correspondiente periodo de estudio teórico y la consiguiente experimentación en el laboratorio, se inicia con espectáculos que sirven para la diversión del público [1].

Posteriormente, se trata de buscar un aprovechamiento práctico; se pasa, de esta forma, de la época de los científicos a la época de los ingenieros. Durante las décadas finales del siglo XIX se comienza a utilizar comercialmente la electricidad, lo cual permite sustituir a la máquina de vapor que era difícil de adaptar para usos domésticos y comerciales. En esta etapa inicial la electricidad tiene dos aplicaciones fundamentales [1]:

- Transmisión de información: telégrafo, teléfono y radiodifusión
- Transformación de la energía eléctrica: alumbrado, motor eléctrico, etc.

Durante la "*Primera Revolución Industrial*", movimiento surgido en Inglaterra a finales del siglo XVIII, se utilizaba el vapor y el carbón como fuente de energía. Este proceso provocó el cambio de paradigma de una sociedad agrícola a otra industrial, suscitando importantes transformaciones sociales, económicas y tecnológicas. Se establece una diferenciación con la "*Segunda Revolución Industrial*", proceso en que se sustituyó al vapor y al carbón por la electricidad y el petróleo como fuente de energía en los procesos industriales; estas nuevas fuentes de energía permitieron, con el paso del tiempo, su utilización en la vida cotidiana de los ciudadanos y provocaron cambios sociales de gran importancia. La propia industria de generación y distribución de energía eléctrica adquiriría unas proporciones espectaculares, convir-

tiéndose en algunos países en el sector de actividad industrial más destacado [2].

La electricidad aportaba flexibilidad, transmisibilidad y divisibilidad frente a la energía que originaba la máquina de vapor. Flexibilidad, porque se puede transformar en luz, calor o fuerza motriz. Transmisibilidad, porque se puede transportar a través de cables a cualquier lugar. Divisibilidad, porque se puede adaptar fácilmente a las necesidades del usuario. Por el contrario, la máquina de vapor era difícilmente adaptable porque el movimiento se trasladaba mediante transmisiones rígidas y poleas [3].

En distintos países europeos se han realizado extensas Historias de la electricidad como en el caso de Francia [4] e Italia [5]. Cabe destacar también los estudios sobre los aspectos tecnológicos que han influido en la configuración del sector eléctrico realizados por Hughes [6] y Gianetti [5, 7]. En España sobresalen especialmente los siguientes trabajos [2, 8-20]. Asimismo, se han realizado múltiples trabajos sobre la electrificación por sectores y por áreas geográficas. Sin embargo, falta un estudio en el cual se pueda aunar, de una forma clara y sencilla, las diferentes etapas históricas de la evolución del sector.

En esta investigación, el objetivo principal es realizar un recorrido histórico por el desarrollo del sector eléctrico hasta la Segunda Guerra Mundial. En este sentido se ha tratado de compendiar en un único trabajo su evolución, no sólo desde una perspectiva técnica sino también organizativa del sector. Es cierto que existen otros trabajos que se centran en el sector eléctrico, pero abordan estos aspectos de una forma individual, sin integrarlos en un mismo artículo. De esta forma, se trataría de proporcionar a los lectores interesados un punto de partida para conocer el sector, aportando bibliografía, puntos de interés, aclarar determinados aspectos que no se entenderían de forma aislada, etc. En ese recorrido, que se realiza de forma cronológica, se describen los diferentes avances que han ido surgiendo en este sector industrial. A lo largo del artículo se realizará un análisis de las etapas correspondientes al nacimiento y consolidación del sector

en el mundo occidental, efectuando una comparación con el progreso del sector en España. Se abordará, principalmente, el apartado de la generación y distribución de electricidad. Además, para el análisis histórico del sector eléctrico se utilizará el método analítico-sintético, evaluando los hechos históricos desde diversas perspectivas (tecnológicas, económicas...).

Para desarrollar este estudio, tras la presente introducción, se exponen los usos iniciales de la electricidad, explicando los primeros modelos de generación eléctrica y los modelos iniciales de mercado. Posteriormente, se describirá la etapa de consolidación, haciendo referencia a la implantación de un patrón basado en la generación hidroeléctrica y en la integración de mercados. Seguidamente, se tratará el tema de la necesidad de grandes inversiones y el auge de oligopolios. Para finalizar, se presentan las conclusiones y se hace alusión a futuros trabajos.

1. PRIMEROS PASOS DEL SECTOR ELÉCTRICO (1880-1914)

Hasta la Segunda Guerra Mundial, en el desarrollo del sector eléctrico, se pueden distinguir los siguientes hitos [5, 21]:

- Usos inaugurales de la electricidad (1880-1914).
- Consolidación de la generación hidráulica, integración de mercados, necesidad de inversión y creación de oligopolios (1914-1945).

Tras el inicio del uso comercial de la electricidad, las aplicaciones prácticas de la misma no pararon de crecer y extenderse. Sin embargo, podían distinguirse básicamente los siguientes usos: alumbrado, fuerza motriz (aplicando el motor eléctrico tanto en la industria como en la tracción en los medios de transporte) y la química (en hornos eléctricos y en la electrolisis) [3, 15]. Evidentemente todas estas aplicaciones no surgieron al mismo tiempo.

En los países occidentales, en el nacimiento del sector eléctrico, se observan una serie de rasgos globales comunes, ligados a la difusión de la tecnología. Fueron Alemania, los Estados Unidos e Inglaterra los países que maduraron la tecnología para la electrificación y su comercializaron. A continuación, extendieron su uso a otros países mediante la

financiación de proyectos en los mismos, haciendo de la electrificación un proceso global en el mundo occidental [4]. A pesar de esos rasgos globales comunes, se aprecian divergencias cuantitativas y cualitativas en los ritmos de desarrollo del proceso en los diferentes países. Esas diferencias vienen marcadas por la tecnología utilizada y por los recursos naturales disponibles, que pueden utilizarse como fuente primaria para obtener electricidad; estas cuestiones, afectan a la rentabilidad de los sistemas [22]. Cronológicamente, España siguió la evolución general de los países occidentales, aunque la intensidad de su desarrollo no fuera comparable [23].

1.1. PRIMEROS MODELOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA

En estos comienzos, en relación con la tecnología utilizada, se produce lo que se denominó "guerra de sistemas" o "guerra de corrientes". **Tesla**, aliado de *Westinghouse*, y **Edison**, representante de *General Electric*, se enzarzaron en disputas en defensa del empleo de la corriente alterna y continua. Edison había construido la primera central eléctrica comercial en Pearl Street, Nueva York, en 1882, decantándose por la utilización de corriente continua (Figura 1). En 1893, los responsables de la Feria Mundial de Chicago encargaron a la Westinghouse la iluminación de dicho evento; el coste de la iluminación era muy inferior al manejado en su proyecto por General Electric (de Edison). La corriente continua, que pretendía utilizar Edison presentaba una serie de inconvenientes, tales como la relación proporcional entre el aumento de la intensidad y el grosor de los conductores, la gran cantidad de energía que disipaba en forma de calor, así como los problemas para realizar transporte a larga distancia. El problema del transporte a largas distancias de la energía eléctrica se presentó en un principio tanto para la corriente continua como para la alterna; posteriormente se descubrió que cuanto mayor era la tensión, menor impacto tendrían las pérdidas. La aparición del transformador permitió a la corriente alterna cobrar ventaja sobre la continua, ya que en este tipo de corriente no existía la tecnología para realizar los cambios de tensión. Paradójicamente, en la actualidad, debido al desarrollo de la electrónica y de los convertidores, las redes de transporte de larga distancia están utilizando corriente continua.

Más tarde, Westinghouse recibió el encargo de la construcción de la planta hidroeléctrica de las cataratas Niágara (Figura 2), cuyo modelo (modelo Niágara,

de caudal) se tomó como referencia para la producción de energía hidroeléctrica y, de esta forma, la utilización de la corriente alterna se implantó como tecnología preponderante [24]. La central que se construyó en el río Niágara, y que empezó a funcionar en 1896, fue un compendio de los avances que en el campo de la electricidad se produjeron en América y Europa, y sirvió de modelo para posteriores procesos electrificadores [6].

La electricidad es una fuente de energía secundaria. Hay que tener en cuenta que hasta la construcción de la primera central nuclear, la electricidad se obtenía fundamentalmente utilizando carbón o agua. En esta etapa inicial, en los países pioneros que disponían de la tecnología necesaria, se puede distinguir, dependiendo de la abundancia de cursos fluviales aprovechables o grandes explotaciones carboníferas, entre dos modelos diferenciados de electrificación: el térmico y el hidráulico [6-8].

El modelo hidráulico se implantó en los países nórdicos (Suecia, Noruega y Finlandia), Italia y Suiza. Estos países emplearon la fuerza del agua de los ríos como fuente para producir electricidad. La orografía de estas naciones, con ríos caudalosos, cauces con gran desnivel y caudal regular, permitió la obtención hidráulica de electricidad para usos industriales intensivos

(electro-siderurgia y electro-química). Se ha calificado su electrificación como de desarrollo precoz, consumos intensivos y con redes eléctricas poco integradas.

La poca disponibilidad de carbón hizo que los gobiernos de estos países trataran de evitar su dependencia de carbón importado del exterior, y se volcasen en la producción hidroeléctrica. Por ello, el cambio de modelo energético en estos países no está exento de connotaciones nacionalistas, basados en la búsqueda de la independencia energética [5].

En la mayoría de estos países los rendimientos de los sistemas eran elevados y constituían islotes autosuficientes, con grandes infraestructuras de generación [7]. Su explotación se circunscribía únicamente a esa zona geográfica, sin constituir redes que permitieran la comercialización de la electricidad en otras zonas [5].

La aplicación de la electricidad y su utilización en algunos procedimientos químicos, posibilitó el desarrollo de estos sectores industriales claves para lo que se ha dado en llamar "*Segunda Revolución Industrial*" [25].

El modelo térmico se empleó en Alemania, los Estados Unidos e Inglaterra, naciones que disponían de importantes recursos carboníferos que se utilizaron como fuente para obtener electricidad, quemando dicho carbón en centrales tér-

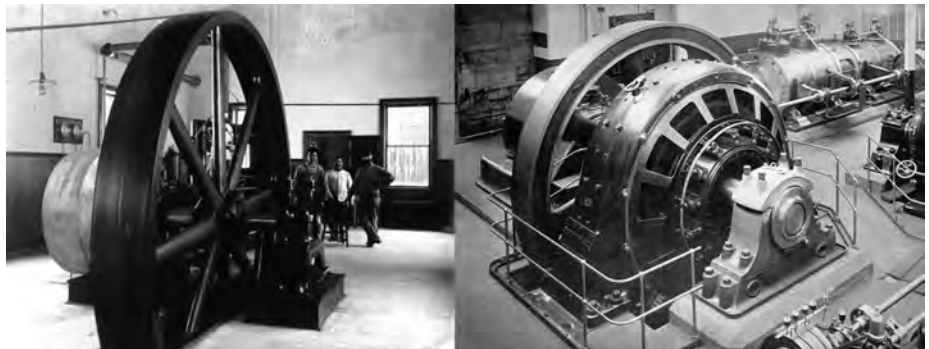


Figura 1: Ejemplos de las primeras dinamos con carácter industrial



Figura 2: Primera central hidroeléctrica de Niágara – Modelo de las sucesivas

micas para generar electricidad. Se describe este modelo como de electrificación más lenta, menos intensivas en consumos y con mayor tendencia a la integración. La disponibilidad de carbón hizo que se posergase la electrificación, por ello se dice que son sistemas eléctricos de despertar tardío. La gran disponibilidad de combustibles sólidos a precio reducido en Alemania e Inglaterra, unida a una reducida riqueza hidrográfica, hizo que la producción eléctrica fuera básicamente de carácter termoeléctrico [5, 7].

Mientras que los sistemas térmicos se construyeron en torno a grandes núcleos de generación y crecían abruptamente, los sistemas hidro-dependientes aprovecharon recursos acuíferos dispersos y de diverso tamaño y crecían de forma progresiva [26]. Antes de 1945, la inversión en construcción de redes de transporte se presentaba como alternativa a la construcción de grandes centrales de generación hidráulica. Esto habría llevado a optar por una u otra infraestructura, es decir, se debía elegir entre montar redes o construir presas. Donde se optó por subvencionar la construcción de presas, como en Italia y en algunas etapas en España, se dejó de lado la construcción de redes. En países término-dependientes, por el contrario, se habría agilizado la construcción de esas redes [5].

En Alemania, antes de la Primera Guerra Mundial, la producción hidroeléctrica se concentraba en la Baviera subalpina y en la Selva Negra [27]. En Inglaterra se situaba en la zona de los Highlands escoceses. En ambos casos eran regiones apartadas de los grandes centros industriales [28].

A pesar de encasillar a España dentro del modelo de desarrollo hidráulico, existen notables diferencias con el patrón anteriormente mencionado (precocidad, uso intensivo e industrial). El caso español se caracteriza por su lento desarrollo y su escaso uso intensivo, utilizándose básicamente la electricidad generada para iluminación. La utilización de la electricidad para estos fines se vio favorecida por la poca extensión de la red de iluminación por gas, y el retraso del proceso urbanizador en España [13]. La falta de carbones baratos y aprovechamientos hidráulicos adecuados para su explotación obstaculizaron, en buena medida, la implantación de industrias que utilizaban procesos electrolíticos y electro-térmicos. La carencia de una industria que necesitase de un consumo eléctrico intensivo puede justificar el comienzo tardío de la electrificación, y el bajo rendimiento del sistema suministrador [29].

1.2. PRIMEROS MODELOS DE MERCADO ELÉCTRICO

La inversión en infraestructuras eléctricas municipales atrajo gran cantidad de capital desde finales del siglo XIX. Compañías norteamericanas, británicas, suizas y, sobre todo, alemanas, fabricaban los equipos eléctricos, pero también se introdujeron en el mercado de la generación [3]. Algunas empresas europeas observando que sus mercados nacionales eran demasiado pequeños, extendieron sus negocios fuera de sus fronteras. Se constituyeron de esta forma numerosas empresas pequeñas, que generalmente eran de propiedad privada o municipal.

Inicialmente, la principal aplicación de la energía eléctrica fue la iluminación pública utilizando lámparas de incandescencia; sustituyendo, de esta forma, a la iluminación con gas. Una excepción es el caso de los mencionados países nórdicos, Suiza y norte de Italia en las que la aplicación más extendida fue la industria con consumos intensivos (electro-siderurgia y electro-química).

Los usos también se extendieron al sector del transporte en las ciudades. En 1879 se presentó en Berlín el primer tranvía eléctrico y 1890 en Londres la primera línea de metro. Se sustituía de esta forma la tracción animal en el transporte. La expansión de la utilización del motor eléctrico permitiría su utilización en la industria (talleres y fábricas) sustituyendo a la máquina de vapor. Una cuestión a tener en cuenta es que la propia industria eléctrica se convirtió en la mayoría de los países occidentales en un sector industrial fundamental, y sobresaliente, en cuanto a la cuantía de las inversiones que recibía.

En esta etapa el rendimiento de la generación térmica era mucho menor que la hidráulica. La térmica utilizaba básicamente la máquina de vapor; la fuerza del vapor empujaba un pistón cuyo movimiento se transmitía a un generador, comúnmente una dinamo; su rendimiento no aumentaría hasta el descubrimiento del ciclo de Rankine. En la hidráulica la fuerza del agua movía una turbina que transmitía su movimiento directamente a un generador. Las instalaciones, de reducido tamaño, se localizaban próximas al lugar donde se pretendía realizar la distribución. Las redes de distribución tenían, por tanto, un carácter local y, generalmente, circunscritas al ámbito urbano. Los primeros sistemas de distribución de electricidad utilizaban corriente continua suministrada por una o dos dinamos según se utilizaran dos o tres conductores. Algunas compañías utilizaban corriente alter-

na, que permitía suministrar electricidad a un área situada a mayor distancia del lugar de generación. Cabe destacar que en este período, no existía un sistema estandarizado y cada compañía utilizaba las variantes tecnológicas (tipos de corriente, voltajes y frecuencias) que estimaba más oportunas.

En cuanto a la financiación de las inversiones en el sector, a partir de 1880, los países de la periferia europea y de población reciente del mundo occidental, recibieron las inversiones de los países pioneros de la industria eléctrica. Los fabricantes de material electrotécnico, con apoyo de la banca de inversión internacional, se posicionaron en otros países, vendiendo o fabricando los productos que habían patentado, y entrando en la industria de generación eléctrica directamente o a través de filiales. Se creaba, de esta forma, una industria dependiente de la casa matriz [30]. A finales de la década de los 90 del siglo XIX, los países de la periferia europea, como Portugal, España o Rusia, con escasa o nula capacidad tecnológica en el campo de la electrotécnica, recibieron inversiones extranjeras, sobre todo alemanas [31].

En cualquier caso, en nuestro país, la inversión extranjera nunca llegó a superar el tercio de la inversión total en el sector y progresivamente fue cediendo paso a la inversión local. A diferencia de lo que había sucedido en el sector ferroviario y en la minería, en la electrificación española, el capital patrio fue preponderante [11].

En España, la utilización de la electricidad estuvo asociada al desarrollo del alumbrado público, aunque posteriormente, y de forma gradual, se extendió su uso para iluminación privada. En 1905 se contabilizaban 792 "fábricas de electricidad", pequeñas centrales térmicas ubicadas, por lo general, en el interior del casco urbano, que funcionaban utilizando como fuente de energía primaria el carbón o gas de alumbrado [14]. Se establecían, sobre todo en las pequeñas poblaciones con mercados de pequeñas dimensiones, monopolios de distribución en sus zonas de influencia. En las grandes ciudades, estas centrales se construyeron con la participación de filiales de empresas extranjeras, alemanas sobre todo (AEG, Siemens...), que aportaban la financiación y los equipos técnicos. Las grandes ciudades resultaban atractivas al inversor porque podían suponer una importante fuente de negocio e ingresos [10].

En definitiva, esta etapa de inicios y poca madurez del sector se caracteriza por la descentralización y fragmentación

de la producción. Solo en aquellas regiones, como el País Vasco o Galicia, con tradición de empleo de energía hidráulica para labores industriales (batanes, molinos...), se desarrolló en esta etapa la hidroelectricidad [9].

2. CRECIMIENTO DEL SECTOR. CONSOLIDACIÓN DE LA GENERACIÓN HIDRÁULICA E INTEGRACIÓN DE MERCADOS (1914-1945)

Una segunda etapa, de claro predominio hidroeléctrico, se generalizó a partir de la Primera Guerra Mundial. Asimismo, el sector comenzó a sobrepasar la esfera urbana y a crear redes de carácter regional; se tendieron redes de transporte eléctrico de larga distancia y se ampliaron las redes de distribución. El carbón y el gas alcanzaron, durante la guerra, precios demasiado elevados, lo que hizo rentable su sustitución por la hidroelectricidad; el tipo de generación que permitía ofrecer precios más competitivos a los consumidores [32]. Surgen en este sentido discrepancia en el alcance de la electrificación española. Se considera, por algunos autores, que España, antes de la Guerra Civil, había alcanzado el nivel de electrificación de los países más desarrollados de su entorno, gracias a la generación masiva de energía eléctrica de origen hidráulico [17]. Otros autores, consideran que la electrificación fue lenta si se establecen comparaciones con los Estados Unidos [12].

2.1. MODELO DE GENERACIÓN HIDRÁULICA

Desde aproximadamente 1905, el impulso electrificador cobra fuerza, debido a la utilización de la corriente alterna y del transformador. Estos dos avances técnicos permitieron llevar electricidad a las ciudades desde las lejanas centrales hidroeléctricas. Permitieron, en definitiva, realizar el transporte de esta energía a gran escala. Esta disponibilidad de electricidad favoreció su utilización en la industria manufacturera, la sustitución de la máquina de vapor y, por tanto, la sustitución del carbón como fuente de energía. De esta forma, se pudo proporcionar gran cantidad de energía, a un precio más barato, para su uso por los habitantes y las fábricas de los grandes núcleos urbanos. Las centrales generadoras ya no tenían que estar en la propia ciudad [9].

El paso de la electricidad de origen térmico a la electricidad de origen hidráulico se produjo entre 1910 y 1920, y este modelo se prolongaría hasta la década de

los sesenta del siglo XX, década en que se pudieron utilizar otros tipos de energía primarias para la generación (nuclear y nuevas formas de generación de origen térmico) [16].

A principios del siglo XX, las explotaciones hidráulicas se caracterizaban por utilizar presas de poca altura, debido a que aún no se habían desarrollado los materiales, ni el cálculo de estructuras adecuados para realizar construcciones mayores. Esto hacía necesaria la construcción de largos canales y tuberías con elevados desniveles, para que el agua dispusiera de la energía necesaria para mover las turbinas [33].

En el primer tercio del siglo XX, aparecieron nuevos materiales y se desarrollaron nuevos diseños de ingeniería que permitieron hacer presas de mayor altura y con mayor capacidad de almacenamiento, lo que permitió situar las turbinas y las centrales eléctricas al pie de la propia presa, sin que fuese necesario utilizar la anterior técnica de canales de derivación. La posibilidad de construir presas con capacidad para almacenar grandes masas de agua, hizo factible que el propio empuje provocado por la presión del agua almacenada al salir por un orificio, impulsara las turbinas.

Entre 1907 y 1913, en España las grandes ciudades comenzaron a recibir el suministro eléctrico de las centrales hidráulicas situadas a centenares de kilómetros. Se empezaron a construir grandes centrales hidroeléctricas y se tendieron redes de transporte más extensas de carácter interregional. De esta forma, se ponía en contacto una amplia oferta, proporcionada por las nuevas centrales, y la demanda, situada en los grandes núcleos urbanos. Esta nueva oferta proporcionaba energía a un coste menor [33].

2.2. NECESIDAD DE INVERSIÓN Y CREACIÓN DE OLIGOPOLIOS

La producción eléctrica pasó a necesitar grandes inversiones para la construcción de presas y redes de transporte y fue necesario acudir a la solicitud de grandes préstamos o, simplemente, los grandes bancos entraron directamente en la constitución de sociedades para la explotación comercial de la electricidad [33]. Se constituyeron grandes oligopolios que absorbieron o hicieron desaparecer a las pequeñas compañías en aquellas zonas que tenían un mayor interés comercial.

A partir de la segunda mitad de la década de los veinte del siglo XX, se produce una nueva oleada de inversión extranjera en los países periféricos, debido a la necesidad de disponer de enormes recursos

financieros para la construcción de presas hidráulicas y redes de transporte. Tras la derrota de Alemania en la Primera Guerra Mundial, los Estados Unidos lideraron esta financiación a través de una red de estructuras corporativas internacionales [30].

En la electrificación española, jugó un papel destacado la financiación de la banca industrial vasca, especialmente el Banco de Vizcaya. A principios del siglo XX, la banca industrial vasca reinvertió los beneficios obtenidos del desarrollo industrial previo, y de la repatriación de patrimonios americanos. El Banco de Vizcaya estuvo presente, directa o indirectamente, en la financiación del conjunto de las Hidroeléctricas (Ibérica, Española y Viesgo). Este conglomerado extendía sus mercados por el interior de la península, la zona Cantábrica y de Levante, salvo Cataluña. El Banco de Bilbao se embarcó en el proyecto de los Saltos del Duero, también conocido como "Sistema Duero", uno de los grandes hitos la electrificación española construido en la frontera hispano-portuguesa, con capacidad para producir un tercio del total de la electricidad que circulaba por las redes españolas en 1933; proyecto que se prolongó durante varias décadas, desde la constitución de la empresa en 1918, debido a dificultades diplomáticas, financieras y empresariales [34].

Tampoco se puede olvidar la contribución de otros bancos como el Urquijo, el Central o el Hispano-Colonial. El Banco Urquijo participó en la Unión Eléctrica Madrileña y en Hidroeléctrica del Cantábrico. Durante la década de los veinte consejeros del Banco Español de Crédito y del Banco Central se incorporaron a los Consejos de Administración de las principales hidroeléctricas. También se realizaron inversiones en el extranjero, como por ejemplo el Banco Hispano Colonial, el Banco de Vizcaya, y el Banco Urquijo en la CHADE (Compañía Hispano Americana De Electricidad) [34, 35]. La expansión de la hidroelectricidad es protagonizada por empresas de nuevo cuño, pero seguían perviviendo, sobre todo en Castilla, Extremadura y Andalucía, centrales aisladas que realizaban un papel relevante en el suministro de mercados que estaban al margen de los intereses de las grandes compañías [36].

En 1925 los consumos urbanos seguían suponiendo el 30% de la demanda total, lo que es muestra de la pervivencia de empleos tradicionales, pero no se puede olvidar que desde 1916 la utilización industrial había comenzado a encabezar los consumos eléctricos, suponiendo en 1925 el 50% de la totalidad [9].

3. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

La evolución del sector eléctrico está condicionada por los avances tecnológicos, pero, también, por consideraciones políticas y por las corrientes económicas. Una de las primeras decisiones técnicas que se tomaron, y, posteriormente, se aceptaron a nivel mundial, fue la utilización de la corriente alterna, no sin asistir a una confrontación con los defensores de la corriente continua.

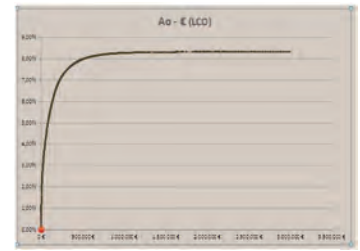
Asimismo, se asiste a la elección entre generación hidráulica y térmica. Conforme se desarrolla la tecnología necesaria, se construyen grandes embalses y redes de transporte, que necesitarán de grandes inversiones, lo que conllevará en muchos casos, la desaparición de las pequeñas "fábricas de electricidad" que habían sido pioneras en la electrificación. Se producirán transformaciones en el sector que afectarán a las siguientes etapas que se pueden observar en el desarrollo del mismo. En un trabajo posterior se hará un estudio similar al actual de la evolución del sector eléctrico a partir de la Segunda Guerra Mundial.

Se han intentado compendiar en este artículo diferentes ámbitos del sector eléctrico (tecnológico, económico...). Dentro de la dificultad de resumir todas estas facetas en un texto breve, se han expuesto las cuestiones más importantes en referencia al tema central de la investigación. Determinados aspectos que no se desarrollan en profundidad en el presente trabajo son motivo de estudios posteriores. Asimismo, una temática poco destacada hasta el momento, y que sería necesario profundizar, sería la referida a la industria que se ha dedicado a la fabricación de material eléctrico, especialmente en lo que se refiere a España.

PARA SABER MÁS

- [1] Aracil J. Fundamentos, método e historia de la ingeniería. 1ª edición. Madrid. Síntesis, 2010, 434 p. ISBN: 9788497567138
- [2] Maluquer de Motes J. (1992). "Los pioneros de la segunda revolución industrial en España: La Sociedad Española de Electricidad (1881-1894)". Revista de Historia Industrial. 1992. Vol. 2, P. 121-141
- [3] Sudriá C, Feliu G. Introducción a la historia económica mundial. 1ª Edición. Valencia. Universitat de Valencia. 2007, 545 p. ISBN 9788437067070
- [4] Morsel F, Caron F, Cardot F et al. Histoire de l'électricité en France 1ª Edición, París. Fayard. Tomo 1, 1991, ISBN 2213017803, Tomo 2, 1995 ISBN 2213027803, Tomo 3, 1996 ISBN 2213029121
- [5] 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 del ENEL ISBN 88420391
- [6] Hughes TP. Networks of Power: Electrification in Western society, 1880-1930. 1ª Edición. Baltimore and London. The Johns Hopkins University Press Baltimore, 1983. 474 p. ISBN 0-8018-2873-2
- [7] Giannetti R. La conquista della forza: risorse, tecnologia ed economia nella industria elettrica italiana (1883-1940). 1ª edición. Milán. Franco Angeli, 1985, 272 p. ISBN 9788820439378.
- [8] Bartolomé I (2005). "La red nacional y la integración de los mercados eléctricos españoles durante los años de entreguerras. ¿Otra oportunidad perdida?". Revista de Historia Económica - Journal of Iberian and Latin American Economic History. 2005. Vol. 23, 2, P 270-298
- [9] Bartolomé I. La industria eléctrica en España (1890-1936). Estudios de Historia Económica N° 50. 2007. Madrid. Banco de España, 2007, 165 p. ISBN 0213-2702
- [10] 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
- [11] Bartolomé I. "Cuando la electrificación venía del extranjero: la transferencia de tecnología y capital intra-periférica en la electrificación ibérica (1890-1940)" II Simpósio Internacional Eletrificação e modernização social, São Paulo, 27, 28 y 29 de mayo 2013
- [12] Antolín F. "Electricidad y crecimiento económico en España". Revista de Historia Económica - Journal of Iberian and Latin American Economic History. 1988. Vol. 6, 3, P 635-655
- [13] Antolín F. "Las empresas de servicios públicos municipales", en Historia de la empresa pública en España, 1ª edición. Madrid. Espasa-Calpe. 1991. 418 p. ISBN 84-239-6231-8
- [14] Nuñez Romero-Balmas, G. (1995): "Empresas de producción y distribución de electricidad en España (1878-1953)". Revista de Historia Industrial. 1995, Vol. 7, P 199-227
- [15] Aubanell AM. "La competencia en la distribución de electricidad en Madrid, 1890-1913" Revista de Historia Industrial. 1992, Vol. 2, P.143-171
- [16] 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
- [17] Sudriá C. "La electricidad en España antes de la guerra civil: Una réplica". Revista de Historia Económica - Journal of Iberian and Latin American Economic History. 1990, Vol. 8, 3, P. 651-660. DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/S021261090000241X>
- [18] Sudriá, C. "La industria eléctrica y el desarrollo económico en España", en, Electricidad y desarrollo económico: perspectiva histórica de un siglo, Hidroeléctrica del Cantábrico S.A. 75 Aniversario. 1ª edición. Oviedo. Hidroeléctrica del Cantábrico. 1990. 320 p. ISBN n.d.
- [19] Sudriá, C. "La restricción energética al desarrollo económico de España". Papeles de Economía Española. 1997. N° 73, P. 165- 188
- [20] Palacin 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
- [21] Barquin J. Energía: Técnica, Economía y Sociedad. 1ª edición. Madrid. Universidad Pontificia de Comillas 2004, 289 p. ISBN 84-8468-134-3
- [22] Wrigley EA. (1990). Continuity, chance and change: The character of the industrial revolution in England. 1ª edición. Cambridge. Cambridge University Press. 1990. 156 p. ISBN 9780521396578
- [23] Cayón F (2001), "Electricidad e historia: la perspectiva de un siglo", en TST: transportes, servicios y telecomunicaciones. 2001. TST 1. P 113-133
- [24] Alayo JC, Sánchez J. "La introducción de la técnica eléctrica" en Técnica e ingeniería en España: El Ochocientos: de los lenguajes al patrimonio Zaragoza. Prensa Univ/Real Academia Ingeniería/IFC. 2011. 832 p. ISBN 9788499111513
- [25] Devine W D. "Early developments in Electro-processing: New products, new industries", en Electricity in the American Economy: Agent of Technological Progress, Nueva York. Praeger 1990. 464 p. ISBN 978-0313275128
- [26] Turvey R. "Rates of Return, Pricing and Public Interest". Economic Journal 1971. Vol. 81, P. 489-501
- [27] Ott, H. "History of Electricity in Germany" en "1880-1980. Une siècle de l'électricité dans le monde" 1ª edición. París. Presses Universitaires de France. 452 p. ISBN 978-2-905821-03-4
- [28] Mortara G. Lo sviluppo dell'energia elettrica nel mondo" en Nel cinquantenario della società Edison 1884-1934. Vol III. 1ª edición. Milán. Istituto Grafico Raffaello Bertieri. 1934. 487 p. ISBN n.d.
- [29] Nadal J. "La consolidació pel baix dels adobs. 1914-1939" en Historia económica de la Catalunya Contemporània, Barcelona. Enciclopèdia Catalana. 1993. ISBN 84-7739-050-9
- [30] Hausman, W J, Hertner P y Wilkins M. Global electrification. Multinational Enterprise and International Finance in the History of Light and Power, 1878-2007, 2ª edición. Cambridge. Cambridge University Press .2011. 512 p. ISBN 9780521299008
- [31] Nelles HV. "Financing the Development of Foreign-Owned Electrical Systems in the Americas, 1890-1929: First Steps in Comparing European and North American Techniques". Business and Economic History. 2003. Vol. 1. P. 1-29 http://www.thebhc.org/sites/default/files/Nelles_0.pdf
- [32] Carreras A. "El aprovechamiento de la energía hidráulica en Cataluña, 1840-1920. Un ensayo de interpretación" Revista de Historia Económica - Journal of Iberian and Latin American Economic History. 1983. Vol. 1, 2, P 31 - 63. DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/S0212610900012660>
- [33] Chapa A. Cien años de historia de Iberdrola. Los hechos, Vol. 1, Madrid. Iberdrola, 2002, 301 p. ISBN 8493143448
- [34] Díaz P. (1998). "El proceso de creación de Saltos del Duero (1917-1935)". Revista de Historia Industrial, 1998 N° 13, P. 181-198
- [35] Valdaliso JM. "Los orígenes de Hidroeléctrica Ibérica, Hidroeléctrica Española y Saltos del Duero" en Un siglo de luz. Historia empresarial de Iberdrola. 1ª edición. Madrid. El Viso. 2006. 760 p. ISBN 8493310786
- [36] Garrués J. "Electricidad e industria en la España rural: el Irati, 1904-1961". Revista de Historia Económica-Journal of Iberian and Latin American Economic History. 2006. Vol. 24, 1, P. 97-138. DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/S0212610900000483>

La planificación de repuestos en el Ejército de Tierra. Implantación del método disponibilidad basada en la escasez (RBS)



Spare parts planning in the Spanish Army: readiness based sparing method (RBS) implementation



Juan Carlos García-Benito¹, María Luz Martín-Peña²

¹ ISDEFE. Ingeniería de Sistemas para la Defensa de España. C. Beatriz de Bobadilla,3 - 28040. Madrid. Tfno: + 34 914 115011. jcgarcia@isdefe.es

² UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS. Ciencias Jurídicas y Sociales. Paseo de los Artilleros - 28032 Madrid. Tfno: 34 914 889247.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8083> | Recibido: 09/06/2016 • Aceptado: 29/06/2016

ABSTRACT

• One of the goals of the Ejército de Tierra (Spanish Army, SA) Operations Department is to ensure the operational availability of its numerous fleets of weapons' systems. Specially in times of economic crisis, with severe budget cuts, achieving this goal becomes a challenge for the logistic engineering, which has to look for efficiency by implementing innovative projects to improve its supply chain.

Within the maintenance processes, the purchasing and distribution planning of spare-parts are considered the most relevant for the SA due to its influence in the operational availability and the enormous economical resources needed. Among other factors, the pattern of the spare parts demand, extremely irregular, erratic and with a large number of null periods, turns out that finding a good planning method is not a simple task.

This article analyzes the implementation of the adapted RBS method ("Reliability Based Sparing") which provides SA a useful solution to the above purpose, diverting the attention from the demand of each single spare part to the whole system and the available credit. Satisfactory results after the first year of operation are presented.

• **Keywords:** purchasing planning, distribution planning, spare parts, MRO, Defense, RBS, METRIC.

RESUMEN

La Dirección de Operaciones del Ejército de Tierra tiene entre una de sus metas, el asegurar la disponibilidad operativa de sus numerosas flotas de sistemas de armas. En épocas de crisis económicas, con fuertes reducciones presupuestarias, la consecución de dicha meta se convierte en un reto para la ingeniería logística, la cual debe recurrir a la búsqueda de la eficiencia mediante la implantación de proyectos innovadores que mejoren su cadena de suministro.

Dentro de los procesos de mantenimiento, destaca uno por su importancia y por los recursos económicos que necesita: la planificación de aprovisionamientos y distribución de repuestos necesarios en las acciones de mantenimiento. Debido a, entre otros factores, las características de su demanda muy errática e irregular con gran número de periodos con valores nulos, encontrar un buen método de planificación no es tarea sencilla.

Este artículo analiza el proceso de implantación de una adaptación del método RBS el cual resuelve el problema anterior des-

viando el foco de atención del repuesto al sistema al que pertenece, así como crédito disponible. Los primeros resultados, considerados como satisfactorios, tras un año desde su implantación, son presentados.

Palabras clave: planificación de compras, planificación distribución, repuestos, MRO, Defensa, RBS, METRIC.

1. INTRODUCCIÓN

En el sector servicios, al igual que en el industrial, la *dirección de operaciones* juega un papel fundamental, ya que es la encargada de gestionar y buscar la eficiencia en la ejecución de procesos clave de las organizaciones. El Ejército de Tierra-ET no es ajeno a lo anterior y su dirección de operaciones (DINFULOG-Dirección de Integración de Funciones Logísticas) es un elemento fundamental para la consecución de las metas de la organización. Prueba de ello es la reciente reestructuración que ha sufrido el Mando del Apoyo Logístico de ET, cambiando las tradicionales direcciones verticales (mantenimiento, compras y transporte) por una nueva dirección de operaciones horizontal (DINFULOG) que integra todos los procesos que regulan la cadena de suministro de ET. Esta importancia nace de una necesidad prioritaria: disponer de un gran número de sistemas en estado operativo para garantizar el cumplimiento de sus objetivos. En la actualidad, el número de conjuntos de utilización final usados por ET supera los 12.000, de los cuales, aproximadamente 2.500, se consideran sistemas principales o relevantes para el desarrollo de sus distintas misiones. Ante tan elevado número de sistemas de armas, la necesidad de conseguir una adecuada *disponibilidad operativa* se convierte en un reto exigente para la ingeniería logística. A esto, hay que añadir el habitual tamaño reducido de las flotas, la poca similitud entre los sistemas militares y civiles, su avanzada y muy especializada tecnología, el empleo heterogéneo de los mismos, la escasez de proveedores cualificados, así como la carencia, en muchos casos, de datos históricos fiables. Todo ello, provoca que los estudios de ingeniería necesarios para determinar el apoyo logístico de dichos sistemas adquieran especial relevancia a lo largo de su ciclo de vida.

Dentro de la ingeniería de apoyo logístico, destaca un proceso sobre los demás por su importancia y complejidad: se trata de la *planificación de aprovisionamientos de repuestos*. En síntesis, consiste en decidir qué repuestos comprar, en qué cantidad y en qué fecha, para poder hacer frente a las futuras necesidades de los talleres de ET. Además, la complejidad aumenta debido a varias

razones: en primer lugar la motivada por la legislación existente que regula la contratación en las Administraciones Públicas, la cual, unida a los dilatados plazos de entrega de la mayoría de los proveedores de Defensa, provoca que el horizonte de planificación sea muy largo. Por otra parte, en entornos de servicios en los que predomina el mantenimiento correctivo, la demanda suele ser bastante errática e irregular, causada por averías poco frecuentes, en flotas no muy grandes. En estos entornos, resulta especialmente complicado predecir la demanda de repuestos.

Todos estos hechos han provocado que, desde hace ya tiempo, la DINFULOG haya emprendido numerosos proyectos para mejorar su método de planificación, empleando planteamientos científicos cada vez más sofisticados.

En paralelo, existe otro objetivo largamente perseguido: se trata de relacionar la disponibilidad operativa de la familia de sistemas y el gasto en compra de repuestos: curva DO (Ao - Availability Operational)-€ (Fig.1).

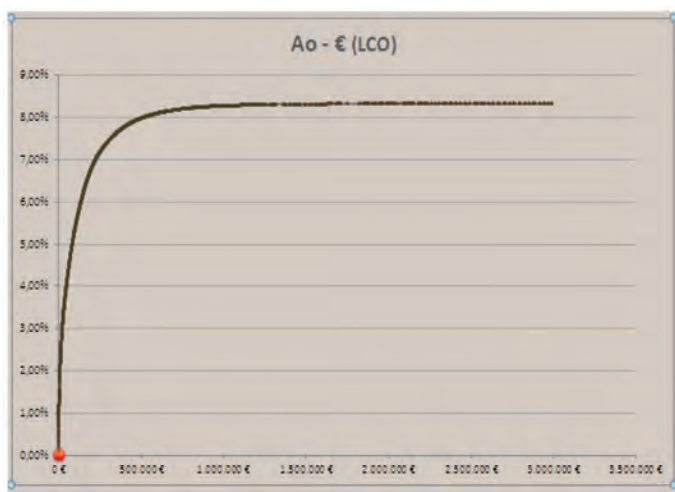


Fig. 1: Relación entre disponibilidad operativa (Ao) e inversión en repuestos

Este conocimiento es clave para realizar, de la manera más eficiente, el proceso de presupuestación y reparto de créditos de mantenimiento entre las distintas familias de sistemas de armas.

Como respuesta a estas dos necesidades, en 2012 se constituyó un Grupo de Trabajo cuya misión era encontrar un método de planificación de repuestos idóneo para ET. Al final de sus trabajos, se concluyó que el método más adecuado era el método RBS (Readiness Based Sparing/Disponibilidad Basada en la Escasez - ver Sherbrooke[1]).

De esta forma, este artículo revisará la literatura existente al respecto, presentará el modelo empleado en ET incidiendo en las diferencias con modelos RBS estándar y los resultados obtenidos tras un año de implantación.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA I

Aunque en el sector de Defensa el método RBS es conocido como tal, en el mundo académico es conocido por METRIC (Multi Echelon Technique for Recoverable Item Control/Técnica Multi Escalón Para Control Artículos Recuperables). Fue creado por Sherbrooke[2] para calcular el nivel de stock a mantener en un sistema de dos escalones. Posteriormente, Muckstadt[3] hizo una ampliación del método conocida como MOD-METRIC en la que se consideran los distintos niveles de configuración del sistema, decidiendo cuál de ellos interesa almacenar, con el inconveniente que era muy complejo de calcular. Fue otra vez Sherbrooke[4] quien

mejoró el método ganando precisión en el cálculo de faltantes esperados, y en velocidad de cálculo, llamándose al nuevo método VARI-METRIC.

Desde entonces hasta la actualidad, las aportaciones al método han sido numerosas. Así, desde el punto de vista conceptual, una evolución posterior del modelo VARI-METRIC se puede encontrar en Gupta[5], donde se propone un modelo de dos escalones y multi-configuración para artículos reparables usando cadenas de Markov. Recientemente, en Chenyu[6] se propusieron técnicas para estimar el tipo de distribución y sus parámetros usados en el modelo.

También a lo largo de los últimos años, se han ido añadiendo restricciones adicionales al modelo. Así, Díaz[7] considera limitada la capacidad de los talleres y Song[8] incorpora otros factores como la canibalización, envíos laterales y de emergencia, capacidad y política de mantenimiento.

Desde el punto de vista del rendimiento del cálculo, varios han sido los trabajos académicos. En este sentido es interesante destacar el estudio de Nowicki[9] el cual analiza la eficiencia de todos los algoritmos relacionados con METRIC y demuestra como la complejidad del problema necesita de métodos aproximados. De todos los algoritmos, el análisis marginal propuesto por Sherbrooke[4], proporciona soluciones cercanas al óptimo y con muy buenas medidas de rendimiento.

Basten[10] realiza el primer trabajo donde integra en el método METRIC el cálculo de número de sistemas finales redundantes, considerando el tamaño de la flota como una variable de decisión. En algunos escenarios, conseguir la operatividad marcada sólo se puede conseguir con una flota redundante que entre en servicio cuando se produzca la entrada en taller de un sistema operativo.

Otro área de desarrollo del método METRIC ha sido los trabajos por incorporar al modelo análisis LORA (Level Of Repair Analysis), los cuales son usados en el sector MRO para decidir entre aquellos artículos que tienen la capacidad de ser reparados, cuáles interesa ser reparados y en qué escalón. Basten[11] integra en METRIC un análisis LORA mediante un algoritmo interactivo que proporciona soluciones cercanas al óptimo.

Aunque METRIC se aplicó primeramente en el mundo de la defensa, también fue rápidamente aplicado al mundo civil, en especial al mantenimiento de aviones de aerolíneas comerciales. Las referencias Chenyu[6] y Van Jaarsveld[12] exponen casos reales de aplicación de METRIC al sector civil aeronáutico.

El presente artículo aporta a la literatura anterior la descripción de un caso real de implantación del método RBS en un entorno de mantenimiento de flotas del sector de Defensa, ya que no son muchas aquéllas que traten el tema, y máxime aportando resultados reales. De hecho no existe ninguna referencia reciente que aporte resultados reales tras su aplicación en entornos de Defensa.

3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

A diferencia de otros métodos tradicionales, el método RBS no se ocupa de estimar la demanda futura de cada repuesto, sino que, al contrario, clasifica todos los repuestos que pertenecen al sistema de armas, priorizándolos según la ganancia de disponibilidad operativa que produciría la adquisición de una unidad de inventario de cada uno de ellos.

De esta forma, dado un crédito a invertir en la adquisición de repuestos, se puede conocer, aplicando el método RBS, aquellos repuestos que proporcionan la mayor disponibilidad operativa posible hasta completar dicho crédito. El método RBS, a diferencia

de otros, sobresale por la sencillez de sus fundamentos. De forma resumida, comienza demostrando que, desde el punto de vista de la gestión del repuesto, "aumentar la disponibilidad operativa del sistema de armas es equivalente a reducir los faltantes esperados en el próximo periodo de planificación" (ver Smith[13]). Para ello, para un determinado repuesto perteneciente a un sistema de armas, se formula sus faltantes esperados (EBO - Expected Backorders - Faltantes Esperados) como la esperanza matemática de que la demanda sea mayor que el stock:

$$EBO(s) = \sum_{x=s+1}^{\infty} (x - s)Pr\{D = x\} = Pr\{D = s + 1\} + 2Pr\{D = s + 2\} + 3Pr\{D = s + 3\} + \dots \quad (1)$$

Dónde:

- s : stock actual del repuesto.
- Pr{D=x}: probabilidad de que la demanda del repuesto en todo ET en el horizonte de planificación sea igual a "x".

Seguidamente, RBS plantea que, el método de planificación óptimo buscado, será aquél que calcule la cantidad a comprar de cada repuesto del sistema de armas "s_i" de forma tal que se minimice los EBO totales del sistema de armas sin sobrepasar el crédito asignado "C". Analíticamente (ver Sherbrooke[1]):

$$\begin{aligned} \min_{(s_1, s_2, \dots)} & EBO(s_1) + EBO(s_2) + EBO(s_3) + \dots \\ \text{con } & c_1s_1 + c_2s_2 + c_3s_3 + \dots \leq C \end{aligned} \quad (2)$$

Dónde "c_i" es el precio unitario de adquisición del repuesto "i".

Para tal fin, primeramente se debe demostrar la separabilidad de la función objetivo (2) lo que permite manejar cada artículo s_i de forma independiente (ver Sherbrooke[1]). Después, la condición necesaria para conseguir un valor mínimo se logra aplicando el procedimiento estándar de incorporar un multiplicador de Lagrange - λ que multiplique al factor de la restricción e igualando su derivada parcial a cero. Al ser s_i una variable discreta, es equivalente a que su primera diferencia satisfaga:

$$EBO(s_i) - EBO(s_i - 1) + \lambda c_i \leq 0$$

$$EBO(s_i + 1) - EBO(s_i) + \lambda c_i > 0$$

O equivalentemente:

$$EBO(s_i) - EBO(s_i - 1) \leq -\lambda c_i < EBO(s_i + 1) - EBO(s_i)$$

$$Y \frac{EBO(s_i) - EBO(s_i - 1)}{c_i} \leq -\lambda < \frac{EBO(s_i + 1) - EBO(s_i)}{c_i}$$

Es decir, de existir un λ, cualquier s_i puede ser un mínimo de (2) si satisface la ecuación (3) (condición necesaria). La condición suficiente se logra al ser la ecuación (2) convexa (ver demostración en Sherbrooke[1]).

Por tanto, se llega al siguiente ratio (4) el cual asegura valores mínimos en la optimización (3) y valores decrecientes a aumentar el valor de s_i:

$$\text{Ratio RBS} = \frac{EBO(s-1) - EBO(s)}{c} \quad (4)$$

Este ratio es aplicado a todos los repuestos asociados al sistema de armas, unidad a unidad, de forma que, aquéllas que tengan un valor más alto, serán las que proporcionen mayor disponibilidad operativa al menor precio, siendo, por tanto, más aconsejada su adquisición. Ahora se entiende como, la predicción de la demanda futura de cada repuesto propuesta por métodos tradicionales de

planificación, queda relegada a un segundo plano, siendo ahora la priorización del repuesto el fundamento de este método.

El modelo RBS general se describe por las siguientes características:

1. La demanda de cada repuesto en cada taller/almacén se modela con distribuciones de Poisson.
2. Sólo contempla artículos reparables.
3. Se resuelve en un solo cálculo tanto la planificación de compras como de distribución (niveles o puntos de pedido en

escalones inferiores). En sistemas multi-escalón, una planificación de distribución correcta es clave para conseguir los objetivos de disponibilidad operativa marcados. De forma simplificada, un nivel o punto de pedido no es más que una cantidad de inventario con la que se dota al taller para que, cuando lo precise, disponga de él, sin tener que esperar al envío desde el almacén central; al agotarse se repone de forma automática desde el almacén central. Otra vez más, se trata de balancear la disponibilidad operativa frente a la inversión en repuestos: a más y mayores niveles de distribución menor es la espera por repuestos y por tanto, mayor la disponibilidad operativa prevista, pero requiere una mayor inversión en su adquisición.

4. No contempla envíos laterales entre almacenes para resolver faltantes.
5. No contempla baja de artículos reparables.
6. Todos los artículos tienen la misma criticidad.
7. La probabilidad de un fallo en un componente es independientes del fallo en otro.
8. Los tiempos de reparación de cada artículo son independientes entre sí y no presentan tiempos de espera de entrada en taller.

El modelo RBS implantado por ET, aporta al modelo original las siguientes adaptaciones, cuya explicación detallada y justificación se pueden consultar en [14]

1. Contempla todos los repuestos necesarios en el mantenimiento del sistema, reparables o no.
2. Distingue dos cálculos distintos: la planificación de compras y planificación de distribución, con dos curvas DO-~~C~~ distintas. Dos razones han provocado esta necesidad:
 - a. Se quiere que el proceso de reparto de créditos entre las distintas familias sean controlado por el gestor aportando valor según su experiencia. Así, cinco son los conceptos logísticos que hay que tener en dicho proceso: compra de repuestos para necesidades de mantenimiento correctivo (RBS compras), compra de repuestos para constitución de puntos de pedido en escalones inferiores (RBS distribución), compra de repuestos para mantenimientos programados (se pueden retrasar o minorar el uso de los sistemas afectados), compra de faltantes activos (con créditos ajustados, para artículos caros, no todos sus faltantes se tienen que resolver ya que pondría en peligro la compra de otros artículos más baratos con la consiguiente aparición de más faltantes en el futuro próximo) y externalización de servicios (reparaciones más rápidas aunque más caras). El gestor tiene que decidir, con las herramientas de apoyo adecuadas, qué crédito asigna a estas cinco vías de ganancia de disponibilidad operativa, y por tanto, se quiere que la compra de

repuestos para necesidades de correctivo (RBS-compras) y para constitución de niveles (RBS-distribución) sean dos opciones independientes controladas por el gestor.

- b. Estos dos procesos son gestionados en la actualidad por dos órganos distintos de ET.
3. Se contempla en el cálculo la baja de artículos reparables, incrementándose los faltantes esperados según su histórico de bajas.
4. A diferencia del modelo METRIC, no sólo se usa la distribución de Poisson en el cálculo de probabilidades de demanda. En casos en que la demanda del repuesto es regular y estable en el tiempo, el uso de una distribución Normal da buenos resultados. Pero en patrones de demanda *erratic* o *slow-moving*, los más habituales en ET y en organizaciones MRO en general, (ver clasificación de demanda de piezas de repuesto propuesta en Williams[15]), caracterizados por distribuciones asimétricas con gran número de periodos con demanda nula, el comportamiento de la distribución Normal no era lo suficientemente exacto. Para corregir dicha situación, el modelo de ET analiza la demanda de cada repuesto, aplicando el *contraste de Kolmogorov-Smirnov*, y seleccionado el tipo de distribución más adecuado para el patrón de demanda detectado. Las distribuciones que maneja el contraste son las más utilizadas en el sector MRO: *exponencial*, *Poisson*, *Normal* y *Weibull*. Tras medir el resultado de distintos casos preparados al efecto, se estima que la selección de una función de distribución que se adecuó correctamente al patrón de demanda de cada repuesto, puede incrementar la precisión del método en valores cercanos al 8%. Por último, se ha detectado que para tasas de fallo λ bajas (<1) el contraste de Kolmogorov-Smirnov no funciona correctamente, siendo en estas situaciones la distribución de Poisson la que mejor se adapta a la demanda. Esto hecho fue ya observado por Tersine[16], por lo que, en estos casos, se modifica el resultado del contraste KS.
5. Debido a que los plazos de aprovisionamiento son largos, para aumentar el número de elementos de la muestra, se usan técnicas *bootstrap* para conseguir un mayor número de muestreos. Esta técnica es especialmente útil en sistemas de reciente adquisición.
6. En ET es común la supresión de unidades y creación de otras, tanto en territorio nacional como en misiones internacionales, moviendo habitualmente un porcentaje alto de flotas entre ellas. Esto implica que los consumos históricos usados en la planificación de la distribución de un determinado almacén en el momento actual no sean válidos ya que ha podido variar, en gran medida, la flota actual a la que apoya. Para corregir esta situación el modelo de ET lo resuelve calculando las probabilidades de demanda no basándose en los históricos de cada unidad sino en la actual flota asignada. De esta forma, toda unidad que tenga la misma flota asignada tendrá el mismo resultado en el cálculo RBS-distribución.
7. Se han cambiado las expresiones del modelo original que convierten *la reducción de faltantes esperados* en incremento de *disponibilidad operativa*, incorporando factores propios MRO.

El RBS-distribución es muy similar al RBS-compras; sus principales diferencias son las siguientes:

- En adquisiciones, la *curva DO-€* estaba formada por puntos que identifican a un determinado repuesto. Ahora en distribución, la *curva DO-€* está constituida por puntos que

identifican a almacenes y repuestos. Los repuestos en los distintos almacenes donde pueden ser consumidos, compiten entre sí para obtener los niveles o puntos de pedido que originan mayor disponibilidad al menor precio.

- En adquisiciones, el periodo de muestreo de la demanda histórica es igual al horizonte de planificación para el que se quiere calcular la cantidad a comprar. Suelen ser periodos largos. En cambio, en distribución, dicho periodo es igual al tiempo de suministro entre el almacén central y el almacén en cuestión.
- En adquisiciones, el análisis de demanda considera toda la demanda histórica de ET. En distribución, en cambio, sólo se considera la demanda de cada almacén según su flota actual asignada.

Por otra parte y de forma no menos importante, el método RBS ofrece también la relación anteriormente citada entre la disponibilidad operativa prevista y el gasto en repuestos, cumpliéndose otro de los objetivos perseguidos en el proyecto. El método RBS calcula por cada unidad a comprar de cada repuesto, su ganancia de disponibilidad operativa y su precio de adquisición. Además propone el orden en el que se deben adquirir los repuestos, por lo que, aunando ambas ideas, dibujando conjuntamente todos los repuestos del sistema de armas propuestos por el método y en ese orden, se construye la *curva "DO-€"*. Ésta está formada por una serie de valores óptimos: es decir, para un determinado gasto, indica cuál es la máxima disponibilidad operativa alcanzable ya que, teóricamente, alcanzar una disponibilidad mayor con ese crédito no es posible (Fig.1).

4. CASO DE ESTUDIO

Seguidamente y a modo de ejemplo, se va a presentar la aplicación de lo anterior a un caso real, comenzando por el cálculo de faltantes esperados-EBO para a continuación aplicar el ratio RBS en la selección de repuestos. El artículo 61350098578XX es una pila BA-3058 consumida en la familia URO VAMTAC. El análisis de su demanda histórica en todo ET realizado por el contraste KS, ha determinado que la distribución Normal es la más idónea con unos parámetros de $\mu=3534,94$ y $\sigma=620,84$, según los consumos en todo ET en plazos igual al horizonte de planificación. El stock del artículo en el momento del cálculo es de 4.124 unidades. Por consiguiente, para poder aplicar el método es necesario, obtener los faltantes esperados: EBO(4124), EBO(4125), EBO(4126)...Cada uno de ellos se resuelve aplicando (1). Así, por ejemplo:

$$EBO(4.124) = 1.Pr\{D = 4.215\} + 2Pr\{D = 4.216\} + 3Pr\{D = 4.217\} + \dots \quad (5)$$

A su vez, la probabilidad de que la demanda sea igual a un determinado valor, al utilizar una distribución Normal se obtiene con la expresión siguiente (6), que aplicada a (5) proporcionará los valores de EBO:

$$Pr\{D = x\} = f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(x-\mu)^2} \quad (6)$$

$$Pr\{D = 4125\} = \frac{1}{620,84\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2 \times 620,84^2} (4125 - 3534,94)^2} = 0,00040905$$

Una vez que los faltantes esperados han sido calculados, ya se está en disposición de aplicar el ratio RBS (4) a todos los repuestos de la familia, tal y como se puede ver en la siguiente figura(2).

s	Artículo 1		Artículo 2	
	EBO(s)	[EBO(s-1)-EBO(s)]/5	EBO(s)	[EBO(s-1)-EBO(s)]/1
0	1,000		4,000	
1	0,368	0,126	3,018	0,982
2	0,104	0,053	2,110	0,908
3	0,023	0,016	1,348	0,762
4	0,004	0,004	0,782	0,567
5	0,001		0,410	0,371
6	0,000		0,195	0,215
7	0,000		0,085	0,111
8	0,000		0,034	0,051
9	0,000		0,012	0,021
10	0,000		0,004	0,008

Fig. 2: Ejemplo RBS aplicado a 2 artículos de una familia

En ella se presentan dos artículos, a los que se aplica el ratio RBS según aumenta la cantidad "s" de unidades a comprar. Si el primer artículo fuese el artículo 61350098578XX del ejemplo anterior, s=0, implicaría no comprar nada y mantener su stock de 4.124 unidades; s=1 adquirir una unidad y obtener un stock de 4.125 unidades y así sucesivamente. El primer artículo tiene un precio de 5€ y el segundo de 1€, y el ratio RBS para cada unidad a comprar se presenta en la columna de la derecha, el cual ordenado descendientemente, proporciona el siguiente resultado

- 6 unidades del artículo 2 (hasta ratio 0,215)
- 1 unidad de artículo 1 (ratio 0,126)
- 1 unidad de artículo 2 (ratio 0,111)
- 1 unidad del artículo 1 (ratio 0,053)
- 2 unidades del artículo 2 (hasta ratio 0,021)
- Y así sucesivamente.

En función del crédito disponible, se suspendería la acumulación de repuestos según su importe acumulado.

5. RESULTADOS

Como primera validación, se probó el comportamiento del modelo RBS en distintas familias de material diverso. Para ello se utilizó una herramienta de simulación de red logística (MAS1) desarrollada por ET. Es un simulador dinámico de evento discreto con variables no estocásticas, que modela la cadena de suministro de ET al tener definido sus artículos, almacenes, talleres, medios productivos, redes de transportes y red de apoyo entre unidades. Se situó la fecha de inicio de simulación un año antes de la fecha presente y con los datos históricos disponibles hasta esa fecha, se calculó la cantidad a comprar (RBS-compras) o los puntos de pedido (RBS-distribución) según el método correspondiente que se quería simular. Con dicho resultado del cálculo introducido en MAS1, se procedía a simular su comportamiento enfrentándolo con el último año de demanda real, registrando día a día el comportamiento de la red logística. Al final de la simulación, se medían distintos ratios, siendo prioritario para la toma de decisiones, las esperas registradas en los distintos talleres por la falta de repuestos o lo que es lo mismo la indisponibilidad operativa provocado por los faltantes de repuestos. Al comparar de esta forma los distintos métodos, los resultados fueron bastantes positivos ya que a igualdad de crédito, el método RBS tanto en compras como en distribución, proporcionaba una mayor disponibilidad operativa que el resto de métodos. También se observó que la exactitud de la curva teórica y el posicionamiento de su zona inicial eran bastante correctos y se adecuaban a la realidad advertida en las simulaciones.

Tras esta primera fase, se pasó en 2013 a realizar un piloto de implantación de dicho método en la planificación de adquisi-

Subfamilia (% Faltates)	2013	2014	Evolución 13/14	Subfamilia (% Faltates)	2013	2014	Evolución 13/14
FAMILIA XXX	23,89	15,82	█	FAMILIA XXX	6,8	0	█
FAMILIA XXX	15,41	11,25	█	FAMILIA XXX	4,57	1,88	█
FAMILIA XXX	15,41	11,25	█	FAMILIA XXX	15,24	4,85	█
FAMILIA XXX	15,41	11,25	█	FAMILIA XXX	21,43	40,31	█
FAMILIA XXX	6,95	12,86	█	FAMILIA XXX	3,76	0,28	█
FAMILIA XXX	7,74	7,19	█	FAMILIA XXX	0,23	0	█
FAMILIA XXX	20,51	18,11	█	FAMILIA XXX	14,08	7,74	█
FAMILIA XXX	7,74	7,19	█	FAMILIA XXX	25,34	4,23	█
FAMILIA XXX	20,23	16,52	█	FAMILIA XXX	15,22	6,67	█
FAMILIA XXX	15,19	10,55	█	FAMILIA XXX	2,45	4,45	█
FAMILIA XXX	10,95	8,59	█	FAMILIA XXX	23,51	16,42	█
FAMILIA XXX	10,95	8,59	█	FAMILIA XXX	6,71	4,7	█
FAMILIA XXX	10,95	8,59	█	FAMILIA XXX	6,45	7,07	█
FAMILIA XXX	20,89	5,09	█	FAMILIA XXX	21,5	11,78	█
FAMILIA XXX	7,31	1,70	█	FAMILIA XXX	29,48	36,27	█
FAMILIA XXX	12,62	5,00	█	FAMILIA XXX	0,36	1,94	█
FAMILIA XXX	13,30	11,38	█	FAMILIA XXX	16,28	7,72	█
FAMILIA XXX	11,80	7,94	█	FAMILIA XXX	52,8	18,67	█
FAMILIA XXX	15,15	6,96	█	FAMILIA XXX	100	14,29	█
FAMILIA XXX	9,37	6,46	█	FAMILIA XXX	8,23	3,46	█
FAMILIA XXX	16,38	4,35	█				
FAMILIA XXX	7,48	6,02	█				

Fig. 3: Evolución faltantes en OC1, OC2 y OC3

ciones del Parque y Centro de Mantenimiento Vehículos Ruedas nº1(PCMVR1). Los resultados obtenidos fueron bastantes positivos; aun así, el modelo sufrió modificaciones para ajustarlo a las particularidades de mantenimiento de ET. Una vez que la bondad del modelo quedó suficientemente probada, se decidió iniciar su aplicación al resto de Órganos de Compra dependientes de la DIN-FULOG.

Los resultados obtenidos tras más de un año de implantación y uso se pueden considerar como positivos. Los efectos del método RBS se deberían traducir en una reducción de los faltantes de inventario, ya que, como se explicó anteriormente, ésta es la esencia del método, *ya que maximizar la disponibilidad operativa era equivalente a reducir el número de faltantes*. Se entiende por *faltante* como *las necesidades de repuestos no satisfechas que han causado esperas en taller a distintas acciones de mantenimiento con la correspondiente pérdida de disponibilidad operativa*. Sin embargo, aunque se observase una reducción de dicha variable en el año en el que el RBS ha estado operativo (2014), no se tendría la certeza absoluta de que esta reducción no se ha debido a otras causas. Cambios de planificadores, exceso de stock de otros años, faltantes acumulados, cambios en el crédito asignado, etc., podrían tener un efecto muy determinante en el número de faltantes. Por ello, para que los resultados puedan presentarse como concluyentes se debe esperar un cierto tiempo que permita observar la supuesta tendencia positiva. No obstante, aun no siendo un estudio definitivo, seguidamente se va a exponer la evolución temporal de faltantes de cara a comprobar si en 2014, se ha producido una reducción de los mismos. El ámbito del estudio se circunscribirá, a nivel de subfamilia de material y a tres Órganos de Compra que emplearon en su gestión el método RBS durante todo el año 2014. En dichos Órganos de Compra-OC, el crédito destinado a la compra de repuestos en cada uno de ellos fue similar al disponible en años anteriores. Así, en la próxima

figura, se compara el porcentaje de faltantes en Territorio Nacional observado en los años 2013 y 2014, marcándose en color rojo aquél con un valor menor. El *porcentaje de faltantes* se ha calculado, acumulando por Órgano, año y subfamilia, los faltantes medidos frente al total de líneas pedidas. Es decir *del total de repuestos suministrados desde el almacén central a los distintos talleres, cuántos (%) no se han podido enviar en ese momento por déficit de stock*.

A continuación, y como segundo estudio, es interesante analizar la relación entre la inversión en repuestos y la disponibilidad operativa conseguida. Para ello, de los tres Órganos de Compra anteriores uno de ellos, a finales de 2014, decidió presupuestar para el año 2015 la inversión en repuestos de sus familias utilizando las *curvas DO-€* proporcionadas por el RBS. De esta forma, en sus tres familias principales, analizó la "zona inicial" de cada una de sus subfamilias, y solicitó el crédito correspondiente. La reducción del crédito por familia se puede observar en la siguiente figura, siendo como se puede apreciar, bastante considerable. Los efectos sobre la disponibilidad operativa de la flota de cada subfamilia del 2015 frente a 2014 también se presentan en dicha figura (se entiende por disponibilidad operativa - *Ao el porcentaje de días operativos de toda la flota en el año a estudio frente al total de días disponibles*). Se ha marcado en color azul, el periodo con mayor disponibilidad operativa.

A la vista de la evolución de faltantes expuesta en el primer análisis, se puede extraer la conclusión de que existe una clara tendencia a la baja en los faltantes registrados en 2014. De las 32 subfamilias analizadas, sólo en seis aumenta el número de faltantes. De ellas en cuatro, existe una explicación técnica: se ha aumentado fuertemente su uso en 2014 frente a 2013. Tomando este hecho en consideración y eliminando estas cuatro subfamilias del estudio anterior, se obtiene que de las 28 subfamilias posibles, en 26 se ha reducido el número de faltantes.

Familia	Inversión 2014	Inversión 2015	Inc(%)	
FAM 1	464.357,10 €	165.000,00 €	-64,47%	
Familia	Subfamilia	Ao (2014)	Ao (2015)	Evolución 14/15
FAM 1	SUBFAM 1A	100%	100%	
	SUBFAM 1B	99%	99%	
	SUBFAM 1C	98%	97%	
	SUBFAM 1D	93%	94%	
	SUBFAM 1E	99%	100%	
Familia	Inversión 2014	Inversión 2015	Inc(%)	
FAM 2	1.114.350,00 €	648.907,36 €	-41,77%	
Familia	Subfamilia	Ao (2014)	Ao (2015)	Evolución 14/15
FAM 2	SUBFAM 2A	68%	69%	
	SUBFAM 2B	87%	88%	
	SUBFAM 2C	83%	85%	
	SUBFAM 2D	98%	98%	
Familia	Inversión 2014	Inversión 2015	Inc(%)	
FAM 3	869.366,65 €	511.471,00 €	-41,17%	
Familia	Subfamilia	Ao (2014)	Ao (2015)	Evolución 14/15
FAM 3	SUBFAM 3A	97%	95%	
	SUBFAM 3C	52%	58%	
	SUBFAM 3D	71%	74%	

Fig. 4: Evolución disponibilidad operativa y crédito

Por otra parte, el segundo análisis, nos muestra que incluso con una reducción de la inversión en repuestos muy significativa (oscila entre el 41% y 64%), la disponibilidad operativa conseguida en 2015 se mantiene o incluso aumenta frente a 2014. Así de las 12 subfamilias afectadas, en 10 se mantiene o aumenta la disponibilidad operativa, y en las 2 subfamilias en las que decrece, lo hace con cantidades no significativas.

Ambos estudios, presentan cifras bastante positivas que respaldan las dos grandes aportaciones del método RBS: la ganancia de disponibilidad operativa (o equivalentemente la reducción de faltantes) y la posibilidad de planificar con mayor precisión la inversión requerida.

6. CONCLUSIONES

Este artículo presenta una adaptación del modelo RBS aplicada a la planificación de compras y distribución de repuestos en un entorno de mantenimiento de flotas, así como los primeros resultados obtenidos tras su implantación, lo que hace él, según lo expuesto en el epígrafe 2, una referencia bibliográfica de interés.

Conceptualmente, al desplazar la *orientación de abastecimiento* propia de métodos basados en la previsión de demanda usados hasta ahora por ET, a otra *propia de mantenimiento*, el repuesto queda relegado a un segundo plano cobrando el *sistema o la familia* un papel principal en el cálculo. Además, éste ya no se regula por parámetros tales como el *nivel de servicio* o la *zona geográfica*; ahora en cambio, la *disponibilidad operativa objetivo* de la familia y el *crédito* disponible son sus controles principales.

Todas estas circunstancias crean el escenario idóneo de planificación en el que la presupuestación del gasto en repuestos y la distribución del crédito entre las distintas familias se llevan a cabo de forma más eficiente, al ser consciente, de esta manera, de los efectos que dichas decisiones tendrán en la disponibilidad operativa de cada familia. Así en épocas de restricciones presupuestarias, con importantes recortes en el crédito asignado que impiden alcanzar la disponibilidad operativa deseada en todos los sistemas, esta herramienta es fundamental para priorizar las distintas familias de sistemas según las necesidades operativas y estratégicas de ET.

También los primeros resultados obtenidos (epígrafe 5) respaldan las previsiones teóricas del modelo, ya que a igualdad de crédito aumenta la disponibilidad de la flota y también ésta se mantiene similar reduciendo significativamente el crédito.

A modo de conclusión general, aunque como se dijo anteriormente, no existe la certeza absoluta de que el método RBS haya sido el único agente causante de esta mejora, no parece erróneo concluir que su papel haya sido determinante. Resultados en definitiva, bastante positivos que asientan el uso del método RBS en la planificación de repuestos de ET y que tomándolo como punto de partida, alientan y promueven futuros proyectos de mejora que permitan su evolución y consolidación en el sostenimiento de ET. En este sentido y como próximas líneas de mejora del proyecto, se pretende incluir la *críticidad* del repuesto en el modelo y el *uso esperado del material* como tercer eje de planeamiento.

BIBLIOGRAFÍA

[1] SHERBROOKE, Craig C. Optimal inventory modeling of systems: multi-echelon techniques". Vol.72. Springer Science Et Business Media,2006.
 [2] SHERBROOKE, Craig C. "METRIC: A multi-echelon technique for recoverable item control." Operations Research 16.1 p:122-141.1968.

[3] MUCKSTADT, John A. "A model for a multi-item, multi-echelon, multi-indenture inventory system". Management science 20.4-part-i p:472-481.1973.
 [4] SHERBROOKE, Craig C. "VARI-METRIC: improved approximations for multi-indenture, multi-echelon availability models." Operations Research 34.2 p.311-319.1986.
 [5] GUPTA, Amit; ALBRIGHT, S.Christian. Steady-state approximations for a multi-echelon multi-indentured repairable-item inventory system.European Journal of Operational Research,1992,vol.62, nº3,p.340-353.
 [6] CHENYU, Liu, et al. Inventory decision model of single-echelon and two-indenture repairable spares. Proceedings of 2nd international conference on computer application and system modeling. 2012.
 [7] DIAZ, A.; FU, M. Multi-echelon inventory systems for repairable items with limited repair facilities.European Journal of Operations Research,1997,vol.97, nº3,p.480-492.
 [8] SONG, Yang; YANG, Jian-hua. Simulation of dynamics behaviors for shipping equipment support with system dynamics analysis approach. Journal of Industrial Engineering and Management,2015,vol.8, nº.3,p.636.
 [9] NOWICKI, David R.; RANDALL, Wesley S.; RAMIREZ-MARQUEZ, Jose Emmanuel. Improving the computational efficiency of metric-based spares algorithms. European Journal of Operational Research, 2012, vol.219, nº2, p.324-334.
 [10] BASTEN, Rob JI; ARTS, Joachim J. Fleet readiness: stocking spare parts and high-tech assets.2014.
 [11] BASTEN, Rob JI, et al. An approximate approach for the joint problem of level of repair analysis and spare parts stocking. Annals of operations research, 2015, vol.224, nº1,p.121-145.
 [12] VAN JAARSVELD, Willem; DOLLEVOET, Twan. Spare parts inventory control for an aircraft component repair shop. 2011.
 [13] SMITH, J., W. Fisher, and J. Heller. "Measurements of Military Essentiality." Logistics Management Institute, Washington, DC.1972.
 [14] Cálculo de las adquisiciones de repuestos. El método RBS. Circular Técnica CT 02/13. Dirección de Mantenimiento-Mando de Apoyo Logístico. Ejército de Tierra.2013.
 [15] WILLIAMS, T. M. "Stock control with sporadic and slow-moving demand." Journal of the Operational Research Society: p.939-948.1984
 [16] TERSINE, Richard J.; TERSINE, R. J. Materials management and inventory systems. North-Holland,1976.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/8083-1.pdf



Empleo de la fotogrametría digital para la evaluación del suelo con riesgo de erosión en olivar

Using digital photogrammetry for evaluating soil erosion risk in olive orchard



Alberto-Jesús Perea-Moreno¹, María-Jesús Aguilera-Ureña¹, José-Emilio Meroño-De-Larriva², Francisco Manzano-Agugliaro³

¹ Universidad de Córdoba. Dpto. de Física Aplicada. Edificio Albert Einstein (C2). Campus Universitario de Rabanales. Ctra. Madrid-Cádiz, km. 396 - 14014 Córdoba. Tfno: +34 957 212633.

² Universidad de Córdoba. Dpto. de Ingeniería Gráfica y Geomática. Edificio Gregor Méndel (C5). Campus Universitario de Rabanales. Ctra. Madrid-Cádiz, km. 396 - 14014 Córdoba. Tfno: +34 957 201826.

³ Universidad de Almería. Dpto. de Ingeniería. Escuela Politécnica Superior - 04120 La Cañada de San Urbano (Almería). Tfno: +34 950 015346.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8010> | Recibido: 29/03/2016 • Aceptado: 02/06/2016

ABSTRACT

• The olives orchard is one of the most important crops in Spain. The long-term sustainability in marginal areas depends on good agricultural practices. One of them is the maintenance of grass cover in order to prevent the soil erosion, especially in areas of steep slopes. Therefore determining the percentage of grass cover in these areas it is essential.

This research aims the grass cover determination in olive orchard using remote sensing techniques. To achieve this, frames of olive orchard were captured by the airborne sensor Ultracam D Vexcel. Where the selected area was an olive orchard of 32000 hectares in the Valle de los Pedroches in the South of Spain, where 64 digital aerial photographs and data of 173 agricultural plots were used. Object-oriented classification technique was applied in this frames, this means a previous image segmentation allowing isolating the grass cover in the olive orchard. Thus, it is allowed to work with the image at object level, which greatly expands the amount of information that can be extracted from it. The software used was eCognition®. The resulting objects are the basis for subsequent classification. The results show that was possible achieving an overall accuracy of 96.10% and an excellent Kappa statistic (94.10%) for object-oriented classification. In conclusion this technique opens new perspectives for the determination of grass cover in olive orchards.

• **Key Words:** olive orchard, grass cover, segmentation, object determination.

RESUMEN

El olivar es uno de los cultivos más importantes de España. La sostenibilidad a largo plazo en las zonas marginales depende de las buenas prácticas agrícolas: una de ellas, es el mantenimiento de cubiertas vegetales para evitar la erosión, sobre todo en zonas de grandes pendientes. Por ello, determinar el porcentaje de cobertura vegetal en estas zonas es de vital importancia.

El objetivo de este trabajo es la cuantificación de cubierta vegetal en olivar mediante técnicas de teledetección. Para conseguir este propósito, se emplearon 64 fotogramas aéreos digitales de un olivar captados por el sensor aerotransportado Ultracam D de Vexcel. La zona de estudio fue un olivar de 32000 has en el Valle de los Pedroches en el sur de España, donde se utilizaron fotografías aéreas digitales y datos de 173 parcelas. A estos fotogramas se les aplicó la clasificación orientada a objetos, técnica que consiste en una segmentación previa de la imagen permitiéndonos aislar el

olivar de la cubierta vegetal. De esta forma, se permite el trabajo con la imagen a nivel de objeto, lo que amplía notablemente la cantidad de información que se puede extraer de la misma. Para ello, se ha segmentado y clasificado las imágenes, empleando el software eCognition®. Los objetos resultantes sirven de base para la posterior clasificación.

Los resultados alcanzados muestran que se es capaz de conseguir una precisión total del 96.10% y un excelente estadístico Kappa (94.10%) para la clasificación orientada a objetos. Como conclusión final, se puede afirmar que esta nueva técnica abre nuevas posibilidades para la determinación de la cubierta vegetal en olivar.

Palabras Clave: olivar, cubierta Vegetal, segmentación, determinación de objetos.

1. INTRODUCCIÓN

Se estima que en el mundo existen 750 millones de olivos, de los cuales el 95 % está en la cuenca mediterránea [1]. En España se estima que había alrededor de 2,5 millones de hectáreas en el año 2012 [2]. Andalucía cuenta con olivares repartidos por gran parte de su territorio, lo cual se sitúa a la cabeza de las regiones productoras de aceite en el mundo, con una superficie de olivar superior a 1,5 millones de hectáreas. En las últimas décadas, la mayor parte de los cambios se han producido en respuesta a la expansión de los mercados internacionales y la política agrícola común (PAC) debido a la política de incentivo. En esto el olivar no ha sido una excepción, ya que después de 1986, la PAC induce claramente a la expansión e intensificación de la agricultura de secano en las colinas, tanto en las zonas cubiertas tradicionalmente por arbustos y en antiguos campos abandonados [3]. Esto dio lugar, a que este cultivo que ha ocupado tradicionalmente suelos marginales, poco fértiles y con elevadas pendientes lo hiciese aún más. El medio rural mediterráneo bajo condiciones climáticas áridas, semiáridas y subhúmedas secas se halla amenazado por problemas de desertificación [4]. Andalucía se caracteriza por una pluviometría irregular con una estación seca pronunciada y lluvias en ocasiones torrenciales, donde las cuencas suelen presentar elevadas pendientes, hecho que facilita los procesos erosivos y no favorece el aprovechamiento de las aguas de lluvia, en muchas ocasiones la única de la que dispone el cultivo, puesto que el 81% de la superficie de olivar andaluz se encuentra en secano [5], mientras que a nivel nacional lo es el 72 % [6]. La pérdida de agua por escorrentía limita en muchos casos la producción, a la par que favorece otros

problemas asociados, como pérdida del suelo [7]. La erosión del suelo es un factor clave en los climas mediterráneos, y no sólo se relaciona con factores geológicos (litología, la topografía) y climatológicos, sino también con los usos del suelo, concretamente con los cambios en la cubierta vegetal [8].

Para paliar estos problemas a veces se practica el no laboreo que consiste en crear cubiertas vegetales entre las hileras de los árboles para que estos permanezcan protegidos ante la erosión hídrica generada por el impacto directo de las gotas de lluvia y mejorar las propiedades del suelo [9]. La cubierta vegetal viva, además de interceptar las gotas de agua de lluvia, aumenta la velocidad de infiltración del terreno, reduciendo la escorrentía, por lo que contribuyen eficazmente a la conservación del suelo [10]. La eficacia de la cubierta aumenta al hacerlo el porcentaje de cobertura del terreno. Esta práctica de agricultura de conservación, se define formalmente como aquella práctica agronómica aplicada a cultivos leñosos, en la que al menos, un 30% de la superficie del suelo libre de copa, se encuentra protegida por una cobertura viva o inerte [11]. Por tanto, determinar la cubierta vegetal en el olivar es un aspecto esencial para la analizar la sostenibilidad del olivar a largo plazo, sobre todo en las zonas marginales y de grandes pendientes. Para ello, la evaluación de herramientas capaces de hacerlo resulta de especial relevancia.

La teledetección espacial es importante hoy en día para resolver problemas de la sociedad actual [12]. El procesamiento de imagen se ha consolidado como una tecnología cada vez más fiable implantada en un amplio número de aplicaciones que resuelven problemáticas diferentes. La precisión y elevada resolución que proporcionan las cámaras actualmente, junto con los rápidos protocolos de comunicación y las prestaciones de los ordenadores posibilitan solucionar problemas difíciles, habitualmente hechos a mano en un pasado cercano [13]. La clasificación convencional de imágenes de satélite se basa en la asignación de los píxeles individuales a determinadas clases temáticas [14]. La mayoría de los métodos de clasificación tradicionales están basados en píxeles y no utilizan la información espacial y el contexto de un objeto y su entorno, que tienen el potencial para mejorar aún más la clasificación digital de imágenes [15]. Los píxeles de borde o mixtos, representan mezclas de dos o más tipos de coberturas. Esto es motivo de las principales causas de error de asignación, y por consecuencia de la pérdida de exactitud en la cartografía temática generada [16]. Una solución práctica a este problema es aportada por el trabajo de Dean et al. [17], el que brinda una aproximación operativa utilizando el concepto de objeto, para la detección de cultivos dentro de las parcelas, aprovechando las características intrínsecas de los mismos: cubiertas vegetales, coetáneas y homogéneas que se desarrollan en espacios regulares de formas geométricas definidas (parcelas), las que son relativamente estables en el tiempo (años). Esta metodología se basa en la clasificación de las imágenes utilizan-

do información estadística descriptiva (media y varianza) de los píxeles de la de la zona núcleo de las parcelas, esto es, la zona central libre de píxeles de borde o mixtos.

Otro aspecto a tener en cuenta es el comportamiento o signatura espectral de cada una de las diversas superficies o usos de suelo a las diferentes longitudes de onda [18]. La energía reflejada a las longitudes de onda roja e infrarroja es sensible a las variaciones del cultivo y suelo [19]. Cultivos densos y sanos se caracterizan por una elevada absorción de energía roja y una alta reflectancia de la radiación infrarroja. Como consecuencia se utilizan unos índices de vegetación que resaltan la sensibilidad a las variaciones en el cultivo.

Por otro lado, las mejoras en los procesos de la fotogrametría digital han permitido generar mediante fotografía aérea productos corregidos geoméricamente, compatibles con la cartografía convencional detallada y son capaces de llegar a resoluciones o posibilidad de análisis de elementos territoriales que superan a los que hasta hace poco sólo nos brindaban los satélites de reconocimiento de recursos naturales [20]. La producción de ortofotos digitales es un complemento ideal de los procesos de evaluación medioambiental [21] y planificación territorial que hasta ahora se venían realizando con imágenes de satélite [22].

El objetivo principal de este trabajo es la cuantificación de cubierta vegetal en olivar, aspecto esencial para analizar la sostenibilidad de este cultivo a largo plazo, mediante técnicas de teledetección empleando fotogramas captados por el sensor aerotransportado Ultracam D de Vexcel. La clasificación orientada a objetos, técnica que consiste en una segmentación previa de la imagen permitiendo aislar el olivar de la cubierta vegetal, fue empleada para este estudio.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio objeto de este trabajo está situada en la provincia de Córdoba (España), en la comarca de "El valle de los

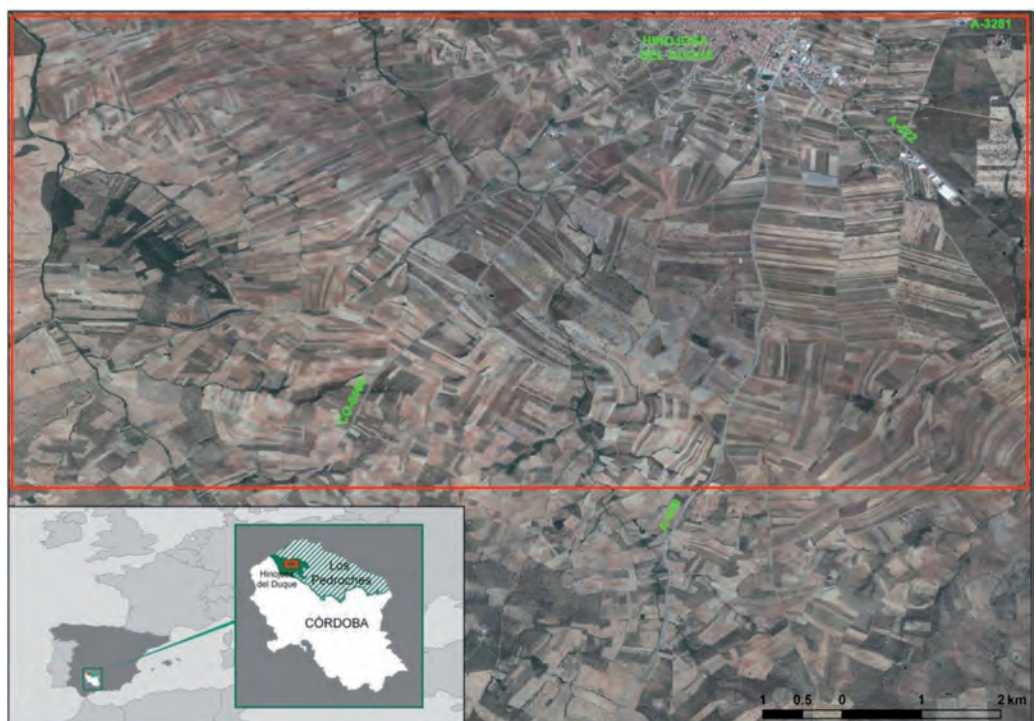


Fig. 1: Zona de Estudio, Valle de los Pedroches (Córdoba)

Pedroches", y abarca el municipio de Hinojosa del Duque. Se trata de una superficie rectangular de 16 km x 20 km y que comprende 32000 has. Se encuentra entre las latitudes 38°33'58" N y 38°23'24"N y las longitudes 5°16'50"W y 5°50'37"W del European Datum 1950, véase Fig. (1).

2.2. MATERIAL

Para llevar a cabo el estudio se emplearon 64 fotografías captadas el día 23 de septiembre del 2015 (entre las 12:10 y las 17:38 horas) por el sensor fotogramétrico Ultracam D de Vexcel, con una resolución de fotograma de 11500 x 7500 píxeles y codificados en 8 bits. Se trata de un sensor aerotransportado por la aeronave



Fig. 2: Proceso de ortorrectificación empleado en este estudio

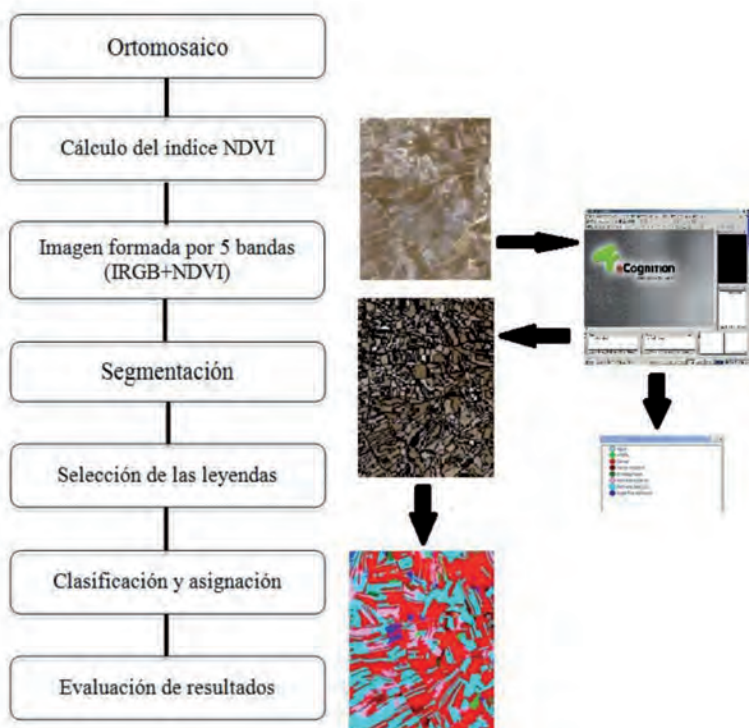


Fig. 3: Esquema conceptual de la metodología

presurizada Beechcraft King Air B-200 a una altura de vuelo de 5555 m y consta de 4 objetivos pancromáticos (B/N) compuestos cada uno por 11500 x 7500 píxeles y por otros 4 objetivos matriciales multispectrales (rojo, verde, azul e infrarrojo) de 4000 x 2672 píxeles cada uno. En cuanto a la focal de los objetivos es de 100 mm y su apertura de lente es $f=1/5.6$ para los objetivos B/N y $f=1/4.0$ para los multispectrales. El tamaño de los píxeles (fotodetectores) es de 9 x 9 micras y la amplitud (ancho por largo) de su campo de visión (FOV) es de 55° x 37°. El proceso de formación de las imágenes se realiza formando un mosaico a partir de la información captada por los citados módulos pancromáticos, a partir de ahí se forman las combinaciones a color natural o falso color, empleando los otros cuatro objetivos color.

Los fotogramas captados para este estudio poseen un tamaño de píxel del suelo de 50 cm; poseen una composición formada por las bandas: infrarrojo, rojo, verde y azul. Estos fotogramas fueron ortorrectificados y se refirieron al European Datum 1950 siguiendo las etapas indicadas en la Fig. (2). Se utilizó un modelo digital del terreno de 10 m de píxel.

2.3.METODOLOGÍA

La metodología tal y como se muestra en la Fig. (3), comienza con el cálculo del índice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Posteriormente, se obtiene una imagen formada por 5 bandas: azul, verde, rojo, infrarrojo cercano e índice NDVI y se procede a realizar la clasificación orientada a objetos, siguiendo las siguientes etapas:

1. Etapa de segmentación de la información.
2. Etapa de selección de leyenda
3. Etapa de entrenamiento
4. Etapa de clasificación o asignación.

Por último, se evalúan los resultados obtenidos de dicha clasificación (validación).

Obtención del índice NDVI

La vegetación tiene un comportamiento espectral muy característico, ya que presenta una gran absorción para las longitudes de onda correspondientes al rojo y por otro lado posee una alta reflectividad para las longitudes de onda del infrarrojo cercano [23]. Por tanto, con el objetivo de resaltar el diferente comportamiento espectral de cada una de las cubiertas, se ha llevado a cabo la obtención del índice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Este índice se basa en la diferencia existente entre la máxima absorción en el rojo (690 nm), debida a los pigmentos de clorofila, y la máxima reflexión existente en el infrarrojo cercano (800 nm), debida a la estructura celular de la hoja [24]. Así usando bandas estrechas hiperespectrales, este índice es cuantificado según la Ec. (1):

$$NDVI = \frac{(R_{NIR} - R_{RED})}{R_{NIR} + R_{RED}} \quad (1)$$

siendo R_{NIR} la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano (R800nm) y R_{RED} la reflectancia en la banda del rojo (R690nm). Este índice varía entre -1 y 1, por lo que resulta un índice de fácil interpretación. Se puede considerar como umbral para cubiertas vegetales un valor del NDVI de 0.1 y para la vegetación densa de 0.5 [24].

Clasificación orientada a objetos

Sin embargo la elevada resolución espacial de las fotografías aéreas digitales conlleva, en cambio, problemas en la respuesta

espectral recibida. Por ejemplo pueden darse la aparición de zonas de sombras o la alta texturización y contraste de la imagen [25]. Para evitar en la medida de lo posible este inconveniente, se optó por emplear el software eCognition®, comercializado desde el año 2000 y desarrollado por la empresa Trimble, para llevar a cabo la segmentación y clasificación de la imagen [26]. Los resultados obtenidos hasta la fecha son, en general, más precisos que los obtenidos con otro tipo de programas [27], si bien es una técnica relativamente reciente [28].

En particular para este trabajo se utilizó la versión eCognition Professional 5.0®, empleando el módulo "Segmentación Multirresolución", que realiza la extracción automática de objetos homogéneos [29]. Este módulo permite dividir la imagen aérea digital en objetos utilizando el algoritmo de segmentación *Fractal Net Evolution Approach* (FNEA) [28]. La segmentación consiste en dividir una imagen en regiones compuestas por varios píxeles que se caracterizan por ser homogéneas en base a unos requisitos definidos por el usuario. El proceso de segmentación dependerá de los datos de entrada y de determinados parámetros que deben de ser definidos por el usuario y que influyen en la formación de los objetos de la imagen resultante. Dichos parámetros son el factor de escala (control de tamaño de los objetos), color (grado de influencia de la información espectral en la segmentación) y forma (grado de influencia de la forma suavidad y compacidad de los objetos). La suavidad y la compacidad parten del parámetro de forma y hacen referencia a la heterogeneidad espacial. La compacidad optimiza los objetos buscando que sus bordes sean compactos. La suma de los criterios suavidad y compacidad es 1.

Para describir los objetos de la imagen a partir de la información derivada de sus propiedades espectrales, se analizó el valor espectral medio de cada objeto en cada banda. Para detectar el contraste espacial entre los píxeles que componen cada objeto se analizaron 3 parámetros texturales: homogeneidad, entropía y contraste. La homogeneidad y el contraste muestran información sobre la variación local entre píxeles. Los valores de homogeneidad serán más altos cuanto mayores sean los valores de la diagonal central de la matriz de concurrencia. Por el contrario, los valores de contraste presentarán valores más altos cuanto mayores sean los valores de las diagonales más alejadas de la diagonal central en la matriz. La entropía muestra información sobre la semejanza en los valores de la imagen y mostrará valores más altos cuanto más se parezcan entre sí los valores de la matriz de concurrencia [30].

En la Tabla 1 se muestran las ecuaciones para el cálculo de los datos espectrales y texturales.

Categorías	Descripción	
Espectrales	Media	$\frac{1}{\#P_v} \sum_{(x,y) \in P_v} c_k(i,j)$
Texturales	Homogeneidad	$\sum_{i,j=0}^{N-1} \frac{P_{i,j}}{1+(i-j)^2}$
	Contraste	$\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j}(i-j)^2$
	Entropía	$\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j}(-\ln P_{i,j})$

Tabla 1: Variables basadas en objetos

Donde: #P_v: número total de píxeles contenidos en un objeto de la imagen v, c_k(i,j): valor de la imagen en el píxel (i,j) en la banda k, i: número de fila, j: número de columna, N: números de filas y columnas, P_{ij}: valor normalizado del píxel.

Los ajustes de los parámetros de segmentación se determinaron a partir del ensayo de diferentes entrenamientos del software con distintos parámetros de entrada. Este proceso se realizó en base a clasificaciones y validaciones con el clasificador Máxima Probabilidad. La regla de decisión de máxima probabilidad se basa en una estimación normalizada (gausiana) de la función de densidad de probabilidad de cada clase [31]. El fundamento de este método está en considerar que los ND para cada clase se ajustan a una distribución normal, lo que permite describir la categoría con una función de probabilidad a partir del vector media y de la matriz de varianza-covarianza [32].

Para una determinada banda, la probabilidad de que un píxel X definido por su ND_x pertenezca a una clase A vendrá dada por:

$$P(x/A) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_A^2}} e^{-\frac{(ND_x - \overline{ND_A})^2}{2\sigma_A^2}} \quad (2)$$

Donde $\overline{ND_A}$ es la media de la clase y σ_A^2 la varianza. Una vez determinada la probabilidad de pertenencia al resto de las categorías que intervienen en la clasificación, ese píxel será asignado a la clase si:

$$p(x/A) \gg p(x/B) \quad (3)$$

Para todo A≠B, variando B desde 1 hasta m, siendo m el número de categorías de la clasificación.

Puesto que la combinación de los parámetros de segmentación da lugar a un número muy elevado de escenarios posibles, se procedió a simplificar el número de escenarios aplicando un único factor de escala para evaluar los parámetros de forma independiente: color, forma, suavidad y compacidad. Así se pudieron determinar los mejores valores para la clasificación posterior. El primer paso, fue realizar un estudio de las variaciones de los parámetros suavidad y compacidad, ambos integrados en el parámetro forma, tal y como puede observarse en la Fig. (4). Las mejores precisiones se alcanzaron para valores de compacidad 50% y suavidad 50%.

A continuación, tal y como se presenta en la Fig. (5), se evaluaron los efectos que producían las variaciones de los parámetros color y forma en las fiabilidades de las clasificaciones, obteniéndose que el valor espectral (color) era más importante para esta segmentación que el contorno de los objetos (forma). Esto se debe a que se crea un número menor de objetos y más ajustados a la realidad.

Por último, y con los parámetros color y forma ya definidos, se procedió a evaluar variaciones en el factor de escala (Fig. 6) hasta obtener el que mejor precisión ofreció. Tras evaluar este conjunto de parámetros de entrada, finalmente los valores utilizados en los análisis llevados a cabo en las imágenes fueron 30 para el parámetro de escala, 0.8 para el de color, 0.2 para el de forma y 0.5 tanto para definir la suavidad como la compacidad.

La validación de la clasificación se ha realizado siguiendo el criterio propuesto por Chuvieco [33]. Así, se recomienda un mínimo de 50 píxeles por cada clase temática para obtener una



Fig. 4: Resultado de la segmentación al variar los parámetros compactad y suavidad: a) compactad=1 y suavidad=0; b) compactad=0.5 y suavidad=0.5 y c) compactad=0 y suavidad=1



Fig. 5: Resultado de la segmentación al variar los parámetros color y forma: a) color=0.9 y forma=0.1; b) color=0.5 y forma=0.5 y c) color=0.1 y forma=0.9



Fig. 6: Resultado de la segmentación al variar el parámetro factor escala: a) factor de escala=10; b) factor escala= 50 y c) factor escala= 90

estimación fiable del error, criterio que ha sido seguido en este trabajo. La localización de los píxeles de validación se llevó a cabo a partir de la "verdad terreno".

La imagen "verdad terreno" fue elaborada a partir de la información procedente de las visitas de campo realizadas por la Agencia de Gestión Agraria y Pesquera de Andalucía en esta zona. Esta información se encuentra en formato *shapefile* y cuenta con todas las subdivisiones realizadas en campo, la referencia de cada una de las parcelas, un identificador de las subparcelas generadas, el cultivo asociado a cada una de ellas y las posibles incidencias

derivadas de las condiciones de cultivo. Los cultivos presentes en la zona y el número de parcelas visitadas se presenta en la Tabla 2.

La precisión de las clasificaciones se calculó a partir de la matriz de confusión de cada una de ellas. A partir de dicha matriz se realizó el cálculo de la Fiabilidad Global (FG) de la clasificación, la cual indica el porcentaje total de píxeles clasificados correctamente en la imagen. Por otro lado, la Fiabilidad del Productor (FP), muestra la probabilidad de que un píxel clasificado represente esa categoría en la realidad, mientras que la Fiabilidad del Usuario (FU), indica la probabilidad de clasificar algún píxel en una cate-

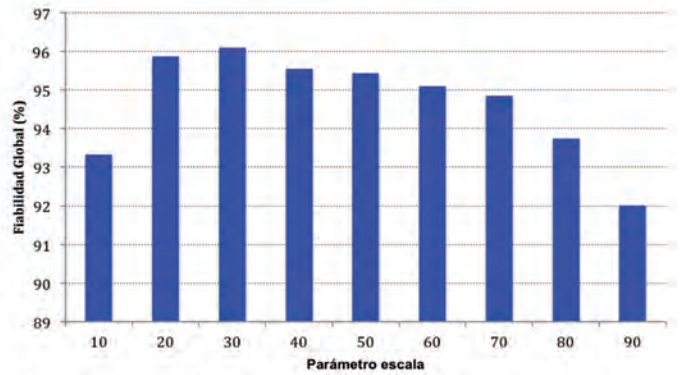
Uso declarado	Número de parcelas
Tubérculos	1
Garbanzos	2
Maíz	2
Almendros	3
Guisantes	3
Triticale	4
Centeno	5
Viñedo vinificación	6
Otros cultivos herbáceos	11
Alfalfa	14
Haboncillos	18
Habas	40
Hortalizas	55
Monte/Matorral	64
Trigo blando	79
Praderas y pastos permanentes >= 5 años	110
Avena	155
Cebada	213
Olivar	443
Tranquillón	589
Retirada obligatoria fija otros	891
Barbecho tradicional desnudo	2327
Trigo duro	2957

Tabla 2: Número de parcelas por uso registradas durante las visitas de campo

goría diferente a la real [34]. Además también se calculó el índice Kappa (K) que considera todos los valores de la matriz de confusión y tiene en cuenta que parte de la coincidencia o acierto entre lo existente en campo y lo clasificado se ha debido al azar [35].

3. RESULTADOS

La determinación del factor de escala más apropiado para la segmentación de la imagen se realizó mediante la clasificación y evaluación de distintos escenarios en los que se mantuvieron estables todos los parámetros excepto el factor de escala. Fig. (7) resume los valores de FG obtenidos al analizar variaciones del factor de escala cada 10 unidades.



Fi. 7: Fiabilidad Global (%) obtenida de la clasificación con parámetro de escala entre 10-90

Como puede observarse, el comportamiento de la segmentación presentó un crecimiento de los objetos muy estable y poco marcado que se deduce de la poca variación en la FG de las distintas clasificaciones evaluadas, un 4.08% entre la mejor y la peor. La FG más alta se alcanzó para un valor del parámetro escala igual a 30. El resultado obtenido de la segmentación fue una nueva imagen que divide la imagen original en 57234 regiones, tales que los píxeles incluidos en cada una de ellas son más parecidos entre sí que a los píxeles de las regiones vecinas. En la Fig. (8) se puede apreciar la segmentación obtenida en algunas de las parcelas objeto de este estudio.

La metodología propuesta se aplicó en nuestra área de estudio obteniendo la clasificación final. En la Fig. (8) se muestran algunas de las parcelas clasificadas, unas con cubierta vegetal y otras con tierra desnuda.

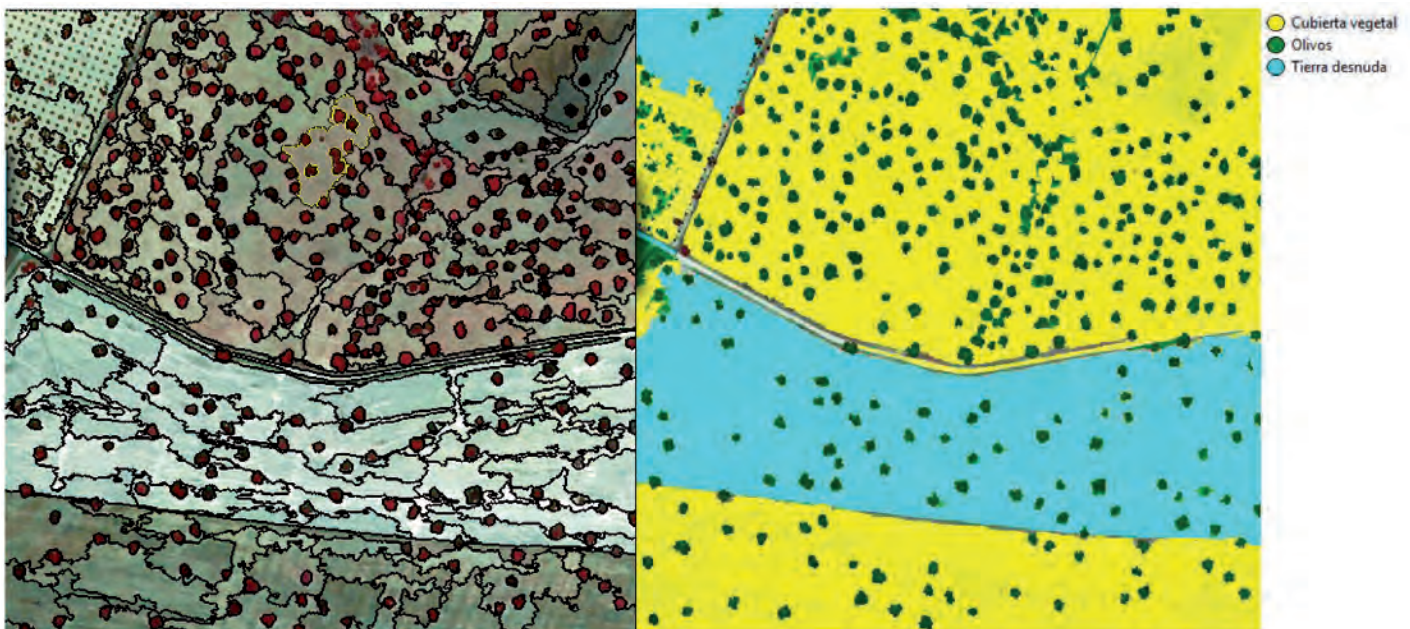


Fig. 8: Imagen segmentada (izquierda) y mapa obtenido tras la clasificación orientada a objetos (derecha)

Clases	Cubierta vegetal	Olivar	Tierra desnuda	Suma
Cubierta vegetal	275	7	3	285
Olivar	6	341	3	350
Tierra desnuda	9	11	345	365
SUMA	290	359	351	1000
Fiabilidad del productor (FP) en %	96.49	97.43	94.52	
Fiabilidad del Usuario (FU) en %	94.83	94.99	98.29	
Fiabilidad Global (FG) en %	96.10			
Índice Kappa en %	94.10			

Tabla 4: Matriz de Confusión para la clasificación orientada a objetos, Fiabilidad del Usuario (FU), Fiabilidad del Productor (FP), Fiabilidad Global (FG) e Índice Kappa (K)

En la Tabla 4 se exponen los resultados obtenidos de la matriz de confusión, FU, FP, FG y K obtenidos de la clasificación orientada a objetos empleando los parámetros óptimos anteriormente definidos.

4. DISCUSIÓN

Tal y como puede observarse en la Tabla 4, la mayor FP ha sido alcanzada en la clase olivar obteniendo un valor del 97.43% mientras que el menor valor ha sido para la clase tierra desnuda (94.52%). En el caso de la FU, el valor más alto ha sido obtenido para la clase tierra desnuda (98.29%) mientras que el valor más bajo ha sido para la clase cubierta vegetal (94.83%). Se han encontrado algunas confusiones entre las clases cubierta vegetal y tierra desnuda, ya que existen parcelas en las que la cubierta es de vegetación espontánea, por lo tanto se pueden encontrar parcelas de suelo prácticamente desnudo y otras con un mayor grado de cobertura del suelo. En consecuencia, la FG del mapa obtenido es muy elevada, situándose en el 96.10%. Por último, K presenta un valor de 94.10%.

Estos resultados apoyan las investigaciones de Thomlinson et al. [36], que indicó que el criterio para una discriminación correcta de usos de suelo no era sólo la obtención de un valor mínimo de fiabilidad global del 85%, sino también no presentar ninguna clase con menos del 70% de precisión. De acuerdo con Yu et al. [37], una fiabilidad global superior al 60% se puede considerar satisfactoria en casos de mapas complejos de vegetación. De este modo, aunque no existe un estándar en los límites de precisión, hay un consenso general de que son necesarias precisiones altas, especialmente si el mapa temático resultante puede ser utilizado como ayuda en políticas medioambientales y en la toma de decisiones para hacer frente a prácticas agrícolas sostenibles.

En la clasificación basada en píxel, cabe destacar en gran medida los problemas asociados al empleo de imágenes de alta resolución espacial, como es el caso del efecto "sal y pimienta". Este efecto, se refiere a situaciones en las que píxeles aislados y, en mucho casos erróneamente clasificados, se encuentran dispersos dentro de otra categoría de clasificación, afectando a la precisión global de la clasificación [21]. Con la clasificación orientada a objetos, se han reducido en gran medida estos problemas asociados al empleo de imágenes de alta resolución y ha permitido la separación entre distintas clases con similitudes espectrales, mejorando así los niveles de precisión. Como consecuencia de estas ventajas, se ha obtenido una precisión global del 96.55 %.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se han evaluado por un lado las fotografías aéreas digitales captadas por el sensor aéreo digital Ultracam D

de Vexcel, que han demostrado ser útiles y precisas para su aplicación en la determinación de la cobertura del suelo en olivar, empleando para ello la combinación de distintas técnicas de procesado que han permitido discriminar con exactitud las cubiertas vegetales del suelo respecto de las copas del olivar. Los resultados estadísticos muestran la validez de la metodología empleada en la cuantificación de cubierta vegetal del suelo en el cultivo de olivo, aspecto esencial para analizar la sostenibilidad de este cultivo a largo plazo.

Los resultados han mostrado un índice de fiabilidad del 96.10% aproximadamente y un excelente estadístico Kappa (94.10%). Por tanto, la clasificación orientada a objetos ha demostrado un gran nivel de precisión en la determinación de las distintas clases de uso del suelo, es decir la separación entre las copas del olivar, las cubiertas vegetales y el suelo desnudo, además ha reducido en gran medida los problemas asociados al empleo de imágenes de alta resolución.

En fotografías captadas por sensores aéreos digitales, los errores en la clasificación debido al ruido denominado sal y pimienta pueden ser considerables. Con la metodología expuesta se han conseguido reducir en gran medida dichos problemas asociados.

La falta de cobertura del suelo es uno de los principales factores que condicionan el riesgo de erosión en buena parte del olivar del área mediterránea. La clasificación orientada a objetos presentada en este trabajo permite detectar aquellas parcelas que dejan desnudo el suelo durante los periodos de lluvia más intensa. Por tanto la metodología presentada puede permitir actuar sobre estas parcelas concretas, recomendando las estrategias que minimicen el riesgo de erosión como son por ejemplo, en terrenos de grandes pendientes establecer diseños de plantación en curvas de nivel, en terrazas, o en bancales, y de manera general aumentar la cobertura del suelo con cubiertas vegetales vivas que cubran el suelo desde otoño a finales de primavera, y con sus rastrojos cubriendo el suelo el resto del año, contribuyendo así al control del riesgo de erosión.

Como conclusión final, se puede afirmar que esta nueva técnica abre nuevas posibilidades para la determinación de la cubierta vegetal en olivar, y por tanto la investigación desarrollada puede servir de herramienta para el estudio y análisis de la sostenibilidad del olivar marginal a largo plazo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Barranco D, Fernández-Escobar R, Rallo L. El cultivo del olivo. Madrid: 6ª Ed. Mundi-Prensa, 2007. 845 pp. ISBN:9788484763291
- [2] MAGRAMA (2012). Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Estadísticas Agrarias. Encuestas sobre plantaciones de árboles frutales, olivar y uva de mesa [en línea]. Disponible en web: http://www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/Distribucion_de_Olivar_y_Vi%C3%B1edo_de_Mesa_seg%C3%BA_n_estados_de_

produccionC3%B3n_(ha)_A%C3%B1o_2012_tcm7-290614.pdf [consulta: 16 de marzo de 2016]

[3] Onate JJ, Peco B. "Policy impact on desertification: stakeholders' perceptions in southeast Spain". *Land use policy*. 2005. Vol. 22(2) p. 103-114. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2004.01.002>

[4] Bermúdez FL, Sarria FA, García CC, et al. "La huella ecológica del cultivo del olivo en España y su aplicabilidad como indicador de agricultura sostenible". *Papeles de geografía*. 2004. Vol. 39. p. 141-155. DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2014.1.a04>

[5] Lizana, A. R., Pérez, A. J. E., Cervera, J. V. G., Et Fernández, R. M. O. (2005). Manejo de suelo en olivar. *Agricultura: Revista Agropecuaria*, (874), 384-392.

[6] Salmoral G, Aldaya MM, Chico D et al.(2011). "The water footprint of olives and olive oil in Spain". *Spanish Journal of Agricultural Research*. 2014. Vol.,9(4). P. 1089-1104. DOI: <http://dx.doi.org/10.5424/sjar/20110904-035-11>

[7] Palese AM, Vignozzi N, Celano G, et al. "Influence of soil management on soil physical characteristics and water storage in a mature rainfed olive orchard". *Soil and Tillage Research*. 2014. Vol.144. p. 96-109. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2014.07.010>

[8] García-Ruiz JM. "The effects of land uses on soil erosion in Spain: a review". *Catena*. 2010. Vol. 81(1). p. 1-11. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2010.01.001>

[9] Gómez J A, Giráldez, JV, Pastor M, et al. "Effects of tillage method on soil physical properties, infiltration and yield in an olive orchard". *Soil and tillage research*. 1999. Vol. 52(3). p.167-175. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00078-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00078-1)

[10] Gómez JA, Sobrinho TA, Giráldez JV, et al. "Soil management effects on runoff, erosion and soil properties in an olive grove of Southern Spain". *Soil and Tillage Research*. 2009. Vol. 102(1). p. 5-13. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2008.05.005>

[11] Mloza-Banda HR, Makwiza CN, Mloza-Banda ML."Soil properties after conversion to conservation agriculture from ridge tillage in Southern Malawi". *Journal of Arid Environments*. 2016. Vol. 127. p. 7-16. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.11.001>

[12] Santamaria-Peña, J., Sanz-Adan, F., Martínez-Rubio, A., et al. "Use of LIDAR technology for detecting energy efficient roofs in urban areas". *Dyna*. 2015. Vol. 90(6). p. 637-643. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7691>

[13] Bereciartua-Pérez A, Picon-Ruiz A. "Location and identification of buried assets by means of georadar and image processing". *Dyna* 2011 Vol. 86(4). p. 438-447. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/3965>

[14] Smits PC, Dellepiane SG, Schowengerdt RA. "Quality assessment of image classification algorithms for land-cover mapping: a review and a proposal for a cost-based approach". *International journal of remote sensing*. 1999. Vol. 20(8). p. 1461-1486. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/014311699212560>

[15] Perea-Moreno AJ, Meroño-De-Larriba JE, Aguilera-Ureña MJ. "Comparison between pixel base and object based methods for analyzing historical building façades". *Dyna*. 2016. In press.

[16] Zhu X, Helmer EH, Gao F, et al. "A flexible spatiotemporal method for fusing satellite images with different resolutions". *Remote Sensing of Environment*. 2016. Vol. 172. p. 165-177. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.016>

[17] Dean AM, Smith GM "An evaluation of per-parcel land cover mapping using maximum likelihood class probabilities". *International Journal of Remote Sensing*. 2003. Vol. 24(14). p. 2905-2920. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/01431160210155910>

[18] Russ JC. *The image processing handbook*. Boca Ratón: 7th. ed. CRC press, 2015. 1010 pp. ISBN: 9781439855980

[19] Cloutis, EA, Connery DR, Major DJ, et al. "Airborne multispectral monitoring of agricultural crop status: effect of time of year, crop type and crop condition parameter". *International Journal of Remote Sensing*. 1996. Vol. 17. p. 2579-2601. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/01431169608949094>

[20] Gil M, Ortiz J, Rego T, et al. "The Correction of the Pseudoscopic Effect on Quickbird Satellite Imagery". *Survey Review*. 2010. Vol. 42(318). p. 318-326. DOI: <http://dx.doi.org/10.1179/003962610X12747001420465>

[21] Perea AJ, Meroño J, Aguilera M, Cruz JL. "Land-cover classification with an expert classification algorithm using digital aerial photographs". *South African Journal of Science*. 2010. Vol. 106(5-6). p. 92-97. DOI: <http://dx.doi.org/10.4102/sajs.v106i5/6.237>

[22] Thomas N, Hendrix C, Congalton RG. "A comparison of urban mapping methods using high-resolution digital imagery". *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2003. Vol. 69(9). p. 963-972. DOI: <http://dx.doi.org/10.14358/PERS.69.9.963>

[23] Broge NH, Leblanc E. "Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density". *Remote sensing of environment*. 2001. Vol. 76(2). p. 156-172. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00197-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00197-8)

[24] Haboudane D, Miller JR, Patte E, et al. "Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: modeling and validation in the context of precision agriculture". *Remote Sensing of Environment*. 2004. Vol. 90. p. 337-352. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2003.12.013>

[25] Van de Voorde, De Roeck T, Canters F. "A comparison of two spectral mixture modelling approaches for impervious surface mapping in urban areas". *International Journal of Remote Sensing*. 2009. Vol. 30(18). p. 4785-4806. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/01431160802665918>

[26] Schiewe J. "Segmentation of high-resolution remotely sensed data-concepts, applications and problems". *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2002. Vol. 34(4) p. 380-385.

[27] Flanders D, Hall-Beyer M, Pereverzoff J. "Preliminary evaluation of eCognition object-based software for cut block delineation and feature extraction". *Canadian Journal of Remote Sensing*. 2003. Vol 29(4). p. 441-452. DOI: <http://dx.doi.org/10.5589/m03-006>

[28] Benz UC, Hofmann P, Willhauck G, et al. "Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information". *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*. 2004. Vol. 58(3). p. 239-258. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2003.10.002>

[29] Tian J, Chen, DM. "Optimization in multi-scale segmentation of high-resolution satellite images for artificial feature recognition". *International Journal of Remote Sensing*. 2007. Vol. 28(20). p. 4625-4644. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/01431160701241746>

[30] Perea AJ, Merono JE, Aguilera MJ "Object-based classification in aerial digital photography for land-use discrimination". *Interciencia*. 2009. Vol. 34(9). P 612-616.

[31] Pedroni L. "Improved classification of Landsat Thematic Mapper data using modified prior probabilities in large and complex landscapes". *International Journal of Remote Sensing*. January 2003. Vol.24-1. p.91-113. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/01431160304998>

[32] Lillesand T, Kiefer RW, Chipman JW. *Remote Sensing and image interpretation*. 6th edition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. 2008. 756p. ISBN: 978-0470052457

[33] Chuvieco E. *Fundamentos de teledetección especial*. Barcelona: 3ª ed. Rialp, 1996. 454 pp. ISBN: 843213127X/9788432131271

[34] Rogan J, Franklin J, Roberts DA. "A comparison of methods for monitoring multitemporal vegetation change using Thematic Mapper imagery". *Remote Sensing of Environment*. 2002. Vol. 80. p. 143-156.

[35] Congalton RG. "A review of assessing the accuracy of classification of remotely sensed data". *Remote Sensing of Environment*. 1991. Vol. 37. p. 35-46. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-b](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-b)

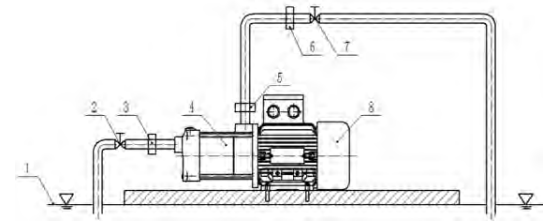
[36] Thomlinson JR, Bolstad PV, Cohen WB. "Coordinating methodologies for scaling landcover classifications from site-specific to global: step toward validating global map products". *Remote Sensing of Environment*. 1999. Vol.70. p. 16-28.

[37] Yu Q, Gong P, Clinton N, et al. "Object-based detailed vegetation classification with airborne high spatial resolution remote sensing imagery". *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2006. Vol. 72(7). p. 799-811. DOI: <http://dx.doi.org/10.14358/PERS.72.7.799>

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a las imágenes e información de campo proporcionadas por el Fondo Andaluz de garantía agraria (FAGA) a través de la Agencia de Gestión Agraria y Pesquera de Andalucía.

Effect of diffuser inlet width on cantilever multistage centrifugal pump



Efecto del ancho de la entrada al difusor en bomba centrífuga multietapa en voladizo



Jiang Xiaoping¹, Wang Chuan^{1,2*}, Wu Jiahui¹, Shi Weidong¹, Liu Sihan¹ and Yang Yongfei¹

¹ National Research Center of Pumps & Pumping System Engineering & Technology, Jiangsu University, Xuefu Road 301#, Zhenjiang, 212013, Jiangsu, China, wangchuan198710@126.com

² Maritime Research Centre, Nanyang Technological University, 50 Nanyang Avenue, 639798, Singapore.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8153> | Recibido: 12/09/2016 • Aceptado: 22/11/2016

ABSTRACT

• Five diffusers with different axial widths were constructed based on the area ratio principle to solve the problem that axial dimension errors of impeller and diffuser strongly affect the external performance and internal flow of a cantilever multistage centrifugal pump. Field calculations on a two-stage centrifugal pump were performed using the RNG *k-ε* turbulence model on ANSYS Computational Fluid X. External characteristic experiments were also conducted to benchmark the numerical calculation. The external performance and velocity distribution in the different pump models were determined. Results show that when the diffuser inlet width is less than the impeller outlet width, an increase in the diffuser inlet width always causes a reduction in the pump head, and the pump efficiency increases at a small flow rate but decreases at a large flow rate. When the diffuser inlet width is larger than the impeller outlet width, the pump head and efficiency decrease constantly, and the rate of decrease increases gradually. The core zone and turbulent boundary exist in the front pump cavity. With an increase in the diffuser inlet width, the non-dimensional circumferential component velocity in the core zone reduces gradually, the effect of turbulent boundary on the flow in the core zone weakens slowly, and the non-dimensional radial component velocity is always approximate to zero. This study provides a new reference for the matching design between impeller and diffuser.

• **Keywords:** Multistage centrifugal pump, inlet width, diffuser, front pump cavity.

RESUMEN

Se construyeron cinco difusores con diferentes anchos axiales basándose en el principio de proporción de área, para resolver el problema de que los errores de dimensión axial de rodete y difusor afecten fuertemente al funcionamiento externo y al flujo interno de una bomba centrífuga cantilever multietapa. Se realizaron cálculos de campo en una bomba centrífuga de dos etapas utilizando el modelo de turbulencia RNG *k-ε* mediante el programa informático ANSYS-Fluid X. También se realizaron experimentos externos para contrastar el cálculo numérico. Se determinaron el rendimiento externo y la distribución de velocidad en diferentes modelos de bomba. Los resultados muestran que cuando la anchura de entrada del difusor es menor que el ancho de la toma del rodete, un aumento en la anchura de entrada del difusor siempre causa una reducción en la altura de presión de la bomba y

la eficiencia de la bomba aumenta con un caudal pequeño pero disminuye con un gran caudal. Cuando el ancho de entrada del difusor es mayor que el ancho de salida del rodete, la altura de presión de la bomba y la eficiencia disminuyen constantemente y la tasa de disminución aumenta gradualmente. En la cavidad frontal de la bomba coexiste una zona interna y una periférica turbulenta. Con un aumento en la anchura de entrada del difusor, la velocidad del componente circunferencial adimensional en la zona interna se reduce gradualmente, el efecto de la periferia turbulenta en el flujo donde la zona interna disminuye poco a poco y la velocidad del componente radial adimensional siempre se aproxima a cero. Este estudio proporciona una nueva referencia para el diseño equilibrado entre rodete y difusor.

Palabras clave: Bomba centrífuga multietapa, ancho de entrada, difusor, cavidad frontal de bomba.

1. INTRODUCTION

Cantilever multistage centrifugal pump has advantages such as compact structure, easy installation, high reliability, convenient maintenance because of its very simple structure in the pump. In many fields, such as building water supply, petrochemical production, metallurgy, electric power, water conservancy, and agricultural irrigation, the traditional double-support structure of the multistage centrifugal pump is gradually replaced with the cantilever multistage centrifugal pump, and the latter is being applied widely. The multistage centrifugal pump mainly consists of an impeller and a diffuser, and the internal flows of such a pump are extremely complex [1-3]. Research has shown that the passage area ratio between the impeller outlet and the throat inlet of the diffuser is the main factor that influences the performance parameters of the multistage centrifugal pump, such as the head, flow, and axial power. As one important component part of the pump, the diffuser can convert the kinetic energy into the pressure energy of the fluids in the pump, and the conversion efficiency is influenced strongly by the match of the impeller and diffuser. However, the cantilever structure causes errors between the impeller and the diffuser to accumulate along the axial direction during installation. The accumulated errors from the design and the manufacture make the impellers and diffusers deviate from the optimal axial position, which may lead to performance reduction of the pump. Other problems caused by the accumulated errors are serious abrasion, vibration, and noise. These problems should be considered and solved.

In recent years, studies on multistage centrifugal pumps have focused on structure optimization, external performance prediction, and cavitation performance [6–11]. Wang et al. [12] simulated the entire flow field of a stainless steel punching well pump with different blade thicknesses and analyzed the influence of the blade thickness on the performance of the entire machine. Dai et al. [13] investigated the effect of the width of the single-stage impeller on the pressure fluctuation in the centrifugal pump based on experiment and numerical simulation. Considerable literature has introduced the matching state between the impeller and the diffuser. Arndt et al. [14] studied the influence of the matching of the impeller guide vane on the flow field and the performance of a centrifugal pump. Yang et al. [15] proposed a design method for the high-efficiency volute cross section of the centrifugal pump based on the principle of area ratio. However, studies on cantilever multistage centrifugal pumps remain limited. Based on the area ratio principle, five different diffusers with different axial widths are designed in this study to investigate the impeller–diffuser matching characteristic and the flow in the front pump cavity for the cantilever multistage centrifugal pump. Computational fluid dynamics (CFD) is used to explore the effect of the diffuser inlet width on the internal flow field and the external performance of the pump. This study could lay a foundation for investigating the reliability and stability of cantilever multistage centrifugal pumps.

The rest of this paper is organized as follows. Section 2 presents the five diffusers based on the area ratio principle and the setting method of numerical calculations on the multistage centrifugal pumps with different diffusers. Section 3 provides the external performance and velocity distribution in the different pump models and obtains the optimal combination of impeller and diffuser. Section 4 summarizes the results and future research directions.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. MAIN DESIGN PARAMETERS

Figure 1 shows the stainless steel cantilever multistage centrifugal pump with the following basic design parameters as follows in Table I, and the real pump model is shown in Fig. 1.

2.2. DESIGN OF MATCHING SCHEME BETWEEN IMPELLER BLADE AND DIFFUSER BASED ON AREA RATIO PRINCIPLE

The diffuser is designed with a continuous entire flow passage from the positive diffuser to the return diffuser. This design is equipped with several flow channels from the inlet of the positive diffuser to the outlet of the return diffuser, with an interference-free characteristic among the flow channels. The flow of this type of diffuser is smoother and the hydraulic performance is better than those of the radial diffuser. The main geometric parameters of the positive diffuser can be seen in Table I, and based on the area ratio principle of centrifugal pump, the area ratio coefficient of the cantilever multistage centrifugal pump is defined as follow

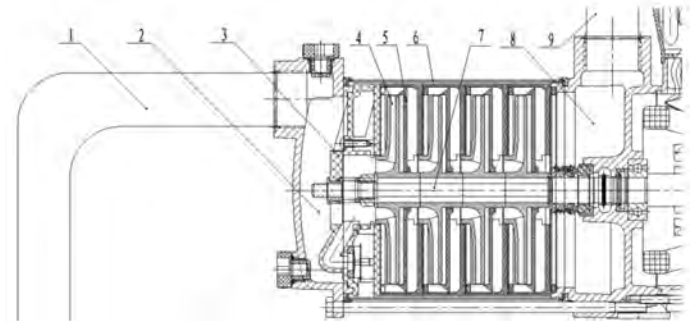


Fig. 1: Assembly diagram of cantilever multistage centrifugal pump as follows: 1. Inlet pipeline; 2. Air-water mixture cavity; 3. Self-priming plate; 4. Impeller; 5. Diffuser; 6. Outer hull; 7. Shaft; 8. Air-water separation cavity; 9. Outlet.

Geometric parameter	Value	Geometric parameter	Value
Inlet diameter of the impeller D_1 (mm)	45	Inlet diameter of the positive diffuser D_3 (mm)	104
Hub diameter of the impeller D_{hh} (mm)	20	Number of the impeller blades Z	6
Outlet diameter of the impeller D_2 (mm)	103	Rated flow Q_t (m ³ /h)	10
Outlet width of the impeller blade b_2 (mm)	10	Single-stage head H (m)	8
Outlet angle of the impeller blade β_2 (°)	16	Rotating speed n (r/min)	2800
Inlet width of the positive diffuse b_3 (mm)	11	Efficiency of the pump η (%)	56.9
Width of the throat a_3 (mm)	4.6	Number of the diffuser blades z	12

Table I: Basic geometric parameters of the original pump

$$Y = \frac{F_3}{F_2} = \frac{\text{Total area of the guide vane inlet}}{\text{Total area of the impeller outlet}} \quad (1)$$

$$F_2 = \pi D_2 b_2 \tan \beta_2 \quad (2)$$

$$F_3 = z a_3 b_3 \quad (3)$$

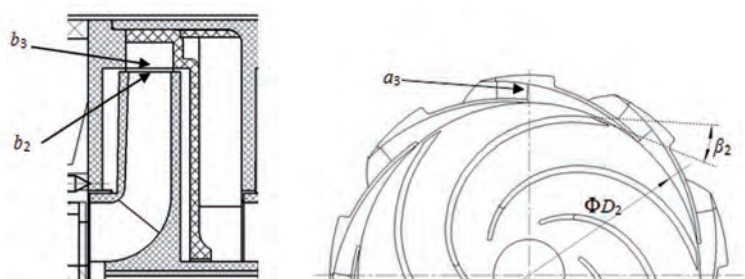
Therefore, the coefficient of cantilever multistage pump area ratio is

$$Y = \frac{F_3}{F_2} = \frac{z a_3 b_3}{\pi D_2 b_2 \tan \beta_2} \quad (4)$$

According to Equation (4), if the impeller parameters, the number of positive diffuser z , and the width of the throat a_3 are determined, then the area ratio coefficient Y is proportional to the inlet width b_3 .



Fig. 2: Flow channel and axial position of diffuser



The preliminary parameters for the diffuser of the cantilever multistage centrifugal pump are shown in Figure 1. The same impeller is matched with the positive diffusers with varying inlet widths (namely, different area ratios) to study and solve the negative effect on the pump performance caused by the axial displacement of the impeller and diffuser and to reduce the possible effect of grinding, vibration, and noise. Then, the numerical calculation method is used to determine the optimal matching relationship. When the model is assembled, the inlet width b_3 of the positive diffuser is set as 9, 10, 11, 12, and 13 mm, and each setting is matched with the same impeller with outlet width $b_2 = 10$ mm, through which the axial size of the back pump cavity formed by the position of the impeller hub and diffuser remains unchanged. The axial size of the front pump cavity b_4 changes with the diffuser inlet width b_3 (see Figure 2), and the area ratio Y changes correspondingly.

2.3. MODEL ESTABLISHMENT

Multistage centrifugal pumps are more complicated than single-stage centrifugal pumps. The swirling of the inlet flow of the impellers, except for the first one, is caused by the outlet flow of diffusers. Moreover, the efficiency of the first stage differs significantly from that of other stages. The number of stages should be determined first to improve the calculation accuracy. In the cantilever multistage pump in this study, b_2 and b_3 are set as $b_2 = 10$ mm, $b_3 = 11$ mm and the pumps for the first four stages are simu-

Stage number n	1	2	3	4
Efficiency of the first stage pump (%)	59.59%	60.09	59.98	59.02
Efficiency of the second stage pump (%)		57.58	57.54	57.61
Efficiency of the third stage pump (%)			57.88	57.76
Efficiency of the fourth stage pump (%)				57.91
Total efficiency (%)	55.66	56.97	57.43	57.36

Table II: Efficiency comparison of different stages

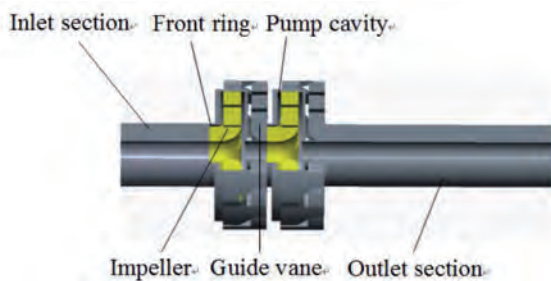


Fig. 3: Calculation model of a two-stage pump

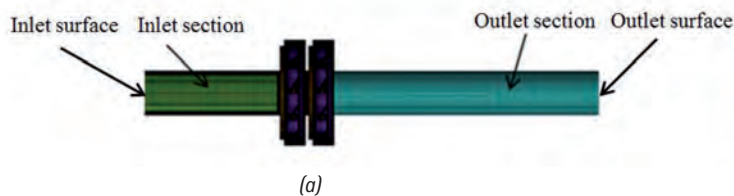


Fig. 4: Structured mesh of fluid entire flow field. (a) Entire domain. (b) Diffuser domain. (c) Impeller domain

lated numerically under the design condition. The results of the simulations for the efficiency at each stage are shown in Table II.

Table II shows that the efficiency of the first stage is relatively large, whereas the efficiency of the second stage is near that of the later stages, which verifies that the flow is irrotational in the first stage but rotational in the other stages. In consideration of the computer resource requirement, which increases with an increase in the stage number, the entire flow field model for two stages is established for this study, and the second-stage efficiency is used to predict the performance value. As shown in Figure 3, the entire flow field domain with two stages is modeled using Creo 2.0 software. The inlet and outlet sections of the water domain are extended properly to avoid the backflow phenomenon in the inlet and outlet.

2.4. MESH GENERATION

To generate a high-quality structured mesh for the water body, ICEM software is used and the mesh near the boundary layer is refined. As shown in Fig. 4, the calculation domain consists of six parts, namely, inlet section, mouth ring, impeller, pump cavity, diffuser, and outlet section. The mesh quality directly affects the calculation accuracy. Compared with the unstructured mesh, the structured mesh has better quality and is faster to generate, thereby increasing the calculation accuracy and reducing the calculation time.

As the calculation results depend on the mesh density and quality, testing the mesh independence and ensuring the quality of each flow field to be greater than 0.30 are necessary. Meshes with four different cell numbers are used for the grid independence study. The head values calculated from each case are compared, as shown in Table III. Among them, the difference in the predicted head values between cases A and B is 5.03%, whereas the deviations in cases B, C, and D are 1.52%, 1.85% and 0.33%

Case	Mesh numbers $\times 10^6$	Efficiency/%
A	0.85	60.76
B	1.86	57.85
C	2.34	56.97
D	3.81	56.78

Table III: Inspection of grid independence

respectively. With regard to the calculation time and coordination accuracy, when the total number of mesh elements is 2,340,000, the calculation requirements are not met.

2.5. SELECTING THE TURBULENCE MODEL

In this study, numerical calculations were performed with ANSYS CFX software, which provides a number of turbulence models.

Turbulence model	Standard $k-\epsilon$	RNG $k-\epsilon$	BSL $k-\omega$	Standard $k-\omega$	SST $k-\omega$	Test value
Efficiency η (%)	57.28	56.97	59.34	59.57	59.91	55.89

Table IV: Numerical and experimental results with different turbulent models under rated flow condition

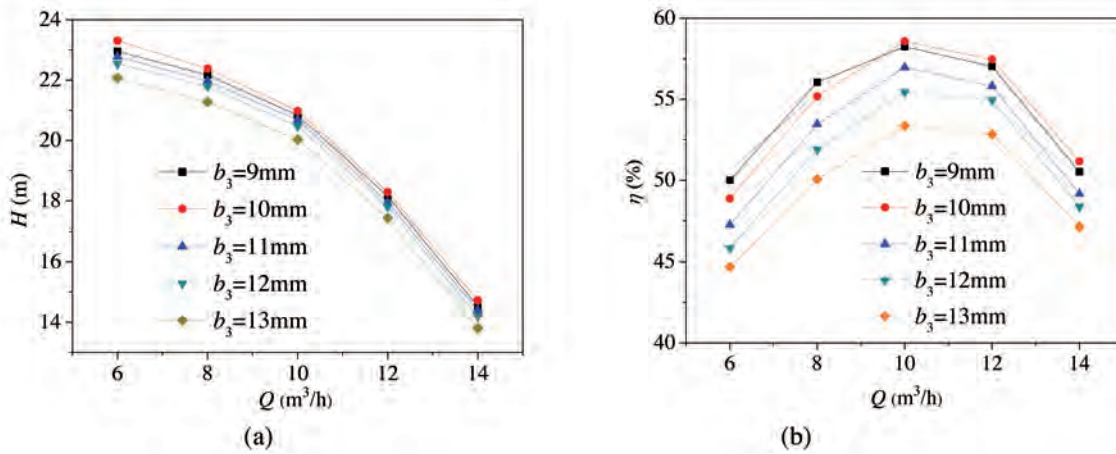


Fig. 5: Performance curve of model pumps. (a) $H-Q$. (b) $\eta-Q$

Among the turbulence models, $k-\epsilon$ and $k-\omega$ are known to be the most suitable for the internal flow of rotating machines. Therefore, five models, i.e., Standard $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$, BSL $k-\omega$, Standard $k-\omega$, and SST $k-\omega$, were selected, and their results were compared with the experimental results. Table IV shows that the prediction by RNG $k-\epsilon$ model is closest to the experimental data; thus, this model was selected in this study.

2.6. BOUNDARY CONDITION

The mesh generated through ICEM is imported in ANSYS Computational Fluid X (CFX) 14.5 to conduct the solving process. The inlet and outlet boundary of the calculation domain are the velocity inlet and free outflow respectively. The surface roughness is set to 25 μm . The rotating coordinate system is adopted in the flow field of the impeller, and the rotation speed is 2800 r/min . The rest of the flow field is set to a stationary coordinate system. As the impeller of the multistage pump and the flow passage type diffuser are composed of a curved wall surface, the streamline has a large bending degree, and the Reynolds stress has obvious anisotropy. The RNG $k-\epsilon$ turbulence model comprises the continuity equation and the Navier–Stokes equation that forms a closed set of equations. With this model, the turbulent fully developed region can be predicted efficiently. In the calculation, the head and average static pressure of the inlet and outlet sections of the

multistage pump are monitored. The average residual is calculated as the convergence criterion, and the residual value is set to 10^{-5} .

3. RESULT ANALYSIS AND DISCUSSION

3.1. COMPARISON OF EXTERNAL CHARACTERISTICS

Under the given settings, the five different diffuser models are simulated by ANSYS CFX. The performance curve of the pump with different inlet widths of the positive diffuser is obtained, as shown in Figure 5.

Figure 5(a) exhibits the curve of head and flow rate. Under the same flow condition, the head of the pump model with $b_3 = 10\text{ mm}$ is the highest, whereas that with $b_3 = 13\text{ mm}$ is the lowest. The head first increases and then decreases with the width of the diffuser varying from 9 mm to 13 mm. From the $0.6Q_{sp}$ to the $0.8Q_{sp}$ working condition, the head is sensitive to the change in the inlet width. In particular, when the width increases from 12 mm to 13 mm, the head difference value reaches the maximum with a value of 0.31 m. From the $1.0Q_{sp}$ to the $1.4Q_{sp}$ working condition, the head difference of the model pump is small, and it decreases with an increase in the flow rate. Therefore, the influence of the positive diffuser inlet width (namely, the area ratio of the impeller and the diffuser Y_1) on the head is reduced gradually with an increase in the flow rate.

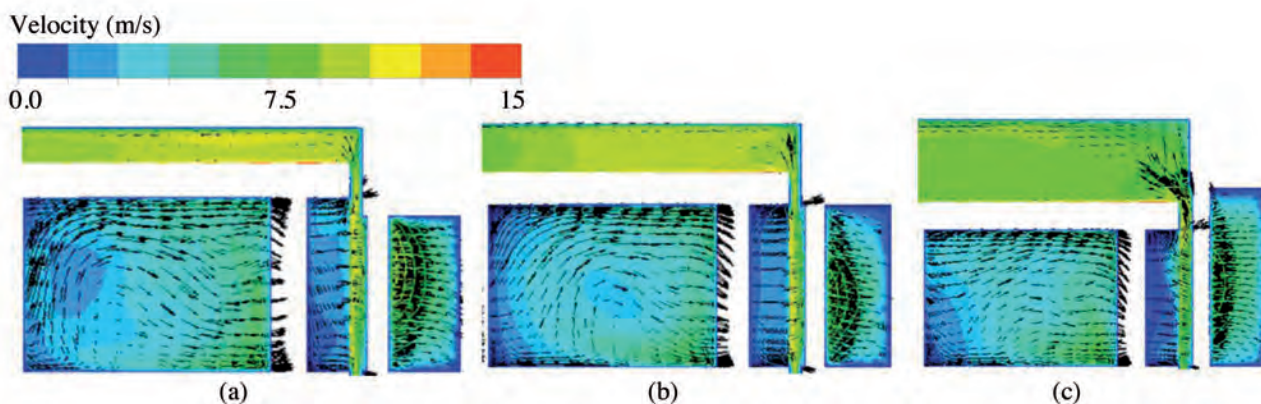


Fig. 6: Meridian velocity vector and contour. (a) $b_3 = 9\text{ mm}$. (b) $b_3 = 10\text{ mm}$. (c) $b_3 = 13\text{ mm}$

Figure 5(b) indicates that, with the increase of the diffuser inlet width, the pump efficiency under rated flow condition and large flow condition increases first and then decreases, finally reaches the highest value when $b_3 = 10$ mm. However, under the small-flow-rate condition, the efficiency of the model pump decreases with an increase in the inlet width. The pump efficiency almost keeps stable when the diffuser inlet width varies from 9 mm to 12 mm. By contrast, the pump efficiency decreases rapidly, especially in the rated condition, when the width exceeds 12 mm. Accordingly, the width of the diffuser inlet has a strong influence on the pump performance. When the width of the diffuser inlet is different under the same flow rate, the maximum values of the efficiency difference and the head difference are 7.53% and 7.70%, respectively. The preceding discussion indicates that for the multistage centrifugal pump, especially the cantilever multistage pump, the width of the positive diffuser inlet should be located within a suitable range.

3.2. ANALYSIS OF INTERNAL FLOW CHARACTERISTICS

The reasons for the increase of the head and efficiency when $b_3 = 10$ mm and their rapid decline when $b_3 = 13$ mm under the rated-flow condition are analyzed. Figure 6 presents the meridian velocity vector diagram and the velocity contour of the transition zone between the secondary impeller and the diffuser under the rated-flow condition for $b_3 = 9, 10, 13$ mm. The internal flow of the diffuser model is relatively regular, and an obvious low-velocity zone exists between the impeller outlet and the diffuser inlet. The diffuser converts the velocity energy into the pressure energy, which forms a large pressure gradient for the surrounding fluid. The low-velocity area increases with an increase in the diffuser inlet width. The velocity vector indicates that within the three types of inlet width, the impeller internal flow pattern is best in the model with $b_3 = 10$ mm.

When $b_3 = 9$ mm, as shown in Figure 6(a), part of the impeller flow channel outlet is blocked by the limited flow area because the width of the impeller outlet (10 mm) is larger than that of the width of the diffuser inlet (9 mm). The capability of flow channel diffusion is reduced, which leads to an increase of nonuniform flow in the impeller outlet. In the diffuser inlet, turbulent dissipation and significant water shock loss occur. A large residual vortex appears in the region near the suction surface of the middle part of the impeller. As a result, large hydraulic loss is produced, and the nonuniformity of the outflow can also have a significant influence on the pressure pulsation and vibration excitation. When the diffuser inlet width increases to 13 mm, the head and efficiency of the model pump decrease rapidly. The main cause of this phenomenon is that the width of the diffuser inlet is higher than that of the impeller outlet, and the fluid is thrown out and flows into the diffuser because of the impeller rotation. The velocity in the diffuser inlet is higher than that in the impeller outlet because of the area difference of the flow channels. Moreover, the secondary backflow is formed between the diffuser and the front pump cavity, thereby resulting in a large hydraulic loss in the pump, as shown in Figure 6(c). Given that the pump cavity is filled with fluid, when the impeller rotates, a disc friction loss occurs between the fluid and the cover plate of the impeller. With an increase in the width b_3 , the impeller position does not change, thereby resulting in an inevitable increase in b_4 , which is the clearance of the front pump cavity between the front cover of the impeller and the face of the front stage diffuser. The larger the value of b_4 , the more fluid is in the pump cavity gap. Therefore, considerable hydraulic loss occurs in the pump cavity circulation. The efficiency is high and the head drop of the model pump is fast when $b_3 = 13$ mm.

3.3. FLOW FIELD CHARACTERISTICS OF FRONT PUMP CAVITY

According to the preceding analysis, the influence of the diffuser inlet width b_3 on the external characteristics of the multistage centrifugal pump is closely related to the flow characteristics of the fluid in the front pump cavity. Taking the front pump cavity before the secondary impeller as an example, this paper discusses the flow characteristics of the fluid in the front of the pump cavity under different inlet width conditions of the diffuser. Given space limitations, this section analyzes the flow fields of the front pump cavity under the rated condition when the diffuser inlet width b_3 is 9, 10, and 13 mm.

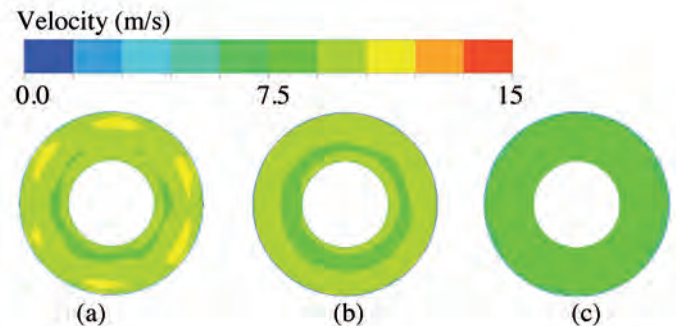


Fig. 7: Velocity distribution in front cavity. (a) $b_3 = 9$ mm. (b) $b_3 = 10$ mm. (c) $b_3 = 13$ mm

Affected by the symmetrical flow of diffusers, the velocity distribution of the fluid that is rotating in front of the pump cavity is also symmetrical. Figure 7 shows the velocity distribution in the central axial section of the front pump cavity with different inlet widths. Under the rated-flow condition, the flow velocity of the fluid in the front pump cavity first increases and then decreases along the radial direction. The change is relatively uniform. Owing to the combined effect of radial leakage flow that exists in the ring clearance and the rotation of the front cover plate of the impeller, the value of the pressure gradient and the velocity of the fluid decrease (the minimum velocity value is up to 1 m/s) at the position of a larger radius. When b_3 increases from 9 mm to 10 mm and then to 13 mm, the average velocity of fluid in the front pump cavity continues to decrease. The absolute velocity when b_3 is 13 mm is obviously smaller than that when b_3 is 9 mm, which indicates that the core rotation zone exists between the rotating front cover plate and the static wall. The effect of the rotating front cover plate on the core area decreases with an increase in the diffuser inlet width.

The circumferential and radial flow characteristics of the fluid in the front pump cavity are studied; thus, the effect of b_3 and b_4 on the flow characteristics in the front of the pump cavity can be further discussed. Figures 8 and 9 show the non-dimensional circumferential velocity and the non-dimensional radial velocity distribution of the monitoring points that are located in the three circles on the velocity distribution photos of the front pump cavity with radii of 0.6, 0.8, and 1.0 R along the axial direction, respectively. The non-dimensional circumferential velocity represents the ratio of circumference velocity component v_u against the impeller rotational velocity w_u at the monitoring point. The non-dimensional radial velocity component represents the ratio of the radial velocity v_r against the impeller rotational velocity w_r at the monitoring point. S represents the distance between the monitoring point and the static wall surface, δ is the thickness of

the front pump cavity, and R is the radius of the impeller. The fluid flow in the front pump cavity is axially symmetric; thus, any of the axial sections in the pump cavity could be selected.

Figures 8(a) to 8(d) illustrate that the front pump cavity has a core flow region where the non-dimensional circumferential ve-

locity is almost unchanged under the rated-flow condition. The comparison of three kinds of inlet width shows that with the increase of the pump cavity thickness, the axial length of the core flow region increases, and the core region becomes closer to the static wall of the diffuser. Furthermore, the non-dimensional cir-

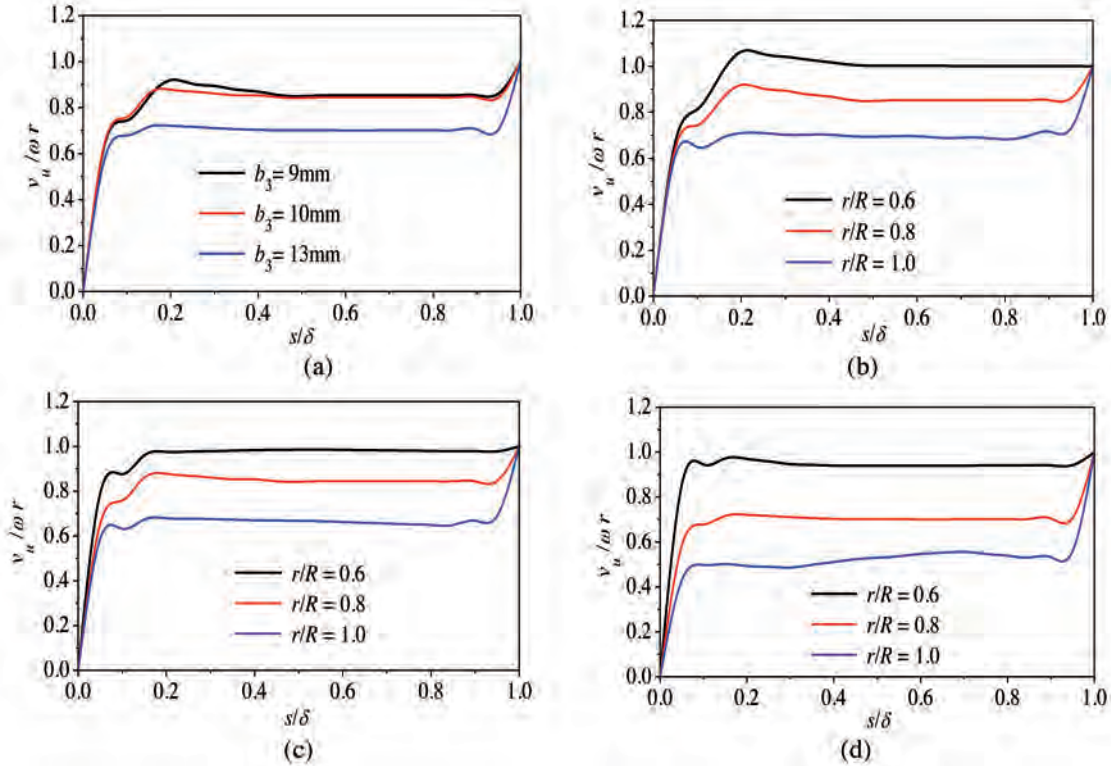


Fig. 8: Axial distribution of circumferential velocity. (a) 0.8 R. (b) $b_3 = 9\text{ mm}$. (c) $b_3 = 10\text{ mm}$. (d) $b_3 = 13\text{ mm}$

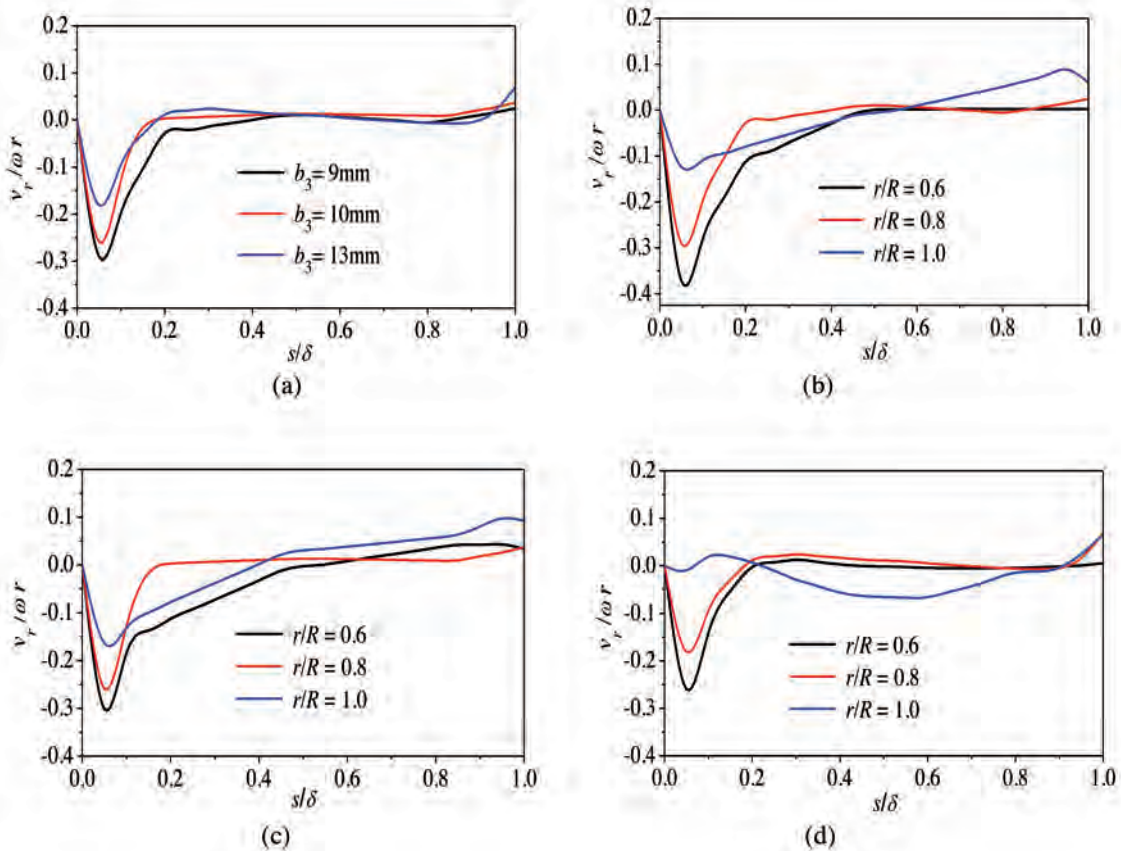


Fig. 9: Axial distribution of radial velocity. (a) 0.8 R. (b) $b_3 = 9\text{ mm}$. (c) $b_3 = 10\text{ mm}$. (d) $b_3 = 13\text{ mm}$

cumferential velocity is larger near the shroud of the impeller, and the non-dimensional circumferential velocity is small where it is close to the static wall. In the same axial section, with an increase in r/R , the dimensionless circumferential velocity of the core region decreases gradually. In the core area where the diameter is $0.6 R$, the non-dimensional circumferential velocity is larger with a value of almost 1. According to the analysis, such a phenomenon is mainly caused by the leakage flow of the ring clearance. When the high-energy fluid flows from the impeller outlet to the front of the pump cavity, the fluid with a higher velocity transfers the energy to the fluid where the position is at a small radius because of the viscous force effect. Figure 8(a) also shows that when $b_3=9$ mm or 10 mm, the difference in the non-dimensional circumferential velocity component is small at $0.8 R$. When b_3 increases to 13 mm, the non-dimensional circumferential velocity decreases significantly, because the increase in the pump cavity axial clearance weakens the mutual interference of the core area flow and boundary layer flow.

The non-dimensional radial velocity distribution of the diffuser with different inlet widths along the axial direction at a radius of $0.8 R$ is shown in Figure 9(a). A core flow area remains in the pump cavity, but the general trend decreases. As shown in Figures 9(b) to 9(d), at the same radial position in the pump cavity with different axial widths, the non-dimensional radial velocity along the axial direction first decreases and then increases gradually after reaching the minimum value. Thereafter, the value stabilizes at approximately 0 because the pump cavity flow is mainly composed of the core area flow and boundary layer flow. The fluid near the rotating impeller front cover is influenced by the "pump capacity" of the rotary impeller cover. Given that the centrifugal force overcomes the force caused by the radial pressure difference, the fluid flows to the outer diameter. Nevertheless, the radial velocity component is smaller than the absolute velocity of the cover plate that leads to a small non-dimensional radial velocity in the impeller front cover wall surface.

velocity appears at the outer diameter when the diffuser inlet is larger than the impeller outlet width.

3.4. EXPERIMENTAL VERIFICATION OF PUMP MODELS

Two groups of pump model with the diffuser width of $b_3 = 11$ mm (original model) and $b_3 = 10$ mm (optimal model) are converted into a prototype to verify the actual reliability of the numerical calculation. The simulations were performed at five flow points ($Q = 1.65, 2.64, 3.3, 3.96, 5.4$ m³/h). At the same time, the hydraulic models were shown to a pump company in Fujian Province, and a five-stage centrifugal pump was manufactured. Then, the pump was sent to the National Water Pump and System Engineering Technology Research Center of Jiangsu University for performance testing. As shown in Figure 10, the test rig is an open-type system, which is composed of two parts—acquisition and water circulation systems. A turbine flowmeter was used to measure the flow rate Q with a precision of $\pm 0.3\%$. The pump speed n was measured by a tachometer (PROVA RM-1500, Taiwan) with a precision of $\pm 0.04\%$. During the experiment, two pressure transmitters (CYG1401, China) with a precision of $\pm 0.2\%$ were used to measure the inlet and outlet pressures.

The comparisons between the numerical and experimental results are presented in Figure 11. The efficiency curves of the numerical and experimental results are nearly the same in the trend. Under the rated flow condition and large flow rate conditions, the numerical and experimental values present an insignificant difference and have a good agreement. The error under the rated-flow condition is within 3%. Under the small flow condition, the calculated value is significantly higher than the experimental values, and their error is large. According to the analysis, given that the pump operates under the small-flow-rate condition, flow separation and shock phenomenon are prone to appear in the flow components and result in large hydraulic loss, but the error is less than 3%. Thus, the numerical prediction has relatively high accuracy. The results show that the performances of the pump can be credibly predicted using CFD through the entire calculation model and appropriate numerical setting method.

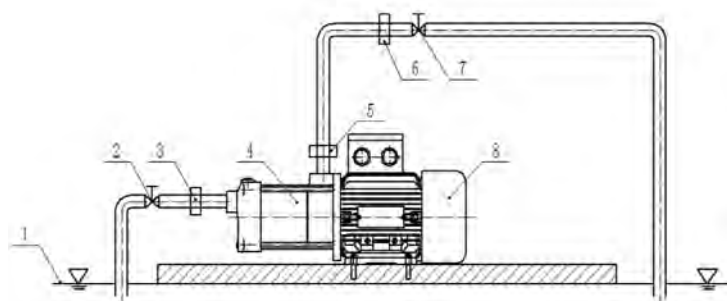


Fig. 10: Schematic diagram of the test rig: 1. Pool 2. Inlet control valve 3. Inlet pressure transmitter 4. Pump 5. Outlet pressure transmitters 6. Turbine flowmeter 7. Flow control valve 8. Motor

At the side close to the static wall, the angular velocity produced by the fluid is too small to overcome the radial pressure difference induced by the ring leakage. Consequently, a negative non-dimensional radial velocity exists near the wall surface. With an increase in the axial clearance of the pump cavity, the absolute value of the non-dimensional radial velocity decreases. When the width of b_3 is 13 mm, the minimum value is 0.26. The radial velocity of the fluid in the core region is relatively small in relation to the boundary layer, and no radial flow basically exists. When b_3 is 13 mm and $r/R=1.0$, the dimensionless radial velocity in the same position is obviously different from that when b_3 is 9 or 10 mm, indicating that the non-uniform distribution of the radial flow field

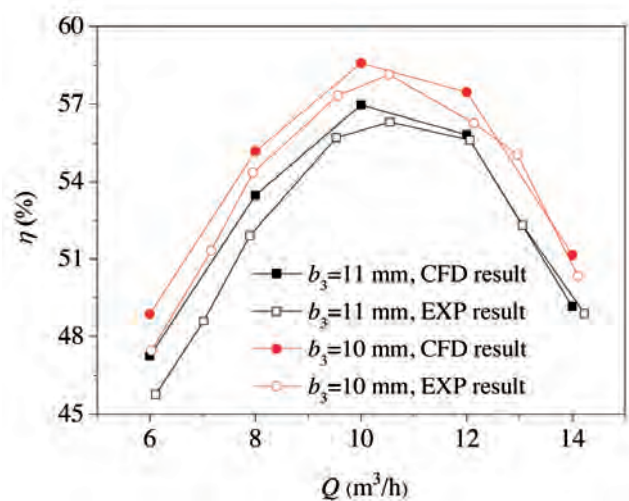


Fig. 11: Comparisons between the numerical and experimental results

4. CONCLUSIONS

In this study, five groups of three-dimensional CFD simulations are conducted to analyze the effect of axial errors between

the impeller and the diffuser on the external characteristics and the internal flow of a cantilever multistage centrifugal pump. The conclusions drawn from this study are as follows:

- (1) The diffuser inlet width that is smaller than the impeller outlet width results in a low pump head. With an increase in the diffuser inlet width, the efficiency increases under the small-flow-rate condition but decreases under the large-flow-rate condition. By contrast, the head and efficiency decrease with an increase in the diffuser inlet width, and the decreasing rate becomes significant when the diffuser inlet width increases to 13 mm.
- (2) The low-velocity zone exists in the transition section from the impeller to the diffuser in the different models. The low-velocity zone is more obvious in the diffusers with a larger inlet width. When the diffuser inlet width is small, the trapped vortex appears in the impeller center near the suction surface area. The secondary back flow forms easily between the diffuser and the pump cavity in the models with a large inlet width.
- (3) The flow field in the front pump cavity is symmetric, and the core area and the turbulent boundary layer exist in the middle of the pump cavity. The boundary layer of the turbulent flow is strongly affected by the leakage of the front ring. With an increase in the diffuser inlet width, the turbulence boundary has a weaker effect on the core flow region.
- (4) The accumulated errors from the design and the manufacture may make the impellers and diffusers deviate from the optimal axial position, which may lead to performance reduction of the pump. Firstly, the diffuser inlet width should not be smaller than the impeller outlet width so that the pump performance keeps stable. Secondly, it's best to make the central plane of the impeller coincide with that of the positive diffuser to keep a high efficiency. Thirdly, it's very necessary to check the axial position of the impeller before running.

This paper only presents the experimental results of the optimal pump model. In the next step, different numerical models should be processed with the real experimental models to verify the accuracy of numerical calculations completely. Moreover, vortex distribution, as an important flow characteristic in the pump, should be considered in future studies.

BIBLIOGRAPHY

- [1] Zhou L, Shi W D, Li W, et al. "Particle Image velocimetry measurements and performance experiments in a compact return diffuser under different rotating speed". *Experimental Techniques*. February 2016. Vol 40-1. p.245-252. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s40799-016-0028-6>.
- [2] Hydraulic Institute, Europump and US-DOE, 2004. "Variable speed pumping: a guide to successful applications". Hydraulic Institute, New York, NY.
- [3] Hergt P H. "Pump research and development: past, present, and future". *Journal of Fluids Engineering*, January 1999. Vol 121-2. p.248-253. DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.2822198>.
- [4] Ouchbel T, Zouggar S, Elhafyani M L, et al. "Power maximization of an asynchronous wind turbine with a variable speed feeding a centrifugal pump". *Energy Conversion and Management*. February 2014. Vol 78-1. p.976-986. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.08.063>. 2014, 78-2: 976-984.
- [5] Goto A, Nohmi M, Sakurai T, et al. "Hydrodynamic design system for pumps based on 3-D CAD, CFD and inverse design method". *ASME Journal of fluids Engineering*. February 2002. Vol 124-2. p.329-335. DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.1467599>.
- [6] Park J H, Kim C G, Lee Y H. "Efficient energy storage method by multistage

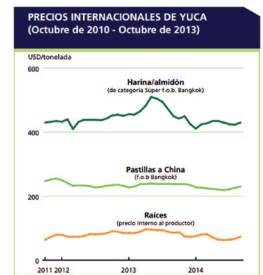
- pump of the energy storage system using CFD". *International Journal of Energy Research*. October 2015. Vol 40-5. p.685-691. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/er.3432>.
- [7] Suh S H, Rakibuzzaman, Kim K W, et al. "A study on energy saving rate for variable speed condition of multistage centrifugal pump". *Journal of Thermal Science*. November 2015. Vol 24-6. p.566-573. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11630-015-0824-9>.
- [8] Sedlář M, Krátký T, Zima P. "Numerical analysis of unsteady cavitating flow around balancing drum of Multistage Pump". *International Journal of Fluid machinery & systems*. April 2016. Vol 9-2. p.119-128. DOI: <http://dx.doi.org/10.5293/IJFMS.2016.9.2.119>.
- [9] Barrio R, Fernández J, Blanco E, et al. "Estimation of radial load in centrifugal pumps using computational fluid dynamics". *European Journal of Mechanics - B/Fluids*. May 2011. Vol 30-3. p.316-324. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.euromechflu.2011.01.002>.
- [10] Murugesan C, Rudramoorthy R. "Numerical and experimental study of single stage and multistage centrifugal mixed flow submersible borewell pumps". *International Journal of Fluid Machinery & Systems*. April 2016. Vol 9-2. p.107-118. DOI: <http://dx.doi.org/10.5293/IJFMS.2016.9.2.107>.
- [11] Rakibuzzaman, Suh S H, Kim H H, et al. "Cavitating Flow Analysis of Multistage Centrifugal Pump". *Journal of Fluid Machinery*. February 2015. Vol 18-1. p.65-71. DOI: <http://dx.doi.org/10.5293/kfma.2015.18.1.065>.
- [12] Wang C, Shi W D, Lu W G et al. "Effect and experiment of different blade thickness on stainless steel stamping well pump performance". *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*. July 2012. Vol 43-7. p.94-99. DOI: <http://dx.doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2012.07.017>.
- [13] Dai H, Liu H, Ding J, et al. "Effects of impeller outlet width on pressure pulsation in two side chambers of centrifugal pump". *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*. February 2015. Vol 33-1. p.20-25. DOI: <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1674-8530.14.0057>.
- [14] Agrawal N, Agrawal K, Mhaske S. "Experimental investigation of rotor-stator interaction in a centrifugal pump with several vaned diffusers". *Journal of Turbomachinery*. February 1990. Vol 13-1. p.1-6. DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.2927428>.
- [15] Yang J, Zhang R H, Wang C L, et al. "Calculation method of area ration and volute cross area for centrifugal pump". *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. August 2006. Vol 42-9. p.67-70. DOI: <http://dx.doi.org/10.3901/JME.2006.09.067>.

APPRECIATION

This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (5160091044), National Science and Technology Small and Medium-sized Enterprise Technology Innovation Foundation under Grant No.14C26213201080, the Jiangsu Natural Science Foundation under Grant No.BK20141302, the Key Research and Development Program of Jiangsu under Grant No.BE2015001-2 and No.BE2015119, the Policy Guidance Class in Jiangsu under Grant No.BY2015064-06, and the Funding for the Construction of Dominant Disciplines in Colleges and Universities in Jiangsu under Grant No.PAPD.

Valorización de lodos procedentes de plantas de tratamiento de agua potable. Una apuesta por la economía circular y sostenibilidad

Valorization of sludge from drinking water treatment plants. A commitment to circular economy and sustainability



Juan-José Argudo-García¹, Valentín Molina-Moreno², Juan-Carlos Leyva-Díaz³

¹ SOMAJASA. Sociedad Mixta del Agua Jaen S.A. Calle Santa María, 40 bajo - 23320 Torreperogil (Jaén). Tfno: +34 953 77 83 71.

² Universidad de Granada. Departamento de Organización de Empresas. Campus Universitario de Cartuja, s/n - 18071 Granada. Tfno: +34 958 249598.

³ Universidad de Granada. Departamento de Ingeniería Civil. Campus Universitario de Fuentenueva, s/n - 18071 Granada.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8024> | Recibido: 11/04/2016 • Aceptado: 03/05/2016

ABSTRACT

- Waste products are generated in a Drinking Water Treatment Plant (DWTP) such as the sludge coming from, mainly, the phases of settling and filtration. Currently, this is becoming increasingly difficult due to the high volume produced and the shortage of disposal options. The objective of the present article is to incorporate the concepts of circular economy and technological nutrient in the valorization of the sewage sludge that is generated in a DWTP. In light of this, it is expected to give answer to the European Directive about circular economy, since the limited availability of suitable agricultural land for sludge application, as well as the risks of pollution of surrounding surface water and ground water bodies has made it necessary to reduce, and even to avoid, the discharges, including the sludge in the productive process as technological nutrient. This enables to use the sludge as basis for the development of additives in the ceramic industry and the production of cements, as well as to recover a fraction of the coagulant and flocculant to use them in the own process of a DWTP.
- **Keywords:** Water, Sludge, Valorization, Technological Nutrient, Circular Economy.

RESUMEN

En una Estación de Tratamiento de Agua Potable (ETAP) se generan residuos como son los lodos procedentes, fundamentalmente, de las etapas de decantación y filtrado. En la actualidad, esto supone un grave problema debido al gran volumen que se produce y a la escasez de ámbitos en los que se pueden disponer. El objetivo del presente artículo es incorporar los conceptos de economía circular y nutriente tecnológico en la valorización de los lodos residuales que se generan en una ETAP. De esta forma, se pretende dar respuesta a la Directiva Europea sobre economía circular, ya que la saturación del territorio en cuanto a la aplicación agrícola del lodo, así como la sensibilidad del mismo en relación a una posible contaminación de las aguas superficiales y subterráneas hace necesario reducir, e incluso evitar, los vertidos, incorporando el lodo en el proceso productivo como nutriente tecnológico. Esto permite utilizar los lodos como base para el desarrollo de aditivos en la industria cerámica y la fabricación de cementos, así como recuperar parte del coagulante y floculante utilizados para su empleo en el propio proceso de una ETAP.

Palabras clave: Agua, Lodo, Valorización, Nutriente Tecnológico, Economía Circular.

1. INTRODUCCIÓN

En el contexto actual y desde el punto de vista económico, el agua se considera como un recurso escaso y limitado lo que conlleva que desde los poderes públicos se deba de plantear cómo debe de hacerse una buena valorización de este recurso biológico desde el punto de vista tanto de su uso como de su posible reutilización después de que el mismo se haya utilizado en un proceso industrial como es el caso del presente trabajo. En este sentido, la ciencia económica plantea un nuevo paradigma al que denomina *Economía Circular*, que promueve que todos los factores de producción que intervienen en un proceso industrial, donde se conviertan *inputs* en *outputs*, deben de tener la consideración de ser reutilizables tanto para el mismo proceso como para otros procesos, no generando ningún tipo de residuo ni externalidades negativas derivadas de los mismos.

El tratamiento de aguas para consumo humano requiere de distintas fases, que van desde el pretratamiento hasta la desinfección final de dichas aguas, de tal manera que se van eliminando las sustancias contaminantes que el agua bruta lleva en suspensión, debido a que el agua bruta destinada a consumo humano se toma mayoritariamente de los embalses o de los ríos, por lo que las bombas de aspiración incorporan gran cantidad de tierra y barro del lecho del río [1]. Además, el aumento de las actividades humanas dentro de las áreas urbanas provoca la contaminación del agua y la degradación de la calidad del agua en ríos y acuíferos [2].

La potabilización de aguas superficiales por medio de tratamientos fisicoquímicos genera un volumen de fango de aproximadamente el 5% del volumen total de agua tratada. El fango producido en una Estación de Tratamiento de Agua Potable (ETAP) procede de la purga del decantador y del lavado de los filtros de arena. En el caso de España, la obtención de agua potable para consumo humano proviene en más del 80% de los casos de la potabilización de aguas superficiales, generándose 120.000 toneladas/año de este residuo en más de doscientas Estaciones de Tratamiento de Agua Potable (ETAPs) [3], que producen 1.35·10⁹ m³/año de agua potable [4].

En la actualidad, la gran cantidad de fango producido por las ETAPs y la escasez de ámbitos en los que se puede disponer el mismo provocan un grave problema como consecuencia de la saturación de los suelos en relación a la aplicación agrícola del fango

y a la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas. En este sentido, se hace necesario valorizar dicho residuo de modo que sea convertido en un nutriente tecnológico que pueda ser reincorporado a la cadena de producción, dando respuesta a las directrices europeas sobre economía circular [5]. En este trabajo se analiza la reutilización del fango procedente de una ETAP en la industria cerámica y cementera.

2. POTABILIZACIÓN DEL AGUA Y GENERACIÓN DE LODOS

El proceso de potabilización de las aguas subterráneas, aguas de manantiales, aguas procedentes de ríos y/o embalses consta de un filtrado inicial para retirar los fragmentos sólidos de gran tamaño, realizando una precloración posterior con cloro o hipoclorito para eliminar los microorganismos del agua. A continuación, se lleva a cabo un proceso de coagulación-floculación cuyo objetivo es favorecer que las partículas sólidas precipiten formando flóculos mediante la adición de coagulantes y floculantes. Seguidamente, la corriente de agua se somete a un proceso de decantación en el que se eliminan los flóculos formados y otras partículas presentes en el agua. El agua también pasa por filtros de arena para eliminar las partículas que aún puedan quedar, reduciendo a la vez su turbidez. Finalmente, se realiza una cloración para eliminar los microorganismos más resistentes y para la desinfección de las tuberías de la red de distribución (Fig. 1).

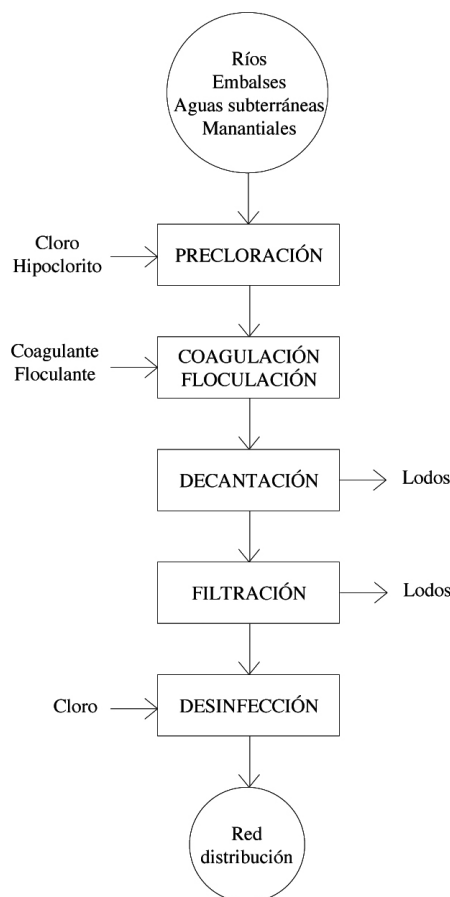


Fig. 1: Diagrama de flujo de una ETAP con tratamiento tipo A2

Una de estas etapas es la decantación, mediante coagulación como fase de desestabilización del coloide, y la posterior de floculación, que no ocurre a la vez, como etapa de agrupamiento de las partículas desestabilizadas en microflóculos y luego en aglomerados más voluminosos llamados flóculos, y con ellos, el agente floculante.

El coagulante más utilizado es el sulfato de aluminio multihidratado, que se disocia en agua y sufre una serie de reacciones con los iones alcalinos presentes en solución acuosa, formando iones complejos que pueden ser adheridos sobre las partículas coloidales suspendidas en el agua produciendo la desestabilización de las cargas y favoreciendo la sedimentación [6]. También se usan los coadyuvantes de coagulación en el proceso de floculación, como por ejemplo los derivados del almidón.

Desde la aparición del RD 140/2003, de 7 de febrero, donde se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano, y la Orden SCO/3719/2005, de 21 de noviembre (ya derogada), se regulan las sustancias para el tratamiento de agua destinada a la producción de agua de consumo humano. Se dejaron de usar los polímeros orgánicos de síntesis a base de poliácridamidas debido a que las dosis permitidas eran demasiado bajas para conseguir resultados eficaces en las ETAPs mediante procesos fisicoquímicos habituales [7].

El problema radicó en que se desconocía el nivel de migración de los polímeros al agua, de tal manera que al no tener la certeza de si producían reacción con el agua, se prohibió el uso de dichas poliácridamidas, y en su lugar se emplean almidones modificados, como establece la Orden SSI/304/2013, de 19 de febrero, en su anexo I.

La descarga de residuos de una ETAP en las corrientes naturales de agua puede plantear problemas importantes, puesto que en estas instalaciones sólo se gestionaba la producción de agua potable durante 24 horas, sin preocuparse en exceso de los lodos que se generan tanto en la decantación como en el lavado de filtros (Fig. 1) [8], pudiendo ocasionarse los denominados depósitos o "bancos de lodos". En la Tabla 1 se muestra, a modo de ejemplo, la producción de lodos en una ETAP del Canal de Isabel II de Madrid.

En relación al documento "Hacia una Economía Circular: un programa de cero residuos para Europa" [9], este aborda el concepto de la economía circular como aquella ciencia social que se preocupa de los recursos actuales sin provocar externalidades negativas y valora el residuo como un nuevo recurso, como un nutriente tecnológico (concepto de los doctores Molina-Moreno y Leyva-Díaz, de la Universidad de Granada). Según afirman los autores Argudo-García, Molina-Moreno y Leyva-Díaz, se puede considerar la economía circular como una ciencia social que estudia la asignación eficaz y eficiente en términos de sostenibilidad de los factores productivos generando un proceso de producción o prestación de servicios que no conlleva la existencia de externalidades negativas para el ecosistema. De este modo, se reduce la cantidad de materiales necesarios para la prestación de un servicio y se prolonga la vida útil de los productos (durabilidad). Se hace necesario, por tanto, desarrollar los procesos productivos en consonancia a las líneas que marca la economía circular. En el caso de una ETAP, los lodos generados desde el punto de vista económico constituyen una externalidad negativa de un proceso industrial donde el agua como nutriente biológico se convierte en un residuo con alta potencialidad negativa hacia el medio ambiente. Esta po-

Caudal de tratamiento	Purga Decantadores		Lavado filtros		Mezcla	
Caudal agua tratada (m³/s)	Volumen (m³/día)	Concentración lodo (Kg/m³)	Volumen (m³/día)	Concentración lodo (Kg/m³)	Volumen (m³/día)	Concentración lodo (Kg/m³)
1	276	4,5	1680	0,25	1956	0,849

Tabla 1: Lodos producidos en una ETAP del Canal de Isabel II (modificado de Ramírez Quirós [8])

tencialidad puede ser aprovechada mediante la instalación de una planta de tratamiento de lodos del agua potable, no muy complejas en su proceso [8], que conviertan ese residuo en un nutriente tecnológico reutilizable.

3. VALORIZACIÓN DE LODOS PROCEDENTES DE UNA ETAP

Entre las diferentes opciones de utilización de los lodos producidos en una ETAP, se pueden destacar las siguientes [4]:

- Envío de los fangos a vertedero controlado después de su deshidratación (60-70% de humedad).
- Aplicación en suelos agrícolas o forestales.
- Reutilización de los fangos para la fabricación de materiales cerámicos y aditivos de cementos en la industria cerámica y en el sector de la construcción.
- Recuperación de compuestos aluminosos y almidón para reutilizarse como agentes coagulantes y floculantes en el tratamiento de aguas.

Generalmente, estos lodos deshidratados se han enviado a vertedero o se han aplicado en suelos agrícolas o forestales [10,11,12], aunque debido a sus propiedades inertes, y no tóxicas, se podrían usar también en rellenos de terrenos y canteras ya explotadas, o compostaje junto a fangos procedentes de depuración de aguas residuales [8]. Dado el gran volumen de lodos generados en las ETAPs y la tendencia a reducir la generación de residuos, convirtiendo a estos en nutrientes tecnológicos que se reincorporen al ciclo de producción, varios estudios han analizado diferentes alternativas para valorizar dichos lodos. Entre las mismas, resultan de especial interés la reutilización de los lodos para la fabricación de materiales cerámicos y aditivos de cementos, así como la recuperación de compuestos aluminosos y almidón para reutilizarse en la etapa de coagulación-floculación de una ETAP.

El primer paso para la valorización de los lodos generados sería la caracterización de los mismos, para lo cual se suelen usar algunas normas como las citadas a continuación:

- UNE-EN 14701-4. Caracterización de lodos. Propiedades de filtración. Determinación de la capacidad de drenaje de lodos floculados.
- UNE-EN 14701-2:2013. Caracterización de lodos. Propiedades de filtración. Determinación de la resistencia específica a la filtración.
- UNE-EN 14702-2:2007. Caracterización de lodos. Propiedades de sedimentación. Determinación de la aptitud para el espesado.
- UNE-CEN/TR 15473:2008-IN. Caracterización de lodos. Buenas prácticas para el secado de lodos.

Asimismo, habría que tener en cuenta la normativa de la Unión Europea sobre eliminación de residuos y su aplicabilidad a corto plazo [13].

Ramírez Quirós [8] establece un tratamiento para la reutilización de los fangos en las industrias cerámica y cementera, que permiten obtener aditivos de cemento, ladrillos, cerámica, etc. El proceso es fácil de implementar y los productos fáciles de comercializar ya que el lodo suele contener los principales componentes de arcillas, usadas para elaborar productos cerámicos, que incluyen óxidos de aluminio, sílice y hierro [14]. Dicho tratamiento de los lodos consta de las siguientes etapas [8]:

1. Mezcla de distintos lodos, procedentes de decantación mediante purga y de filtrado.

2. Espesamiento de lodos poco concentrados, que va desde 0,2 g/L a 0,5 g/L de materia seca, de filtrado o de decantación, respectivamente. Puede ser por gravedad o flotación.
3. Deshidratación, para conseguir valores de un 20% de sequedad de la materia, se somete a filtración o centrifugación el lodo previamente espesado.

Como antecedentes de esta opción de aprovechamiento se pueden mencionar a Dillion et al. [15], que mostraron el potencial resultante al incorporar lodos provenientes de coagulación con sales de aluminio y sales férricas en varios procesos de fabricación de cemento, ladrillos, hierro y acero, cerámica y materiales refractarios en el Reino Unido. En este sentido, el lodo deshidratado podría emplearse como aditivo en la industria cerámica [1]. Gonçalves, et al. [16] presentaron un estudio sobre la incorporación de lodos de una ETAP en Portugal, como aditivo en la elaboración de mortero, encontrando que el lodo deshidratado y secado a 105°C inhibía el proceso de secado y endurecimiento de la pasta del mortero, por lo que concluyeron que el lodo tratado térmicamente a no menos de 450°C es la mejor opción para fabricar mortero, mejorando el tiempo de secado, pero disminuyendo un poco la resistencia mecánica.

Además, los lodos deshidratados y sometidos a procesos de cocido y las cenizas generadas en la combustión de dichos lodos se pueden usar con distintos aditivos, después del tratamiento térmico, en diferentes productos cerámicos [17,18]. Hernández et al. [19] estudiaron el aprovechamiento de lodos aluminosos generados en una ETAP mediante su incorporación en la fabricación de ladrillos cerámicos. En cuanto a lodos con alto contenido en almidón, estos se pueden utilizar como aglutinantes y formadores de poros en la fabricación de cerámicas porosas [20]. En esta línea, los lodos pueden ser usados como aditivos para producir cerámica refractaria con alto contenido en alúmina, conglomerado de peso ligero, cerámica vítrea y como materia prima para la fabricación de *clinker* [21,22,23,24]. El fango producido también puede ser un sustituto potencial para la arcilla de los ladrillos porque su composición química es muy similar [25].

Los lodos procedentes de una ETAP también se usan en la industria de la construcción, considerándose una opción económica y medioambientalmente aceptable [26]. Cerdeño del Castillo y Pérez Lorenzo [27] estudiaron la fabricación de materiales cerámicos para la construcción a partir del fango generado en una ETAP. Alleman y Berman [28] demostraron que la arcilla convencional podía ser parcialmente complementada con fango para la fabricación de ladrillos. Según Pereira et al. [29], esto puede reducir el coste de fabricación debido a la utilización de un residuo como es el lodo y, al mismo tiempo, puede ayudar a resolver un problema medioambiental. Por lo tanto, la utilización de fango procedente de una ETAP en la fabricación de ladrillos elimina un problema medioambiental, se genera un ahorro económico relacionado con la sustitución parcial de un material natural como la arcilla, siendo estas prácticas amigables con el medio ambiente [30]. Según Elías Castells [1], en el sector de la construcción el lodo puede ser aprovechado en la fabricación de cementos Portland y *clinker*, y en la producción de ladrillos cerámicos, como reemplazo parcial de uno de los materiales, que provoca reducción de la contaminación hídrica, menor gasto de energía, menor uso de utilización de recursos naturales, aumentando la vida útil de las canteras [31]. En consecuencia, se puede concluir que la utilización de fango procedente de una ETAP en la industria de los productos de construcción es una alternativa prometedora y económicamente razonable, y los productos producidos no están contaminados con impurezas peligrosas [32].

Husillos Rodríguez [5] analizó el proceso de secado mediante atomizador de fangos procedentes de una ETAP. Dicho tratamiento produce un material pulverulento de fácil manejo, cuyo tamaño de partícula y forma redondeada son parecidos al del cemento Portland comercial. El fango atomizado puede ser usado como materia prima para la elaboración de crudos de cemento, en sustitución parcial o total de la arcilla ya que la aptitud a la cocción del crudo elaborado con dicho lodo de ETAP es buena y los clínkeres obtenidos a partir del mismo son similares a los tomados como referencia.

Respecto al agua clarificada resultante del tratamiento de lodos, se puede recuperar y enviar al proceso de depuración de la ETAP [8] o bien usarse con otros fines o aprovechamientos, de modo que se genere un ahorro en el consumo de agua.

Por otro lado, los lodos que se generan en las etapas de decantación y filtrado se podrían aprovechar para recuperar una fracción del coagulante (compuestos aluminosos) y del polímero usado como floculante (almidón) para reutilizarlos en dicho tratamiento de agua para consumo humano, con el consiguiente ahorro en el empleo de materias primas. En concreto, la alúmina puede recuperarse de los lodos en forma de sulfatos mediante acidificación a pH 3.3-3.4 con ácido sulfúrico concentrado, para usarla de nuevo en el tratamiento. Esta recuperación puede alcanzar un 54 % del peso de sulfato de aluminio comercial empleado [33]. La separación del floculante del lodo se puede llevar a cabo mediante máquina rotativa de alta velocidad y de alta eficiencia energética. Puede funcionar mucho tiempo con bajas vibraciones como consecuencia de su preciso equilibrio dinámico. El separador de almidón bombea líquido claro por la bomba centrípeta y descarga líquidos de concentración (almidón recuperado) a través de sus boquillas. Estas máquinas rotativas van incorporadas en las plantas de tratamiento de lodos. En lo que se refiere al coste energético, el balance energético de una planta de tratamiento de lodos, una vez que se extrae el almidón como se ha comentado, es positivo si tenemos en cuenta que los lodos secos pueden ser usados como combustible seco y que la cantidad generada de los mismos es elevada [34]. En concreto, un lodo con un 10% de humedad permitiría tener valores de poder calorífico inferior de 2456 kcal/kg [35]. Por lo tanto, la viabilidad energética de los lodos tras el secado mecánico y térmico hace que la recuperación de energía tras la incineración compense el consumo de energía de la extracción de almidón.

En relación al almidón industrial, este procede fundamentalmente de la yuca y del maíz y, como material complejo y valioso, depende del suministro de estos cereales, por su competencia con el maíz para alimento de animales y componentes alimenticios [36]. La fuente de almidón de origen natural está en dos cereales; uno primario como la yuca y un cereal secundario muy importante como es el maíz. La producción mundial de yuca en 2014 se previó en unos 291 millones de toneladas, un aumento de 4,6% respecto al año anterior, ocasionada por la demanda de alimentos de todo el continente africano y por las crecientes aplicaciones industriales de la yuca en Asia oriental y sudoriental, en forma de etanol y de almidón. Y las perspectivas para el año 2015 son de un aumento constante de la producción sobre todo en África, donde es un cultivo estratégico para la seguridad alimentaria y para mitigar la pobreza. La Fig. 2 muestra los precios internacionales de la yuca en el periodo comprendido entre los años 2010 y 2013.

En cuanto al maíz la previsión era de 1018 millones de toneladas para 2014, un 0,7% superior al año 2013, un año con un valor sin precedentes por las cosechas excepcionales en EE.UU y en China [37]. Los datos de producción, utilización y existencias

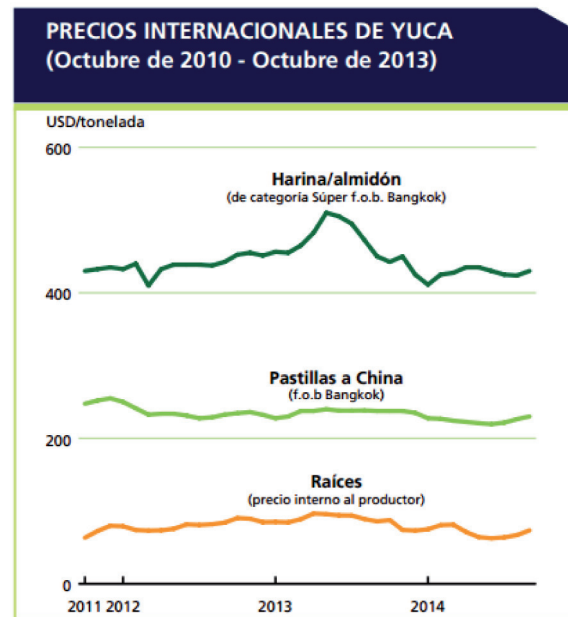


Fig. 2: Precios internacionales de la yuca [37]

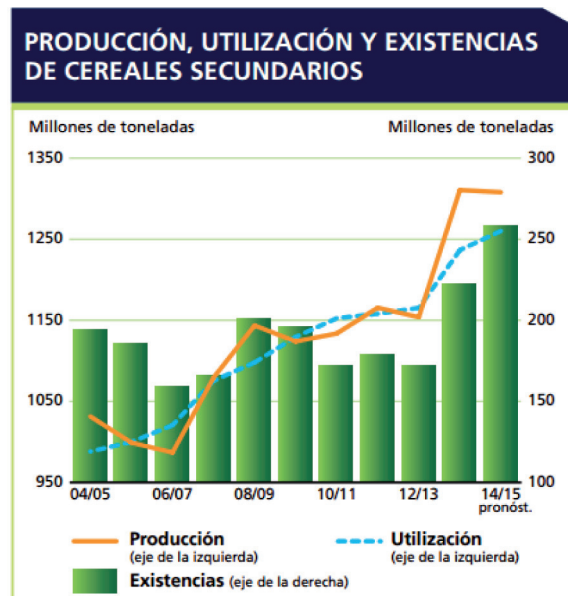


Fig. 3: Producción, utilización y existencias de cereales secundarios, entre ellos el maíz [37]

de cereales secundarios, entre los cuales se encuentra el maíz, se muestran en la Fig. 3.

Por lo tanto, el aprovechamiento de los lodos generados debe de conducir a minimizar las necesidades de dicha fuente de almidón.

En este sentido, la valorización de los lodos generados en una ETAP va en consonancia con el concepto de economía circular, analizado anteriormente. Según Antoine Frérot en el boletín de *Robert Schumann Foundation*: "Frente al agotamiento gradual de los recursos vitales para el funcionamiento de las economías modernas, la economía circular ofrece soluciones pragmáticas y eficaces. Al cerrar los ciclos de la materia, el agua y la energía, esta economía diferente hace posible que la economía crezca, al tiempo que permite reducir las extracciones del medio natural" [38].

Igualmente, Biswas [39] nos indica que una nueva mentalidad es necesaria para identificar cuáles son los problemas relacionados con la gestión del agua e implementar soluciones apropiadas, como las recopiladas en este artículo.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se aborda la filosofía y conceptos de lo que se denomina economía circular y nutriente tecnológico, aplicados a la valorización de lodos en las plantas de tratamiento de agua potable que permitan la inclusión de los mismos como materia prima en nuevos procesos industriales, como en los casos de las industrias cerámica y cementera. Desde este punto de vista, los lodos procedentes de las etapas de decantación y lavado de filtros de una potabilizadora pueden ser tratados mediante un proceso combinado de mezcla, espesamiento y deshidratación que permiten la obtención de un producto con importante valor añadido que se puede reutilizar como aditivo en la industria cerámica, para la producción de ladrillos cerámicos, y en la fabricación de cementos *Portland* y *clinker*, lo que conlleva que los mismos pasen de ser considerados como residuos desde el punto de vista de la economía ortodoxa a considerarse como nutrientes tecnológicos desde el punto de vista de la economía circular.

Además, un aspecto importante que ha de ser considerado en el tratamiento del fango generado en una ETAP es la posibilidad de recuperar parte del coagulante y floculante utilizados, lo que conllevaría un ahorro de materias primas, energía y una minimización del impacto ambiental de dicho proceso con una importante preservación de espacios naturales en relación con su destino final en vertedero.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Elías Castells X. Reciclaje de Residuos Industriales. Ediciones Díaz de Santos, 2009. ISBN: 978-84-797-8835-3.

[2] Hjorth P, Thi Dan N. "Environmentally sound urban water management in developing countries: A case of study of Hanoi". *International Journal of Water Resources Development*. 2007. Vol.9. p.453-464. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/07900629308722601>

[3] Contreras F, Gómez J. "Gestión de los fangos generados en las ETAP's. Aspectos medioambientales, legales y técnicos". AEAS-Granada. 2000.

[4] Armenter JL, Cristiá J, Cusidó JA, et al. "Innovación en el tratamiento de fangos de una ETAP. Secado por atomización y aprovechamiento en la industria cerámica". *Tecnología del Agua*. 2002.

[5] Husillos Rodríguez N. "Valorización de residuos de estaciones de tratamiento de agua potable y residual en la industria del cemento". Tesis Doctoral. 2012. Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja" (CSIC). Universidad Autónoma de Madrid. Madrid.

[6] Solís Silvan R, Laines Canepa JR, Hernández Barajas JR. "Mezcla con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales". *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 2012. Vol.28. p.229-236.

[7] Guerrero L, Moreno C, Sanz J. "Nuevo proceso físico-químico para la potabilización de agua sin la utilización de poliacrilamidas". *Revista InfoEnviro: Actualidad y Tecnología de la Industria Medioambiental*. 2005. Vol.38. p.79-82.

[8] Ramírez Quirós F. "Lodos producidos en el tratamiento del agua potable". *Revista Técnica Industrial*. 2008. Vol.275. p.46-52.

[9] Comisión Europea. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones, Hacia una Economía Circular: Un programa de cero residuos para Europa [en línea]. [ref. de 2 julio 2014]. Disponible en World Wide Web: <http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:50edd1fd-01ec-11e4-831f-01aa75ed71a1.0009.02/DOC_2&format=PDF>.

[10] Elliot HA, Dempsey BA, Maille PJ. "Contents and fractionation of heavy metals in water treatment sludges". *Journal of Environmental Quality*. 1990. Vol.19. p.330-334. DOI: <http://dx.doi.org/10.2134/jeq1990.00472425001900020021x>.

[11] Roy M, Couillard D. "Metal leaching following sludge application to a deciduous forest soil". *Water Research*. 1998. Vol.32. p.1642-1652. DOI: [10.1016/S0043-1354\(97\)00375-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00375-8).

[12] Basta NT. "Examples and case studies of beneficial re-use of municipal by-products". In: Power JF and Dick WA (eds.). *Land Application of Agricultural, Industrial and Municipal By-Products*. 2000. ASA, CSSA and SSSA. Madison. WI. 492-504.

[13] Unión Europea. Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 22 de noviembre de 2008, núm. 312.

[14] Ramírez Zamora RM, Espesal Ayala F, Chavez García L, et al. "Optimization of the preparation conditions of ceramic products using drinking water treatment sludges". *Journal of Environmental Science and Health Part A*. 2008. Vol.43. p.1562-1568. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/10934520802293750>.

[15] Dillion GR, Hall T, Sweet N, et al. "Novel methods for the treatment and disposal of waterworks sludge: Final report". WRC Report No. PT1084. 1996.

[16] Goncalves A, Esteves A, Carvalho M. "Incorporation of Sludges from a Water Treatment Plant in Cement Mortars". In: *The Conference Use of Recycled Materials in Building and Structures*. 2004. Barcelona (España).

[17] Merino I, Arévalo LF, Romero F. "Preparation and characterization of ceramic products by thermal treatment of sewage sludge ashes mixed with different additives". *Waste Management*. 2007. Vol.27. p.1829-1844. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2006.10.008>

[18] Monteiro SN, Alexandre J, Margen JI, et al. "Incorporation of sludge waste from water treatment into red ceramic". *Construction and Building Materials*. 2008. Vol.22. p.1281-1287. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.013>

[19] Hernández D, Villegas JD, Castaño JM. "Aprovechamiento de lodos aluminosos generados en sistemas de potabilización, mediante su incorporación como agregado en materiales de construcción". *Revista Ingenierías*. 2006. Vol.5, núm. 8.

[20] Pacheco Flores A. "Exploración de las condiciones óptimas de producción de cerámicos celulares mediante el reciclado de lodos de potabilización de agua". Tesis. 2012. Universidad Nacional Autónoma de México.

[21] Ferreira JMF, Olhero SM. "Al-rich sludge treatments towards recycling". *Journal of the European Ceramic Society*. 2002. Vol.22. p.2243-2249. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0955-2219\(02\)00023-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0955-2219(02)00023-7).

[22] Toya T, Nakamura A, Kameshima Y, et al. "Glass-ceramics prepared from sludge generated by a water purification plant". *Ceramics International*. 2007. Vol.33. p.573-577. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2005.11.009>

[23] Husillos Rodríguez N, Martínez-Ramírez S, Blanco-Varela MT, et al. "Evaluation of spray-dried sludge from drinking water treatment plants as a prime material for clinker manufacture". *Cement & Concrete Composites*. 2011. Vol.33. p.267-275. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.10.020>.

[24] Huang C-H, Wang S-Y. "Application of water treatment sludge in the manufacturing of lightweight aggregate". *Construction and Building Materials*. 2013. Vol.43. p.174-183. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.016>

[25] Hegazy BE, Fouad HA, Hassanain AM. "Incorporation of water sludge, silica fume, and rice husk ash in brick making". *Advances in Environmental Research*. 2012. Vol.1. p.83-96. DOI: <http://dx.doi.org/10.12989/aer.2012.1.1.083>.

[26] Ramadan MO, Fouad HA, Hassanain AM. "Reuse of water treatment plant sludge in brick manufacturing". *Journal of Applied Sciences Research*. 2008. Vol.4. p.1223-1229.

[27] Cerdeño del Castillo FJ, Pérez Lorenzo A. "Viabilidad técnica de uso de lodos de Estaciones de Tratamiento de Aguas Potables (ETAP) en fabricación de materiales cerámicos para la construcción". *Conarquitectura*. 2006, núm. 30.

[28] Alleman J, Berman N. "Constructive sludge management: biobrick". *Journal of Environmental Engineering*. 1984. Vol.110. p.301-311. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1984\)110:2\(301\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1984)110:2(301))

[29] Pereira DA, Couto DM, Labrincha JA. 2000. "Incorporation of alumina rich residues in refractory bricks". *CFI-Ceramic Forum International*. 2000. Vol.77. p.21-25.

[30] Beretka J. "The utilisation of industrial wastes and by-products in the ceramic industry". *Journal of the Australian Ceramic Society*. 1975. Vol.11. p.25-29.

[31] Torres P, Hernández D, Paredes D. "Uso productivo de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la fabricación de ladrillos cerámicos". *Revista Ingeniería de Construcción*. 2012. Vol.27. p.145-154. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732012000300003>.

[32] Liew AG, Idris A, Wong CHK, et al. "Incorporation of sewage sludge in clay brick and its characterization". *Waste Management & Research*. 2004. Vol.22. p.226-233. DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/0734242X04044989>

[33] VV.AA. *Manual técnico del agua* (3ª ed. española). Editorial Degrémont, 1973.

[34] Grau A, Farré O. Situación y potencial de valorización energética directa de residuos. Estudio Técnico PER 2011-2020. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Plan de Energías Renovables (PER) en España 2011-2020.

[35] Colomer Mendoza FJ, Carlos Alberola M, Herrera Prats L, et al. "Viabilidad de la valorización energética de lodos procedentes de distintos tipos de depuradoras". *Residuos*. 2009. Vol.110. p.32-37.

[36] Casey JP. *Pulpa y Papel* (Química y Tecnología Química Vol. 1). Editorial Limusa, 1991. ISBN: 978-96-818-2061-9.

[37] 2014 *Perspectivas alimentarias*. Resúmenes de Mercado: FAO, 2014. ISSN 1564-2798.

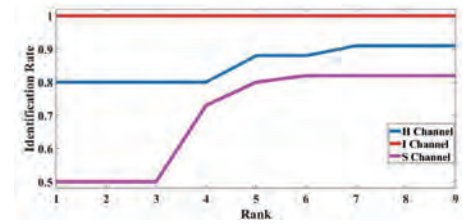
[38] Frérot A. "Economía circular y eficacia en el uso de los recursos: un motor de crecimiento económico para Europa". *Boletín Cuestión de Europa*. Robert Schuman Foundation. 2014. Núm. 331.

[39] Biswas AK. "Water Management: some personal reflections". *Water International*. 2009. Vol.34. p.402-408. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/02508060903396189>

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha contado con el apoyo y financiación de los proyectos del Ministerio de Economía y Competitividad ECO2010-15885 y ECO2013-47027-P, Junta de Andalucía P11-SEJ-7294 y Unión Europea (Fondos FEDER).

Statistical approach based iris recognition using local binary pattern



Enfoque estadístico para el reconocimiento del iris usando patrones binarios locales

Pejman Rasti¹, Morteza Daneshmand¹, Gholamreza Anbarjafari^{1,2}

¹ University of Tartu. Icy Research Group. Institute of Technology. Nooruse 1 - 50411Tartu (Estonia).

² Hasan Kalyoncu University. Department of Electrical and Electronic Engineering. Havaalanı Yolu Üzeri 8. km – Gaziantep. (Turkey).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7997> | Recibido: 14/03/2016 • Aceptado: 29/03/2016

RESUMEN

Entre las características biométricas utilizadas para el reconocimiento de la identidad, el iris ha demostrado ser el más fiable en términos de carácter distintivo suficiente, lo que tiene implicaciones directas e importancia para mejorar el rendimiento y la seguridad del proceso de verificación de seguridad a través del cual se decide si a cualquier instancia se le debe otorgar permiso para acceder a lugares o fuentes de información reservados.

En este trabajo se aborda el principal desafío que implica el reconocimiento del iris, cuya complejidad computacional es relativamente alta, habiendo permanecido sin resolver hasta ahora, al menos, en lo que respecta a la literatura existente. La mejora obtenida por la metodología propuesta se origina tomando ventaja de los patrones binarios locales para procesar cada segmento de la imagen original, habiendo experimentado la ecualización de antemano, así como aplicar funciones de distribución de probabilidad separadamente a cada capa de los valores de pixel, mientras que estar representado con respecto a los canales de color de intensidad de saturación de color mutuamente independientes.

Además, la distancia Kullback-Leibler entre los vectores obtenidos a través de la concatenación de los vectores de características se toma en cuenta como criterio de clasificación, lo que ha llevado a una tasa de reconocimiento sobresaliente de 98,44 por ciento cuando se probó en la base de datos UPOL, con 192 imágenes de iris.

Palabras Clave: Biometría, Distribuciones estadísticas, Análisis de imágenes en color, Reconocimiento de iris, Patrones binarios locales, Función de densidad de probabilidad.

ABSTRACT

Among biometric features utilized for identity recognition purposes, iris has proven to be the most reliable one in terms of sufficient distinctiveness, which has direct implications and importance towards improving the performance and safety of the security verification process through which it is decided whether any instance at hand should be granted permission to access preserved locations or sources of information. This paper deals with the main challenge involved in iris recognition, which lies in its comparatively high computational complexity, having remained unresolved heretofore, at least, as far as the existing literature is concerned. The enhancement brought about by the proposed methodolo-

gy originates from taking advantage of local binary patterns for processing each segment of the original image, having undergone equalization in advance, as well as applying probability distribution functions separately to every layer of the pixel values, whereas being represented with respect to mutually-independent hue-saturation-intensity color channels. Besides, the Kullback-Leibler Distance between the vectors obtained through concatenation of the feature vectors is taken into account as the classification criterion, which has led to an outstanding recognition rate of 98.44 percent when tested on the UPOL database, with 192 iris images.

Key Words: Biometric, Statistical distributions, Image color analysis, Iris recognition, Local binary pattern, Probability density function.

1. INTRODUCTION

Biometric recognition is a well-studied approach to the problem of security verification, which is demanded for ensuring the disallowance of unauthorized access to preserved or private resources of data or material [1-5]. Nevertheless, the issue of whether to consider biometric feature as a criterion, as well as how to evaluate it, is still being questioned and examined [6-10].

One of the rare biometric characteristics that is not only instance-specific, i.e. could be uniquely associated with the samples input to a classifier whereas being trained, but also differs significantly and sufficiently from a person to all others, is the iris pattern. More clearly, the combinations of the iris feature of different human beings, even if highly similar to each other in other terms, would always be uncorrelated enough to qualify as solid metrics for distinguishing them, which has been accepted as a well-established notion by the image processing research community for decades [11].

Thus iris recognition, to the existing knowledge and experience reported in the literature [12], has never failed to provide a reliably critical evaluation of the biometrics required for identity recognition or verification. From biological point of view, the latter virtue may be attributed to the earlier scientific finding that iris properties do not propagate through inheritance, at least in the same manner as other biometric specifications do [13].

Moreover, iris appearance of every individual comprises a complex combination of geometric arrangements, namely, pits, rings, furrows, and stripes [14], each of which is detailed enough to result in perceptible dissimilarities between samples. The uni-

queness of iris patterns has also been investigated in [4] and [5], both of which have concluded that it is at the same level as that of fingerprints. However, they assert that the iris is practically more feasible, as it leaves less chance of becoming entangled with illusions standing for untruthful matches between the instances under study.

As a prominent example from the list of the methods developed for the recognition of identity based on iris patterns, the Duagman's Algorithm could be mentioned [15-16], which deems the successfulness of a test regarding the statistical dependence of the iris phase structure, which has been encoded by means of a prescribed set of quadrature wavelets, the desired condition. Following up the aforementioned study, a device has been introduced in [17], which is responsible for capturing iris images from a distance. It is worth noticing that in order to obtain clearer images, the algorithm described in the latter reference processes and improves the original iris image through implementing super-resolution.

Among other tasks concerning recognition, numerous papers have concentrated on developing efficient approaches to extracting facial features. As an instance, [18] has suggested making use of Gabor filters, multi-channel filters or wavelets for performing the foregoing task. On the other hand, in [19], fusing global and local features has been proposed, where after normalizing the iris images, they are divided into local windows, according to which, the local features representing the fine texture are extracted.

According to [15], one of the major steps needed to be taken for the recognition purpose is detecting the location of the iris within the whole image, whose authenticity influences the performance, i.e. the recognition rate, considerably. For the latter goal, [20-21] denote one of the familiar strategies, namely, utilizing the Hough Transform. Last but not least, in the context of the methodology introduced in [22], minimum-variance investigation of the wavelet has been employed for the sake of recognizing the inner boundary of the iris, whereas a modified brightness-gradient technique handles distinguishing the outer one.

The algorithm presented in this paper, as the first stage, equalizes the input images, so that it could be ensured that undesired effects, such as the lightening conditions' variations, would not interfere with the physical interpretation of the mathematical information available to the recognition system.

Then the image is segmented, so that the details of each part could be examined separately, where a Local Binary Pattern (LBP) is applied, in order to closely study the slight nuances conveyed by the iris image, which is expected to lead to considerable enhancements in the overall performance.

As a major contribution of this paper, in spite of most recognition methods discussed in the literature, such as [23] and [24], instead of reviewing the full pixel information at once, each color channel included in the Hue-Saturation-Intensity (HSI) representation is dealt with individually, which, according to the experiments elaborated in the upcoming sections, results in more realistic analyses and higher recognition rates.

Besides, considering the aforementioned set of color channels, despite the case of RGB, brings about the advantage that their dependence on each other is avoided, and meaningful distinctions between the combinations of the values associated with the channels are exploited.

The Kullback-Leibler distance [25] is perhaps the most frequently used information-theoretic "distance" measure from a viewpoint of theory. If P_0 , P_1 are two probability densities, the Kullback-Leibler distance is defined to be

$$D(P_1 \parallel P_0) = \int P_1(x) \log \frac{P_1(x)}{P_0(x)} dx$$

In order to substantiate the efficiency and applicability of the suggested iris-based recognition algorithm, it is applied to the UPOL database [26], which contains 64 instances, each corresponding to three sample images, where intact operation is demonstrated when taking the saturation channel into account for constructing the feature vectors. Also, the algorithm is tested on UBIRIS V1-1 database [27] and UBIRIS V1-2 database that composed of 1205 iris images of 241 subjects and 660 iris images of 132 iris objects respectively, each subject corresponding to five sample images.

More detailed specifications and guidelines of the modules involved in the proposed recognition system are presented in the succeeding sections, as follows. The next section explains the preprocessing component, which equalizes and segments the iris image into different parts. Then the remaining elements, including the LBP and the creation of the feature vectors, being followed by classification, are clarified. Subsequently, the experimental results are illustrated and discussed.

2. IRIS LOCALIZATION AND PROCESSING OF IRIS IMAGES

In the context of the strategy proposed in this paper, the iris localization task is organized such that the area of interest is separated from the sclera and pupil, which is accomplished via detecting its inner and outer boundaries using the Hough Transform [15], [20], [28-29].

The calculation of the latter necessitates finding the global characteristics, which are used for connecting the discontinuous edge pixels that are supposed to constitute the aforementioned regions' outline. It is noteworthy that this task demands prior knowledge of the overall shape of the target.

In the next step, as stated before, the image is segmented into multiple components. This attitude provides an opportunity to study the image properties, aiming at making the most comprehensive inferences possible from the visual data.

Since throughout the database utilized for the purpose of this paper, namely, the UPOL database, the center of the iris rectangle is always approximately aligned with that of the iris itself, the result of the implementation of the Hough Transform, i.e. the iris pattern, according to the experiments conducted, will be noise-free. Moreover, the segmented iris image only contains the iris texture, but not the surrounding fragments, such as eyelid, pupil, sclera, and eyelash.

3. THE PROPOSED LBP-BASED IRIS RECOGNITION SYSTEM

The main recognition utility takes the preprocessed iris image, having gone through equalization, segmentation and iris localization, as the input, and evaluates it in terms of satisfactorily matching with, at least, one of the instances used to train the classifier.

The main elements of the foregoing process consist of finding the Probability Density Function (PDF) of each segment of the image, applying an LBP, constructing the feature vectors and classifying the image into the corresponding class on that basis, if any, which are explained in the following sections.

a) PDF

The PDF of an image is a mapping η_j , which outputs a value standing for the share of the pixel intensities confined within the j^{th} mutually-exclusive interval, known as bin, spanning the whole range. Obviously, the length of each feature vector is equal to the size of the bin, which means that, assuming N as the total number of the pixels, taking the value 256 in case of a monochrome image, the following relationship holds:

$$N = \sum_{j=0}^{255} \eta_j \tag{1}$$

Then the feature vector, H , is defined as follows:

$$H = \{p_0, p_1, \dots, p_{255}\}, \tag{2}$$

$$p_t = \frac{\eta_t}{N}, \quad t = 0, \dots, 255.$$

b) Color Channels Representations

According to [29], PDF-based iris recognition could be performed in accordance with various color channels representations, such as HSI and YCbCr color spaces, in which the luminance and chrominance are separated from each other, whose inferences would be fused in the next phase, in order to guarantee that the most logical inference is made, i.e. the decision is based on the most reliable criterion extracted from the resources of data at the classifier's disposal.

Nevertheless, since highly correlated information might exist within different color channels, meaning that relatively great mutual entropy is visible among them, only a selection should take part in the decision-making process, which could be seen from Table 1, showing the mutual entropy between the channels of the HSI and YCbCr color spaces.

The high correlations between the pairs of color channels I-Y, I-Cb and I-Cr encourages the notion that, instead of using both color spaces at the same time, considering fusing the data stored on the channels of the HSI color space on its own would be enough to acquire an exhaustive resource of the knowledge demanded for achieving superior recognition rates.

	H	S	I	Y	Cb	Cr
H	100	26.49	9.36	5.28	9.29	16.13
S	26.49	100	25.97	32.91	52.51	65.58
I	9.36	25.97	100	99.05	98.32	93.39
Y	5.28	32.91	99.05	100	96.02	84.63
Cb	9.29	52.51	98.32	96.02	100	92.50
Cr	16.13	65.58	93.39	84.63	92.50	100

Table 1: The correlations between the hsi and ycbcr color channels in percentage

c) LBP

Aiming at deriving the slightest possible attributes of the pre-processed image, it undergoes further analysis through a separate module, where an LBP is applied to each segment, which describes the local spatial structure of the image [31]. In [32], it has been shown that LBP could be used for texture classification, as an effective discriminative measure.

By definition, for a pixel positioned at the point (x,y) , LBP indicates a sequential set of the binary comparison of its value with the eight neighbors. In other words, the LBP value assigned to

each neighbor is either 0 or 1, if its value is smaller or greater than the pixel placed at the center of the mask, respectively. The decimal form of the resulting 8-bit word representing the LBP code can be expressed as follows:

$$LBP(x, y) = \sum_{n=0}^7 2^n s(i_n - i_{x,y}), \tag{3}$$

Where $i_{x,y}$ corresponds to the grey value of the center pixel, and i_n denotes that of the n^{th} neighboring one. Besides, the function $s(x)$ is defined as follows:

$$s(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \tag{4}$$

The LBP operator remains unaffected by any monotonic grey-scale transformation which preserves the pixel intensity order in a local neighborhood. It is worth noticing that all the bits of the LBP code hold the same significance level, where two successive bit values may have different implications. The LBP code is also referred to as a kernel structure index.

An extended variant of the original idea of LBP has been presented in [33], which applies the operator to a circular neighborhood of different radius size. The LBP, R notation has been employed for referring to P equally-spaced pixels on a circle of radius R .

Among major advantages of LBP, is its low computational complexity, which renders it suitable for various image processing applications, such as visual inspection [34], face recognition [35-36], motion detection [37], face detection [38] and image retrieval [39]. Besides, taking advantage of the low computational complexity of LBP in creating feature vectors is a substantial element in improving the affordability of the whole system to the existing real-world identity recognition processors.

d) Feature Vector Construction

In the settings associated with the technique proposed in this paper, similarly to that of [36], the feature vector corresponding to each segment of the preprocessed image, in fact, contains the cumulative histogram, h_p , of the LBP codes calculated at the pixels' locations, defined as follows:

$$h_i = \sum_{x,y} I\{f_1(x, y) = i\} \quad i = 0, \dots, m \tag{5}$$

where $f_1(x,y)$ is a labeled image, m denotes the number of the different labels produced by the LBP operator, and the binary function I is expressed as follows:

$$I(A) = \begin{cases} 1 & A \text{ is true} \\ 0 & A \text{ is false} \end{cases} \tag{6}$$

It is leading the histogram to contain information about the distribution of the local micropatterns, such as spots, edges, and flat areas, over the whole image. Retaining the spatial information is required for an efficient iris representation; hence the image is divided into regions R_0, R_1, \dots, R_{m-1} . The spatially enhanced histogram is defined as:

$$h_{i,j} = \sum_{x,y} I\{f_1(x, y) = i\} I\{(x, y) \in R_j\} \quad i = 0, \dots, m, \tag{7}$$

in which, a description of the iris on three different levels of locality exists: The labels for the histogram contain information

about the patterns at pixel level. The labels are summed over a small region to produce information at regional level; And the regional histograms are concatenated to build a global description of the iris.

e) Classification Metric

The classification component is devised such that the Kullback-Leibler Distance (KLD) is considered as a measure for evaluating the divergence between the PDFs, since it has proven stable and applicable for the purpose of identity recognition in numerous preceding studies [24], [30], [40].

As a relevant note, due to the fact that decreasing the number of the bins causes a loss of information delivered by the PDF patterns, which decreases the recognition rate, a compromise should be found between the foregoing quantity and the consequent computational cost. Fig. 1 shows a diagram of the proposed method.

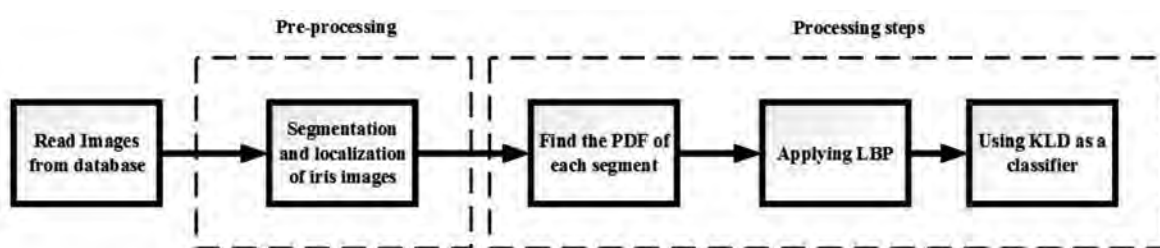


Figure 1: block diagram of the proposed method

4. THE EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSIONS

In the context of this paper, the proposed iris-based recognition methodology is implemented on a database of iris images, such that first, the PDF associated with each image is obtained. In order to do so, an LBP is applied to the image, where the HSI representation is chosen, due to the fact that the information conveyed by the illuminance color channel correlates considerably with that of the YCbCr color channels.

Afterward, the image undergoes segmentation and equalization, which is followed by dividing it into different sub-images. Next, the PDFs associated with each color channel are found. More clearly, each sub-image resulted from dividing the original image on the basis of the separate color channels will lead to different sets of PDFs. Then all the PDFs corresponding to each color channel are concatenated into a single vector, which will be used as the criterion for the classification procedure, which, as aforementioned, is performed by means of the KLD algorithm, at the next stage.

For the sake of verifying and demonstrating the applicability and superiority of the foregoing technique, i.e. statistical-approach-based iris recognition, a selection of the existing methods from the lists of conventional and state-of-the-art algorithms reported in the literature, which deal with the recognition task, have been implemented on the same database, in the same settings, along with the one suggested in this paper, so that the performance achieved could be fairly compared, both qualitatively and quantitatively.

The strategies utilized for the above goal consist of a classical PCA-based iris recognition system and the most recent instances, such as Majority Voting (MV) [23], Feature Vector Fusion (FVF) [15], Ahamed et al. [45], Umer et al. [46] and Harjoko et al. [47], which to the authors' knowledge, are considered the most prominent practices suggested in the literature heretofore. Note that we

have quoted the results of existing methods from the respective articles.

The qualitative strength of the method introduced and implemented in this paper, which directly affects the quantitative measure used to judge the proficiency, originates from employing the LBP, as it could be seen from Fig. 2, which makes it possible to rigorously study the features in accordance with the color information contained in each individual segment. More clearly, the binary patterns implemented on the segments, which have been equalized before, enhance the stability of the whole mechanism by means of closely examining the details.

The preceding concept may be more clearly understood by noticing the fact that all the data included in those segments, as per the practices under usage by other existing systems, would be treated cumulatively, which causes the dismissal of a chance to take advantage of the slight differences between each segment of an image and the one coinciding with it in others.

Besides, it is noteworthy that equalizing the images, as an initial task within the recognition scheme, assures that sudden, undesired changes in the irrelevant circumstances, such as lightning, would not be allowed to mislead the mathematical interpretation whereas introducing random changes into the input data.

The quantitative comparison is based on the common index recognition rate, where the percentage of the ratio between the number of the instances recognized correctly by the algorithm and the total number of the cases under experimentation is taken into account as the efficiency measure. In other words, each class consists of the samples taken from the same instance whereas training the classifier, and the competitiveness of the criterion considered for classification is evaluated on the basis of its capability of assigning the input test sample to the authentic class of the training class, i.e. recognizing the associated identity properly.

Tables 2-4 show the recognition rate achieved through the utilization of each of the H, S and I color channels for recognition, along with that of the aforementioned solutions presented in the literature, namely, PCA, MV and FVF, which clearly proves the outstanding competence of the statistical-based iris recognition process introduced in this paper. Table 5 shows the recognition rate achieved through the utilization of each of the H, S and I color channels with a leave-one-out classification strategy for the UBiris1-1 and UBiris1-2 databases respectively. In all experiments, we found a recognition rate for all possible situation for training and testing set as shown in Tables 2-4, for example there are 5 images per subject, the recognition rate is founded when different number of images of each subject are considered in the training set and the rest as a testing set. As it shows in Tables 3-4 for the UBiris database, system is trained with 4 images per subject for the first row of the table then with 3 images per subject for the second row. Fig. 2 shows a CMC curve of all three channels of H, S and I on UBiris1-2 database.

Training set	H	S	I	PCA	MV [23]	FVF [15]	Ahamed et al. [45]	Umer et al. [46]	Harjoko et al. [47]
2	87.5	100	95	70	96.88	98.44	97.80	100	82.90
1	86	100	93.5	60	89.84	92.19	----	----	----

Table 2: Recognition rate percentages obtained through considering three different color channels, h, s and i, compared with that of the pca, mv and fvf techniques

Training set	H	S	I	Umer et al. [46]
4	100	80	100	97.51
3	75	70	100	----
2	70	57	77	----
1	53	43	75	----

Table 3: Recognition rate percentages obtained through considering three different color channels, h, s and i, for the first 100 images of UBiris1-1 database

Training set	H	S	I
4	80	50	100
3	65	40	85
2	57.5	34	84
1	54	30	80

Table 4: Recognition rate percentages obtained through considering three different color channels, h, s and i, for the UBiris1-2 database

UBiris1 database			UBiris1-2 database		
H	S	I	H	S	I
92	74	92	76	45	100

Table 5: Recognition rate percentages obtained through considering three different color channels, h, s and i, with a leave-one-out classification strategy

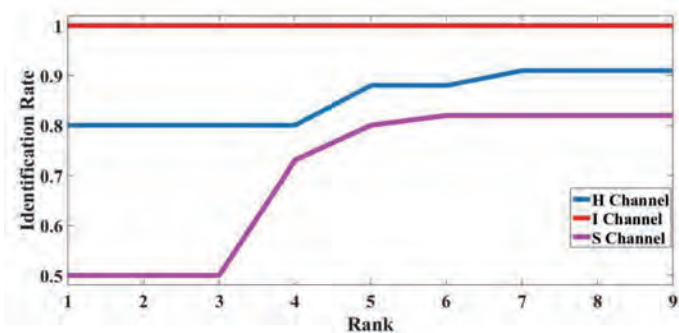


Figure 2: CMC curve for UBiris1-2 database on all three channels

Among others, one of the important conclusions derived from the foregoing table is that the recognition rate accomplished via training the classifier on the basis of the saturation color channel is 100 percent in case of both of the training procedures, meaning that the latter could be deemed robust enough to provide a foundation for flawless operation in terms of identity recognition.

Moreover, even though the performances achieved via other color channels, i.e. hue and intensity, are not as sound as that of the saturation color channel, they are still great enough to be fairly compared with the recognition rates associated with the state-of-the-art approaches MV and FVF, where the performance of the classical PCA-based system is strongly outperformed by the suggested algorithm.

The aforesaid excellence of the proposed technique, especially when using the saturation color channel information, could be attributed to the aggregated effect of introducing a set of innovative modifications made to the recognition system, which basically

lie in a bunch of certain notions, being briefly discussed in what follows.

First, the fact that the H, S and I color channels are distinguished from each other, and the analysis is applied to each of them separately, plays a paramount role in improving the sensitivity of the feature vectors to the variations of the properties from a training class to the others. More clearly, since the information provided by the R, G and B color channels is not as distinctive as the data brought by H, S and I channels, the studies conducted based on the RGB representation of the colors do not typically result in satisfactory recognition rates [23][44]. In other words, compared to HSI, the RGB information normally bears higher proneness to mixed and biased data consistently appearing in all the images prepared whereas creating a database, which, effectively, is not the case of the HSI representation.

Secondly, the data fusion module helps boost the recognition performance by combining the decisions obtained via different making process. In the foregoing settings, even if one of the criteria fails to spot the original class, still the knowledge accumulated in the aforementioned step-by-step algorithm ensures that others would prevent opting for wrong choices on the classes, being successfully demonstrated by the numerical values shown in Table 2, standing for the unimpaired recognition achieved whereas considering the saturation color channel for constructing the feature vectors.

5. CONCLUSION

This paper introduced and verified the efficiency of an innovative statistical-based iris identity recognition system, which, has its own advantages, improves the computational cost, and increases the resulting recognition rate, simultaneously. The classification criterion was based on the fusion of the Kullback-Leibler Distances between the feature vectors constructed upon concatenating the cumulative histograms of the local binary pattern codes corresponding to different segments of the iris images having passed through a preprocessing module, being responsible for equalization, as well as the detection of the iris boundaries against the surrounding parts of the eye, namely, sclera and pupil. The main contribution arose from performing analysis on each of the mutually-independent color channel separately, rather than dealing with all of them at once. The results of the implementation of the proposed method, when compared with that of the existing state-of-the-art techniques, being applied to the same database, i.e. the UPOL, demonstrated its unrivaled performance, with a flawless functionality whereas depending solely on the saturation color channel.

BIBLIOGRAPHY

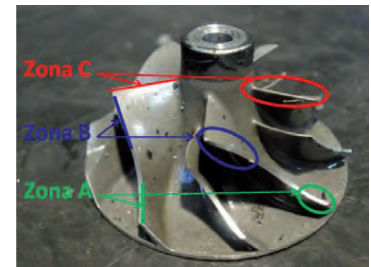
- [1] T. Liu, Z. Lei, J. Wan, and S. Z. Li. "DFDnet: Discriminant Face Descriptor Network for Facial Age Estimation," Biometric Recognition, pp. 649-658. Springer International Publishing, 2015. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-25417-3_76
- [2] I. Odínaka, P.-H. Lai, A. D. Kaplan, J. A. O'Sullivan, E. J. Sirevaag and J. W. Rohrbaugh, "ECG biometric recognition: A comparative analysis," IEEE Transactions on Information Forensics and Security, vol. 7, no. 6,

- pp. 1812-1824, 2012. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/TIFS.2012.2215324>.
- [3] H. Proenca and L. Alexandre, "Toward covert iris biometric recognition: Experimental results from the nice contests," *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 7, no. 2, pp. 798-808, 2012. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/TIFS.2011.2177659>
- [4] M. Uzair, A. Mahmood, A. Mian and C. McDonald, "Periocular biometric recognition using image sets," *IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV)*, 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/WACV.2013.6475025>
- [5] S. Crihalmeanu and A. Ross, "Multispectral scleral patterns for ocular biometric recognition," *Pattern Recognition Letters*, vol. 33, no. 14, pp. 1860-1869, 2012. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.patrec.2011.11.006>
- [6] A. Meraoumia, S. Chitroub and A. Bouridane, "Fusion of finger-knuckle-print and palmprint for an efficient multi-biometric system of person recognition," *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2011. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/icc.2011.5962661>
- [7] E. Sesa-Nogueras and M. Faundez-Zanuy, "Biometric recognition using online uppercase handwritten text," *Pattern Recognition*, vol. 45, no. 1, pp. 128-144, 2012. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.patcog.2011.06.002>
- [8] J. C. Klontz, B. F. Klare, S. Klum, A. K. Jain and M. J. Burge, "Open source biometric recognition," *6th IEEE International Conference on Biometrics: Theory, Applications and Systems (BTAS)*, 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/BTAS.2013.6712754>
- [9] A. K. Jain and A. Kumar, "Biometric recognition: an overview," *Second Generation Biometrics: The Ethical, Legal and Social Context*, Springer, pp. 49-79, 2012. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-3892-8_3
- [10] B. Biggio, G. Fumera and F. Roli, "Learning sparse kernel machines with biometric similarity functions for identity recognition," *5th IEEE International Conference on Biometrics: Theory, Applications and Systems (BTAS)*, 2012. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/BTAS.2012.6374596>
- [11] L. Flom and A. Safir, "Iris recognition system," US Patent 4,641,349 1987.
- [12] De Marsico, Maria, Alfredo Petrosino, and Stefano Ricciardi. "Iris Recognition through Machine Learning Techniques: a Survey." *Pattern Recognition Letters* (2016).
- [13] H. Proenca and L. A. Alexandre, "Iris recognition: An analysis of the aliasing problem in the iris normalization stage," *International Conference on Computational Intelligence and Security*, 2006. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/ICCIAS.2006.295366>
- [14] J. Cui, Y. Wang, J. Huang, T. Tan and Z. Sun, "An iris image synthesis method based on PCA and super-resolution," *17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, 2004. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/ICPR.2004.1333804>
- [15] J. G. Daugman, "High confidence visual recognition of persons by a test of statistical independence," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 15, no. 11, pp. 1148-1161, 1993. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/34.244676>
- [16] J. Daugman, "The importance of being random: statistical principles of iris recognition," *Pattern recognition*, vol. 36, no. 2, pp. 279-291, 2003. [Online]. Available: [http://dx.doi.org/10.1016/S0031-3203\(02\)00030-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0031-3203(02)00030-4)
- [17] R. P. Wildes, J. C. Asmuth, G. L. Green, S. C. Hsu, R. J. Kolczynski, J. R. Matey and S. E. McBride, "A machine-vision system for iris recognition," *Machine vision and Applications*, vol. 9, no. 1, pp. 1-8, 1996. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01246633>
- [18] L. Ma, Y. Wang and T. Tan, "Iris recognition based on multichannel Gabor filtering," *5th Asian Conference on Computer Vision*, 2002.
- [19] P. F. Zhang, D.-S. Li and Q. Wang, "A novel iris recognition method based on feature fusion," *International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2004. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/ICMLC.2004.1380440>
- [20] L. Masek and P. Kovesi, "Matlab source code for a biometric identification system based on iris patterns," *The School of Computer Science and Software Engineering, The University of Western Australia*, 2003.
- [21] R. P. Wildes, "Iris recognition: an emerging biometric technology," *Proceedings of the IEEE*, 1997. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/5.628669>
- [22] Y. Z. Shen, M. J. Zhang, J. W. Yue and H. M. Ye, "A new iris locating algorithm," *16th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT)*, 2006. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/ICAT.2006.18>
- [23] H. Demirel and G. Anbarjafari, "Iris recognition system using combined colour statistics," *IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT)*, 2008. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/ISSPIT.2008.4775694>
- [24] H. Demirel and G. Anbarjafari, "Data fusion boosted face recognition based on probability distribution functions in different colour channels," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2009, p. 25, 2009. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1155/2009/482585>
- [25] Johnson, Don, and Sinan Sinanovic. "Symmetrizing the kullback-leibler distance." *IEEE Transactions on Information Theory* (2001).
- [26] M. a. M. L. Dobes, "Upol iris image database," 2004.
- [27] Proença, H., & Alexandre, L. A. (2005, September). UBIRIS: A noisy iris image database. In *International Conference on Image Analysis and Processing* (pp. 970-977). Springer Berlin Heidelberg.
- [28] T. A. Camus and R. Wildes, "Reliable and fast eye finding in close-up images," *16th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, 2002. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/ICPR.2002.1044732>
- [29] F. Cheung, "Iris recognition," *Department of Computer Science and Electrical Engineering, The University of Queensland*, 1999.
- [30] G. Anbarjafari, "Face recognition using color local binary pattern from mutually independent color channels," *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, vol. 2013, no. 1, pp. 1-11, 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1186/1687-5281-2013-6>
- [31] Y. Rodriguez and S. Marcel, "Face Authentication Using Adapted Local Binary Pattern Histograms," *9th European Conference on Computer Vision*, 2006. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1007/11744085_25
- [32] T. Ojala, M. Pietikainen and D. Harwood, "A comparative study of texture measures with classification based on featured distributions," *Pattern recognition*, vol. 20, no. 1, pp. 51-59, 1996. [Online]. Available: [http://dx.doi.org/10.1016/0031-3203\(95\)00067-4](http://dx.doi.org/10.1016/0031-3203(95)00067-4)
- [33] T. Ojala, M. Pietikainen and T. Maenpaa, "Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 24, no. 7, pp. 971-987, 2002. DOI: 10.1109/TPAMI.2002.1017623
- [34] M. Turtinen, M. Pietikainen and O. Silven, "Visual characterization of paper using isomap and local binary patterns," *IEICE transactions on information and systems*, vol. 89, no. 7, pp. 2076-2083, 2006.
- [35] W. Zhang, S. Shan, W. Gao, X. Chen and H. Zhang, "Local gabor binary pattern histogram sequence (lgbphs): A novel non-statistical model for face representation and recognition," *10th IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2005. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/ICCV.2005.147>
- [36] T. Ahonen, A. Hadid and M. Pietikainen, "Face recognition with local binary patterns," *Computer Vision-eccv*, 2004. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-24670-1_36
- [37] M. Heikkilä, M. Pietikainen and J. Heikkilä, "A texture-based method for detecting moving objects," *British Machine Vision Conference (BMVC)*, 2004. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.5244/C.18.21>
- [38] H. Jin, Q. Liu, H. Lu and X. Tong, "Face detection using improved LBP under bayesian framework," *1st IEEE Symposium on Multi-Agent Security and Survivability*, 2004. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/ICIG.2004.62>
- [39] V. Takala, T. Ahonen and M. Pietikainen, "Block-based methods for image retrieval using local binary patterns," *Image Analysis*, pp. 882-891, 2005. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1007/11499145_89
- [40] H. Demirel and G. Anbarjafari, "Pose invariant face recognition using probability distribution functions in different color channels," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 15, pp. 537-540, 2008. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/LSP.2008.926729>
- [41] J. Daugman, "High confidence personal identification by rapid video analysis of iris texture," *IEEE International Carnahan Conference on Security Technology*, pp. 50-60, 1992. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/CCST.1992.253755>
- [42] L. Ma, T. Tan, Y. Wang and D. Zhang, "Personal identification based on iris texture analysis," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 25, no. 12, pp. 1519-1533, 2003. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/TPAMI.2003.1251145>
- [43] H. Demirel and G. Anbarjafari, "Iris recognition system using combined histogram statistics," *23rd International Symposium on Computer and Information Sciences (ISCIS)*, pp. 1-4, 2008. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/ISCIS.2008.4717879>
- [44] Barbu, T. (2011). An automatic face detection system for RGB images. *International Journal of Computers Communications & Control*, 6(1), 21-32.
- [45] Ahamed, A. and Bhuiyan, M.I.H., 2012, May. Low complexity iris recognition using curvelet transform. In *Informatics, Electronics & Vision (ICIEV)*, 2012 International Conference on (pp. 548-553). IEEE.
- [46] Umer, S., Dhara, B.C. and Chanda, B., 2015. Iris recognition using multiscale morphologic features. *Pattern Recognition Letters*, 65, pp.67-74.
- [47] Harjoko, A., Hartati, S. and Dwiyasa, H., 2009. A method for iris recognition based on 1d coiflet Wavelet. *world academy of science, engineering and technology*, 56(24), pp.126-129.

ACKNOWLEDGMENT

This research is supported by the Estonian Research Council Grant PUT (PUT638).

Peritaje de fallos en turbocompresores de motores de combustión interna alternativos



Fault expertise in internal combustion engine turbocharger



Miguel-Andrés López-Hidalgo¹, Jose-Ramón Serrano-Cruz², Vicente Dolz-Ruiz²

¹ ERGON Centro de investigación y desarrollo en ingeniería automotriz. Universidad del Azuay. Av. 24 de mayo 7-77. Cuenca (Ecuador). Tfno: +59 374 091000.

² UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA. CMT-Motores Térmicos. Camino de Vera, s/n - 46022 Valencia. Tfno: +34 963 877650.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7995> | Recibido: 11/03/2016 • Aceptado: 03/06/2016

ABSTRACT

- In this paper, the effects occur in parts of internal combustion engine turbocharger, which have been tested in critical lubrication conditions (low pressure in the lubrication system, reduced oil flow in the axial bearing, and lubrication interruption).

The purpose of these tests was to obtain evidence of damage having different parts of turbochargers, once these have failed tests under controlled parameters.

With this work, a contribution is generated to identify the causes of failures that occur in turbochargers. With this identification of fault generate a contribution to the possible improvement in the design of the different parts of turbochargers and contribute in improving management control of the internal combustion engines to avoid these faults.

- Key Words:** Turbochargers failures, critical conditions, low pressure lubrication, delayed lubrication.

RESUMEN

En este trabajo, se presentan los efectos en las partes de turbocompresores de motores de combustión interna alternativos (MCIA), que han sido ensayados en condiciones críticas de lubricación (baja presión en el sistema de lubricación, disminución de flujo de aceite en el cojinete axial, e interrupción en la lubricación).

La finalidad de estos ensayos, ha sido el de obtener evidencias de los daños que presentan las diferentes partes de los turbocompresores, una vez que estos han fallado bajo parámetros controlados de los ensayos.

Con este trabajo, se genera un aporte para identificar las causas de los fallos que se producen en turbocompresores de MCIA. Con esta identificación de los fallos se pretende generar un aporte para la posible mejora en los diseños de las diferentes partes de turbocompresores, así como aportar en la mejora de la gestión de control de los MCIA para evitar estos fallos.

Palabras Clave: Fallos en turbocompresores, condiciones críticas, baja presión de lubricación, retraso en la lubricación.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a la velocidad de giro tan elevada a la que puede llegar el eje del turbocompresor (hasta 250 kr/min aproximadamente) y las temperaturas que alcanzan los gases que atraviesan la voluta

de la turbina (alrededor de 900°C), las condiciones de funcionamiento del turbocompresor son extremas, por lo tanto la lubricación debe cumplir con todos sus aspectos tribológicos, requisitos indispensables para que el funcionamiento del turbocompresor sea el adecuado. Los fallos en los turbocompresores están principalmente relacionados con el sistema de lubricación un 50% (30% es atribuido al retraso en la entrada del lubricante y 20% es atribuido a la insuficiente cantidad de lubricante), excesivo calentamiento del lubricante un 12%, partículas presentes en el lubricante un 11%, objetos extraños en las volutas un 3% y un 24% debido a errores humanos por: imperfecciones en la alineación del eje, incorrecta instalación del rotor y el uso de repuestos inadecuados, Dellis (2013) (1).

Se han revisado los tipos de fallos en los turbocompresores, llegando a clasificar los fallos en cuatro grupos, según Lozanovic (2011) (2): a) Contaminación del aceite por presencia de partículas debido a un aceite en malas condiciones o mal filtrado, b) Falta de aceite debido a la obstrucción en el circuito de lubricación, c) Condiciones extremas de operación debido a temperaturas excesivamente altas de los gases de escape y d) Ingreso de objetos extraños que dañan los álabes del compresor y turbina. Lozanovic destaca que los cuatro grupos de fallos son causados por problemas en el motor y no por el turbocompresor. Tradicionalmente se han reportado algunos de los problemas típicos en el motor causados por el turbogruppo. Los síntomas que presentan los motores y que han sido identificados son los siguientes, según Honey Well TurboTechnologies (2009) (3):

- Problemas de rendimiento del motor por falta de compresión del turbocompresor.
- Excesivas emisiones contaminantes del motor por falta de estanqueidad en el sistema de lubricación del turbocompresor.
- Ingreso de aceite desde el compresor al sistema de admisión o salida de aceite por la turbina hacia el sistema de gases de escape.
- Incremento del ruido por vibraciones en el turbocompresor.
- Ruido proveniente del impacto del rotor con la carcasa o el silbido que produce el turbocompresor por el desbalance del eje.

Pese a tener identificada la repercusión de los fallos del turbocompresor en el motor, todavía falta generar un conocimiento claro sobre las condiciones más extremas a las que puede llegar

a funcionar un turbocompresor, las causas de los fallos en el turbocompresor y falta identificar los mecanismos de fallo del turbocompresor.

El objetivo en este trabajo es tratar de determinar la secuencia de los mecanismos de los fallos en los turbocompresores y clarificar las condiciones críticas o límites en los cuales los turbocompresores pueden seguir en funcionamiento sin sufrir daños.

Los mecanismos de fallos y condiciones límites pueden resultar interesantes para mejorar la gestión de sistemas de control electrónico del turbocompresor, optimizar el diseño de sistemas que trabajan en conjunto con el turbocompresor, como por ejemplo el sistema de lubricación. También se pueden establecer criterios que ayuden a realizar peritajes y determinar responsabilidades sobre fallos ocurridos, de responsabilidad del motor o del turbogrupo.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. MATERIALES

Características de los turbocompresores

Los turbocompresores utilizados en motores de combustión interna pueden tener diferentes sistemas de apoyo del eje, sin embargo, el sistema de apoyo que es más utilizado en este tipo de turbocompresores son los cojinetes de lubricación hidrodinámica y en menor medida los apoyos o cojinetes de rodamientos, Kelly (2010) (4).

En la Tabla 1 se pueden ver los tipos de turbocompresores utilizados en este trabajo. En la primera columna está la nomenclatura que se utilizará para los turbocompresores, la cual indica lo siguiente: la marca, el tipo de turbocompresor y el sistema de apoyo del eje. Dentro del sistema de apoyo se identifican tres tipos: el flotante "FRB", el semiflotante "SFRB" y un semiflotante tipo Z (cojinete axial y radial en el mismo cojinete) "SFRBZ" (Figura 1).

2.2. MÉTODO DE ENSAYO. EXPERIMENTACIÓN EN CONDICIONES CRÍTICAS DE LUBRICACIÓN

2.2.1. Baja presión en el sistema de lubricación

En estos ensayos se han tratado de reproducir los efectos que se podrían presentar en el eje, en situaciones en las que la presión de alimentación de aceite es inadecuada.

El ensayo consiste en realizar aceleraciones (transitorios de régimen de giro) con un ratio comprendido entre 100 kr/mins y 500

kr/mins, con dos diferentes temperaturas de aceite a 90°C y 130°C y diferentes presiones de entrada del aceite al turbocompresor desde 1.5 hasta un mínimo de 1.02 bar abs.

2.2.2. Cojinete axial con orificio de lubricación reducido

En este ensayo se utilizó un cojinete axial con el orificio de lubricación reducido para reproducir el funcionamiento de un turbocompresor con el conducto de aceite axial obstruido. Para reproducir las condiciones más desfavorables se han realizado ensayos en los que hay tracción del eje hacia el lado del compresor, en la Figura 2 se puede observar el transitorio del motor en el que se encuentra acoplado el TC. En la Figura 3a) se puede ver una fotografía del cojinete axial con el orificio de paso de aceite normal (diámetro aproximado de 0.9 mm). El diámetro de este orificio en el cojinete axial modificado ha sido reducido hasta 0.3 mm aproximadamente.

Para evaluar la diferencia de flujo másico de aceite, se midió el flujo con distintas presiones en los dos tipos de cojinetes. En la Figura 3b) se puede observar la diferencia de flujo másico con diferentes saltos de presiones en estos cojinetes (orificio reducido

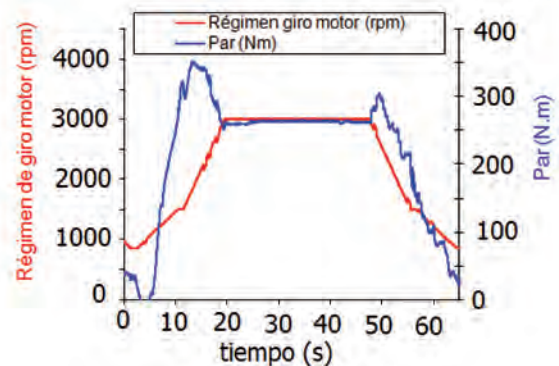


Figura 2: Transitorio de régimen de giro y carga del motor que alimenta al turbocompresor

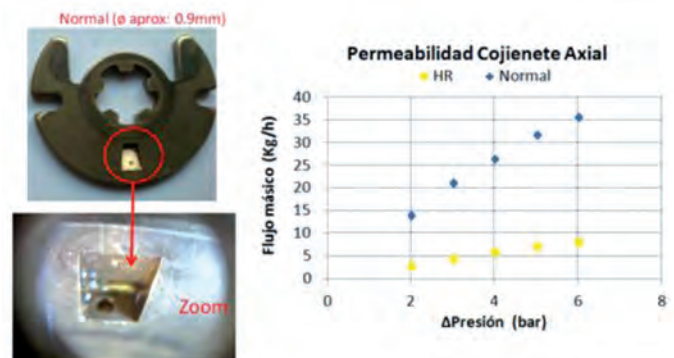


Figura 3a): Fotografía cojinete axial con orificio normal. 3b): Flujo másico cojinete orificio reducido "HR" y normal

Nomenclatura	Marca	Tipo	Sistema de apoyo
BW-GTA17-SFRB	Borg Warner	GTA1752LV	Cojinete Semiflotante
BW-KP35-FRB	Borg Warner	KP35	Cojinetes Flotantes
BW-BV39-FRB	Borg Warner	BV39	Cojinetes Flotantes
HTT-GT14-SFRBZ	Honeywell	GT14	Cojinete Z-Semiflotante

Tabla 1: Tipos de turbocompresores utilizados en los ensayos

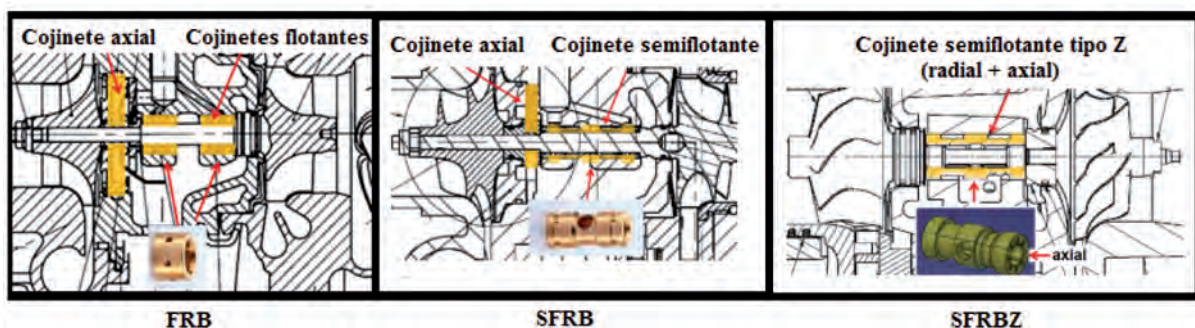


Figura 1: Turbocompresor con cojinetes flotantes "FRB", semiflotante "SFRB", semiflotante tipo Z "SFRBZ"

y normal). En la leyenda las letras "HR" identifican el cojinete axial de orificio reducido.

2.2.3. Interrupción de la lubricación

En este ensayo se han realizado ciclos de corte de aceite, estos se han realizado en la entrada de aceite al sistema de lubricación del turbocompresor, cada corte de lubricación ha sido de 15 segundos y después otra vez se da paso al aceite durante 15 segundos más. Estos ciclos se han repetido 60 veces para observar los efectos de la acumulación de ciclos en pequeños cortes de lubricación, en condiciones de funcionamiento del turbocompresor estacionarias. La velocidad de giro del turbocompresor se ha mantenido constante a 150 kr/min durante estos cortes de lubricación. En este ensayo se utilizaron dos tipos de turbocompresores *Borg Warner*: 3 turbocompresores BW-KP35-FRB con cojinetes flotantes y 2 turbocompresores BW-GTA17-SFRB con cojinetes semiflotantes.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para identificar las causas de los problemas en el turbocompresor se han medido variables termodinámicas como la presión y temperatura en el circuito de aire, circuito de gases y lubricación del turbocompresor. También se ha medido el movimiento del eje para identificar el comportamiento del turbocompresor en el instante que presenta el fallo. Las técnicas utilizadas para la medida del movimiento del eje son detalladas por Pastor (2012) (5) técnica mediante imágenes y Serrano (2015) (6) técnica con sensores infrarrojos.

Se han determinado algunos "parámetros principales" que sirven para identificar el momento del fallo, similitudes en los daños

de los diferentes elementos, pautas de funcionamiento y las posibles razones para que se originen los fallos. Estos "parámetros principales" son los siguientes:

- *Movimiento del eje*: En esta variable se analiza el criterio de máxima excentricidad alcanzada. Este criterio es el diámetro de la órbita que describe el movimiento del eje dividido para la máxima excentricidad del turbocompresor (máximo movimiento que puede llegar a tener el eje hasta entrar en contacto con un elemento fijo), el movimiento del eje se obtuvo con la técnica de medida con imágenes. En los ensayos en los que se aplica la técnica con sensores infrarrojos se utiliza el criterio del máximo diámetro del movimiento de precesión de la punta del eje adimensionalizada (dividida) con la máxima excentricidad, como es explicado en los artículos de Pastor (2012) (5) y Serrano (2015) (6) para las técnicas, respectivamente.
- *Nivel de daños observados*: Al reducir la película de lubricación por carencia de aceite, se puede producir contacto entre eje y cojinete. La evidencia de este contacto en los ensayos fue la presencia de colores de temple (por aumento de temperatura), ralladuras (por desgaste abrasivo) o adición de material (por desgaste adhesivo) en el eje, en la revisión posterior a los ensayos. Los principales colores de temple observados en las revisiones han sido morado y azul, las temperaturas alcanzadas para esta coloración deben estar entre 280°C y 290°C según Verhoeven (2005) (7). También se han observado ralladuras en el eje y en los cojinetes (desgaste abrasivo), pero sin la presencia de colores de temple, es un indicador de fricción pero en instantes de tiempo muy reducidos.

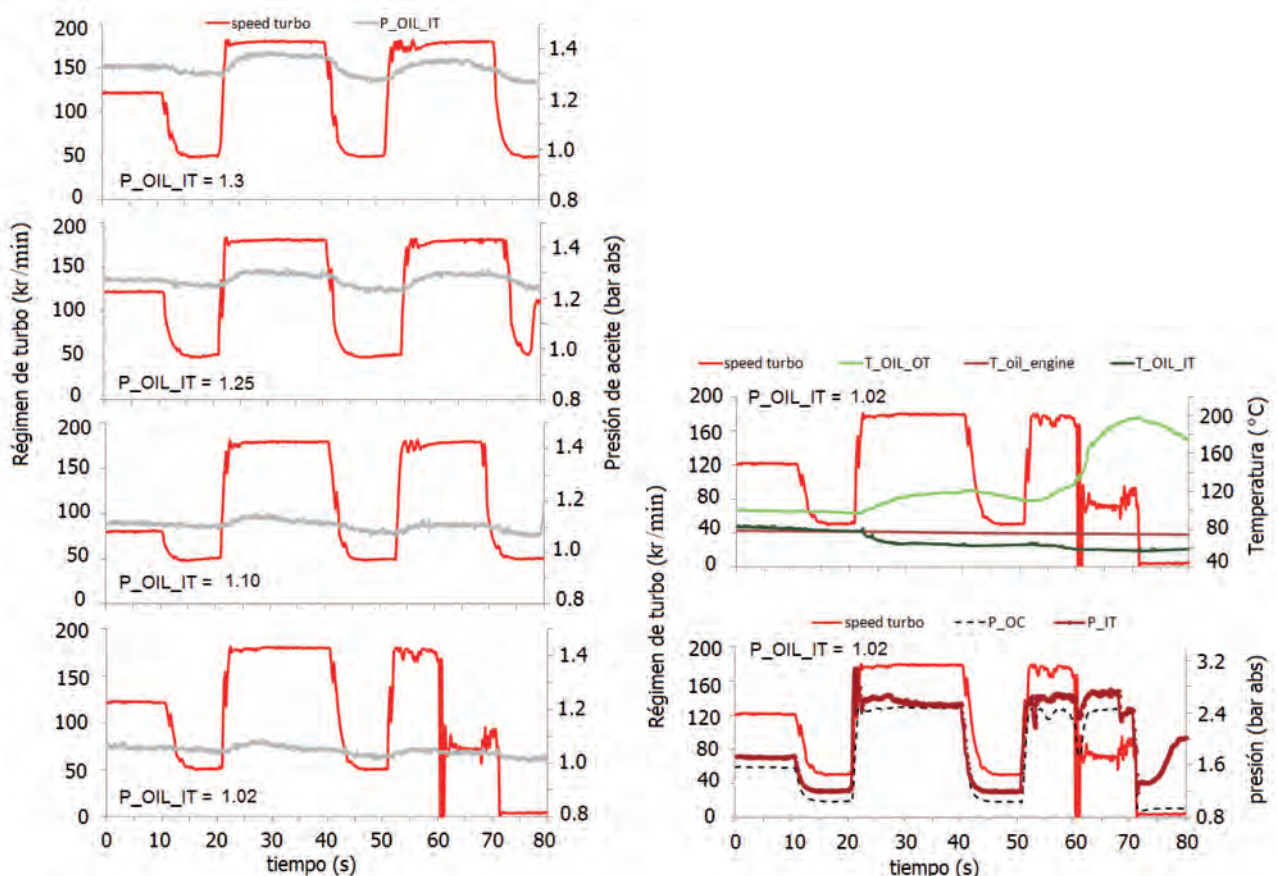


Figura 4: Ensayos transitorios con un ratio comprendido entre 100 kr/mins y 500 kr/mins, temperatura de aceite de 90°C y presiones de entrada desde 1.3 hasta 1.02 bar abs. 4a) Ensayos de baja presión de aceite turbocompresor BW-BV39-FRB. Figura 4b) Variables termodinámicas, último ensayo con baja presión de aceite

- **Indicadores termodinámicos:** Se han obtenido distintas variables medidas durante los ensayos para que permitan identificar variaciones en el rendimiento del turbocompresor, las variables medidas han sido: temperaturas y presiones de entrada y salida del compresor y turbina; y de entrada y salida del aceite; flujos de aire en el compresor y gases de escape en la turbina.

Baja presión en el sistema de lubricación

En estos ensayos se utilizaron 2 turbocompresores *Borg Warner* BW-BV39-FRB con cojinetes flotantes y un turbocompresor *Honeywell* HTT-GT14-SFRBZ con cojinete semiflotante. Con el primer grupo de turbocompresores (*Borg Warner*) se ensayó realizando dos aceleraciones (transitorios de régimen de giro) con un ratio comprendido entre 100 kr/mins y 500 kr/mins, la temperatura del aceite de entrada al TC es de 90°C y las presiones de entrada del aceite al TC van desde 1.3 hasta un mínimo de 1.02 bar abs. Con el segundo tipo de turbocompresor (*Honeywell*) se realizaron ensayos con presiones de: 1.5, 1.3 y 1.1 bar abs, con ratio de aceleración de hasta 180 kr/mins y temperatura de entrada del aceite al TC de 90°C y 130°C.

En la Figura 4 se presentan los resultados del ensayo con el primer TC *Borg Warner* BW-BV39-FRB. En la Figura 4a) se observa el régimen de giro (speed turbo) en color rojo y la presión de aceite a la entrada del TC (P_OIL_IT) en color gris; en el último ensayo con presión de aceite de 1.02 bar abs, se observa una caída en el régimen de giro del TC, en el segundo 60, en la Figura 4b) se presentan las variables termodinámicas (temperaturas en la parte superior y presiones en la parte inferior) de este ensayo con presión de 1.02 bar abs, además en el segundo 60 se puede observar un incremento de la temperatura en la salida del aceite del TC línea color verde claro (T_OIL_OT) y una pérdida de presión en la salida del compresor línea negra entrecortada (P_OC), este ensayo se realizó con un pico de aceleración de 320 kr/mins.

En la Figura 5 se ven las diferentes partes del TC con las evidencias de colores de temple en el eje y la arandela del cojinete axial, las arandelas del cojinete axial resultaron soldadas entre sí, además se evidencian las ralladuras en el eje, rallas en los cojinetes radiales (se evidencian rallas externas debido a que son cojinetes flotantes) y el contacto de los álabes de la rueda del compresor con la carcasa.

Con el segundo TC marca *Borg Warner* BW-BV39-FRB, se incrementó el ratio de aceleración hasta 500 kr/mins y la mínima presión de entrada de aceite ensayada fue de 1.25 bar abs, pese a estas condiciones extremas el TC no presentó averías.

Con el TC *Honeywell* HTT-GT14-SFRBZ de cojinete flotante tipo z, el ensayo más crítico fue con una presión de 1.1 bar abs, ratio de aceleración de 180 kr/mins y temperatura del aceite de 130°C.

En la Figura 6 se pueden observar los diámetros adimensionalizados de la órbita que describe el movimiento de precesión de la punta del eje en el lado del compresor. Estos datos han sido obtenidos de las señales filtradas de los sensores durante cada uno de los ensayos con la técnica de medida con sensores infrarrojos, como lo explica Serrano (2015) (6). La señal ha sido adimensionalizada con el diámetro de la máxima excentricidad del turbocompresor (máximo movimiento que podría alcanzar el eje del turbocompresor para entrar en contacto entre el eje y los cojinetes). En la leyenda de la Figura 6 se puede observar la temperatura del aceite (90°C ó 130°C), la presión de entrada del aceite (1.5 ó 1.1 bar abs) y el número de ensayo (t1 o t2), cada ensayo se realizó dos veces para observar su repetitividad. Aquí se puede observar que la máxima amplitud de movimiento se alcanza con menor presión

de aceite y mayor temperatura (1.1 bar abs y 130°C) como era de esperar, estos movimientos con líneas de color negro y violeta.

Movimiento del eje: Con el turbocompresor (HTT-GT14-SFRBZ) con cojinete semiflotante tipo z, pese a tener una presión en el sistema de aceite de solo 1.1 bar abs y ratios de aceleración de 180 kr/mins, solo se alcanzó un máximo de amplitud de movimiento de 0.33 en el movimiento del eje.

Nivel de daños observados. En el turbocompresor (BW-BV39-FRB) el lado del compresor es el que presenta más daños, el eje no presenta colores de temple muy perceptibles, las arandelas del cojinete axial están soldadas entre sí y presentan colores de temple, los cojinetes radiales tienen ralladuras muy profundas, la turbina no presenta daños muy graves (fotografías Figura 5).

Indicadores termodinámicos. Se ve un aumento en la temperatura de salida del aceite de 80°C aproximadamente, para este incremento de temperatura se plantean dos hipótesis: a) El aumento de temperatura en la salida del aceite (T_OIL_OT) puede ser un indicador de pérdida de estanqueidad en el lado de la turbina (incremento de blow by de los gases de escape al sistema de lubricación del TC), además se observa que el compresor sigue comprimiendo pero con pérdidas de presión y la turbina disminuye su rendimiento tiene un incremento súbito de temperatura a la salida de turbina de 26°C aproximadamente. b) El gripaje de los cojinetes genera calor, por lo tanto se da el aumento de temperatura. Ello, junto con el roce del compresor produce una reducción en la velocidad de la turbina y por lo tanto una reducción del rendimiento de la misma, un aumento de la temperatura de salida de gases y una reducción de la relación de compresión del compresor.

Cojinete axial con orificio de lubricación reducido

Con el turbocompresor *Borg Warner* BW-BV39-FRB de cojinetes flotantes, se realizaron 13 horas de estabilización en es-



Figura 5: Fotografías turbocompresor BW-BV39-FRB, ensayos a baja presión con alto ratio de aceleración

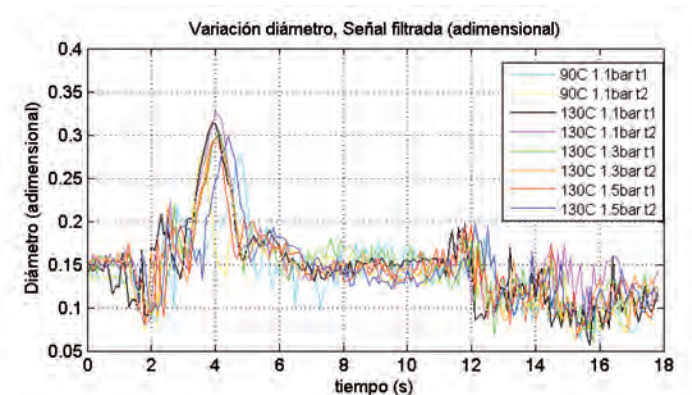


Figura 6: Señal filtrada de los sensores infrarrojos turbocompresor HTT-GT14-SFRBZ, ensayos baja presión alto ratio de aceleración

tacionario y 25 horas de los ciclos transitorios en las condiciones descritas en el apartado 2.1.2.

Debido a los ciclos repetidos de tracción del eje a los que el turbocompresor fue sometido durante los ensayos, el anillo de estanqueidad del lado de la turbina sufrió daños severos. En la Figura 7a) se puede ver el cojinete axial y dos anillos, el anillo ensayado y un anillo nuevo. Al fallar el anillo los gases del lado de la turbina pueden ingresar en el circuito de lubricación, en la Figura 7b) se puede ver un incremento de la temperatura (pico de color verde oscuro, segundo 62) en el circuito de lubricación, esto produce una ineficiente película de lubricación presentado los fallos de lubricación en el turbocompresor.

Movimiento del eje: En este ensayo no se midió el movimiento radial del eje, ya que en este ensayo el movimiento principal era axial.

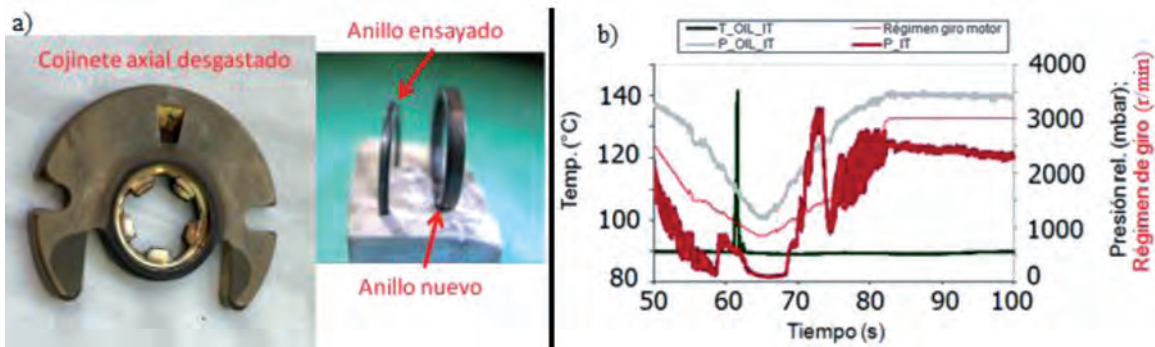


Figura 7a) Cojinete axial y anillo de estanqueidad. 7b) Variables termodinámicas ensayo orificio reducido BW-BV39-FRB

Daños observados: Se evidenciaron daños en las puntas de los álabes de la rueda del compresor (en el exduser), debido al impacto por el excesivo movimiento axial del eje. También se evidenciaron ralladuras en el cojinete axial en el lado de la turbina (es decir se produce una tracción desde el compresor), otro elemento que presentó averías fue el anillo de estanqueidad de la turbina, en la Figura 7a) se compara un anillo nuevo con el anillo ensayado.

Indicadores termodinámicos: Se observó un pico de 50°C de temperatura en la entrada de aceite (la hipótesis consiste en que la temperatura sube por el ingreso de gases de escape en el sistema de lubricación por el daño del anillo). El aumento de blow by en el TC, provocó el aumento de presión en el sistema de lubricación, esto produjo no solo daños en el turbogrupo sino también daños en el motor de combustión en el que se encontraba instalado el TC.

Interrupción de la lubricación

Con dos de los tres turbocompresores BW-KP35-FRB se observó un comportamiento anómalo durante los ensayos. Con el primer TC se observó este comportamiento anómalo entre el segundo 250 y 500 aproximadamente (Figura 8), en esta figura se pueden observar las variables de presión y temperatura y este comportamiento anómalo tiene las siguientes características:

- Aumenta la permeabilidad del circuito de aceite, la media de los picos de la presión de entrada de aceite (P_OIL_IT) al turbocompresor son inferiores.
- Disminución de la presión a la salida compresor (P_OC).

- Disminución del flujo másico en el compresor (M_COMP).
- Incremento en la temperatura del aceite de salida (T_OIL_OT).
- En cuanto al movimiento del eje, de manera cualitativa se observó un comportamiento repetitivo. Cuando está con aceite, el movimiento describe una elipse grande y cuando está sin aceite el movimiento es más centrado en una zona pequeña.

En la Figura 9 (ANEXO 1) se pueden ver las fotografías de las distintas partes del turbocompresor que presentan anomalías después del ensayo de interrupción en la lubricación. En la parte superior se observa la adición de material del cojinete axial sobre la parte posterior de la rueda del compresor y sobre la arandela del lado del compresor. En la parte central de la Figura 9 (ANEXO 1) se

pueden ver las ralladuras en el cojinete axial, siendo las más notables las del lado del compresor. En la parte inferior de la Figura 9 (ANEXO 1) se pueden observar los colores de temple en el eje del turbocompresor específicamente en la zona de apoyo del eje sobre el cojinete (en el lado de la turbina).

Además, se utilizaron dos turbocompresores BW-GTA17-SFRB (con cojinetes semiflotantes), los dos turbocompresores tuvieron fallos en el primer corte de lubricación. Los dos turbocompresores rompieron el eje durante el ensayo. Antes de la rotura total del

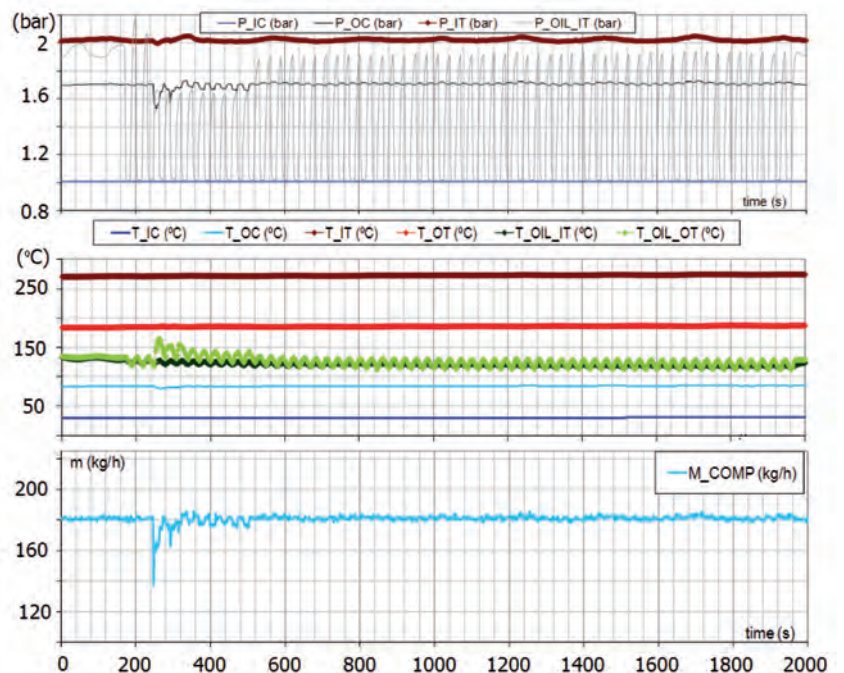


Figura 8: Variables termodinámicas durante el ensayo del primer turbocompresor BW-KP35-FRB

turbocompresor se verificó un aumento de movimiento del radial del eje, alcanzando los límites de movimiento de máxima excentricidad. En la Figura 10 (ANEXO 1) se pueden observar los elementos del segundo TC de este tipo con sus averías, el primer TC presentó daños similares.

Movimiento del eje. El turbocompresor de cojinetes flotantes que presentó anomalías en su funcionamiento alcanzó valores de 71% de máxima excentricidad. Uno de los turbocompresores con cojinetes semiflotantes alcanzó el 100% de máxima excentricidad, con el segundo TC de cojinetes semiflotantes se obtuvieron datos hasta el inicio de un movimiento errático (momento en el que no se pueden procesar las imágenes para obtener la posición del eje) con medidas de hasta el 64% de máxima excentricidad. Al revisar las imágenes del movimiento errático se observó que la amplitud de movimiento aumentó hasta alcanzar la máxima excentricidad.

Daños observados. En los turbocompresores que no rompieron pero presentaron comportamientos anómalos se observan colores de temple en los ejes (debido al largo período de tiempo con cortes de lubricación), en la Figura 10 (ANEXO 1) se ven estos colores de temple del eje. Las ralladuras en los cojinetes axiales son en el lado del compresor (es decir, se generó mayor tracción desde la turbina). Se observó que los ejes de los turbocompresores BW-GTA17-SFRB se fracturaron, es posible que por aumento de los esfuerzos de torsión Figura 10 (ANEXO 1).

Indicadores termodinámicos. En los cuatro turbocompresores con problemas se observó un incremento brusco en la temperatura de aceite a la salida del TC, pero solo en los turbocompresores destruidos se observó el incremento de temperatura en la salida de la turbina.

4. CONCLUSIONES

Ensayos con baja presión de aceite: La primera hipótesis es que en condiciones de baja presión de aceite los TC con cojinetes semiflotantes pueden ser más resistentes que los turbocompresores de cojinetes flotantes. Esta hipótesis está fundamentada en el mayor tiempo de residencia que puede tener el aceite en el caso de TC con cojinetes semiflotantes a igualdad de condiciones de operación, estos comparados con TC de cojinetes flotantes. En el caso de no presencia de aceite se plantea una segunda hipótesis, que los TC con cojinetes flotantes parecen ser más resistentes esto debido al menor par de fricción (menor velocidad relativa entre eje y cojinete) y por lo tanto menor esfuerzo de torsión.

Cojinete axial reducido: Con este tipo de ensayos se ha podido evidenciar que en el caso de darse una deficiencia en la lubricación axial, se pueden presentar picos de temperatura en la salida de la turbina, esto debido al deterioro del anillo de estanqueidad. Este parámetro puede servir como una alarma de control en el funcionamiento del TC.

Interrupción en la lubricación: Con cortes repetitivos de aceite y contacto entre eje y cojinete, estas condiciones podrían resultar más perjudiciales para los turbocompresores con cojinetes semiflotantes. Esta hipótesis se la plantea debido a la mayor velocidad relativa entre eje y cojinete; y por lo tanto una vez que entran en contacto estos dos elementos, el eje puede sufrir un mayor esfuerzo de torsión, provocando su rotura.

En la Tabla 2 se presenta un resumen de la sensibilidad (en forma cualitativa) de los turbocompresores a las condiciones críticas de funcionamiento estudiadas en este trabajo. Con signo positivo "+" están los turbocompresores con mayor sensibilidad al tipo de ensayo y con signo negativo "-" los turbocompresores que tienen menor sensibilidad, es decir los que resisten más en ese tipo de

condiciones críticas de funcionamiento. En el ensayo de cojinete axial reducido no se realizó el ensayo con el TC de cojinete semiflotante Z debido a que no se puede obstruir ese cojinete.

	Sensibilidad a condiciones críticas de funcionamiento		
	Baja presión	Cojinete axial con orificio reducido	Interrupción en la lubricación
Cojinete flotante	+	+	-
Cojinete semiflotante	-	s/r	+

Tabla 2: Resumen de la sensibilidad cualitativa de los turbocompresores en diferentes condiciones críticas de funcionamiento

Peritajes: En caso de controversias entre fabricantes de motores y fabricantes de turbocompresores, sobre responsabilidad de fallos, se pueden utilizar algunos criterios observados en este trabajo:

- Colores de temple en el eje del turbocompresor: es un indicador de un fallo de cortes intermitentes de la lubricación (interrupción de la lubricación) durante lapsos de tiempo elevado.
- Presencia de ralladuras sin colores de temple en el eje: es un indicador de fallo súbito y sin presencia de aceite.
- Zonas de averías en los álabes: se han identificado tres zonas en los álabes de la rueda del compresor que pueden ser dañadas por diferentes causas. En la Figura 11 (Anexo 1) se presenta una fotografía en la que se pueden ver estas zonas:

Zona A: Daños por excesivo movimiento axial que puede ser provocado por disminución en flujo del aceite por el cojinete axial y ciclos de aceleración repetitivos.

Zona B: Daños por excesivo movimiento radial por fallos en la lubricación de los cojinetes radiales.

Zona C: Esta zona de los álabes no puede ser afectada por fallos en el sistema de lubricación o por fallos propios del turbocompresor (ningún turbocompresor en este trabajo ha presentado daños en esta zona). Esta zona solo puede verse afectada por el ingreso de objetos extraños al turbocompresor Serrano (2011) (8).

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Dellis Polichronis, Retzios Evaggelos, Gerialis Alcibiades, Gasparakis Elias y Pesiridis Apostolos. "Turbocharger Lubrication - Lubricant Behaviour and Factors That Cause Turbocharger Failure". *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, Vol. 2, pp. 40-54, 2013. DOI: <http://ijaet.academicpaper.org/article/view/1072000033>
- (2) Lozanovic Jasmina y Lozanovic Veljko. "Damage Analysis of Automotive Turbochargers". *IMEKO TC15 - Experimental Mechanics - 10 th YSESM-Chemnitz, Germany*, 2011. <http://www.imeko.org/publications/yseesm-2011/IMEKO-YSESM-2011-ea27.pdf>
- (3) Technologies Honeywell Turbo. "Turbo Fundamentals". *EMEA Aftermarket Press Event*, 2009. <http://turboexchangecept.co.za/images/2%20turbo%20fundamentals.pdf>
- (4) Kelly A. D. "Rotordynamic characterization and comparison of Turbocharger bearing systems". *Borg Warner Turbo and Emissions Systems, USA*, 2010.
- (5) Pastor, J.V., Serrano, J.R., Dolz, V., López, M.A., Bouffaud, F. Study of turbocharger shaft motion by means of non-invasive optical techniques: Application to the behaviour analysis in turbocharger lubrication failures. *MECHANICAL SYSTEMS AND SIGNAL PROCESSING*. 32, pp. 292 - 305. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2012.04.020>
- (6) J.R. Serrano, C. Guardiola, V. Dolz, M.A. López, F. Bouffaud. Study of the turbocharger shaft motion by means of infrared sensors. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 56-57, pp. 246-258. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2014.11.006>
- (7) Verhoeven John D. *Metallurgy of Steel for Bladesmiths & Others who Heat Treat and Forge Steel*. Iowa University, 2005. <http://www.hybridburners.com/documents/verhoeven.pdf>
- (8) Serrano J.R., Tormos B., Gargar K.L. and Bouffaud F. Study of the effects on turbocharger performance generated by the presence of foreign

objects at the compressor intake. *Experimental Techniques* (2011) Society for experimental Mechanics. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1747-1567.2011.00795.x>

AGRADECIMIENTOS

El presente estudio ha sido desarrollado gracias al apoyo de las becas del Senescyt del gobierno ecuatoriano y gracias a la colaboración del grupo de investigadores del departamento de motores térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia.

ANEXO 1



Figura 9. Fotografías de las partes del primer turbocompresor BW-KP35-FRB, ensayo interrupción de lubricación



Figura 10. Fotografías de las piezas del segundo turbocompresor BWGTA17-SFRB, ensayo interrupción de lubricación

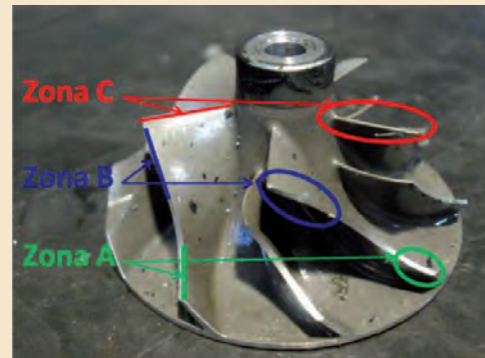


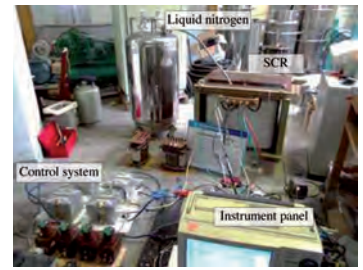
Figura 11. Zonas de averías en ruedas de compresor

UNIDADES Y NOMENCLATURA

<i>abs</i>	presión absoluta
<i>BW</i>	Borg Warner
<i>FRB</i>	cojinete flotante
<i>HTT</i>	Honey Well
<i>HR</i>	cojinete axial con orificio reducido
<i>MCIA</i>	motor de combustión interna alternativo
<i>M_COMP</i>	flujo másico de aire en el compresor
<i>P_IC</i>	presión en la entrada del compresor
<i>P_OC</i>	presión en la salida del compresor
<i>P_IT</i>	presión en la entrada de la turbina
<i>P_OT</i>	presión en la salida de la turbina
<i>P_OIL_IT</i>	presión de aceite de entrada al turbocompresor
<i>SFRB</i>	cojinete semiflotante
<i>SFRBZ</i>	cojinete tipo Z, cojinete flotante y radial en el mismo cojinete
<i>TC</i>	turbocompresor
<i>T_IC</i>	temperatura de entrada en el compresor
<i>T_OC</i>	temperatura en la salida del compresor
<i>T_IT</i>	temperatura en la entrada de la turbina
<i>T_OT</i>	temperatura en la salida de la turbina
<i>T_OIL_IT</i>	temperatura en la entrada del aceite del turbocompresor
<i>T_OIL_OT</i>	temperatura en la salida del aceite del turbocompresor

Transient characteristics and optimal control strategy of superconducting controllable reactor

Características transitorias y estrategia óptima de control de un reactor controlable superconductor



Bo Chen¹, Na Yu^{1*}, Xuanyao Luo², Lei Liu², Xiang Li^{2,5}, Bin Sun³, and Zhangting Yu⁴

¹ School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, 947 Peace Avenue, Qingshan District, Wuhan 430081, Hubei, China. Corresponding author: Na Yu, email: m13517129418_1@163.com

² School of Electrical Engineering, Wuhan University, 299 Bayi Street, Wuchang District, Wuhan 430072, Hubei, China

³ Institute of Economy and Technology of Huanggang Power Supply Company, 36 Dongmen Street, Huangzhou District, Huanggang 438000, Hubei, China

⁴ Guangxi Grid Company, LTD Electric Power Research Institute, 6-2, Minzhu Street, Nanning 530000, Guangxi, China

⁵ Department of Electrical and Electronic Engineering Saga University, 1 Honjo-machi, Saga, 840-8502, Japan

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8186> | Recibido: 26/09/2016 • Aceptado: 29/11/2016

RESUMEN

- El Reactor Controlable Superconductor (SCR) es un equipo prometedor para compensar la potencia reactiva y mejorar la estabilidad de la tensión y la fiabilidad de un sistema energético. Dada la especial estructura y la complejidad del circuito magnético del SCR, falta un análisis en profundidad de las características transitorias y de la estrategia de control que tienen un importante efecto sobre su rendimiento. En este estudio se propone un análisis de las características transitorias y una estrategia óptima de control. En primer lugar, se presenta el principio básico de la operación y la impedancia del modelo analítico del SCR. Después, se analizan detalladamente las características transitorias en el componente de corriente continua (DC) y la sobretensión, proponiéndose una estrategia óptima de control basada en un interruptor de circuito y en tiristores anti-paralelos. Finalmente se validan el principio y los resultados de los métodos propuestos por simulación electromagnética y por experimentos con un prototipo a 380V/30kVar. Los resultados de la simulación y los experimentos demuestran que el componente de DC y la sobretensión se producen en el proceso transitorio. Cuando el ángulo de conexión del arrollamiento superconductor es de 90°, el componente de DC y la sobretensión son pequeños. El sistema de control óptimo propuesto puede evitar la producción del componente de DC y sobretensión que dañarían los arrollamientos superconductores. Los resultados obtenidos por este estudio podrán ser aplicados en el diseño de SCR con rendimientos óptimos.
- **Palabras clave:** Reactor Controlable Superconductor, Estrategia de control óptimo, Componente de DC, Sobretensión.

ABSTRACT

Superconducting controllable reactor (SCR) is a promising device for reactive power compensation to improve the voltage stability and reliability of power system. Given the special structure and complex magnetic circuit of SCR, the transient characteristics and control strategy, which have an important effect on the performance of SCR, lack comprehensive analysis. In this study, transient characteristics analysis and an optimal control strategy are proposed. First, the basic operating principle and the impedance of the analytical model of SCR were presented. Second, the transient characteristics on the DC component and the overvoltage of SCR were analyzed in detail, and an optimal control strategy

based on circuit breaker and anti-parallel thyristors was proposed. Finally, the principle and performance of proposed methods were validated through electromagnetic simulation and experiments of 380V/30kVar prototype. The simulation and experimental results demonstrate that the DC component and overvoltage will be produced in the transient process. When the switching angle of superconducting winding is 90°, the DC component and overvoltage become small. The optimal control system proposed can avoid producing the DC component and overvoltage that damage the superconducting windings. The results obtained in this study can be applied to the optimal performance design of SCR.

Keywords: Superconducting controllable reactor, Optimal control strategy, DC component, Overvoltage.

1. INTRODUCTION

With the widely use of high-power fluctuating loads and the continuous growth of distributed sustainable energies, reactive power fluctuation of high-voltage power system has been becoming a serious problem, which will reduce the power quality, power factor and lead to voltage fluctuation [1]. To solve these issues, reactive power compensation devices should be installed in the high-voltage power system [2-4]. Traditional reactive power compensation measures mainly include installing the synchronous compensator and fixed capacitor. The synchronous compensator is one of the earliest devices for reactive power compensation. This device is similar to a synchronous motor under no-load conditions. The synchronous compensator can provide dynamic reactive power compensation by adjusting the exciting current. However, given the disadvantages of large loss, high noise, and complex maintenance, the use of synchronous compensator is limited to the high-voltage power system. In addition, fixed capacitor is one of the most commonly used devices for reactive power compensation in the power system. This device is low cost, easy to install, and low maintenance. Considering that fixed capacitor can provide the fixed capacitive reactive power, the harmonic currents of power system may be amplified by the fixed capacitor, and the response speed is so slow that it cannot satisfy the dynamic reactive power compensation requirements of high-voltage power system. Hence, studying effective reactive power compensation devices in high-voltage power grid is necessary.

2. STATE OF THE ART

At present, reactive power compensation devices, which have been attracting worldwide attention from researchers and companies, mainly include thyristor controlled reactor (TCR), saturable reactor (SR), and static var generation (SVG) [5-12]. A thyristor-controlled reactor was used for power factor correction and terminal voltage stabilization of power system in [5]. A combined system of a TCR and a shunt hybrid power filter was proposed to provide the harmonic and reactive power compensation in [6]. TCR can adjust the reactive power by changing the trigger angle of thyristors. However, the withstanding voltage and harmonics of TCR limit its development. A saturable two-stage magnetic controlled reactor was proposed for arc suppression in [7-8]. A saturable continuously variable series reactor was presented to power flow control in [9]. However, the saturable reactor (SR) is limited by its harmonics and response speed. In addition, SVG can flexibly compensate the reactive power of power system and has low harmonics via control strategy. Static synchronous compensators, as a type of SVG, was presented to provide unbalanced voltage support in unbalanced power systems [10-11]. A cascaded static var generator (SVG) with delta-configuration was discussed for a compensation of reactive, negative-sequence, and harmonic currents in [12]. A single-phase full-bridge configuration of static var generators (SVG) was used with reduced equipped capacitance for reactive power compensation in [13]. However, considering that the power electronic devices can only withstand low voltage, SVG is difficult to apply in high-voltage power grids.

With the development of second-generation high-temperature superconducting technology, superconducting controllable reactor (SCR) has been one of the most promising reactive power compensation devices in the power system. Its advantages are its free harmonics, fast response speed, low losses, and ability to withstand high voltage [14-16]. The leakage inductance and reactive capacity of SCR can be adjusted by shortening the superconducting windings. Researchers have analyzed the principle and steady-state performance of SCR [16]. However, the transient characteristics and control strategy of SCR require additional attention.

The output capacity of SCR is adjusted by switching on/off the superconducting windings. When the superconducting windings are switched on/off at the different angles of system voltage, the DC component and overvoltage will be produced in the superconducting windings. The DC component may produce more losses and lead to superconducting quench. The overvoltage will cause the insulation damage of the superconducting windings. Therefore, the control strategy of SCR should be optimized to avoid producing DC component and overvoltage, and the optimal control strategy of SCR should be a greater focus. SCR should be designed to have several gears to adjust the output capacity, thereby meeting the requirements of reactive power compensation. The key problem of capacity gear design of SCR is impedance calculation. Hence, based on the basic principle and mathematical impedance model, this paper analyzes the transient characteristics of SCR via the theory and finite element analysis method (FEA) [17]; the DC component and overvoltage produced in transient process will have an important effect on the performance. Finally, this paper presents an optimal control strategy to effectively avoid the DC component and overvoltage.

The remainder of this paper is organized as follows: Section 3 describes the operating principle, the transient characteristics, and the optimal control strategy of SCR. Then, Section 4 presents various simulations via FEA method to analyze the transient characteristics of SCR, and presents a real 380V/30kVar experiment to

evaluate the performance and transient control characteristics of SCR with optimal control system. Lastly, Section 5 concludes.

3. METHODOLOGY

3.1. OPERATING PRINCIPLE OF SCR

Fig.1 shows the structure of SCR, which consists of the windings, cores, controlling system, and cooling system. SCR includes a working winding and two superconducting windings. The working winding is connected to electrical power system to supply reactive power compensation, whereas two superconducting windings are used as the controlled windings to adjust the output capacity of SCR. The controlling system can control the on/off conditions of superconducting windings B and C. The flux path can be changed by the on/off conditions of superconducting windings. Hence, the reactance of SCR can be adjusted.

Considering that the structure of this device is similar to that of a transformer, the equivalent circuit of SCR is shown in Fig.2. The on/off conditions of superconducting windings can be represented by switches K_1 and K_2 . X_A , X_B , and X_C represent the equivalent reactance of working winding A and two superconducting windings B and C, respectively. Based on on/off states of superconducting windings, SCR has four working modes and four capacity gears, as shown in Table I.

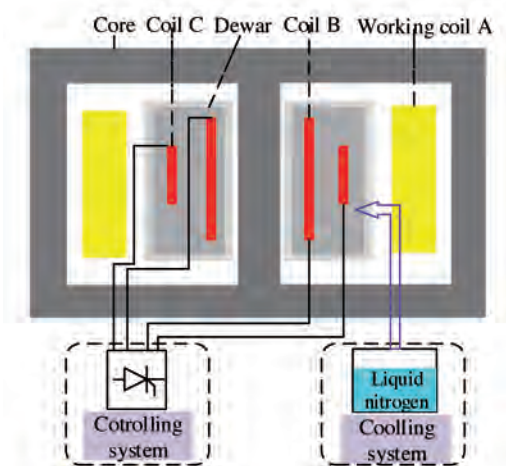


Fig. 1: Structural topology of SCR

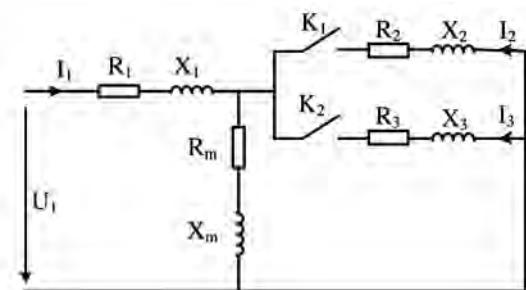


Fig. 2: Circuit principle of SCR

Capacity gear	Superconducting winding B (K_1)	Superconducting winding C (K_2)	Reactance
G1	off	off	X_{G1}
G2	off	on	X_{G2}
G3	on	off	X_{G3}
G4	on	on	X_{G4}

Table I: Working gear of SCR

For a winding with n layers [18–19], the magnetic conductance matrix of this winding is

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & & & P_{1n} \\ & E & & \\ & & \square & \\ & & & \square \\ P_{n1} & & & P_{nn} \end{bmatrix}$$

$$P_{ij} = \frac{\lambda_i}{j_j} \quad (2)$$

where $P_{ij} = P_{ji}$. P matrix can be obtained via FEA simulation for n times. λ_i is the flux linkage of coil i with current i_j .

Hence, the inductance matrix of the winding can be calculated as

$$L_{ij} = N_i N_j P_{ij} \quad (3)$$

where N_i and N_j represent the number of coil turns in layer i and j , respectively.

We assume that three windings of SCR contain n_A, n_B , and n_C layers. $A(i)$, $B(i)$, and $C(i)$ represent layer numbers of working windings A, superconducting winding B, and superconducting winding C, respectively.

The self-inductance and mutual inductance of three windings can be calculated as

$$L_A = \sum_{i=1}^{n_A} L_{A(i)A(i)} + \sum_{i=1}^{n_A} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n_A} L_{A(i)A(j)} \quad (4)$$

$$L_B = \sum_{i=1}^{n_B} L_{B(i)B(i)} + \sum_{i=1}^{n_B} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n_B} L_{B(i)B(j)} \quad (5)$$

$$L_C = \sum_{i=1}^{n_C} L_{C(i)C(i)} + \sum_{i=1}^{n_C} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n_C} L_{C(i)C(j)} \quad (6)$$

$$M_{AB} = \sum_{i=1}^{n_A} \sum_{j=1}^{n_B} L_{A(i)B(j)} \quad (7)$$

$$M_{AC} = \sum_{i=1}^{n_A} \sum_{j=1}^{n_C} L_{A(i)C(j)} \quad (8)$$

$$M_{BC} = \sum_{i=1}^{n_B} \sum_{j=1}^{n_C} L_{B(i)C(j)} \quad (9)$$

Thus, the equivalent reactance of windings can be expressed as

$$X_A = j\omega(L_A - \frac{N_A}{N_B} M_{AB} - \frac{N_A}{N_C} M_{BC} + \frac{N_A^2}{N_B N_C} M_{AC}) \quad (10)$$

$$X_B = j\omega(\frac{N_A^2}{N_B^2} L_B - \frac{N_A}{N_B} M_{AB} - \frac{N_A^2}{N_B N_C} M_{AC} + \frac{N_A}{N_C} M_{BC}) \quad (11)$$

$$X_C = j\omega(\frac{N_A^2}{N_C^2} L_C - \frac{N_A}{N_C} M_{BC} - \frac{N_A^2}{N_B N_C} M_{AC} + \frac{N_A}{N_B} M_{AB}) \quad (12)$$

The magnetic flux circuit of SCR is shown in Fig.3. The magnetic path of capacity gear G1 is shown as G1, in which the main magnetic path mainly contains iron cores. The double-line represents the magnetic circuit of capacity gear G2, which consists of iron cores and air between superconducting winding C and working winding A. The magnetic circuit of capacity gear G3 includes iron cores and air between superconducting winding B and working winding A, which is shown by a short dash line. The magnetic circuit of G1 is represented by a solid line.

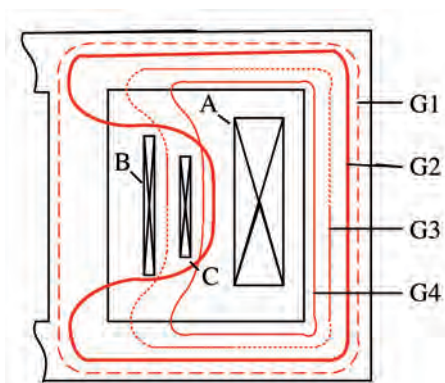


Fig. 3: Magnetic flux circuit of SCR

Hence, the reactance under different capacity gears can be expressed as

$$\begin{cases} X_{G1} = X_A + X_m \\ X_{G2} = X_A + X_B \\ X_{G3} = X_A + X_C \\ X_{G4} = X_A + X_B // X_C \end{cases} \quad (13)$$

The relationship between each reactance under different capacity gears is: $X_{G4} < X_{G3} < X_{G2} < X_{G1}$, whereas the relationship between different gear capacity is $S_{G1} < S_{G2} < S_{G3} < S_{G4}$.

3.2. TRANSIENT CHARACTERISTICS ANALYSIS OF SCR

The flux change of superconducting winding of a closed superconducting loop is shown in Fig.4. Ψ_0 is the flux through the superconducting winding. Ψ_a is the self-inductive flux produced by the current through the superconducting winding,

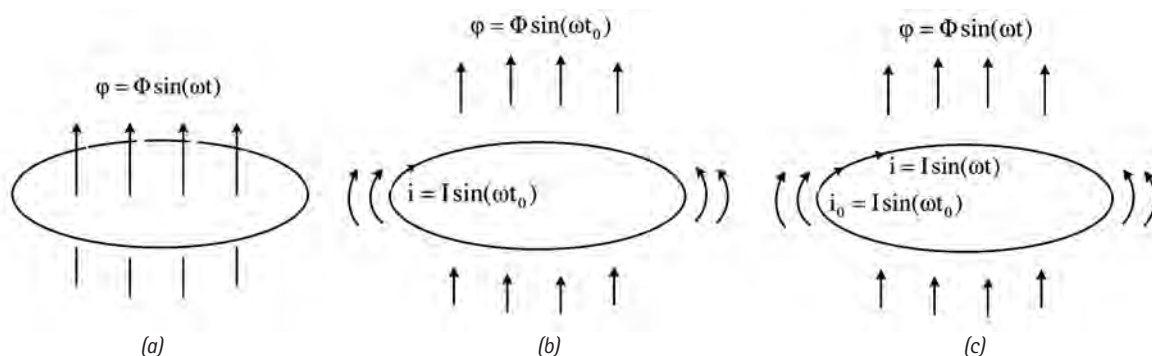


Fig. 4: Flux of a superconducting loop. (a) before closing the winding, (b) when closing the winding, (c) after closing the winding

$\psi_a = k\psi \sin(\omega\tau + \theta)$. k is the induction coefficient. i represents the current through the superconducting winding, and e is the induced electromotive force of the superconducting winding. The loop resistance $R = 0$.

Based on Faraday's law of induction

$$\sum e = e_a + e_s = -\frac{d(\Psi_a + \Psi_s)}{dt} = Ri = 0 \tag{14}$$

The total flux through the superconducting winding can be obtained

$$C = \Psi_a + \Psi_s \tag{15}$$

If the superconducting loop is closed at $t = 0$, then

$$\Psi_0 = k\psi \sin(\theta) - k\psi \sin(\omega t + \theta) \tag{16}$$

Hence, the DC flux is produced through the superconducting winding. This flux will induce the DC component in the superconducting winding.

When the superconducting winding of SCR is short-circuit, the resistance of superconducting winding $R = 0$, the current of superconducting winding is

$$i = I_{pm} \sin(\omega t + \theta - \varphi) + C \tag{17}$$

where C is DC component, I_{pm} is the peak value of the periodic component, θ is the switching angle, and φ is the impedance angle.

Given that the current of superconducting winding cannot be changed at the switching time, the DC component can be expressed as

$$C = -I_{pm} \sin(\theta - \varphi) \tag{18}$$

The DC component will not decay and will make the cores become saturated, thereby producing more losses and harmonics. In addition, the DC component may lead to superconducting quench.

If the superconducting winding is cut off, then the current in inductance L_B will flow through the capacitor C_B (winding capacitor and winding-to-ground capacitor), as shown in Fig.5.

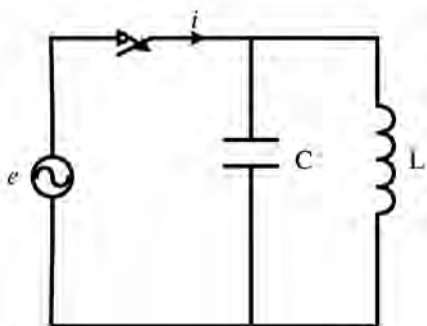


Fig. 5: The equivalent circuit on overvoltage of SCR

Given that the cut-off current of the winding is I_0 and the capacitor voltage is U_0 , the energy of the superconducting winding can be expressed as

$$W = \frac{1}{2} L_B I_0^2 + \frac{1}{2} C_B U_0^2 \tag{19}$$

When all magnetic energies are transformed into electrostatic energies, the capacitor voltage will reach the maximum value U_{Bm}

$$\frac{1}{2} C_B U_{Bm}^2 = \frac{1}{2} L_B I_0^2 + \frac{1}{2} C_B U_0^2 \tag{20}$$

$$U_{Bm} = \sqrt{I_0^2 \frac{L_B}{C_B} + U_0^2} \tag{21}$$

For superconducting winding. L_B is much larger than C_B . Hence, if the winding was not cut off at $I_0 = 0$, then the overvoltage would be huge and would easily cause the insulation damage of the superconducting winding.

3.3. OPTIMAL CONTROL STRATEGY OF SCR

To avoid producing DC component and overvoltage, the superconducting windings must be switched off/on when the currents of superconducting windings have reached zero. At this time, the flux through the superconducting windings has also reached zero.

$$\varphi = \Psi \sin(\omega t + \theta) = 0 \tag{22}$$

$$\omega t + \theta = k\pi \tag{23}$$

The voltage of working winding can be calculated as

$$e_1 = -N_1 \frac{d\varphi}{dt} = -\omega N_1 \Phi_m \cos(\omega t + \theta) \tag{24}$$

From (22) and (24), the phase difference between the flux of superconducting winding and the voltage of working winding is 90° . Hence, the superconducting windings should be switched off/on when the phase of voltage of working winding is $k\pi - 90^\circ$.

In order to achieve the requirements above, an optimal transient control strategy based on circuit breaker and anti-parallel thyristors is proposed. Before switching on the superconducting winding, the anti-parallel thyristors are turned on at 90° of voltage phase of working winding for several cycles. Then, the superconducting winding is closed by a circuit breaker. In addition, before opening the superconducting winding, the anti-parallel thyristors are also turned on at 90° for several cycles until the circuit breaker is turned off completely, the current will be transferred to the anti-parallel thyristors. When the trigger pulses of the anti-

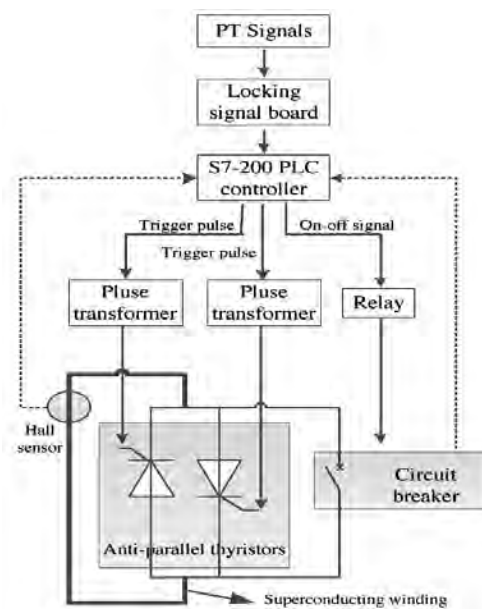


Fig. 6: Principle of control strategy of SCR

parallel thyristors are stopped, the thyristors will be turned off when the current is at zero point.

The principle of control strategy of SCR is shown in Fig.6. To ensure the reliability and stability of control system, Siemens S7-200 PLC is chosen as the controller. Firstly, the working voltage signals are acquired by the locking signal board to controller. When the capacity gear of SCR needs to be adjusted, a control signal is sent to a relay to control the circuit breaker, and pulse signals are sent to the pulse transformer to control the anti-parallel thyristors. The thyristor under a positive voltage will be turned on. In addition, when closing the superconducting windings, the anti-parallel thyristors can be turned on in the process of switching off the circuit breaker. The Hall current sensors are used to measure the currents of SCR.

4. RESULT ANALYSIS AND DISCUSSION

4.1. SIMULATION ANALYSIS OF SCR

In order to validate the principle and efficiency of methods proposed by this paper, a 380 V/30 kVar FEA model of SCR is de-

Parameter	Value
Rated voltage/V	380
Rated capacity/kVar	30
Saturation flux density/T	1.65
Cross-sectional area of core/m ²	0.0079
Height of cores /mm	455
Height of windings	410
Inner diameter of working winding	430
Turns of working winding	170
Inner diameter of superconducting winding B	156.44
Inner diameter of superconducting winding C	224.2
Turns of superconducting winding B and C	748

Table II : Parameters of SCR

signed. Various FEA simulation and optimization studies of SCR were performed in ANSYS. The capacity gears of SCR are: 0%, 80%, 90%, and 100%. Gear1 (G1: 0%) reflects no-load losses. The parameters of iron cores and windings are shown in Table II. The silicon steel sheet material of core is 30Q140, and its thickness is 0.30mm. The materials of superconducting windings are made up of Type H Sumitomo BISCCO.

The above parameters indicate that the impedance of SCR at different gears are calculated by simulation

$$X_{G1} = 207.65, X_{G2} = 6.09, X_{G3} = 5.22, X_{G4} = 4.95 \quad (25)$$

Based on the optimized method above, an optimal SCR FEA model with optimal parameters is designed. Various FEA simulations are performed to analyze the transient characteristics of SCR. The DC component of SCR is analyzed first. When the superconducting coil C is switched on at different angles of voltage phase of working winding A, the DC components are 100%, 70%, 50%, and 0%, when the superconducting winding is closed at 0°, 45°, 60°, and 90°, respectively. Hence, the results demonstrate that DC component of SCR is related to the angles of voltage phase of working winding A. To avoid the DC component, the superconducting winding should be switched on at 90°. The simulation waveforms at 0°, 45°, and 90° are shown in Fig.7.

Fig.8 shows the current and voltage of Superconducting windings when the capacity gear changes. When the superconducting winding C was switched on at 0.005s (90°), the capacity gear of SCR is changed from G1 to G2. Then at 0.025s (90°), the capacity gear of SCR is changed back to G1. This figure displays that almost no overvoltage occurs when superconducting winding is turned on and off at the voltage phase of 90°.

4.2. EXPERIMENTAL ANALYSIS OF SCR

In order to validate the principle and performance of SCR, a 380 V/30 kVar single-phase SCR laboratory prototype and control system were designed and tested, as shown in Fig.9 and Fig.10. The

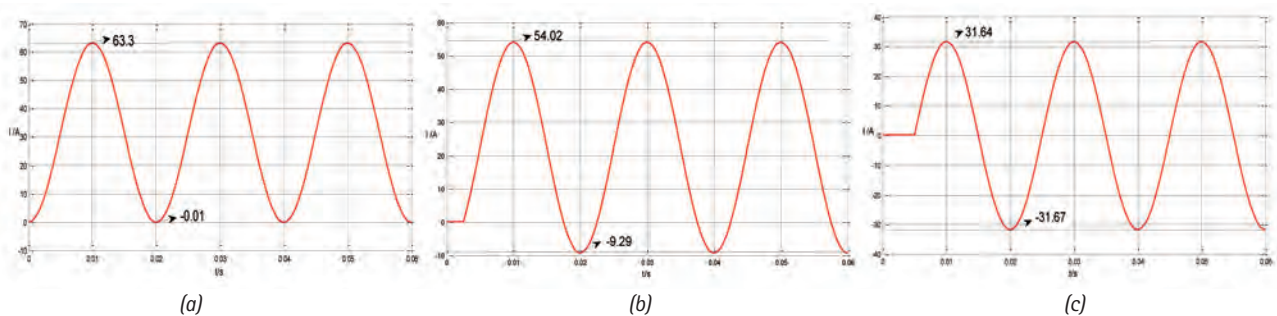


Fig. 7: DC component when superconducting winding is closed at different angles. (a) Superconducting winding is closed at 0°. (b) Superconducting winding is closed at 45°. (c) Superconducting winding is closed at 90°

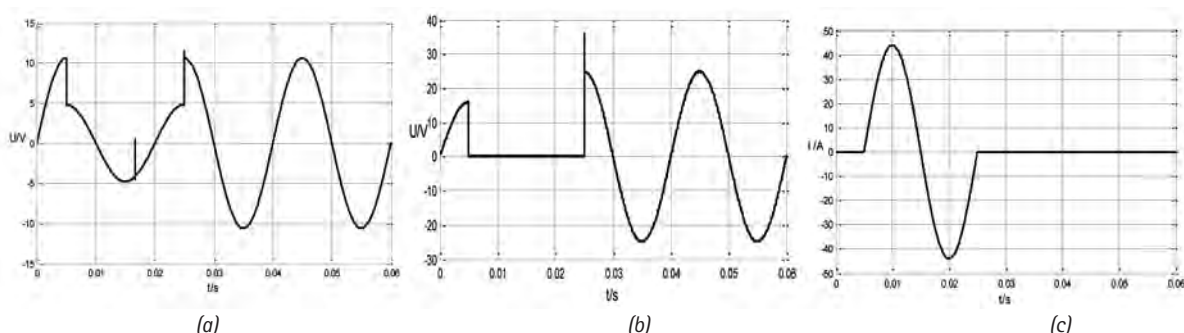


Fig. 8: Simulation results of overvoltage from G2 to G1. (a) Voltage of superconducting winding B. (b) Voltage of superconducting winding C. (c) Current of superconducting winding C

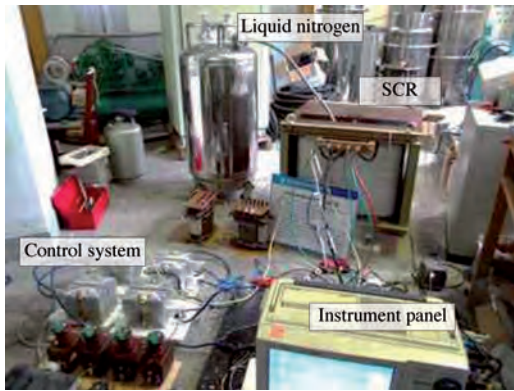


Fig. 9: Testing platform of 380V/30 kVA SCR

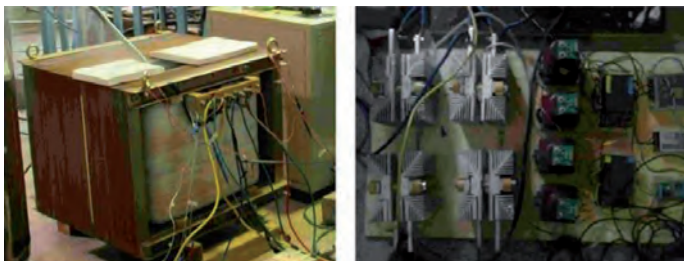


Fig. 10: Prototype and control system of 380V/30 kVA SCR. (a) Prototype of SCR. (b) Control system of SCR

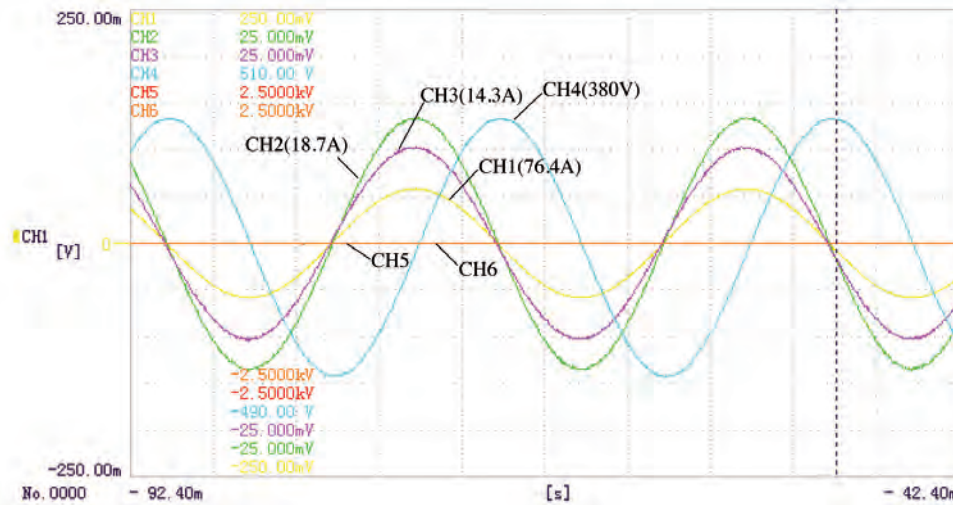


Fig. 11: Steady-state experimental results of SCR

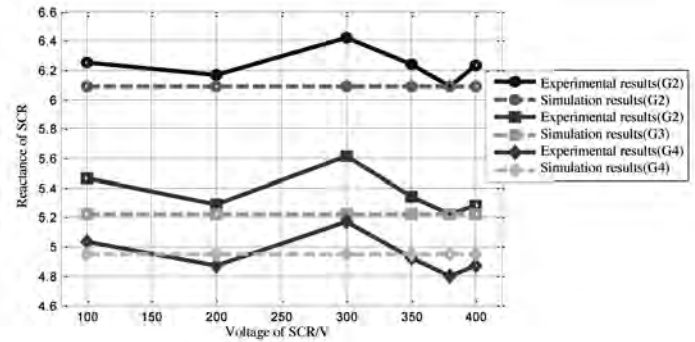


Fig. 12: Comparison of impedance calculation results between simulation and experiment

design capacity gears of SCR prototype were 0%, 80%, 90%, and 100%. Superconducting windings were immersed in a Dewar filled with liquid nitrogen that maintained the temperature at 77 K. The control system was composed of anti-parallel thyristors, isolated pulse transformers, and Siemens S7-200 controllers. In addition, the experimental platform also included a 380V AC power supply and measuring instruments.

When the superconducting windings B and C were both closed, the capacity gear is G4, the steady-state experimental results of SCR are shown in Fig.11. CH1 represents current of working winding A, CH2 represents the current of superconducting winding B,

and CH3 represents the current of superconducting winding C. Meanwhile, CH4 represents the voltage of working winding A and CH5 represents the voltage of superconducting winding B. In addition, CH6 represents the voltage of superconducting winding C. The steady-state results of SCR indicate that no harmonics and no overvoltage occurred. The SCR has a good performance on reactive power compensation.

The comparison of impedance calculation results between simulation and experiment is shown in Fig.12. The errors between experimental results and simulation results in G2, G3, and G4 are 2.2%, 2.8%, and 0.2%, respectively.

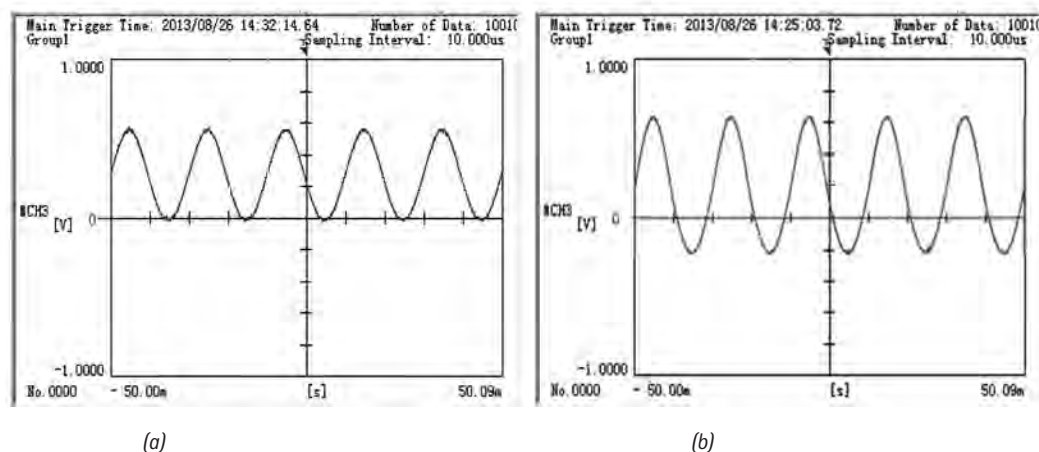


Fig. 13: Experimental results when superconducting winding is closed at different angles. (a) Superconducting winding is closed at 0°. (b) Superconducting winding is closed at 60°

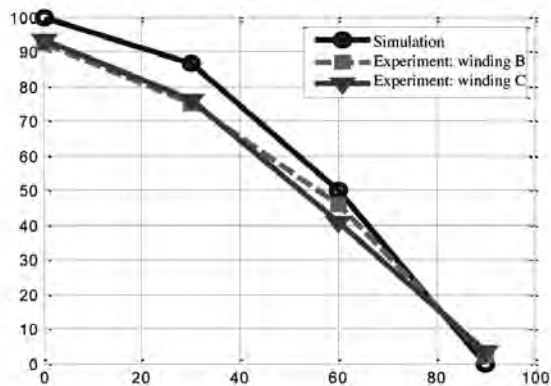


Fig. 14: DC component comparison between experiment and simulation

In order to validate the transient control characteristics and the optimal transient control strategy of SCR, the transient characteristics of SCR were tested. Fig.13 shows the current waveforms of working winding A when the superconducting winding C is closed at 0° and 60°. The DC component at the comparison of DC component of superconducting windings between experiment and simulation is shown in Fig.14.

The experimental results indicated that when the switching angle of superconducting winding changes from 0° to 90°, the DC component decreases gradually, similar to a sinusoidal wave. The largest DC component rate of superconducting windings B and C were 2.2% and 3.4% at 90°. The results between the experiment and simulation are almost identical. The small error of results is derived from the delay of the control system.

Fig.15 shows the overvoltage of superconducting windings when switching the capacity gears of SCR. The experimental results show that the overvoltage is excessively small with the optimal control system. The overvoltage times (maximum overvoltage/steady-state voltage peak) of superconducting windings in different gears are shown in Table III. The maximum overvoltage times is limited below 2.0 and has little effect on the insulation of superconducting windings. Hence, the experimental results demonstrate the effectiveness of optimal control system proposed in this paper.

4.3. DISCUSSION

When the superconducting winding is closing, the initial flux through the superconducting winding will induce the DC component. Since the resistance of superconducting winding is almost zero, the DC component will not decay. Moreover, when the

Voltage	200V		350V		400V	
	B	C	B	C	B	C
winding						
G2 to G1	2.0	1.87	1.23	1.58	1.11	1.35
G3 to G1	1.37	1.37	1.29	1.35	1.84	1.84
G4 to G1	1.84	1.90	1.46	1.49	1.83	1.92

Table III: Overvoltage times

switching angle of superconducting winding changes from 0° to 90°, the DC component will decrease gradually.

Additionally, when the superconducting winding is turning off, the magnetic energy of windings will be transferred to electrostatic field energy through the winding capacitor and winding-to-ground capacitor. Hence, the overvoltage of capacitor may be produced, when the winding is not cut off at $I_0=0$.

When the superconducting winding is controlled to switch off/on at voltage angle of 90°, the cut-off current and initial flux of superconducting winding is zero. There will be no overvoltage and DC component in the transient operation. Hence, the optimal control system is needed to avoid producing DC component and overvoltage of SCR.

According to the simulation and experimental results analysis, with the optimal control system proposed in this paper, the maximum DC component can be controlled below 3.4%, and the maximum overvoltage times is limited below 2.0 and has little effect on the insulation of superconducting windings. Therefore, it demonstrates that the optimal transient control strategy based on circuit breaker and anti-parallel thyristors can effectively reduce the DC component and overvoltage of superconducting windings. The small error of results is derived from the delay of the control system. The delay time would cause that the superconducting windings will not be switched on/off at 90°. Hence, in the design of control system, the delay time is needed to be considered. Moreover, the minor errors between the experimental and simulation results demonstrate the effectiveness of the simulation methods proposed in this paper.

5. CONCLUSION

In order to improve the performance of SCR, the transient characteristics analysis on DC component and overvoltage, and an optimal control strategy based on circuit breaker and anti-parallel thyristors were proposed. The mathematical impedance model of SCR is presented in detail, and the transient characteristics of SCR and the optimal control strategy are introduced. Via theoretical

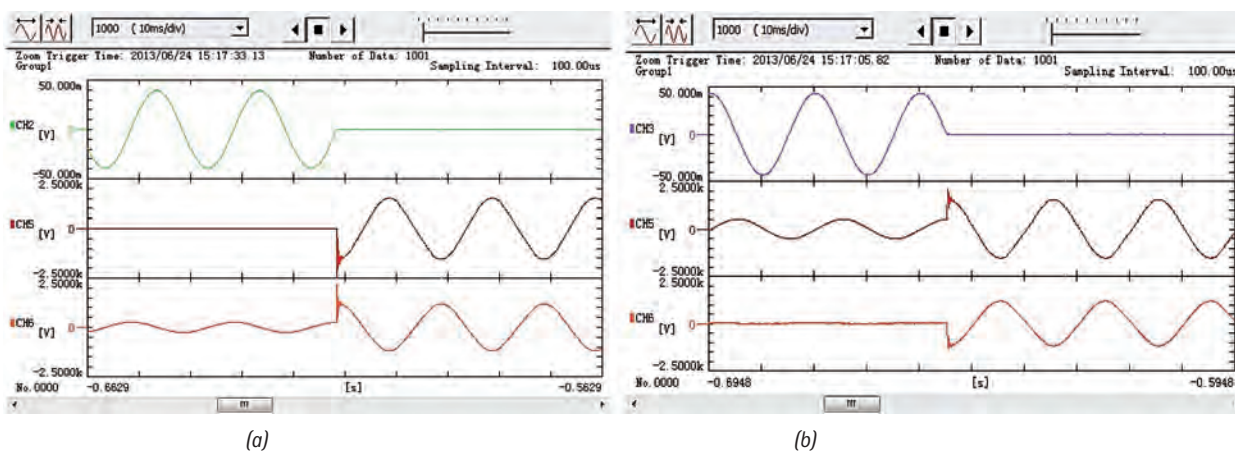


Fig. 15: Experimental results of overvoltage. (a) From G2 to G1.(b) From G3 to G1

analysis, simulation, and experiments, the following conclusions were obtained:

- (1) Based on the transient characteristics analysis of SCR, DC component and overvoltage would be produced in transient operation without optimal control strategy. The large DC component may drive the cores of SCR into saturation, resulting in producing more losses and harmonics, even leading to superconducting quench. In addition, the larger overvoltage will cause the insulation damage of the superconducting winding.
- (2) To avoid DC component and overvoltage, the superconducting windings should be switched off/on when the voltage phase of working winding is 90°.
- (3) The simulation and experimental results demonstrate that the optimal transient control strategy based on circuit breaker and anti-parallel thyristors can effectively reduce the DC component and overvoltage of superconducting windings.

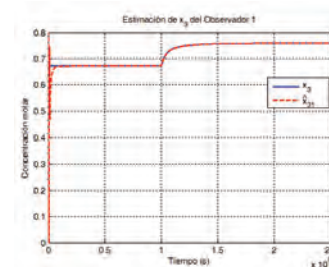
In order to satisfy the operational requirements of the power system, the performance of SCRs, the control system in higher voltage class, and the influence on the stability of power system of SCR would be analyzed in future research.

BIBLIOGRAPHY

- [1] Bai, J., Gu, W., Yuan, X., et al. "Power quality prediction, early warning, and control for points of common coupling with wind farms". *Energies*. August 2015. Vol. 8-9, p.9365-9382. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/en8099365>.
- [2] Lei W, Lam C S, Man C W. "Design of A Thyristor Controlled LC Compensator for Dynamic Reactive Power Compensation in Smart Grid". *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2016. p.1-1. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TSG.2016.2578178>.
- [3] Zhu G, Xiaowei D, Zhang C. "Optimisation of reactive power compensation of HVAC cable in off-shore wind power plant". *IET Renew Power Generation*. June 2015. Vol. 9-7, p.857-863. DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/iet-rpg.2014.0375>.
- [4] Boukadoum A, Bahi T. "Fuzzy logic controlled shunt active power filter for harmonic compensation and power quality improvement". *Journal of Engineering Science & Technology Review*. October 2014. Vol. 7-4, p.143-149.
- [5] Bohmann L J, Lasseter R H. "Stability and harmonics in thyristor controlled reactors". *IEEE Transactions on Power Delivery*. April 1990. Vol. 5-2. pp.1175-1181. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/61.53138>.
- [6] Haque S E, Malik N H. "Analysis and Performance of a Fixed Filter-Thyristor Controlled Reactor (FF-TCR) Compensator". *IEEE Transactions on Power System*. June 1987. Vol. 2-2, p.303-309. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRS.1987.4335123>.
- [7] Chen X, Chen B, Tian C. "Modeling and Harmonic Optimization of a Two-Stage Saturable Magnetically Controlled Reactor for an Arc Suppression Coil". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. July 2012. Vol. 59-7. p.2824-2831. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2011.2173090>.
- [8] Chen X, Chen J, Chen B. "Harmonic optimization for the multi-stage saturable magnetically controlled reactor using particle swarm optimization algorithm". In: *proceedings of 2014 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Hangzhou, China, 9-11 June 2014*. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICIEA.2014.6931460>.
- [9] Young M, Dimitrovski A, Li Z, et al. "Gyrator-Capacitor Approach to Modeling a Continuously Variable Series Reactor". *IEEE Transactions on Power Delivery*. January 2015. Vol. 31-3. p.1-8. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2510642>.
- [10] Rodríguez A, Bueno E J, Álvar Mayor. "Voltage support provided by STATCOM in unbalanced power systems". *Energies*. February 2014. Vol. 7-2. p.1003-1026. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/en7021003>.
- [11] Chebabhi A, Fellah M K, Kessal A, et al. "Four Leg DSTATCOM based on Synchronous Reference Frame Theory with Enhanced Phase Locked Loop for Compensating a Four Wire Distribution Network under Unbalanced PCC Voltages and Loads". *Journal of Power Technologies*. 2016.
- [12] Fujun M, An L, Qiaopo X, et al. "Derivation of zero-sequence circulating current and the compensation of delta-connected static var generators for unbalanced load". *IET Power Electronics*. March 2016. Vol. 9-3. p.576-588. DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/iet-pel.2014.0682>.
- [13] Isobe T, Shiojima D, Kato K, et al. "Full-bridge Reactive Power Compensator with Minimized Equipped Capacitor and its Application to Static Var Compensator". *IEEE Transactions on Power Electronics*. March 2015. Vol. 31-1. p.224-234. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2015.2412954>.
- [14] Zhang Y, Lehner T F, Fukushima T, et al. "Progress in Production and Performance of Second Generation (2G) HTS Wire for Practical Applications". *IEEE Transactions on Applied Superconducting*. October 2014. Vol. 24-5, p.1-5. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TASC.2014.2340458>.
- [15] Dias D H N, Sotelo G G, Dias F J M, et al. "Characterization of a Second Generation HTS Coil for Electrical Power Devices". *IEEE Transactions on Applied Superconducting*. June 2015. Vol. 25-3, p.1-4. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TASC.2014.2366237>.
- [16] Shen S, Tang Y, Ren L, et al. "Development of a Leakage Flux-Controlled Reactor". *IEEE Transactions on Applied Superconducting*. June 2014. Vol. 24-3. p.1-5. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TASC.2013.2291156>.
- [17] Wamkeue R, Elkadri N E E, Kamwa I, et al. "Finite-Element Modelling of Multiple Rotor Circuits Synchronous Machines". *International Journal of Simulation Modelling*. July 2015. Vol. 22-4. p. 239-244.
- [18] Bell S C, Bodger P S. "Inductive reactance component model for high-voltage partial-core resonant transformers". *IET Electric Power Application*, October 2008. Vol. 2-5. p.288-297. DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/iet-epa:20070452>.
- [19] Laphorn A C, Chew I, Enright W G. "HTS Transformer: Construction Details, Test Results, and Noted Failure Mechanisms". *IEEE Transactions on Power Delivery*. February 2011. Vol. 26-1. p.394-399. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2061874>.

Detección y diagnóstico de fallos en sensores de temperatura en una columna de destilación fraccionada

Fault detection and diagnosis in temperature sensors of a fractional distillation column



Eduardo-Mael Sánchez-Coronado, Luis-Gerardo Vela-Valdés, Manuel Adam-Medina, Carlos-Alberto Torres-Cantero, Gerardo-Vicente Guerrero-Ramírez

CENIDET. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Interior Internado Palmira, s/n - 62490 Cuernavaca, Morelos (México).
Tfno:+52 777 362 7770.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7990> | Recibido: 08/03/2016 • Aceptado: 22/06/2016

ABSTRACT

- This article presents the design of a fault diagnosis and isolation system on sensors for temperature measuring on a fractional distillation column to prevent unstable operation. The diagnosis and fault isolation system is based on a state estimation model using state observers. The distillation column is modeled by a nonlinear mathematical model deduced from the material and component global balance for a binary mixture (alcohol-water), the model describes the behavior of the liquid molar concentration of the more volatile component of the mixture, also it allows to establish an operating point on the system which is used as a reference for a secure, stable and linearly predictable operation. The system includes the design of a set of reduced order observers which besides operating as virtual sensors are also used to generate residues, these are used to diagnose faults in the temperature sensors. The proposed fault diagnosis and isolation system for the distillation column performs residues generation and evaluation for fault detection, diagnosis and isolation to be performed in a short period of time.
- Keywords: Distillation columns, sensor fault, models, observers, fault diagnosis.

RESUMEN

En este artículo se presenta el diseño de un sistema de detección y diagnóstico de fallos en sensores de temperatura de una columna de destilación fraccionada para evitar su operación inestable. Este sistema está basado en modelo por estimación de estado utilizando observadores de estado. La columna de destilación es modelada a través de un modelo matemático no lineal deducido a partir del balance global de materia y de componente para una mezcla binaria (alcohol-agua); el modelo describe el comportamiento de la concentración molar líquida del componente más volátil de la mezcla, además permite establecer un punto de operación en el sistema el cual se utiliza como referencia para su operación segura, estable y linealmente predecible. El sistema incluye el diseño de un conjunto de observadores de orden reducido, los cuales, además de funcionar como sensores virtuales, se emplean para generar residuos: éstos son utilizados para diagnosticar fallos en los sensores de temperatura. El sistema de detección y diagnóstico de fallos propuesto para la columna de destilación realiza una generación y evaluación de residuos reducido para que

la detección, localización y diagnóstico de fallos sean realizados en un corto periodo de tiempo.

Palabras clave: Columnas de destilación, fallo en sensor, modelos, observadores, diagnóstico de fallos.

1. INTRODUCCIÓN

A causa de las consecuencias de eventos catastróficos en la industria química por la aparición de fallos en sensores (como los ocurridos en la explosión de la unidad de isomerización de la refinería BP en Texas, Estados Unidos en 2005 [1], o la fuga de amoníaco de la unidad de licuación de CO_2 en la planta *GPN Grandpuits* en Grandpuits-Bailly-Carrois, Francia en 2009 [2], o por la explosión del reactor de formulación de Seveso en Bourgoin-Jallieu (Isère), Francia en 2011 [3]), se ha generado el interés por diseñar sistemas de diagnóstico de fallos para evitar repercusiones humanas, ambientales y económicas causadas por fallos en elementos primarios de medición de sistemas de producción químicos.

La destilación es actualmente una de las operaciones unitarias más usadas en la industria química para separar mezclas [4], el alcanzar y mantener un régimen de operación seguro y estable debe ser un requerimiento en toda columna de destilación operativa. Una forma de asegurar este régimen es a través del diseño de sistemas de diagnóstico de fallos los cuales detectan, localizan y diagnostican fallos en elementos que pueden ocasionar la operación inestable y peligrosa del sistema.

En procesos químicos existen variables cuyas magnitudes determinan la seguridad y eficiencia del proceso requiriendo que la instalación de sistemas de detección y diagnóstico de fallos en sensores sea imprescindible. En destilación la temperatura es considerada una variable crítica, a través de su medición se puede calcular la concentración molar de los componentes de la mezcla para verificar su correcta separación. Suele medirse indirectamente la concentración molar puesto que los analizadores de composición molar presentan retardos de medición, requirieren alto grado de mantenimiento y son de elevado costo económico en adquisición e instalación [5].

El interés investigativo y aplicativo de sistemas de diagnóstico de fallos se puede evidenciar con diversos trabajos, por ejemplo, en [6] se pueden encontrar conceptos, definiciones, métodos y usos de sistemas de diagnóstico de fallos. De igual manera, en [7] se encuentra una recopilación y clasificación de técnicas de diagnóstico de fallos, igualmente, los resultados presentados en algunos

trabajos recientes ([8, 9]) confirman las ventajas de su utilización para la operación de plantas químicas.

Ahora bien, la situación tecnológica actual en sistemas de detección y diagnóstico de fallos está en su utilización para el diseño de diferentes sistemas del área de control, por ejemplo en [10] se utilizan conceptos de control robusto para el diagnóstico de fallos en sistemas LPV, en cuanto a control tolerante a fallos, en [11] se diseña un esquema de control tolerante a fallos pasivo en sensores de una pila de combustible bajo representación lineal por tramos; así mismo en la detección de fallos en actuadores de columnas para diseño de sistemas de control tolerantes a fallos activos [12].

Las técnicas de detección y diagnóstico de fallos basadas en modelos cuantitativos utilizan residuos como indicadores de fallos los cuales pueden ser generados por distintos métodos. Los residuos señalan la presencia de fallos a través de discrepancias entre el valor de la salida experimental del sistema y la salida estimada por un modelo matemático [13].

Los observadores usados como técnica de generación de residuos permiten detectar y diagnosticar fallos, así mismo estiman aquellas variables que no pueden ser medidas por inexistencia, ausencia o incapacidad (por avería) de los sensores. Igualmente presentan la ventaja sobre los sensores físicos que no necesitan calibración ni mantenimiento pudiendo operar indefinidamente, no obstante para su buen desempeño tienen la limitación no mejorable de requerir las salidas libres de fallos (y de entrada) provistas por los sensores; además de contar con un modelo matemático validado experimentalmente del sistema.

El objetivo principal de este artículo es mostrar el diseño y los resultados de un sistema de detección y diagnóstico de fallos en sensores de temperatura de una columna de destilación basado en modelo usando observadores; para ello se desarrollan técnicas de generación y evaluación de residuos para diagnóstico de fallos. Se pretende evitar la operación inestable del sistema provocado por una temperatura anormal no detectada, las consecuencias pueden ir desde desviaciones del producto destilado hasta eventos catastróficos provocados por choques térmicos.

El trabajo está estructurado de la siguiente manera: en la sección 2 se describe el proceso de destilación así como su modelado y la obtención del modelo matemático del sistema, en la sección 3 se describe el diseño del sistema de detección y diagnóstico de fallos además del diseño de los observadores, la sección 4 presenta

los resultados obtenidos, finalmente las conclusiones alcanzadas aparecen en la sección 5.

2. COLUMNA DE DESTILACIÓN

2.1. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

Una columna binaria de destilación fraccionada posee n platos etiquetados por números ordenados progresivamente desde el domo (plato superior) hacia la base (plato inferior), además tiene un hervidor para proveer el calor a la mezcla y un condensador para enfriar los vapores que llegan al domo para producir el flujo del destilado, cabe señalar que estos dos elementos se consideran también como platos. El esquema del sistema utilizado es presentado a continuación por la Figura (1).

Las variables mostradas por la Figura (1) se describen a continuación en la Tabla (I).

Variable	Descripción	Unidad
L, V	Flujo molar líquido y de vapor en la sección de rectificación y agotamiento respectivamente	(mol/s)
F	Flujo molar de alimentación líquido	(mol/s)
D, B	Flujo de producto destilado y fondo respectivamente	(mol/s)
x_i, y_i	Fracción molar líquida y de vapor del plato i del componente más volátil de la mezcla respectivamente	a-dimensional
x_D, x_B	Fracción molar del flujo del producto de destilado y de fondo respectivamente	a-dimensional
z_F	Concentración molar del flujo de alimentación líquido	a-dimensional
M_D	Masa molar retenida del condensador	mol
M_i	Masa molar retenida del plato i	mol
M_B	Masa molar retenida del hervidor	mol

Tabla I: Variables del proceso de destilación

Cuando se calienta la mezcla se produce el flujo molar de vapor (V) el cual asciende atravesando los platos perforados hasta alcanzar el condensador, lo anterior provoca que cada plato tenga una concentración molar diferente del componente más volátil. Una parte del flujo molar líquido del condensador (L) retorna a la columna como reflujo. Cuando el reflujo desciende por gravedad atravesando los platos provoca el aumento en la concentración molar líquida del componente menos volátil. Al plato de alimentación molar líquida se etiqueta como f y es el que divide las dos secciones de la columna.

2.2. MODELO MATEMÁTICO DE COLUMNAS BINARIAS DE DESTILACIÓN

El modelo matemático del sistema está compuesto por ecuaciones diferenciales formuladas por el balance global de materia y componente de cada plato [14], el balance se realiza considerando cuatro secciones de la columna compuestas por algunos platos, dichas secciones son: el condensador, un plato perforado genérico de cualquier sección de la columna (rectificación o agotamiento), el plato de alimentación molar líquida y el hervidor.

En la columna se realizan las siguientes suposiciones para obtener el modelo matemático: el condensador es total, el hervidor es un plato teórico, la columna es adiabática, la volatilidad relati-

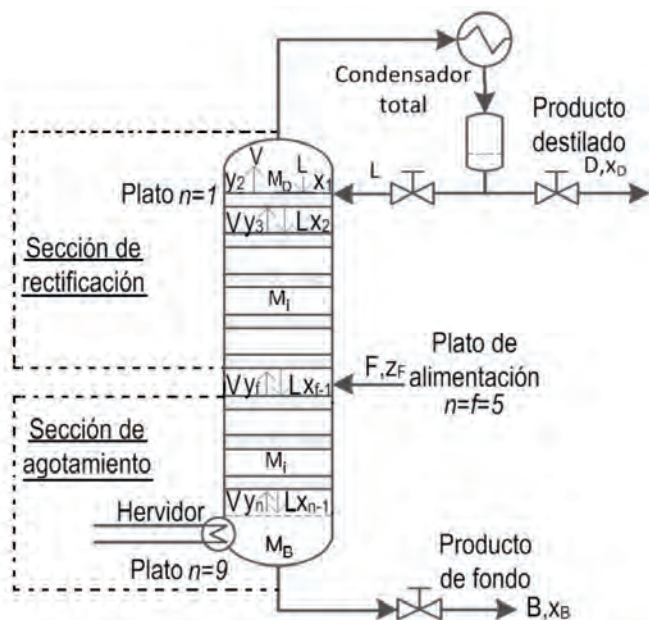


Fig. 1: Esquema de la columna de destilación fraccionada

va es diferente en cada plato puesto que la mezcla es no ideal, las fases en cada plato están en equilibrio termodinámico, la retención molar de los platos es constante, el proceso es isobárico y hay control de nivel perfecto en los acumuladores de los productos de destilado y fondo.

El resultado del balance global de materia y componente para una mezcla binaria en las cuatro secciones de la columna que establece el modelo matemático el cual calcula la concentración molar líquida del componente más volátil es [12]:

$$\begin{aligned}
 &\text{Condensador:} \\
 &\frac{d(M_1 x_1)}{dt} = V(y_2 - x_1) \\
 &\text{Plato genérico localizado en la sección de rectificación:} \\
 &\frac{d(M_i x_i)}{dt} = V(y_{i+1} - y_i) + L(x_{i-1} - x_i), \text{ con: } i = 2, 3, \dots, f-1 \\
 &\text{Plato de alimentación molar líquida:} \\
 &\frac{d(M_f x_f)}{dt} = (Vy_{f+1} - Vy_f) + L(x_{f-1} - x_f) + F(z_f - x_f) \\
 &\text{Plato genérico localizado en la sección de agotamiento:} \\
 &\frac{d(M_i x_i)}{dt} = V(y_{i+1} - y_i) + (F + L)(x_{i-1} - x_i), \text{ con: } f+1, \dots, n-1 \\
 &\text{Hervidor:} \\
 &\frac{d(M_n x_n)}{dt} = V(x_n - y_n) + (F + L)(x_{n-1} - x_n) - Bx_B
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Una forma de calcular la fracción molar de vapor del alcohol es definiendo la volatilidad relativa para cada plato de acuerdo al equilibrio termodinámico líquido-vapor, ésta se define por la ecuación (2) como:

$$\alpha = \frac{y_U / x_U}{y_S / x_S} = \frac{y/(1-y)}{x/(1-x)} \Rightarrow y_i = \frac{\alpha_i x_i}{1 + (\alpha_i - 1)x_i}
 \tag{2}$$

en donde U y S indican al componente más y menos volátil de la mezcla respectivamente. Así mismo, cuando la concentración molar líquida alcanza el estado estacionario (sin variaciones de temperatura significativas) se puede obtener la fracción molar de vapor del alcohol a través de la volatilidad relativa. La concentración molar líquida puede ser medida indirectamente por sensores de temperatura, su magnitud depende de la relación temperatura-composición establecida por las propiedades termodinámicas de la mezcla.

2.3. MODELO MATEMÁTICO DEL CASO DE ESTUDIO

El objeto de estudio abordado para el diseño del sistema de detección y diagnóstico de fallos en sensores es una columna de destilación binaria de 9 platos, su representación a través del modelo matemático deducido a partir del balance global de materia y componente establecido en la ecuación (1) considerando que: $x(t) \in U \in \mathfrak{R}^n$ es el vector de estado que representa la concentración molar líquida del etanol, con 2 flujos molares de entrada $u(t) = [L \ V]^T$, 2 variables exógenas consideradas como perturbaciones de entrada $w(t) = [F \ z_f]^T$ y 2 salidas $h(x(t)) = [x_2 \ x_9]^T$ correspondientes a la concentración molar líquida del alcohol en la mezcla binaria en los platos 2 y 9 respectivamente puede ser descrita por el sistema no lineal de la ecuación (3) como:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^2 g_i(x(t))u_i(t) + \sum_{j=1}^2 d_j(x(t))w_j(t) \\
 y(t) &= h(x(t)) = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_9 \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

y de forma explícita como:

$$\begin{aligned}
 g_1(x(t)) &= \begin{bmatrix} 0 \\ (x_1 - x_2) \\ \vdots \\ (x_{f-1} - x_f) \\ \vdots \\ (x_{f-1} - x_f) \\ \vdots \\ (x_{n-1} - x_n) \end{bmatrix}, g_2(x(t)) = \begin{bmatrix} (y_2 - x_1) \\ (y_3 - y_2) \\ \vdots \\ (y_{f+1} - y_f) \\ \vdots \\ (y_{f+1} - y_f) \\ \vdots \\ (y_n - y_{n-1}) \end{bmatrix}, d_1(x(t)) = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ -x_f \\ (x_f - x_{f+1}) \\ \vdots \\ (x_{n-1} - x_n) \\ (x_{n-1} - x_n) \end{bmatrix}, d_2(x(t)) = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \\
 u(t) &= \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L/M_n \\ V/M_n \end{bmatrix}, w(t) = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F/M_n \\ Fz_f/M_n \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

estableciéndose la ecuación (5) como:

$$y_n = \frac{\alpha_i x_i}{1 + (\alpha_i - 1)x_i}
 \tag{5}$$

La manera en que se ha deducido la ecuación (4) a partir de la ecuación (1) es a través de la agrupación de las variables: x_i en $g_i(x(t))$ y $d_i(x(t))$, y_i en $g_2(x(t))$, M_n , L y V en $u(t)$ y M_n , F y z_f en $w(t)$ siendo que de la cantidad de platos del sistema es la extensión del modelo matemático.

Obtención del modelo matemático lineal del caso de estudio

Cuando el sistema definido por la ecuación (3) alcanza el estado estable con ciertos valores de $u(t)$, $w(t)$ y $x_i(t)$ se establece un punto de referencia o punto de operación.

Para obtener la respuesta dinámica lineal del sistema alrededor de un punto de operación a partir del modelo matemático no lineal se usa el método de linealización por expansión en series de Taylor (método Jacobiano), en dicho espacio de estados son utilizados los valores del estado estable estableciéndose por las variables: u_{ss} , w_{ss} y x_{ss} . De esta manera la representación lineal del sistema mostrada por la ecuación (6) es:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Ew(t) \\
 y(t) &= Cx(t)
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

en donde $x(t) \in \mathfrak{R}^n$ es el vector de estado con n igual al número de platos del sistema, $u(t) \in \mathfrak{R}^m$ es el vector de entrada, $w(t) \in \mathfrak{R}^d$ es el vector de entradas exógenas y $y(t) \in \mathfrak{R}^p$ el vector de salida que en este caso es la concentración molar líquida del alcohol en los platos 2 y 9 (x_2) y 9 (x_9). Las matrices de la columna cuyas dimensiones son: $A \in \mathfrak{R}^{n \times n}$, $B \in \mathfrak{R}^{n \times m}$ y $E \in \mathfrak{R}^{n \times d}$ fueron obtenidas por el método Jacobiano utilizando una formulación detallada en el material suplementario, los valores numéricos de las matrices mencionadas anteriormente son:

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{bmatrix} -\frac{V}{M_1} & \frac{V}{M_1}K_{12} & 0 & \dots & 0 \\ \frac{L}{M_1} & -\frac{L}{M_1} - \left(\frac{V}{M_1}\right)K_{11} & \left(\frac{V}{M_1}\right)K_{12} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & -\frac{L}{M_f} - \left(\frac{V}{M_f}\right)K_{f-1} - \frac{F}{M_f} & \left(\frac{V}{M_f}\right)K_{f+1} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \frac{L+F}{M_i} & -\frac{L}{M_i} - \left(\frac{V}{M_i}\right)K_i - \frac{F}{M_i} & \left(\frac{V}{M_i}\right)K_{i+1} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & -\frac{L+F+VK_n-V}{M_n} \end{bmatrix} \\
 B &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{(x_1 - x_2)}{M_1} & \frac{(y_1 - y_2)}{M_1} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{(x_{f-1} - x_f)}{M_{f-1}} & \frac{(y_{f-1} - y_f)}{M_{f-1}} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{(x_{n-1} - x_n)}{M_n} & \frac{x_n - y_n}{M_n} \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ \frac{(z_f - x_f)}{M_f} & \frac{F}{M_f} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{(x_f - x_f)}{M_f} & 0 \\ \vdots & \vdots \\ \frac{(x_{n-1} - x_n)}{M_n} & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

y recordando que $y_i = \alpha_i x_i / I + (\alpha_i - 1)x_i$ se obtiene la ecuación (8) con:

$$K_i = \frac{\alpha_i}{[1 + (\alpha_i - 1)x_i]} \quad (8)$$

3. DIAGNÓSTICO DE FALLOS BASADO EN OBSERVADORES DE ESTADO

El sistema de diagnóstico a diseñarse debe detectar, localizar y diagnosticar fallos en sensores de temperatura usados como medidores de concentración molar líquida del alcohol, para realizar dichas tareas es necesario utilizar un diseño de diagnóstico de fallos basado en un esquema por banco de observadores.

3.1. ESQUEMA DE OBSERVADOR DEDICADO PARA DIAGNÓSTICO DE FALLOS

En esencia un observador en un algoritmo que estima las variables de estado a partir de las mediciones de entrada y salida incluyendo en su diseño el modelo matemático del sistema, además un observador reduce asintóticamente a cero la diferencia entre el valor de la salida experimental y la salida estimada, esto se logra a través de un término de corrección llamado ganancia del observador (H) que hace converger las variables estimadas hacia las señales experimentales. Una forma de seleccionar la ganancia del observador es por colocación de polos [15].

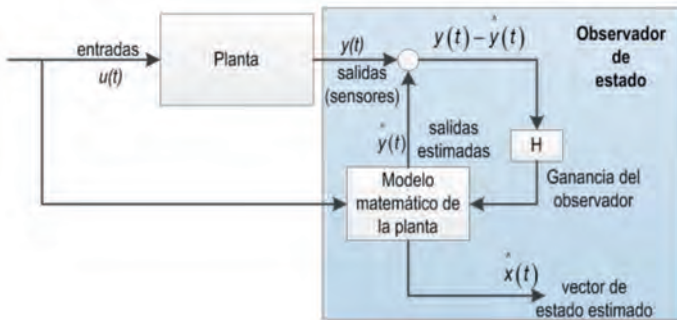


Fig. 2: Representación por bloques de un observador

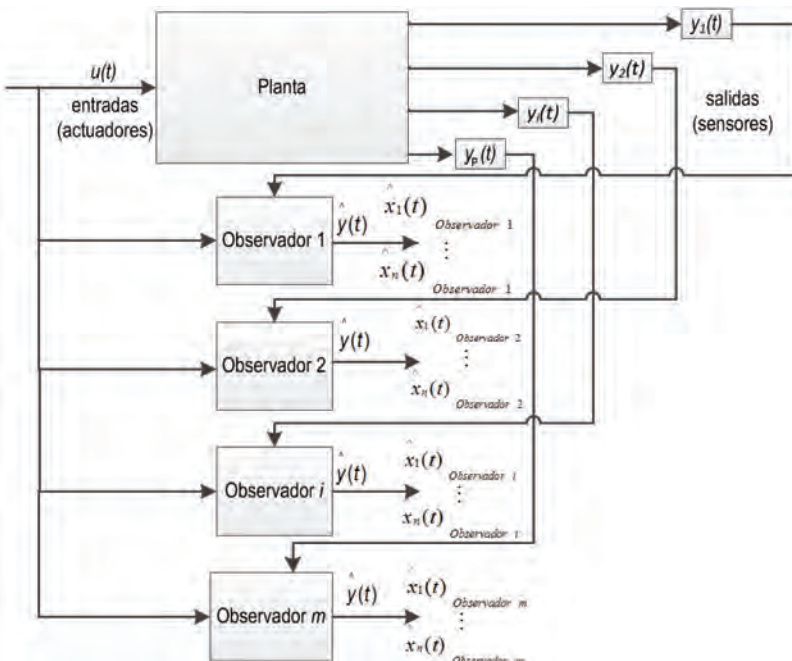


Fig. 3: Esquema DOS

Cuando el observador estima todas las variables de estado se conoce como observador de orden completo, contrariamente si estima solo algunas variables se le denomina de orden reducido [16]. La representación por bloques de un observador se presenta a continuación en la Figura (2).

La Figura (2) muestra que el observador requiere que la salida del sistema medida por los sensores esté libre de fallos para estimar las variables de estado, esto es una limitación del uso de un solo observador. Una alternativa que resuelve dicha limitación, y que además se puede utilizar para detectar, localizar y diagnosticar fallos, es un esquema por banco de observadores conocido como: esquema de observador dedicado o DOS (*Dedicated Observer Scheme*, por sus siglas en inglés) [17].

El esquema DOS utiliza todas las entradas y salidas del sistema, sin embargo se diseña un observador para cada salida y se estima todo el vector de salida, entonces hay m observadores asociados al número p de sensores. Cabe destacar que cualquier observador del banco puede ser usado como sensor virtual siempre y cuando la señal de salida de la que dependa esté libre de fallos. A continuación en la Figura (3) se muestra gráficamente el esquema DOS.

Para que el sistema detecte y diagnostique fallos es necesario realizar algunas comparaciones para identificar diferencias entre el valor de las variables estimadas de cada observador con algún otro elemento de referencia. El elemento de referencia puede ser un observador del esquema o un sensor libre de fallos.

Cuando ocurre una inadecuada medición de la salida por fallo en un sensor el observador relacionado a esa salida no puede realizar la estimación correctamente. Una ventaja del esquema DOS es que relaciona un fallo a un conjunto de discrepancias generadas en forma de señales utilizándolas como indicadores de fallo; de la cantidad, combinación o propiedades de dichas señales se pueden atribuir fallos específicos en los sensores. Las señales de discrepancia se denominan "residuos" definiéndolos por la ecuación (9) como:

$$r_{ij}(t) = x_i - \hat{x}_{ij} \quad (9)$$

en donde i y j indican el número de la variable y el número del observador del esquema DOS del que proviene la señal estimada respectivamente, además cuando no hay fallo el valor del residuo es aproximadamente 0. En este trabajo el cálculo de los residuos se realiza de manera puntual.

Las etapas posteriores a la detección son la localización y el diagnóstico, para ejecutarlas es necesario evaluar los residuos para determinar si dar o no aviso al operador de la presencia de fallos.

Para evaluar los residuos se utilizan umbrales para generar firmas de fallos (síntomas) que dependiendo de su valor y combinación se pueden localizar, diferenciar y descartar fallos. Los síntomas son señales que toman valores binarios dependiendo si el valor del residuo relacionado a él se encuentra o no dentro del valor del umbral. Los valores de los umbrales se establecen para descartar eventos que no sean fallos como malas calibraciones o ruidos de medición.

Los síntomas son evaluados por la relación:

$$s_{ij}(t) = \begin{cases} 1, & |r_{ij}| > \lambda, \forall t \geq 0 \\ 0, & \text{en otro caso} - \forall t \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

en donde $S_{ij}(t)$ es el síntoma relacionado al residuo r_{ij} y λ es el valor del umbral. Una vez obtenidas las fir-

mas de fallos se establece la matriz de fallos, a través de ella se determina la capacidad de detección, localización y diagnóstico de fallos del sistema.

Esquema DOS de la columna de destilación para diagnóstico de fallos

La columna bajo estudio tiene 6 sensores de temperatura localizados en los platos 1, 2, 3, 5, 8 y 9 etiquetados del 1 al 6 respectivamente. Los sensores son RTD's (*Resistance Temperature Detector*, por sus siglas en inglés) de platino "Pt-100" de sensibilidad $+0.4\Omega/^{\circ}K$ a 100Ω y una precisión clase A: $\pm 273^{\circ}K / 0.06\Omega$. Puesto que el plato f se localiza en medio de la columna causando que el número de platos sea igual en ambas secciones; ante ello y bajo la teoría de diseño de columnas se considera entonces la buena sensibilidad de los RTD's siendo de poca repercusión la localización de los mismos [18].

De los 6 sensores el número 2 se encuentra libre de fallos al tener redundancia material, esto se logra usando sensores repetidos para medir x_2 por lo que entonces es tomado como un sensor de referencia. En la Figura siguiente (4) se muestra la redundancia material del sensor 2.

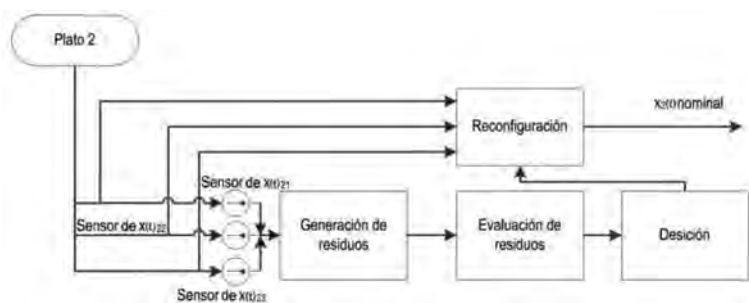


Fig. 4: Redundancia material del sensor 2

Los subíndices i y k de las variables $x(t)_{ik}$ de la Figura (4) indican el número de la variable de estado medida y el número del sensor redundante etiquetado respectivamente.

En la investigación se diseñan 5 observadores para formar el banco de observadores del esquema DOS, éstos estiman la concentración molar del alcohol a través de las entradas del sistema y de la medición de temperatura en los platos del sistema.

Se propone que los observadores sean de orden reducido al descartar la estimación de las variables de salida de las que dependen puesto que los sensores pueden presentar fallo, con ello se evita realizar cálculos innecesarios de estimación. Así mismo el sensor 2 tampoco requiere de observador porque se encuentra libre de fallos al contar con redundancia material, ver Figura (4), esto reduce aún más el número de residuos y síntomas a evaluar

Observador	Entradas usadas	Salidas utilizadas	Variables estimadas
Observador 1	L, V, F y Z _F	x ₁ y x ₂	$\hat{x}_{31}, \hat{x}_{41}, \hat{x}_{51}, \hat{x}_{61}, \hat{x}_{71}, \hat{x}_{81}$ y \hat{x}_{91}
Observador 2	L, V, F y Z _F	x ₃ y x ₂	$\hat{x}_{12}, \hat{x}_{42}, \hat{x}_{52}, \hat{x}_{62}, \hat{x}_{72}, \hat{x}_{82}$ y \hat{x}_{92}
Observador 3	L, V, F y Z _F	x ₅ y x ₂	$\hat{x}_{13}, \hat{x}_{33}, \hat{x}_{43}, \hat{x}_{63}, \hat{x}_{73}, \hat{x}_{83}$ y \hat{x}_{93}
Observador 4	L, V, F y Z _F	x ₈ y x ₂	$\hat{x}_{14}, \hat{x}_{34}, \hat{x}_{44}, \hat{x}_{54}, \hat{x}_{64}, \hat{x}_{74}$ y \hat{x}_{94}
Observador 5	L, V, F y Z _F	x ₉ y x ₂	$\hat{x}_{15}, \hat{x}_{35}, \hat{x}_{45}, \hat{x}_{55}, \hat{x}_{65}, \hat{x}_{75}$ y \hat{x}_{85}

Tabla II: Variables de los observadores de orden reducido

que consecuentemente la evaluación y decisión del sistema requieren de menor tiempo para ejecutarse.

En la Tabla II se presentan las propiedades de los observadores relacionados a los RTD's que pueden presentar fallos (1, 3, 5, 8 y 9).

Los subíndices i y j de las variables estimadas \hat{x}_{ij} de la Tabla anterior indican el número de la variable y el número del observador del que proviene la estimación respectivamente, por ejemplo la variable \hat{x}_{31} es la estimación de la concentración molar líquida del plato 3 proveniente del Observador 1.

3.2. DISEÑO DE LOS OBSERVADORES DE ORDEN REDUCIDO

A continuación se presenta el diseño resumido de los observadores de estado pertenecientes al esquema DOS los cuales estiman la concentración molar del componente más volátil de la mezcla, para mayor detalle del procedimiento de diseño y obtención de los mismos puede ser consultado el material suplementario.

Considere que el sistema lineal de la ecuación (6) representa la columna bajo estudio alrededor de un punto de operación. Si el sistema tiene p salidas medibles, entonces los m observadores de orden reducido requieren estimar únicamente las $n - p$ salidas considerándose no necesario estimar las salidas de las cuales dependen, ni tampoco aquellas salidas en donde el sensor tenga redundancia material. Consecuentemente el sistema puede ser dividido a través del vector de estado $x(t)$ en $x_a(t) \in \mathbb{R}^p$ y $x_b(t) \in \mathbb{R}^{(n-p)}$ representando a las variables que no se necesitan estimar y aquellas que el observador requiere estimar respectivamente, quedando según las Ecuaciones (11) y (12) como:

$$\dot{x}_a(t) = A_{aa}x_a(t) + A_{ab}x_b(t) + B_a u(t) + E_a w(t) \quad (11)$$

$$\dot{x}_b(t) = A_{ba}x_a(t) + A_{bb}x_b(t) + B_b u(t) + E_b w(t) \quad (12)$$

con: $A_{aa} \in \mathbb{R}^{p \times p}$, $A_{ab} \in \mathbb{R}^{p \times (n-p)}$, $A_{ba} \in \mathbb{R}^{(n-p) \times p}$, $A_{bb} \in \mathbb{R}^{(n-p) \times (n-p)}$, $B_a \in \mathbb{R}^{p \times p}$, $B_b \in \mathbb{R}^{(n-p) \times p}$, $E_a \in \mathbb{R}^{p \times p}$, y $E_b \in \mathbb{R}^{(n-p) \times p}$, de tal manera que el observador debe ser de orden $o = n - p$.

Ahora bien, la Ecuación (12) representa la dinámica de la parte no medible, por lo tanto se obtiene un sistema dinámico no medible con su salida formado por las Ecuaciones (11) y (12) quedando según la Ecuación (13) como:

$$\begin{aligned} \dot{x}_b(t) &= A_{ba}x_a(t) + A_{bb}x_b(t) + B_b u(t) + E_b w(t) \\ y(t) &= A_{ba}x_b(t) \end{aligned} \quad (13)$$

Siendo así, un observador para el sistema de la ecuación (13) queda definido por la ecuación (14) como:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_b(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + Ew(t) + H(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t) \end{aligned} \quad (14)$$

en donde reemplazando los términos de la Ecuación (13) en la Ecuación (14) se establece el observador propuesto en la presente investigación por la Ecuación (15) la cual lo define como:

$$\dot{\hat{x}}_b(t) = (A_{bb} - HA_{ba})\hat{x}_b(t) + [(A_{ba} - HA_{ba})H + (A_{ba} - HA_{ba})]y(t) + (B_b - HB_b)u(t) + (E_b - HE_b)w(t) \quad (15)$$

en donde definiendo el error de observación por la Ecuación (16) estableciéndose como:

$$e(t) = x_b(t) - (\hat{x}_b(t) + Hy(t)) \quad (16)$$

y que por desarrollo algebraico queda definido por la Ecuación (17) como:

$$\dot{e}(t) = (A_{bb} - HA_{ab})e(t) \quad (17)$$

con la posibilidad de seleccionar los autovalores del término $(A_{bb} - HA_{ab})e(t)$ de la ecuación (17) para que el error converja a cero asintóticamente [19].

4. RESULTADOS

El presente trabajo aborda la destilación de la mezcla binaria etanol-agua a través de una columna de 9 platos para realizar el diagnóstico de fallos en sensores de temperatura, los RTD's se utilizan para medir la concentración molar del alcohol.

El comportamiento dinámico del sistema se obtiene a partir del modelo matemático de la ecuación (3). En la Tabla (III) se muestran los parámetros del sistema.

Para verificar el comportamiento dinámico del sistema se asignan los valores de entrada: $u=[0.4602 \ 1.3259]^T$ y $w=[1.4815 \ 0.5]^T$; las condiciones iniciales de los estados son: $x_i(0)=0$ con $\{i=1, 2, \dots, 9\}$. A continuación en la Figura (5) se presenta la respuesta dinámica de la concentración molar líquida del alcohol.

La Figura 5 presenta la dinámica de la concentración molar de etanol cuyo valor es mayor en los platos superiores puesto que el

flujo de vapor se enriquece progresivamente. El tiempo requerido del sistema para evaporar parcialmente la mezcla para alcanzar el estado estable está determinado por la masa molar del hervidor que en este caso es:

$$M_B = 20 \times 10^3 \text{ mol.}$$

Además se aprecia en la Figura (5) que en $t=1.5 \times 10^5$ s se alcanza el estado estable cuyos valores son: $u_{ss}=[0.4602 \ 1.3259]^T$, $w_{ss}=[1.815 \ 10.5]^T$, $y_{x_{ss}}=[0.908 \ 0.768 \ 0.672 \ 0.578 \ 0.514 \ 0.5 \ 0.458 \ 0.331 \ 0.127]^T$. Los valores de u_{ss} , w_{ss} y $y_{x_{ss}}$ descriptos se utilizan como el punto de operación del sistema para obtener su respuesta lineal.

Por la relación composición-temperatura de la mezcla las temperaturas correspondientes a la composición de los platos 1 al 9 (x_i) son: 346.24° K, 347.08° K, 347.63° K, 348.26° K, 348.75° K, 348.85° K, 349.19° K, 350.26° K, y 354.12° K. Las temperaturas son obtenidas del diagrama Temperatura/Composición el cual determina que el punto azeotrópico es: $x=y=0.911$ a 347.19° K. El diagrama se puede consultar en el material suplementario.

Igualmente, en la misma Figura (5) se presenta la respuesta dinámica lineal del sistema establecida por las matrices de la Ecuación (7) utilizando el punto de operación obtenido, se aprecia que la representación lineal es capaz de representar al sistema no lineal alrededor del punto de operación y es utilizable para diseñar los observadores establecidos por la Ecuación (15).

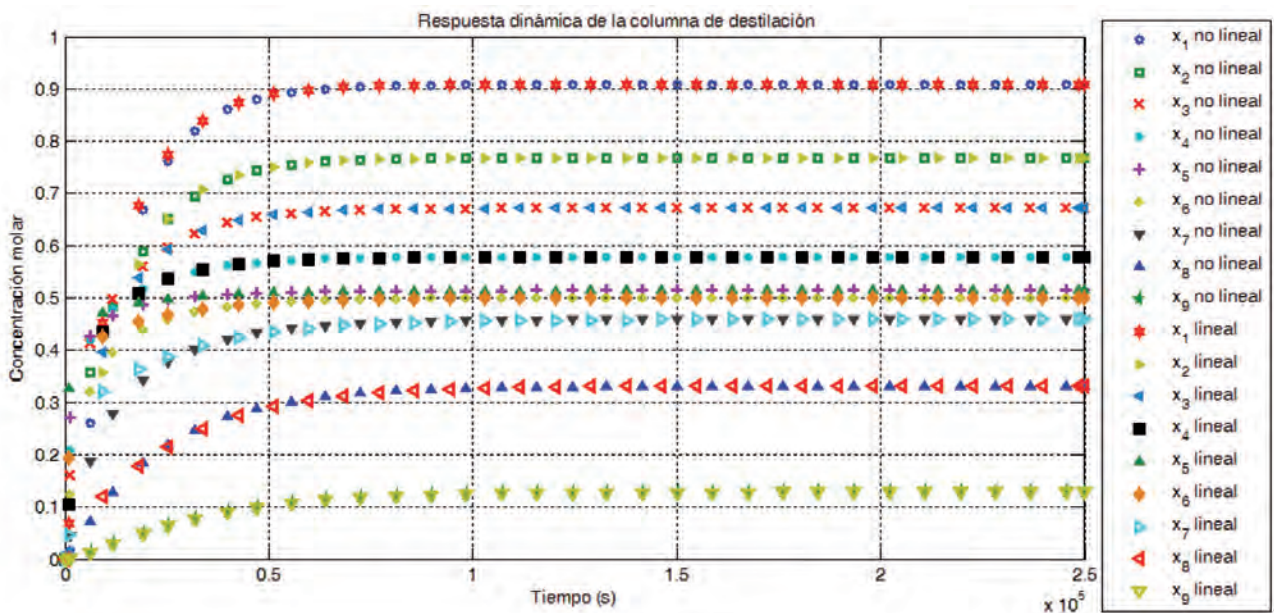


Fig. 5: Comportamiento dinámico de la concentración molar líquida del etanol

Variable	Descripción
$n=9$	Número de platos
$f=5$	Número del plato de alimentación molar líquida
$M_D=10 \times 10^3 \text{ mol}$	Masa molar retenida del condensador ($n=1$)
$M_i=1 \times 10^3 \text{ mol}$	Masa retenida en platos genéricos
$M_B=20 \times 10^3 \text{ mol}$	Masa molar retenida del hervidor ($n=9$)
$\alpha_2=2.98 \ \alpha_3=2.98$	Volatilidad relativa del plato i (α_i)
$\alpha_4=3.47 \ \alpha_5=3.63$	
$\alpha_6=3.77 \ \alpha_7=3.91$	
$\alpha_8=4.59 \ \alpha_9=6.26$	

Tabla III: Parámetros de la columna de destilación

Finalmente, el error relativo máximo entre ambas representaciones dinámicas en todos los platos a partir de $t=1.5 \times 10^5$ s es: $er_i(\text{con } i=1, 2, \dots, 9)=[0.09\% \ 0.22\% \ 0.75\% \ 0.25\% \ 2\% \ 3.6\% \ 7.7\% \ 10.6\% \ 2.6\%] \times 10^{-2}$.

Los siguientes resultados corresponden a los observadores los cuales se muestran a través del Observador 1, se presenta la estimación de x_3 y x_8 correspondientes a las concentraciones molares en los platos 3 y 8 en los cuales hay RTD's.

Para demostrar la convergencia del Observador 1 se establecen las condiciones iniciales: $\hat{x}_{i1}(0)=0.1$ con $i=1, 2, \dots, 9$. La ganancia del Observador 1 se obtiene por colocación de polos, por lo tanto los valores propuestos de los polos son: $P_i/[-0.026 \ -0.0035 \ -0.0063i \ -0.0035+0.0063i \ -0.0008 \ -0.0044 \ -0.011-0.0011i \ -0.011+0.0011i]$. Los polos de los observadores restantes pueden

ser consultados en el material suplementario del presente trabajo.

En las siguientes Figuras ((6) y (7)) se presentan los resultados del Observador 1.

Las Figuras anteriores presentan la estimación de x_3 y x_8 así como sus errores de observación ($x_i - \hat{x}_{i1}$), además se demuestra la convergencia del observador con respecto al modelo no lineal apreciándose que en $t=0.2 \times 10^5$ s el error tiene un valor cercano a cero. A pesar de que en $t=1 \times 10^5$ s ocurren cambios en los valores de las variables medidas el observador mantiene la convergencia sin alterar el error de observación.

Los valores máximos absolutos de error de observación del Observador 1 obtenidos son: $x_3 - \hat{x}_{31} = 7.92 \times 10^{-6}$, $x_5 - \hat{x}_{51} = 5.24 \times 10^{-6}$, $x_8 - \hat{x}_{81} = 6.44 \times 10^{-5}$ y $x_9 - \hat{x}_{91} = 4.8 \times 10^{-5}$. Los valores máximos absolutos de error de observación de los observadores restantes se presentan en el material suplementario del presente trabajo.

Cabe destacar que el Observador 1 estima las variables x_{41} , x_{61} , y x_{71} en donde no hay sensor puesto que el sistema es operado en un régimen alrededor del punto de referencia, en caso de operar fuera del punto de operación el sistema solo tiene la capacidad de diagnosticar fallos debido a que dicho régimen es utilizado por

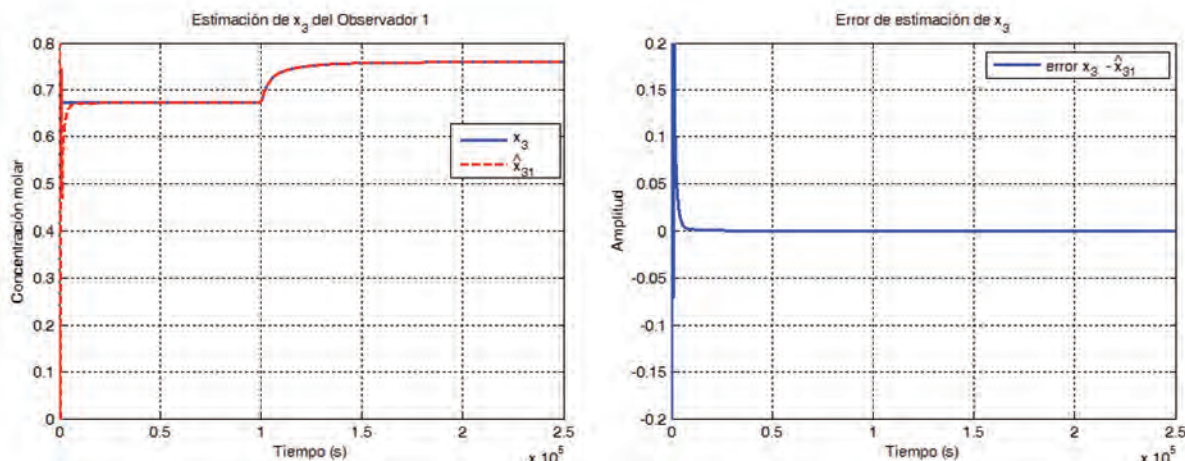


Fig. 6: Estimación y error de observación de x_3

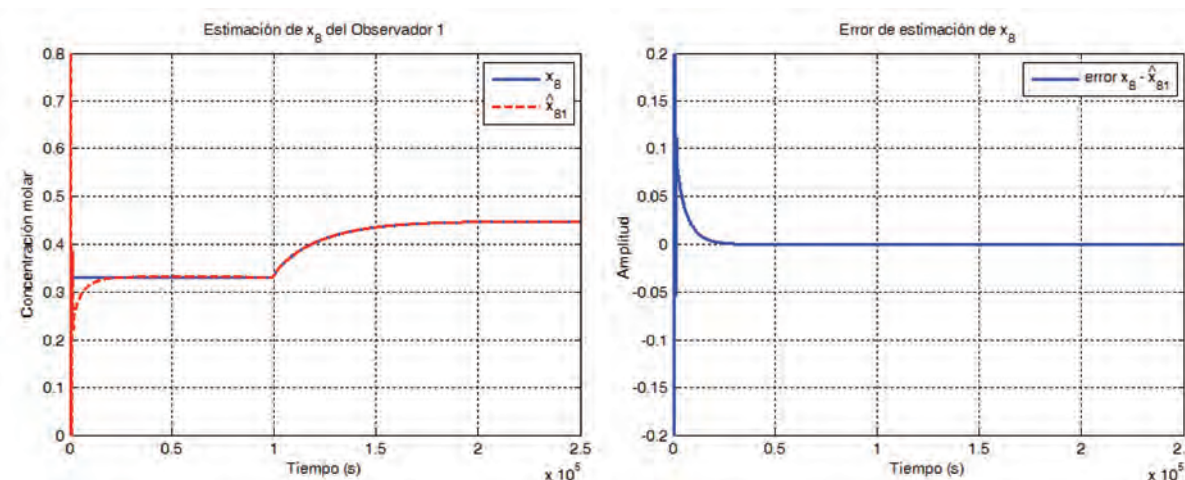


Fig. 7: Estimación y error de observación de x_8

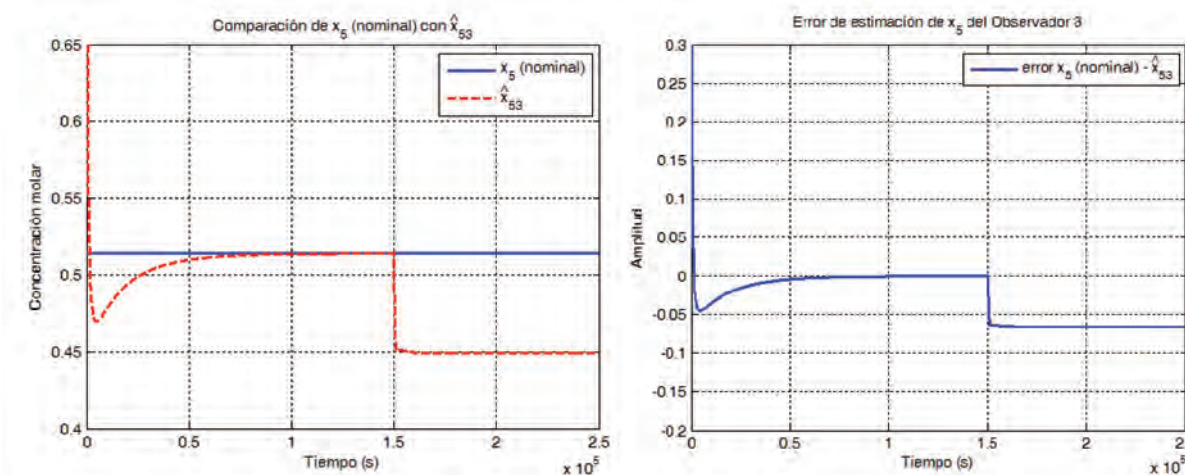


Fig. 8: Estimación y error de observación de x_5 del Observador 3 con fallo en el sensor 4

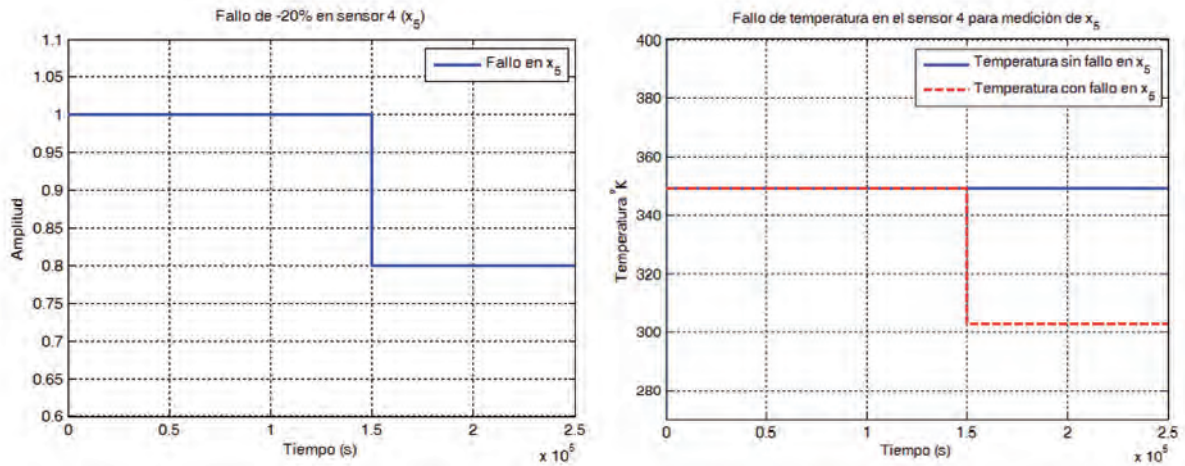


Fig. 9: Fallo del sensor 4

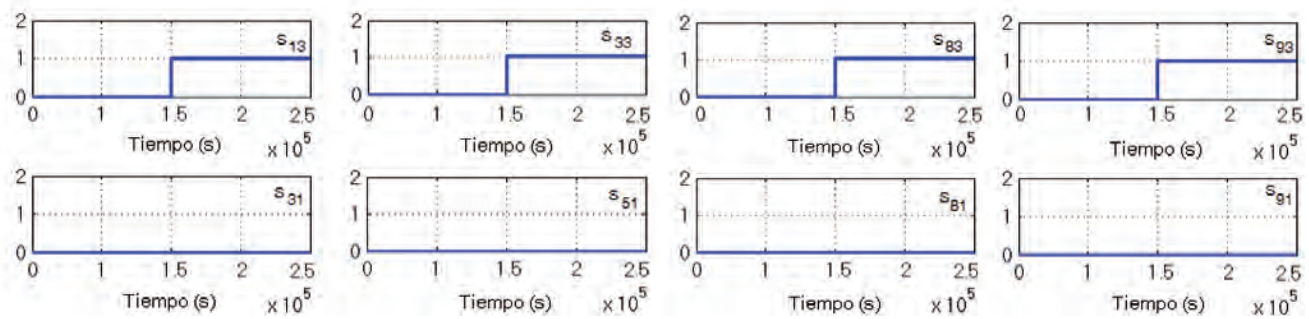


Fig. 10: Síntomas relacionados al Observador 3 (fila superior) y al Observador 1 (fila inferior)

los observadores; esto puede ser solucionado con observadores no lineales en donde aun operando fuera del punto de operación funcionan también como sensores virtuales (estimadores de estado), no obstante para el caso particular abordado la columna siempre se opera alrededor de un solo punto de operación cuya validación se ha mostrado previamente.

A continuación, los siguientes resultados corresponden al sistema de detección y diagnóstico de fallos en caso de la aparición de fallos en los sensores de temperatura.

Las Figuras (8), (9) y (10) muestran un caso particular de fallo que permite comprobar la respuesta del sistema de detección y diagnóstico de fallos. Para ello, aparece un fallo aditivo en el sensor 4 encargado de medir la concentración molar líquida del alcohol en el plato 5 (x_5) relacionado al Observador 3 (ver Tabla (II)) en el instante $t=1.5 \times 10^5$ s. El sensor presenta una degradación del -20% ($x_{5(\text{medida por el sensor 4})} \times 0.8$) durante la medición obteniéndose:

La Figura (8) muestra que ante la aparición del fallo el Observador 3 ya no es capaz de estimar correctamente x_5 (ni las demás variables de estado) debido a que depende de la medición nominal de la misma, esto causa que los síntomas relacionados al

Observador 3 mostrados en la Figura (10) indiquen anomalía en $t=1.5 \times 10^5$ s, sin embargo los síntomas relacionados al Observador 1 no presentan cambio alguno, con ello se interpreta que el Observador 1 estima las variables correctamente aún en presencia del fallo.

Las matrices de residuos y de fallos del sistema se presentan a continuación en las Tablas (IV) y (V) respectivamente.

Las Tabla IV muestra que ante el fallo en x_5 los residuos del Observador 3 (r_{13} , r_{33} , r_{83} y r_{93}) salen del valor del umbral establecido ($\pm 5\%$ de los valores de error de observación), consecuentemente los síntomas relacionados al Observador 3 y que involucran

Sensores	X_1	X_3	X_5	X_8	X_9
Observador 1	0	0	0	0	0
Observador 2	0	0	0	0	0
Observador 3	1	1	0	1	1
Observador 4	0	0	0	0	0
Observador 5	0	0	0	0	0

Tabla V: Matriz de fallos

Sensores	X_1	X_3	X_5	X_8	X_9
Observador 1	≈ 0	$r_{31} = 7.92 \times 10^{-6}$	$r_{51} = 5.24 \times 10^{-6}$	$r_{81} = 6.44 \times 10^{-5}$	$r_{91} = 4.8 \times 10^{-5}$
Observador 2	$r_{12} = 5.63 \times 10^{-6}$	≈ 0	$r_{52} = 5.24 \times 10^{-6}$	$r_{82} = 6.44 \times 10^{-5}$	$r_{92} = 4.8 \times 10^{-5}$
Observador 3	$r_{13} = -0.1924$	$r_{33} = -0.0594$	≈ 0	$r_{83} = 0.2649$	$r_{93} = 0.1223$
Observador 4	$r_{14} = 5.63 \times 10^{-6}$	$r_{34} = 7.92 \times 10^{-6}$	$r_{54} = 5.24 \times 10^{-6}$	≈ 0	$r_{94} = 4.8 \times 10^{-5}$
Observador 5	$r_{15} = 5.63 \times 10^{-6}$	$r_{35} = 7.92 \times 10^{-6}$	$r_{55} = 5.24 \times 10^{-6}$	$r_{85} = 6.44 \times 10^{-5}$	≈ 0

Tabla IV: Matriz de residuos

al sensor 4 forman una fila de unos en la Tabla V, de esta manera es interpretado que cuando hay una fila de unos se sabe que existe un fallo y cual sensor está averiado dependiendo en donde se encuentre la fila de unos.

Los resultados obtenidos establecen que el sistema de detección y diagnóstico de fallos puede manejar hasta 4 fallos simultánea-

mente, esto es porque el fallo de un sensor en particular afecta únicamente a los síntomas del observador del banco el cual haya sido diseñado para depender de una determinada salida, esto se puede verificar por la diferencia en la comparación del valor de la estimación del observador y el sensor libre de fallos (x_2). Cabe destacar que los fallos pueden ser identificados por el sistema instantes después que el error de observación de los observadores alcancen sus respectivos valores.

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se mostraron los resultados del diseño de un sistema de detección y diagnóstico de fallos basado en modelo utilizando un esquema de observador DOS, éste se aplica en los sensores de temperatura utilizándolos como medidores de concentración molar en una columna binaria de destilación fraccionada de 9 platos. El modelo matemático lineal del sistema alrededor del punto de operación demuestra ser una aproximación válida del comportamiento no lineal del sistema al obtenerse un error máximo relativo del $10.6 \times 10^{-20}\%$. El uso de la representación lineal para el diseño de los observadores del esquema DOS ha mostrado ser una estimación realista obteniéndose un error de observación menor a 8.25×10^{-5} .

La matriz de fallos del sistema de detección y diagnóstico de fallos diseñado cuya dimensión reducida es de 5×5 muestra que es posible detectar, localizar y diagnosticar fallos hasta en 4 sensores. Por otra parte, se ha asegurado la operación segura y estable del sistema aún con la aparición de fallos en los sensores de temperatura evitando poner en riesgo al operador, al sistema o al medio ambiente. Finalmente, cabe destacar que los resultados pueden ser aplicables en otras plantas de destilación una vez ajustando los parámetros expuestos por el presente trabajo. Como trabajo futuro se propone que el sistema sea utilizado para el diseño de un sistema de control tolerante a fallos en los sensores de la columna de destilación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board. "Investigation Report: Refinery Explosion and Fire". Texas (United States). 2005. p 341
- [2] French Ministry for sustainable development – DGPR/SRT/BARPI. "Sensor malfunction". France". 2013. p 6
- [3] French Ministry for sustainable development – DGPR/SRT/BARPI – Chemical Industry Union. "Explosion of a formulation reactor at a chemical plant". 2012. p 6
- [4] Minh LQ, Long NVD, Duong PLT, et al. "Design of an extractive distillation column for the environmentally benign separation of zirconium and hafnium tetrachloride for nuclear power reactor applications". *Energies*. September 2015. Vol. 8-9. p.10354–10369. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/en80910354>
- [5] Rani A, Singh V, Gupta JRP. "Development of soft sensor for neural network based control of distillation column". *ISA Transactions*. May 2013. Vol. 52-3. p.438–449. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isatra.2012.12.009>
- [6] Isermann R. *Fault-Diagnosis Systems. An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. 1st edition. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. 475p. ISBN: 978-3-540-30368-8. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/3-540-30368-5>
- [7] Zhang Y, Jiang J. "Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems". *Annual Reviews in Control*. December 2008. Vol. 32-2. p.229–252. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.arcontrol.2008.03.008>
- [8] Subramanian S, Ghouse F, Natarajan P. "Fault diagnosis of batch reactor using machine learning". *Modelling and Simulation in Engineering*. 2014. 14p. DOI:10.1155/2014/426402
- [9] Rehman A, Qayyum A, Taskeen M, et al. "Design of robust fault detection scheme for penicillin fermentation process". In: 9th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS 2015, Paris (France) 2–4 September. 2015. Vol. 48-21. p.589–594. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.590>

- [10] López F, Ponsart J, Theilliol D, et al. "Robust H_2/H_∞ fault detection observer design for descriptor-LPV systems with unmeasurable gain scheduling functions". *International Journal of Control*. June 2015. Vol 88-11. p 2380–2391. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00207179.2015.1044261>
- [11] Rodríguez J, Adam M, Cervantes I, et al. "Design of a fault tolerant passive control system in sensors for a fuel cell modeling by piecewise linear model". *DYNA*. March 2016. Vol 91-2. p 223–232. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7647>
- [12] Ortiz G, Escobar R, Adam M, et al. "Control tolerante a fallas activo en sensores y actuadores: Aplicación a una columna de destilación". *RIAI*. Enero 2016. Vol 13-1. p 67–79. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2015.05.006>
- [13] Venkatasubramanian V, Rengaswamy R, Yin K, et al. "A review of process fault detection and diagnosis: Part I: Quantitative model-based methods". *Computers Et Chemical Engineering*. March 2003. Vol. 27-3. p.293–311. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0098-1354\(02\)00160-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0098-1354(02)00160-6)
- [14] Cingara A, Jovanovic M. "Analytical first-order dynamic model of binary distillation column". *Chemical Engineering Science*. 1990. Vol. 45-12. p.3585–3592. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0009-2509\(90\)87161-K](http://dx.doi.org/10.1016/0009-2509(90)87161-K)
- [15] Broulès H, Marinescu B. *Linear time-varying systems. Algebraic-analytic approach*. 1st edition. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. 603p. ISBN: 978-3-642-19726-0. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-19727-7>
- [16] Radisavljevic V. "Linear observers design and implementation". In: American Society of Engineering Education (ASEE Zone 1), Bridgeport Connecticut (United States) 3–5 April. IEEE. 2014. p.1–6. ISBN: 978-1-4799-5232-8. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ASEEZone1.2014.6820636>
- [17] Isermann R. "Model-based fault-detection and diagnosis – status and applications". *Annual Reviews in Control*. 2005. Vol. 29-1. p.71–85. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.arcontrol.2004.12.002>
- [18] Urrea R, Castellanos E, Alvarez J, et al. "Distillate cascade composition using a two-temperature measurement secondary component". *I&EC Research*. August 2006. Vol 45-20. p 6828–6841. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/ie060421a>
- [19] Ogata K. *Modern control engineering*. 3th edition. USA: Prentice-Hall, 1997. 603p. ISBN: 0-13-227307-1

AGRADECIMIENTOS

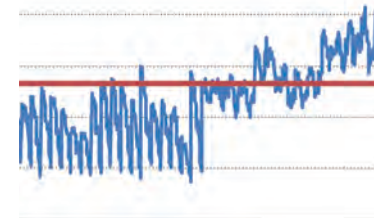
Los autores del artículo agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada al Tecnológico Nacional de México (TECNM) y al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) con la cual hizo posible realizar la investigación.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/7990-1.pdf



Método para calcular la potencia eléctrica óptima a contratar en España



Method for calculating optimum contracted electric power levels in Spain

Carlos Gorria Corres¹, Mikel Lezaun Iturralde¹, Eduardo Sáinz de la Maza Escobal¹, Jordi Martí Carrera², Alaitz Mitxelena de la Torre³

¹ Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea – UPV/EHU. Facultad de Ciencia y Tecnología. Dpto.de Matemática Aplicada y Estadística e Investigación Operativa. Calle Sarriena s/n – 48940 Leioa. Tfno.: + 34 946 012502. mikel.lezaun@ehu.eus

² Grupo Init. Paseo Uribitarte, 6 planta 2 – 48001 Bilbao.

³ Eroski S. Coop. Barrio San Agustín, s/n – 48230 Elorrio.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8021> | Recibido: 07/04/2016 • Aceptado: 05/09/2016

ABSTRACT

- In Spain, as in most European countries, the bills paid by electricity consumers are calculated on the basis of three main components: the energy term (active/reactive), the power term and taxation on electricity and other items (e.g. equipment rental & measurement actions). The power term can be broken down in turn into two components: one based on the actual energy supplied and the other on the supply capacity of each installation. The price of this last component is calculated on the basis of the maximum power capacity contracted by users in line with the capacity of each installation (referred to here as "contracted power") and of expected consumption. As actual power demand from customers departs from this reference level, billing for this item can increase or decrease. This article presents a method for optimising contracted power under Spanish low and high-voltage rates based on actual power supplied over the course of a full year. The result is an IT programme that is extremely helpful in making decisions concerning the power level to be contracted in the coming year, since in principle the requirements should be similar to those of the ongoing year. The process designed is validated with data on power consumption at premises owned by Eroski S. Coop. and by the University of the Basque Country (UPV/EHU).
- **Keywords:** power term, contracted power, optimisation.

RESUMEN

En España, como en la mayoría de los países europeos, la factura eléctrica de los consumidores se calcula en función de tres componentes principales: término de energía (activa/reactiva), término de potencia, e impuestos sobre la electricidad y otros varios, como alquiler de equipos y actuaciones en la medida. A su vez, el término de facturación de potencia tiene dos componentes, una debida a la energía real suministrada y la otra a la capacidad de suministro de la instalación. El cálculo de la tarifa por esta última componente se basa en las potencias que contrata el usuario, de acuerdo con la capacidad de su instalación y sus previsiones de consumo. Conforme las potencias que realmente demanda el cliente se apartan de esta referencia, la factura por este concepto puede aumentar o disminuir.

En este artículo se muestra un método para optimizar la potencia a contratar en tarifas de baja y alta tensión españolas, a partir de potencias reales suministradas a lo largo de todo un año. El resultado es un programa informático que sirve de gran ayuda a

la hora de tomar una decisión sobre las potencias a contratar en el año venidero, ya que en principio las potencias que se vayan a demandar serán similares a las del año en curso. El proceso diseñado se ha validado con datos de consumo de centros de Eroski S. Coop. y de la Universidad del País Vasco – UPV/EHU.

Palabras clave: término de potencia, potencia a contratar, optimización.

1. INTRODUCCIÓN

En la mayor parte de los países europeos, la factura eléctrica de los consumidores se calcula en función de tres componentes: término de energía (activa/reactiva), término de potencia, e impuestos sobre la electricidad y otros varios, como alquiler de equipos y actuaciones en la medida. El término de facturación de la potencia suele tener dos apartados, uno debido a la capacidad de suministro de la instalación y otro a la energía real demandada. También puede haber una cuota fija de acceso. En algunos países hay un sistema de diferenciación tarifaria horaria o estacional. En lo que corresponde a la capacidad de la instalación, en la mayoría de los casos la tarificación está basada en un sistema de "suscripciones", en el que el utilizador de la red contrata con su proveedor unas potencias de suministro de acuerdo con sus previsiones de consumo. Estas suscripciones constituyen la base de la facturación por potencia contratada. Este sistema incita al cliente a afinar las potencias a contratar, ya que cuanto más se acerquen las previsiones a las potencias reales requeridas, menos deberá pagar. Para una comparativa de la política tarifaria de distintos países ver ([1]).

En Europa coexisten diferentes estructuras tarifarias para la factura de acceso relativa a la potencia contratada. Por ejemplo, en Bélgica, por el exceso sobre la potencia contratada se factura para todo el mes, la diferencia entre la potencia cuarto horaria máxima registrada y la contratada, al 115% del precio de la potencia contratada ([2]). En Italia, para la factura mensual por potencia contratada, se toma la potencia cuarto horaria demandada máxima del mes ([3]). En Francia, las fórmulas que calculan la facturación por potencias suministradas superiores a las contratadas son más complejas ([4]). En Italia no existe diferenciación horaria o estacional, mientras que sí la hay en Bélgica y Francia. En este artículo nos centramos en la estructura tarifaria por potencia contratada en España (ver [5]).

En España existen diferentes tipos de tarifas de acceso a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica, cada una

de ellas para determinados valores de la tensión y potencia de la energía suministrada. La estructura de las distintas tarifas, así como los valores de los parámetros que determinan el precio a abonar, los establece el gobierno mediante un decreto y se aplican invariablemente a todos los consumidores. En este artículo se estudian dos tipos de tarifas, las tarifas 3 y 6. Estas tarifas tienen diferenciación horaria y en ellas, la cuantía a abonar anualmente por este concepto depende de la potencia contratada por el cliente en cada uno de los periodos tarifarios, pero con correcciones que penalizan económicamente las potencias demandadas superiores a la contratada y, en las tarifas 3, bonifican las inferiores. Cada consumidor, de acuerdo con las características técnicas de su instalación, se acoge necesariamente a una de las tarifas y contrata una potencia determinada para cada periodo tarifario, que estará en vigor todo un año.

El contenido de este artículo es fruto de un proyecto para la empresa de distribución *Eroski S. Coop.*, que cuenta con más de 2.000 tiendas de distintos formatos y negocios. El objetivo es diseñar una herramienta informática para que de acuerdo con su tipo de tarifa, el usuario estime la potencia que debe contratar en cada periodo tarifario, para que al cabo de un año haya abonado por este concepto lo menor posible. Para abordar este problema, la primera consideración es asumir que para una misma instalación, las potencias demandadas durante el año venidero serán similares a las del año en curso. Si se ha modificado la instalación será necesario realizar los ajustes pertinentes. Así pues, nuestra argumentación consiste en calcular las potencias a contratar óptimas para los datos de consumo conocidos del año actual, con

los parámetros de precios y penalizaciones del curso siguiente, y a partir de ellas decidir las potencias a contratar para los próximos doce meses.

Para obtener en cada tarifa las potencias óptimas a contratar a partir de los datos conocidos de un año, se ha diseñado un método que aprovecha la estructura de las tarifas. En las tarifas 3, un problema de optimización no lineal con tres variables y restricciones se reduce a minimizar funciones univariadas evaluadas en un pequeño número de puntos. En las tarifas 6, un problema de optimización no lineal de seis variables con restricciones se convierte en minimizar funciones convexas de una sola variable real. Los algoritmos se pueden programar en una simple hoja Excel y su ejecución es prácticamente instantánea. Revisando la literatura, no hemos encontrado trabajos en los que se presenten algoritmos de optimización de este concepto de la tarifa eléctrica y los beneficios económicos que supone su aplicación.

2. DESCRIPCIÓN DE LAS TARIFA 3 Y 6

En España, un real decreto define las tarifas de acceso a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica, de acuerdo con las distintas modalidades de suministro ([6]). En la tabla 1 se muestran las características en cuanto a tensión y potencia contratada de las distintas tarifas 3 y 6. La tarifa 3.0A es de baja tensión y las restantes de alta.

En estas tarifas hay diferenciación horaria, esto es, el precio por kW contratado depende de la hora del día y época del año. A este respecto, en España hay cuatro zonas geográficas: península,

Tarifa	3.0A	3.1A	6.1A	6.1B	6.2	6.3	6.4
Tensión	≤ 1 kV	> 1 kV y < 36 kV	> 1 kV y < 30 kV	≥ 30 kV y < 36 kV	≥ 36 kV y < 72,5 kV	≥ 72,5 kV y < 145 kV	≥ 145 kV
Potencia	> 15 kW en algún periodo	≤ 450 kW en los 3 periodos	> 450 kW en algún periodo	Sin restricciones de potencia			
	3 periodos tarifarios			6 periodos tarifarios			

Tabla 1: Tensiones y potencias del suministro de energía de las tarifas 3 y 6

	Lunes a viernes no festivos nacionales						Sábados, domingos, festivos	
	Horas						Horas	
	0 a 8	8 a 10	10 a 16	16 a 17	17 a 23	23 a 24	0 a 18	18 a 24
Otoño-invierno	P3	P2	P2	P2	P1	P2	P3	P2
Primavera-verano	P3	P2	P1	P2	P2	P2	P3	P2

Tabla 2: Distribución horaria de los tres periodos de la tarifa 3.1A en la península. Los cambios de otoño-invierno a primavera-verano y viceversa, se realizan con el cambio de hora oficial de marzo y octubre respectivamente

	Lunes a viernes no festivos nacionales											
	Horas											
	0 a 8	8 a 9	9 a 10	10 a 11	11 a 13	13 a 15	15 a 16	16 a 18	18 a 19	19 a 21	21 a 22	22 a 24
E, F y D	P6	P2	P2	P1	P1	P2	P2	P2	P1	P1	P2	P2
Mz y N	P6	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P3	P3	P3	P3	P4
Ab, My y O	P6	P5	P5	P5	P5	P5	P5	P5	P5	P5	P5	P5
1-15 Jn y Sp	P6	P4	P3	P3	P3	P3	P4	P4	P4	P4	P4	P4
16-30 Jn y Jl	P6	P2	P2	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P2	P2	P2
Ag	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
Sábados, domingos y festivos nacionales, de 0 a 24 horas P6												

Tabla 3: Distribución horaria de los seis periodos de la tarifa 6 en la península. Se tienen las siguientes notaciones. E, F y D (enero, febrero y diciembre); Mz y N (marzo y noviembre); Ab, My y O (abril, mayo y octubre); Jn (junio); Jl (julio); Sp (septiembre) y Ag (agosto)

Baleares, Canarias y Ceuta y Melilla. En todas ellas, las tarifas 3 tienen tres periodos tarifarios, denominados P1 (punta), P2 (llano) y P3 (valle), y las tarifas 6 seis periodos, de P1 a P6. La asignación en cada zona geográfica de las horas del día a un periodo u otro y el precio por kW contratado y periodo, se fijan por decreto gubernamental. Las distribuciones horarias a los distintos periodos están publicadas en [7]. Las tablas 2 y 3 muestran la asignación de todas las horas del año a los distintos periodos de las tarifas 3.1A y 6 en la península. En la tarifa 3.0A, la asignación de las horas de las dos épocas del año a sus tres periodos es similar a la de la tarifa 3.1A.

Una vez asignada la tarifa, el cliente debe decidir que potencia contratar en cada uno de los periodos tarifarios. Con una condición importante, la potencia contratada en un periodo siempre tiene que ser igual o mayor que la contratada en el periodo precedente. Es decir, la de P2 mayor o igual que la de P1, la de P3 mayor o igual que la de P2, etc. Además, la decisión tomada se aplica a todo un año, no hay revisiones interanuales. Esta elección, junto con las potencias realmente requeridas, condiciona el montante a abonar por potencia contratada.

3. FACTURACIÓN DE LA TARIFA 3.0A Y 3.1A

Se factura por meses y periodo. La facturación de cada periodo depende de la relación entre la potencia contratada y la realmente suministrada. La potencia suministrada se mide con contadores eléctricos dotados de maxímetro. Estos aparatos miden la potencia promedio de cada cuarto de hora, denominada potencia cuarto horaria, de los tres periodos de facturación (punta, llano y valle). En las tarifas 3, el aparato sólo registra la potencia cuarto horaria máxima mensual de cada periodo. La potencia a facturar de un periodo se calcula en función de la relación entre el valor cuarto horario máximo mensual y la potencia contratada, de acuerdo con las siguientes reglas.

- Si la potencia cuarto horaria máxima mensual registrada es inferior al 85% de la potencia contratada, para todo el mes se factura el 85% de la potencia contratada.
- Si la potencia cuarto horaria máxima mensual registrada está entre el 85% y el 105% de la potencia contratada, para el mes completo se factura la potencia máxima registrada.
- Si la potencia cuarto horaria máxima mensual registrada es superior al 105% de la potencia contratada, para todo el mes se factura la potencia máxima mensual más el doble de la diferencia entre esa potencia máxima y el 105% de la potencia contratada.

Veamos la formulación matemática de estas reglas. Sea y_i (kW) la potencia contratada del periodo P_i y $P_{i,j}$ la potencia cuarto horaria máxima registrada del mes $j, j \in J = \{1, 2, \dots, 12\}$, y periodo $P_i, i = 1, 2, 3$. Sea $q_{i,j}$ el precio en euros por kW del periodo P_i durante el mes j . Este precio está fijado por decreto gubernamental y puede ser modificado durante el año. La factura por acceso a la potencia y_i en el periodo P_i del mes j es

esto es

$$G_{i,j}(y_i) = q_{i,j} \times \begin{cases} p_{i,j} + 2(p_{i,j} - 1,05 y_i) & \text{si } y_i < \frac{p_{i,j}}{1,05} \\ p_{i,j} & \text{si } \frac{p_{i,j}}{1,05} \leq y_i \leq \frac{p_{i,j}}{0,85} \\ 0,85 y_i & \text{si } \frac{p_{i,j}}{0,85} < y_i \end{cases}$$

La factura anual en el periodo P_i es

$$G_i(y_i) = \sum_{j=1}^{12} G_{i,j}(y_i),$$

y la total

$$G(y_1, y_2, y_3) = \sum_{i=1}^3 G_i(y_i) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{12} G_{i,j}(y_i). \tag{1}$$

Así, conocidas las potencias cuarto horarias máximas mensuales $P_{i,j}$ y los precios $q_{i,j}$ por Kw, $i = 1, 2, 3, j \in J$, las potencias óptimas a contratar $y_i, i = 1, 2, 3$, se obtienen resolviendo el siguiente problema de optimización no lineal.

4. PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN P_1

Comencemos por la tarifa 3.1A. El problema de optimización P_1 a resolver es hallar los valores (y_1, y_2, y_3) que minimizan la función de tres variables (1) y verifican las restricciones

$$0 \leq y_1 \leq y_2 \leq y_3, \tag{2}$$

$$y_3 \leq 450. \tag{3}$$

Las restricciones (2) vienen del hecho de que siempre las potencias contratadas tienen que ir en orden creciente con el periodo tarifario y la (3) para que permanezcan en el rango de potencias de la tarifa 3.1A.

El mínimo de (1) verificando las condiciones (2) se busca como suma de los mínimos de la factura anual de cada periodo, suma de los mínimos de la factura de dos periodos con igual potencia más el mínimo de la del otro periodo o mínimo de la suma de las facturas de los tres periodos con igual potencia, siempre que los valores en los que se obtienen el mínimo verifiquen las restricciones (2). Como además tienen que verificar la restricción (3), los candidatos a ser solución son los puntos

$$(w_1, w_2, w_3), (w_{1,2}, w_{1,2}, w_3), (w_1, w_{2,3}, w_{2,3}), (w_{1,3}, w_{1,3}, w_{1,3}),$$

$$(w_1, w_2, 450), (w_{1,2}, w_{1,2}, 450), (w_1, 450, 450), (450, 450, 450),$$

donde $w_i, i = 1, 2, 3$, es el valor que minimiza $G_i(y)$, $w_{i,i+1}, i = 1, 2$, el valor que minimiza $G_i(y) + G_{i+1}(y)$ y $w_{1,3}$ el valor que minimiza $G_1(y) + G_2(y) + G_3(y)$.

En todos los casos, las funciones $G_i(y_i)$ a minimizar son suma de las funciones $G_{i,j}(y_i)$, formadas por tres tramos lineales, el primero de pendiente negativa, el del centro horizontal y el tercero de pendiente positiva. Por ello, $G_i(y)$ es convexa, está formada

$$G_{i,j}(y_i) = q_{i,j} \times \begin{cases} 0,85 y_i & \text{si } p_{i,j} < 0,85 y_i \\ p_{i,j} & \text{si } 0,85 y_i \leq p_{i,j} \leq 1,05 y_i \\ p_{i,j} + 2(p_{i,j} - 1,05 y_i) & \text{si } 1,05 y_i < p_{i,j} \end{cases}$$

por tramos rectos y el mínimo necesariamente se alcanza en una de las esquinas, en uno de los valores $\frac{p_{i,j}}{1,05}$ y $\frac{p_{i,j}}{0,85}$ con $j \in J$. Así, el cálculo de los valores que hacen mínimo los costes es como sigue:

w_i , $i = 1, 2, 3$, es el valor que minimiza $G_i(y)$

entre los 24 puntos $\frac{p_{i,j}}{1,05}$, $\frac{p_{i,j}}{0,85}$, $j \in J$,

$w_{i,j+1}$, $i = 1, 2$, el valor que minimiza $G_i(y) + G_{i+1}(y)$

entre los 48 puntos $\frac{p_{i,j}}{1,05}$, $\frac{p_{i,j}}{0,85}$, $\frac{p_{i+1,j}}{1,05}$, $\frac{p_{i+1,j}}{0,85}$, $j \in J$,

$w_{1,3}$ el valor que minimiza $G_1(y) + G_2(y) + G_3(y)$

entre los 72 puntos $\frac{p_{i,j}}{1,05}$, $\frac{p_{i,j}}{0,85}$, $i = 1, 2, 3$, $j \in J$.

De entre estos ocho puntos candidatos se seleccionan los que verifican las restricciones (2) y (3) y el que hace mínimo el funcional (1) es la solución del problema planteado.

En la tarifa 3.0A, el problema de optimización es el mismo, salvo que la restricción (3) se sustituye por

$$16 \leq y_3. \quad (3')$$

Los candidatos a ser solución son los anteriores puntos

$$(w_1, w_2, w_3), (w_{1,2}, w_{1,2}, w_3), (w_1, w_{2,3}, w_{2,3}), (w_{1,3}, w_{1,3}, w_{1,3}).$$

De entre estos cuatro puntos se seleccionan los que verifican las restricciones (2) y (3') y el que hace mínimo el funcional (1) es la solución del problema planteado. Si ninguno de esos puntos verifica la condición (3'), se seleccionan los puntos que verifican la restricción (2) y en cada uno de ellos se reemplaza el valor de la potencia del periodo 3 por 16. Estos nuevos puntos ya verifican las restricciones (2) y (3') y la solución es el que minimiza la función (1).

5. FACTURACIÓN DE LA TARIFA 6.1A Y 6.1B.

También en este caso se factura por meses y periodo. La factura de las tarifas 6 involucra a todas las potencias cuarto horarias mensuales suministradas y no se bonifican reducciones de potencia respecto de la contratada, pero sí se penalizan los excesos. La factura de cada periodo tiene dos componentes:

- una parte fija que corresponde a la potencia contratada,
- una parte variable que corresponde a todos los excesos mensuales de potencia cuarto horaria respecto de la contratada. Estos excesos se contabilizan con su media cuadrática.

La traducción de estas reglas a fórmulas es como sigue. Sea x_i (kW) la potencia contratada y $q_{i,j}$ el precio en euros por kW del periodo P_i , $i = 1, 2, \dots, 6$, durante el mes j . Este precio también está fijado por decreto gubernamental y puede ser modificado durante el año. Los dos conceptos de la facturación mensual son los siguientes.

- Parte fija. Para cada periodo P_i , la tarifa a facturar por la potencia x_i en el mes j es

$$q_{i,j} x_i$$

- Facturación por exceso de potencia demandada. Sean $P_{i,j,k}$ con $k = 1, 2, \dots, c(j)$, donde $c(j)$ es el número de cuartos de

hora del mes j , todas las potencias cuarto horarias suministradas del mes j y periodo P_i . La factura $E_{i,j}$ correspondiente al exceso de la potencia suministrada sobre la potencia contratada x_i en ese mes y periodo es

$$E_{i,j} = 1,4064 K_i \sqrt{\sum_{P_{i,j,k} > x_i} (P_{i,j,k} - x_i)^2},$$

donde actualmente $K_1=1$, $K_2=0,5$, $K_3=K_4=K_5=0,37$ y $K_6=0,17$.

La factura total por la potencia contratada x_i en el periodo P_i del mes j es

$$G_{i,j}(x_i) = q_{i,j} x_i + 1,4064 K_i \sqrt{\sum_{P_{i,j,k} > x_i} (P_{i,j,k} - x_i)^2}, \quad (4)$$

la facturación anual en el periodo P_i es

$$G_i(x_i) = \sum_{j=1}^{12} G_{i,j}(x_i),$$

y la facturación anual total

$$G(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = \sum_{i=1}^6 G_i(x_i). \quad (5)$$

Por tanto, conocidas todas las potencias cuarto horarias suministradas $P_{i,j,k}$, $i = 1, 2, \dots, 6$, $j \in J$, $k = 1, 2, \dots, c(j)$ donde $c(j)$ es el número de cuartos de hora del mes j , las potencias óptimas a contratar x_i , $i = 1, 2, \dots, 6$, se obtienen resolviendo el siguiente problema no lineal.

6. PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN P_2

El problema de optimización P_2 a resolver es hallar los valores $(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ que minimizan la función de seis variables (5), sujetos a las restricciones

$$0 < x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq x_4 \leq x_5 \leq x_6. \quad (6)$$

$$451 \leq x_6. \quad (7)$$

En las tarifas 6.1A y 6.1B se ha añadido la restricción (7) para que las potencias pertenezcan a su correspondiente rango de valores.

El mínimo de (5) verificando las condiciones (6) se busca como suma de los mínimos de la factura anual de cada periodo o suma de los mínimos de la factura con dos, tres, cuatro, cinco o seis periodos con igual potencia en todas las posibles configuraciones con esas opciones, siempre que se verifiquen las restricciones (6). Se tiene pues que calcular

$$z_i, \text{ valor que minimiza } G_i(x), i = 1, 2, \dots, 6$$

$$z_{i,i+1}, \text{ valor que minimiza } G_i(x) + G_{i+1}(x), i = 1, 2, \dots, 5$$

$$z_{i,i+2}, \text{ valor que minimiza } G_i(x) + G_{i+1}(x) + G_{i+2}(x), i = 1, 2, \dots, 4$$

$$z_{i,i+3}, \text{ valor que minimiza } G_i(x) + G_{i+1}(x) + G_{i+2}(x) + G_{i+3}(x), i = 1, 2, 3$$

$z_{i,i+4}$ valor que minimiza $G_i(x) + G_{i+1}(x) + G_{i+2}(x) + G_{i+3}(x) + G_{i+4}(x)$, $i = 1, 2$

$z_{1,6}$, valor que minimiza $G_1(x) + G_2(x) + G_3(x) + G_4(x) + G_5(x) + G_6(x)$.

Todas estas funciones $G_i(x)$ a minimizar son suma de las funciones (4), que son continuas con derivada continua creciente en el intervalo $[0, P_{i,j,M})$, donde $P_{i,j,M}$ es la correspondiente potencia cuarto horaria mensual máxima registrada, y por tanto convexas. En consecuencia, las funciones univariantes $G_i(x)$ también son convexas y la obtención numérica de los valores que las minimizan es inmediata utilizando un método de bisección ([8]).

Los puntos candidatos a ser la solución del problema P_2 son:

- $(z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6)$, $(z_{1,2}, z_{1,2}, z_3, z_4, z_5, z_6)$,
- $(z_1, z_{2,3}, z_{2,3}, z_4, z_5, z_6)$, $(z_1, z_2, z_{3,4}, z_{3,4}, z_5, z_6)$,
- $(z_1, z_2, z_3, z_{4,5}, z_{4,5}, z_6)$, $(z_1, z_2, z_3, z_4, z_{5,6}, z_{5,6})$,
- $(z_{1,2}, z_{1,2}, z_{3,4}, z_{3,4}, z_5, z_6)$, $(z_{1,2}, z_{1,2}, z_3, z_{4,5}, z_{4,5}, z_6)$,
- $(z_{1,2}, z_{1,2}, z_3, z_4, z_{5,6}, z_{5,6})$, $(z_1, z_{2,3}, z_{2,3}, z_{4,5}, z_{4,5}, z_6)$,
- $(z_1, z_{2,3}, z_{2,3}, z_4, z_{5,6}, z_{5,6})$, $(z_1, z_2, z_{3,4}, z_{3,4}, z_{5,6}, z_{5,6})$
- $(z_{1,2}, z_{1,2}, z_{3,4}, z_{3,4}, z_{5,6}, z_{5,6})$, $(z_{1,3}, z_{1,3}, z_{1,3}, z_4, z_5, z_6)$,
- $(z_1, z_{2,4}, z_{2,4}, z_{2,4}, z_5, z_6)$, $(z_1, z_2, z_{3,5}, z_{3,5}, z_{3,5}, z_6)$,
- $(z_1, z_2, z_3, z_{4,6}, z_{4,6}, z_{4,6})$, $(z_1, z_{2,3}, z_{2,3}, z_{4,6}, z_{4,6}, z_{4,6})$,
- $(z_1, z_{2,4}, z_{2,4}, z_{2,4}, z_{5,6}, z_{5,6})$, $(z_{1,2}, z_{1,2}, z_3, z_{4,6}, z_{4,6}, z_{4,6})$,
- $(z_{1,2}, z_{1,2}, z_{3,5}, z_{3,5}, z_{3,5}, z_6)$, $(z_{1,3}, z_{1,3}, z_{1,3}, z_4, z_{5,6}, z_{5,6})$
- $(z_{1,3}, z_{1,3}, z_{1,3}, z_{4,5}, z_{4,5}, z_6)$, $(z_{1,3}, z_{1,3}, z_{1,3}, z_{4,6}, z_{4,6}, z_{4,6})$,

- $(z_{1,4}, z_{1,4}, z_{1,4}, z_{1,4}, z_5, z_6)$, $(z_1, z_{2,5}, z_{2,5}, z_{2,5}, z_{2,5}, z_6)$,
- $(z_1, z_2, z_{3,6}, z_{3,6}, z_{3,6}, z_{3,6})$, $(z_{1,4}, z_{1,4}, z_{1,4}, z_{1,4}, z_{5,6}, z_{5,6})$,
- $(z_{1,2}, z_{1,2}, z_{3,6}, z_{3,6}, z_{3,6}, z_{3,6})$, $(z_{1,5}, z_{1,5}, z_{1,5}, z_{1,5}, z_{1,5}, z_6)$,
- $(z_1, z_{2,6}, z_{2,6}, z_{2,6}, z_{2,6}, z_{2,6})$, $(z_{1,6}, z_{1,6}, z_{1,6}, z_{1,6}, z_{1,6}, z_{1,6})$,

De entre estos 32 puntos se seleccionan los que verifican las restricciones (6) y (7) y el que hace mínimo el funcional (5) es la solución del problema planteado. Si ninguno de los 32 puntos verifica la condición (7), se seleccionan los puntos que verifican la restricción (6) y en cada uno de ellos se reemplaza el valor z_6 por 451. Estos nuevos puntos ya verifican las restricciones (6) y (7), por lo que la solución es el que entre ellos minimiza la función (5).

7. RESULTADOS

El resultado del proyecto son sendas hojas Excel en las que se han programado los algoritmos diseñados para la optimización de las tarifas 3.0A, 3.1A y 6.1A, las cuales se han aplicado en centros de Eroski y de la Universidad del País Vasco – UPV/EHU. En las tablas 4 y 5 se presentan una aplicación de las hojas Excel para la tarifa 3.1A y tarifa 6.1A respectivamente. En esta última tarifa, aunque los datos de partida son todas las potencias cuarto horarias por periodo suministradas por la empresa comercializadora, se incluyen las máximas mensuales a modo de simple referencia. En los dos casos su uso es muy sencillo. Como resultado se muestran las potencias óptimas por periodo, la factura anual correspondiente a esas potencias y la de las realmente contratadas u otras de referencia, y el ahorro potencial que supondría haber contratado las óptimas. En la figura 1 se muestran las gráficas de las máximas potencias cuarto horarias mensuales y de la óptima del periodo 1, del centro XX con tarifa 3.1A de la tabla 4. En la figura 2 se muestran las gráficas de todas las potencias cuarto horarias y de la óptima del periodo 1, del centro YY con tarifa 6.1A de la tabla 5. En los dos casos se observa que la potencia óptima es netamente

CENTRO XX, Tarifa 3.1A												
Potencia cuarto horaria máxima suministrada por periodo y mes (kW)												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
periodo 1	53	50	54	62	84	105	127	59	120	71	44	49
periodo 2	104	93	77	61	70	97	122	57	116	66	92	91
periodo 3	25	27	29	27	27	24	35	24	28	26	29	28
Precio en euros por kW y mes para cada periodo horario durante todo el año												
$q_1 = 4,93112$			$q_2 = 3,04088$			$q_3 = 0,69730$						
	potencia contratada		potencia óptima		Ahorro		%					
periodo 1	150 kW		83 kW									
periodo 2	150 kW		92 kW									
periodo 3	150 kW		92 kW									
Factura	13.264 €		10.163 €		3.101 €		23,38					

Tabla 4: Ejemplo de una aplicación de la hoja Excel para la tarifa 3.1A

menor que las mayores potencias suministradas. En este sentido se constata que en prácticamente todas las aplicaciones en centros de Eroski y la UPV/EHU, las potencias óptimas son inferiores a las contratadas. Esto es debido a que la tendencia natural de los

CENTRO YY, Tarifa 6.1												
Potencia cuarto horaria máxima suministrada por periodo y mes (kW). Sólo tiene un valor unformativo como referencia												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
periodo 1	611	599	0	0	0	740	927	0	0	0	0	604
periodo 2	653	611	0	0	0	698	927	0	0	0	0	622
periodo 3	0	0	446	0	0	729	0	0	848	0	455	0
periodo 4	0	0	520	0	0	706	0	0	705	0	551	0
periodo 5	0	0	0	453	865	0	0	0	0	689	0	0
periodo 6	339	330	349	324	267	360	413	512	331	268	370	336

Precio en euros por kW y mes para cada periodo horario durante todo el año			
$q_1 = 3,26162$	$q_2 = 1,63222$	$q_3 = q_4 = q_5 = 1,19452$	$q_6 = 0,54502$

	potencia contratada	potencia óptima		
periodo 1	800 kW	530 kW		
periodo 2	800 kW	530 kW		
periodo 3	800 kW	530 kW		
periodo 4	800 kW	530 kW		
periodo 5	800 kW	530 kW		
periodo 6	800 kW	530 kW	Ahorro	%
Factura	87.834 €	73.000 €	14.834 €	16,89

Tabla 5. Ejemplo de una aplicación de la hoja Excel para la tarifa 6.1A

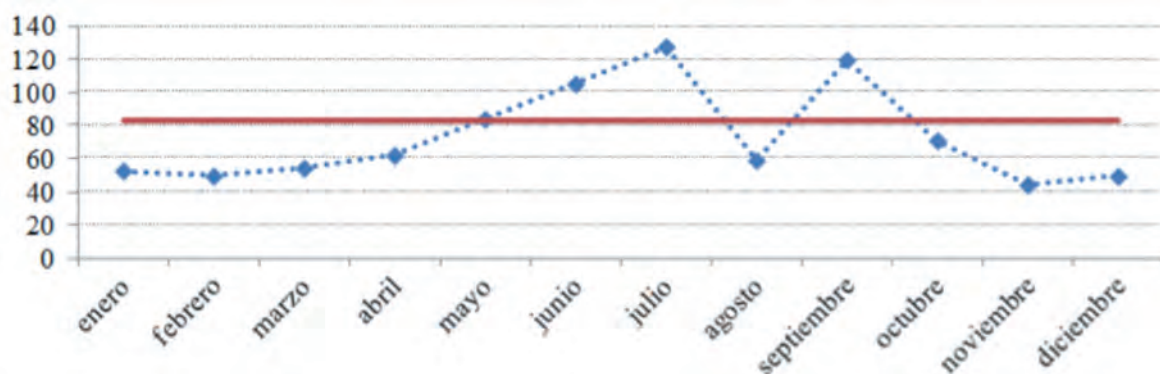


Figura 1: Gráficas de las potencias cuarto horarias máximas mensuales suministradas y óptima del periodo 1 del centro XX con tarifa 3.1A de la tabla 4.

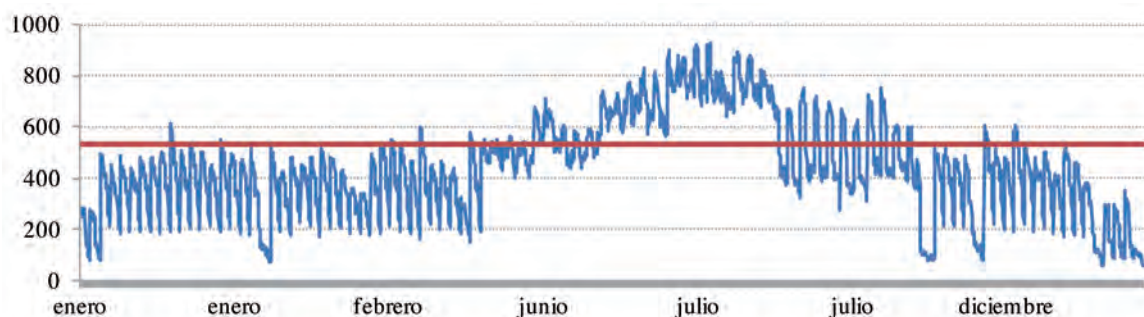


Figura 2: Gráficas de las potencias cuarto horarias anuales suministradas y óptima del periodo 1 del centro YY con tarifa 6.1A de la tabla 5

gestores es intentar evitar penalizaciones por haber contratado potencias bajas, lo cual les lleva a elegir potencias demasiado altas, con el consiguiente sobre coste.

8. CONCLUSIONES

La aplicación de la herramienta desarrollada en centros de Eroski y de la UPV/EHU ha sido como sigue. En la UPV/EHU se ha aplicado a los 11 centros con tarifa 3.1A y a los 10 con tarifa 6.1A. En todos ellos, a partir de las potencias suministradas en el año 2013, se han obtenido las correspondientes potencias óptimas. Hecho esto, se ha calculado la factura para las potencias suministradas en el año 2014, tomando como potencias contratadas las óptimas de 2013. Comparando los resultados con las facturas reales de 2014, el ahorro potencial por este concepto es el 12,5 % en el total de centros con tarifa 3.1 A, el 16,54 % en el total de centros con tarifa 6.1A, y un ahorro global del 15,7 %, 161.000 €. A su vez, si comparamos los resultados de 2014 con las potencias óptimas obtenidas para 2013, con los obtenidos con las potencias óptimas del mismo 2014, se obtiene un desvío del 1,52 % en los centros con tarifa 3.1 A, del 0,38 % en los centros con tarifa 6.1 A, y del 0,62 % en el global de los centros de la UPV/EHU. A la vista de esto, la UPV/EHU ha ajustado sus potencias contratadas para 2016 a las óptimas de 2014.

En lo que respecta a Eroski, el 88 % de sus centros corresponden a una tarifa 3.0A o 3.1A y el 12 % a una tarifa 6.1A o 6.1B. A mediados de 2015, se seleccionaron 85 centros para realizar ajustes de potencia con los resultados obtenidos aplicando el optimizador diseñado. De ellos, el 85 % han sido centros con tarifa 3.0A o 3.1A y el 15 % con tarifa 6.1A o 6.1B. Tomando como potencias contratadas las óptimas del año precedente y comparando las tarifas óptimas con las reales una vez transcurrido un año, el ahorro potencial por este concepto en los centros con tarifa 3.0A o 3.1A es el 10 %, el 18 % en los centros con tarifa 6.1A o 6.1B y el 3 % en la facturación anual. Una comparación de los ahorros que se están produciendo a mediados de este año de 2016 con los esperados de la optimización, da una disminución del beneficio del 15 % en los centros con tarifa 3.0A o 3.1A y un aumento del 2 % en los centros con tarifa 6.1A o 6.1B. El motivo de estos desvíos es múltiple. Por ejemplo, no en todos los casos los ajustes de potencia se han hecho a los valores indicados por el optimizador, bien por motivos técnicos como trafos de medida fuera de rango, o bien por prudencia a la espera de realizar mejoras en los centros. También influye que el optimizador se basa en las demandas de potencia de los centros a lo largo del año anterior, por lo que en el año en curso, a pesar de que en principio las variaciones no deberían de ser grandes, los ahorros estimados pueden sufrir desviaciones importantes debido al peso del frío industrial y la climatización en la factura eléctrica, para los cuales la climatología juega un papel importante. Además de esto, al ser Eroski es una empresa con multitud de puntos de consumo, continuamente se realizan modificaciones: cambios de equipos (luminarias, hornos, máquinas de clima, centrales de frío,...), instalación de cierres con puertas de mobiliario de frío, reducciones o ampliaciones de salas de ventas, etc., lo cual conlleva cambios en las demandas de potencia y en consecuencia se debe realizar anualmente el estudio de optimización de las potencias a contratar para detectar y corregir posibles desviaciones respecto de las óptimas de los años precedentes. En cualquier caso, para este año Eroski tiene la voluntad de ampliar la aplicación del optimizador diseñado sobre todo a centros con tarifa 6.1A o 6.1B.

Para finalizar, indicamos que en los dos casos estudiados hay

centros en los que las potencias contratadas están bien ajustadas y centros en los que la desviación con respecto de las óptimas es grande, casi siempre, como se ha indicado anteriormente, por un exceso de las potencias contratadas.

Como conclusión final, tanto la UPV/EHU como Eroski califican los resultados de la aplicación de este proyecto como muy satisfactorios.

BIBLIOGRAFÍA

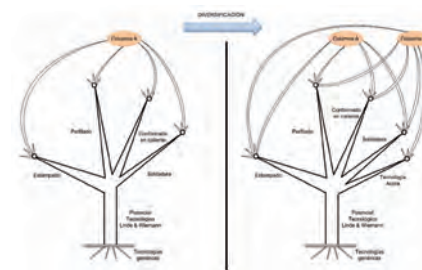
- [1] European Network of Transmission System Operators for Electricity. *ENTSO-E Overview of Transmission Tariffs in Europe: Synthesis 2015*.
- [2] Commission de Régulation de l'Electricité et du Gaz (CREG). *Tarifs pour utilisation du réseaux et services auxiliaires*.
- [3] Autorità per l'energia elettrica il gas e il sistema idrico (AEEG). *Tariffe de distributione*.
- [4] Commission de Régulation de l'Énergie (CRE). *Tarifs d'Utilisation du Réseau Public d'Électricité (TURPE)*.
- [5] Comisión Nacional de Energía (CNE). *Peajes de acceso de energía eléctrica*.
- [6] Real Decreto 1164/2001, BOE nº 268, 8 de noviembre de 2001.
- [7] Real Decreto 1164/2001, modificación del 10 de octubre de 2015.
- [8] S. Boyd, L. Vandenberghe. *Convex Optimization*, Cambridge University Press, Cambridge, 2004.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por Eroski S. Coop. y el Proyecto del Ministerio de Economía y Competitividad de España, Ref. MTM2013-40824-P.

Desarrollo del concepto de árbol multitecnológico: una aplicación en la industria auxiliar del automóvil

Development of the multitechnological tree concept: an application to the automotive industry



Victoria Muerza- Marín¹, Emilio Larrodé- Pellicer¹, Oliver Díez²

¹ UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA. Dpto. de Ingeniería Mecánica. C/María de Luna, s/n – 50018. Zaragoza. Tfno: +34 976 761888. vmuerza@unizar.es

² LINDE+ WIEMANN. Polígono Industrial Can Illa, Av. Millenari de Catalunya, 34 – 08530 La Garriga (Barcelona).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8002> | Recibido: 16/03/2016 • Aceptado: 26/04/2016

ABSTRACT

- Technological diversification is revealed as a usefulness strategy in the automotive industry as it reduces the company's global risk in the medium to long term due to the high level of competition. However, technological diversification also implies a risk for the company since it involves the reservation of resources, which is associated with cost. It is therefore a decision that must be studied in depth. This paper presents: (i) the concept of multi-technological tree, consisting on a technology tree of multi-technology basis, as a tool for identifying diversification opportunities, and (ii) the indicators to be considered when identifying the key technologies of an organization. This concept has been applied to a company of the automotive supply industry.
- **Keywords:** Industrial and technological diversification; key technology; technological tree; multi-technological tree; automotive supply industry.

RESUMEN

La diversificación tecnológica se desvela como una estrategia de gran utilidad en el sector del automóvil ya que reduce el riesgo global de la empresa en el medio y largo plazo debido a la gran competencia existente. Sin embargo, la diversificación tecnológica entraña asimismo un riesgo para la empresa puesto que implica la reserva de recursos de la organización, lo que lleva asociado un coste, y por tanto es una decisión que debe ser estudiada en profundidad. Este artículo presenta: (i) el concepto de árbol multitecnológico, consistente en un árbol tecnológico de base multitecnológica como herramienta para la identificación de oportunidades de diversificación, y (ii) los indicadores a tener en cuenta a la hora de identificar las tecnologías clave de una organización. Este concepto ha sido aplicado a una empresa del sector auxiliar del automóvil.

Palabras clave: Diversificación industrial y tecnológica; tecnología clave; árbol tecnológico; árbol multitecnológico; sector auxiliar del automóvil.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día existen múltiples factores que afectan al correcto desarrollo y funcionamiento de las empresas. El dinamismo y la creciente complejidad de los mercados, así como la globalización

de la economía están llevando a muchas empresas a reorganizar sus estrategias, con objeto de ser competitivas y mejorar su posición en el mercado. A este respecto, un proceso combinado de entrada y salida en el mercado permite a las empresas adaptarse a los cambios del mercado y de la tecnología como respuesta a la modificación de la composición de sus negocios en el tiempo [7]. Las empresas que operen en industrias competitivas tienen incentivos para diversificar constantemente su base tecnológica con el fin de mejorar la calidad de sus productos y de esa forma evitar la vulnerabilidad a los competidores potenciales [4].

El enfoque basado en los recursos [10,13,17] sugiere que las ventajas competitivas de una empresa provienen de sus capacidades internas, donde los recursos de la empresa se utilizan como fuerzas impulsoras para la búsqueda de nuevas oportunidades de negocio. Por tanto, las empresas se encuentran con la necesidad de identificar y evaluar si sus capacidades internas (recursos humanos, tecnología) y *know-how*, son idóneas para un proceso de diversificación tecnológica. En concreto, en las empresas que pertenecen al sector del automóvil la competencia existente entre ellas obliga a introducir mejoras e innovaciones tecnológicas tanto en el producto como en el proceso productivo, lo que les confiere una mejora de su competitividad. La diversificación tecnológica es una de las claves para mejorar esta competitividad.

La Cátedra de Competitividad y Diversificación Industrial y Tecnológica de la Universidad de Zaragoza ha elaborado una metodología para el desarrollo de procesos de diversificación tecnológica [9,11,12] que consta de tres fases: (i) evaluación de la idoneidad de la diversificación, que incluye la formulación del problema y la selección de aquellas empresas que tienen potencial para llevar a cabo un proceso de diversificación mediante la utilización de técnicas multicriterio; (ii) selección de la estrategia de diversificación, donde se confirma la idoneidad de la diversificación, se construye el árbol tecnológico de la empresa como base para la selección de la estrategia tecnológica (desde un punto de vista *top-down* o *bottom-up*) y se extrae el conocimiento relevante; (iii) implementación de la estrategia de diversificación, que consiste en el diseño del plan de negocio apropiado para la implementación de la alternativa tecnológica seleccionada (producto o cartera de productos); aquella que sea la más efectiva, eficaz y eficiente para implementar la estrategia de diversificación.

Este artículo se va a centrar en la segunda fase de la metodología presentada, en particular en el concepto de árbol tecnológico [5] por ser una etapa fundamental en la identificación de nuevas alternativas debido a su sistemática estructurada y ágil. Sin em-

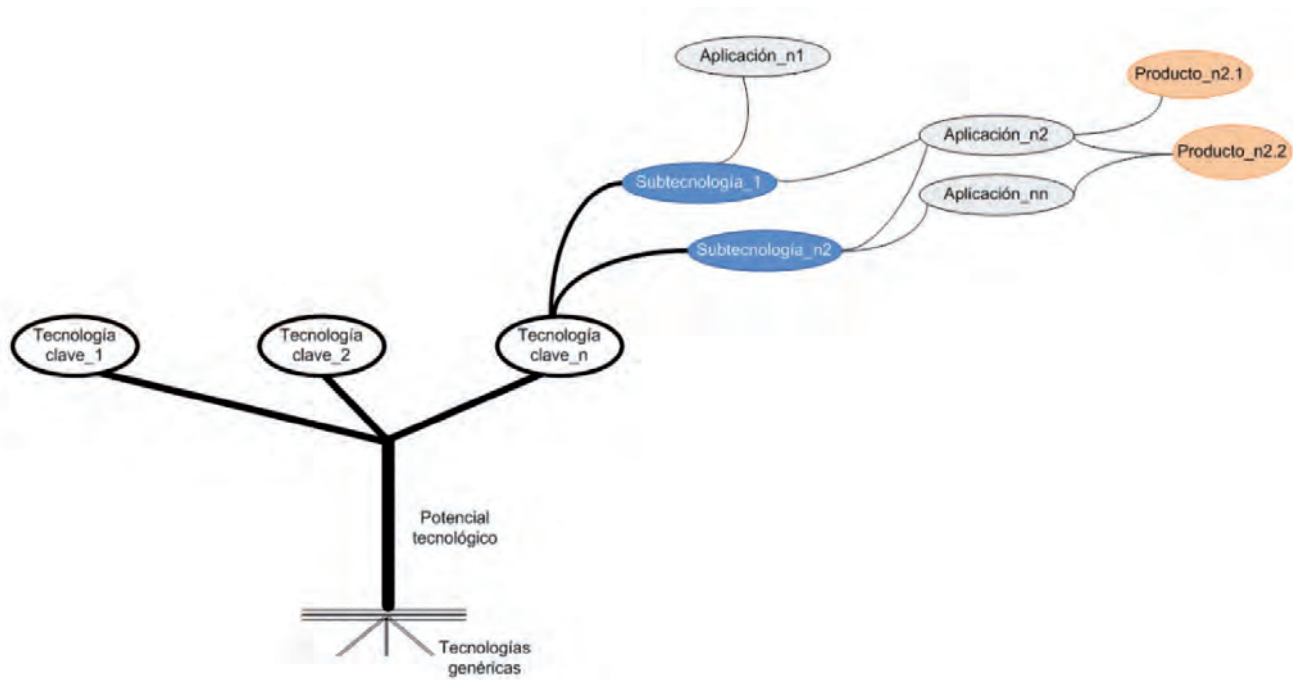


Figura 1: Árbol tecnológico de la empresa [Adaptado de 12]

bargo, la aplicación de esta herramienta ha supuesto hasta ahora un análisis unidimensional de la tecnología. Este artículo propone una nueva aplicación de este concepto cuando se utilizan varias tecnologías para la fabricación de un producto (árbol multitecnológico), el cual se utilizará como herramienta para la identificación de oportunidades de diversificación. Además, se propone que para identificar las tecnologías clave de una empresa (aquellas que se utilizan para desarrollar los arboles tecnológicos), se deben tener en cuenta estos cuatro indicadores: Eficiencia, Productividad, Accesibilidad y Aplicabilidad, los cuales deben ser validados para la confirmación de que esas tecnologías son claves para la empresa.

2. MARCO TEÓRICO DEL PROCESO DE DIVERSIFICACIÓN INDUSTRIAL Y TECNOLÓGICA

2.1. CONCEPTO DE DIVERSIFICACIÓN

La estrategia de diversificación ha sido ampliamente estudiada desde diferentes perspectivas en los últimos cuarenta años, y quizás éste es el motivo por el que aún no existe un acuerdo claro sobre la forma de conceptualizar, definir y medir esta estrategia de negocio [15,16].

Una de las definiciones más comúnmente aceptada es propuesta por Ansoff en su matriz producto-mercado [1] donde describe las opciones de crecimiento de una empresa (aumento de las ventas) en términos de productos y mercados. De acuerdo con esta definición, la diversificación ocurre cuando una empresa produce nuevos productos que suponen la entrada en nuevos mercados.

[9] definen la diversificación tecnológica como la búsqueda de nuevos productos y mercados basados en la explotación del potencial tecnológico de la empresa por medio de la identificación de sus tecnologías clave, ventajas competitivas y oportunidades potenciales. Estos autores diseñan y desarrollan un marco metodológico global para el proceso de diversificación tecnológica. En este contexto, [11] y [12] aplican un procedimiento multicriterio y su correspondiente herramienta de toma de decisiones (Decision Support System, DSS) para la selección del mejor producto en un proceso de diversificación tecnológica relacionada. En este

artículo, se entiende por diversificación tecnológica como la incorporación de una nueva tecnología clave que aporta una ventaja competitiva en un nuevo producto que puede abarcar nuevos mercados.

2.2. METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DE PROCESOS DE DIVERSIFICACIÓN TECNOLÓGICA

Conforme al marco metodológico propuesto en [11] y [12] para los procesos de diversificación basados en las tecnologías clave de la empresa, en lo que sigue se contemplan tres fases:

- Fase 1: Evaluación de idoneidad de diversificación tecnológica:
 - Etapa 1.1: Formulación del problema.
 - Etapa 1.2: Evaluación de idoneidad multicriterio.
- Fase 2: Selección de la estrategia de diversificación tecnológica:
 - Etapa 2.1: Confirmación de la idoneidad de diversificación.
 - Etapa 2.2: Construcción del árbol tecnológico de la empresa.
 - Etapa 2.3: Selección de la estrategia tecnológica.
 - Etapa 2.4: Extracción de conocimiento y recomendaciones.
- Fase 3: Implementación de la estrategia de diversificación:
 - Etapa 3.1: Diseño de la estrategia de negocio.
 - Etapa 3.2: Proceso de implementación.

La Fase 1 ha sido presentada en [9]. Este trabajo se centra en el desarrollo de la Fase 2, particularmente en la Etapa 2.2 desde un punto de vista multitecnológico que se presenta con más detalle en la Sección 3.

3. DESARROLLO DEL ÁRBOL TECNOLÓGICO DE LA EMPRESA. UN ANÁLISIS MULTITECNOLÓGICO

3.1. CONCEPTO DE ÁRBOL TECNOLÓGICO Y TECNOLOGÍAS CLAVE

El concepto de árbol tecnológico fue introducido por el grupo GEST (*Groupe d'Etude des Stratégies Technologiques*) a mediados de los años ochenta [5] para representar la capacidad de desarro-

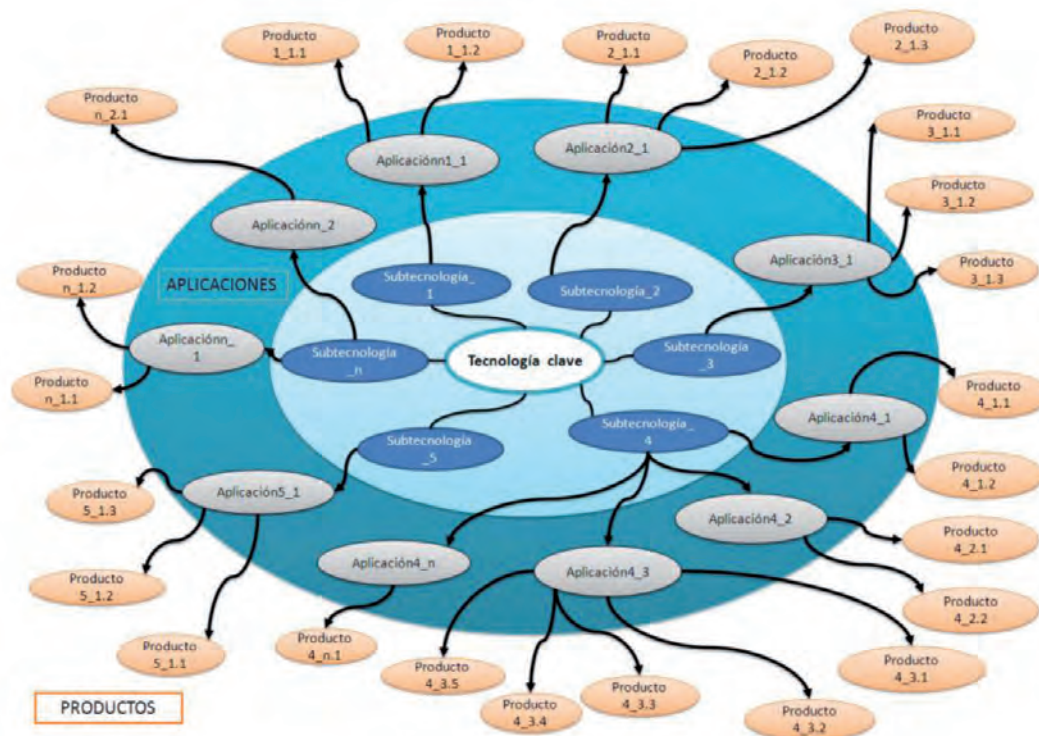


Figura 2: Ejemplo de árbol tecnológico basado en una tecnología clave [12]

llo tecnológico de la empresa en base a sus tecnologías clave. Más recientemente, [12] proponen el concepto de:

- (i) Árbol tecnológico de la empresa: representa la capacidad de desarrollo tecnológico de la empresa con respecto a sus tecnologías clave. Las raíces del árbol presentan las tecnologías genéricas, el tronco es el potencial industrial y tecnológico de la empresa, las principales ramas son las tecnologías clave y las otras ramas representan sus subtecnologías, aplicaciones y productos asociados (ver Figura 1).
- (ii) Árbol tecnológico basado en una tecnología clave: cada una de las ramas principales (tecnologías clave) puede ser desarrollada en más detalle (ver Figura 2) considerando sus correspondientes subtecnologías, aplicaciones y productos.

Esta es la principal diferencia con respecto a la definición original [5], donde las ramas de un árbol tecnológico (árbol para una tecnología clave) son los sectores de actividad industrial y los subsectores y productos son representados por medio de la "fruta". Como puede observarse, esta representación supone la búsqueda de alternativas en producto partiendo desde un punto de vista unidimensional, es decir, partiendo de una única tecnología clave.

El concepto de tecnología ha evolucionado con el tiempo. [2] pone de manifiesto la acordanza de algunos autores en cuanto a

Indicador	¿Disponer/Incorporar esta tecnología...	Validación
P1: Eficiencia	... supone un ahorro en el consumo energético dentro del proceso productivo o producto?	Si
P2: Productividad	... supone un aumento en la productividad de la empresa (aumento de unidades producidas, disminución del tiempo de fabricación)?	Si
P3: Accesibilidad	... está al alcance de cualquier empresa?	No
P4: Aplicabilidad	... es aplicable para la fabricación de varios productos?	Si

Tabla 1: Identificación de las tecnologías clave de una empresa

que la respuesta sobre si algo es tecnología o no, está íntimamente relacionada con la pregunta misma de cómo llevar a cabo una acción sobre algo y cómo lograr un resultado concreto sobre ese algo. Como resultado de esta pregunta se obtendrá la representación de un conocimiento particular que puede ser aplicado tanto a la resolución de un problema como a la elaboración de un producto o el alcance de un objetivo, con la ayuda y utilización de un conjunto de actividades, medios y métodos. Tal y como el autor argumenta, a este conocimiento o *know-how* que aplicamos, lo podemos llamar tecnología.

La tecnología tiene un papel fundamental

en la determinación de la ventaja competitiva de la empresa, tanto en costes como en diferenciación [14]. Cuando se aplica correctamente, la tecnología puede variar el comportamiento de la demanda mediante la introducción al mercado de nuevos productos que posean nuevas características técnicas o funcionales, asimismo puede variar la oferta mediante la obtención del mismo producto a menor coste [2]. En consecuencia, las empresas deben explorar y explotar todas las posibles aplicaciones de las tecnologías esenciales [6] incluso si eso significa la entrada en mercados muy diferentes. A efectos de este artículo, el concepto de tecnología se relaciona con el *know-how* de la empresa, es decir, el conocimiento y las habilidades y capacidades que una empresa tiene disponible en un momento determinado.

[3] señala que el concepto de tecnología clave proviene de dos interpretaciones marcadamente diferentes. Por un lado, una tecnología puede ser considerada potencialmente clave o crítica debido a su atractivo (impacto potencial favorable de cualquier tipo) y a su impacto en las posiciones competitivas del mercado. La segunda interpretación proviene de las consideraciones de la dinámica de la tecnología, donde las tecnologías son priorizadas en función de su potencial impacto económico y social.

En este artículo se considera que la tecnología clave es aquella en la que se sustenta el presente y futuro de la empresa. Supone un elemento diferenciador frente a la competencia haciéndola

la más competitiva. A este respecto, [2] afirma que para lograr competitividad es necesario poseer un nivel tecnológico acorde al sector en que se mueve la empresa y mantener una adecuada velocidad de actualización tecnológica. La tecnología de una empresa se puede clasificar entre clave y no clave.

En este artículo se propone la identificación de las tecnologías cla-

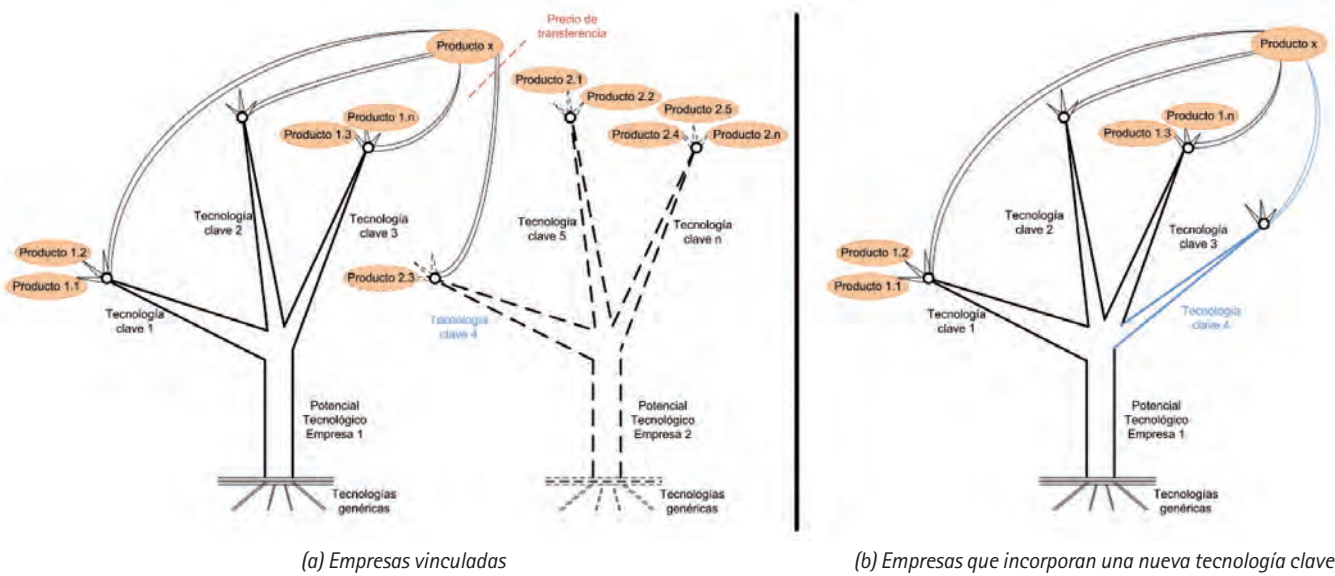


Figura 3: Árbol multitecnológico de un producto

ve de la empresa en base a cuatro indicadores. Los indicadores están directamente relacionados con la competitividad de la empresa desde un punto de vista interno y externo en consonancia con la definición expuesta. Estos son: *Eficiencia*, *Productividad*, *Accesibilidad* y *Aplicabilidad* de la tecnología. Todos los indicadores deberán cumplir con la validación mostrada en la Tabla 1, para que una tecnología sea considerada como tecnología clave.

Las tecnologías no clave representan al resto de tecnologías de la empresa:

- **Tecnologías básicas:** son tecnologías del presente. Se consideran consolidadas y son requeridas para el desarrollo de los productos de la empresa pero su posesión no implica una ventaja competitiva puesto que también son conocidas por la competencia.
- **Tecnologías innovadoras:** se distinguen dos subgrupos. Por un lado, las *tecnologías incipientes* que son aquellas que tienen un impacto conocido a corto plazo y *tecnologías emergentes*, aquellas de las que se desconoce el impacto que puedan tener, siendo unas tecnologías a largo plazo e inmaduras puesto que se encuentran en sus primeras fases de desarrollo.
- **Tecnologías auxiliares:** Son el estándar de la industria. En el pasado suponían una diferenciación para la empresa.

Partiendo de la configuración de árbol tecnológico descrita en esta Sección, y sabiendo que la selección de la mejor alternativa o estrategia para llevar a cabo una diversificación es un problema

altamente complejo, se requiere la consideración de múltiples escenarios, actores y criterios. Su resolución combina la información objetiva relativa al mercado, los competidores y la empresa (aspectos económicos y tecnológicos) con el conocimiento subjetivo y las preferencias del decisor.

La selección de la estrategia tecnológica puede ser llevada a cabo por medio de dos enfoques diferentes [12]:

- Enfoque Bottom-Up** (orientación basada en la tecnología): después de la identificación de las tecnologías claves de la empresa, sus correspondientes subtecnologías, aplicaciones y productos, en otras palabras, una vez que se ha construido el árbol tecnológico de la empresa, se selecciona la estrategia tecnológica más apropiada (productos o combinaciones de productos).
- Enfoque Top-Down** (orientación basada en el mercado): después de que la empresa (con el apoyo del grupo de analistas) identifica un conjunto de productos potencialmente interesantes desde una perspectiva de mercado y que puedan ser desarrollados por medio de tecnologías relacionales, se selecciona el producto más apropiado para alcanzar las metas propuestas por la empresa teniendo en cuenta múltiples aspectos o criterios (económicos, tecnológicos, ambientales, etc).

3.2. DESARROLLO DE ÁRBOLES TECNOLÓGICOS DE BASE MULTITECNOLÓGICA: ÁRBOL MULTITECNOLÓGICO

Tal y como se ha comentado en el apartado anterior, el desarrollo tradicional de los árboles tecnológicos se realiza partiendo de una única tecnología clave. Sin embargo, desde un punto de vista *top-down*, existen algunos productos que necesitan varias tec-

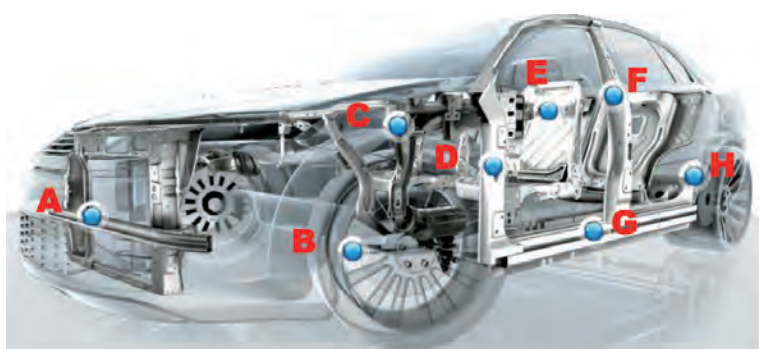


Fig. 4: Productos fabricados por la empresa Linde Et Wiemann (Fuente: Linde Et Wiemann)

A	Tablero frontal
B	Bastidor
C	Cockpit
D	Columna A
E	Asiento
F	Columna B
G	Talonera
H	Tubo de escape

nologías clave para poder ser diseñados y fabricados. Esto sucede especialmente en la industria auxiliar del automóvil, donde para fabricar una pieza se necesita del dominio de varias tecnologías, por tanto el enfoque varía y se puede hablar de árbol multitecnológico o árbol tecnológico de base multitecnológica (ver Figura 3) y puede ser definido como el desarrollo de alternativas de producto en base al dominio de varias tecnologías clave, ya sea por parte de una empresa o empresas vinculadas. Sin embargo, hay muchas empresas que no poseen todas las tecnologías claves necesarias y deben subcontratar la operación a terceros (en algunos casos empresas vinculadas que pueden pertenecer a países diferentes), con la consecuente problemática en cuanto a la determinación de los precios de transferencia. La determinación del precio de transferencia adecuado es un problema altamente complejo puesto que en algunos casos debe ser fijado en función del cumplimiento de la

normativa y legislación vigente en diferentes países, y favoreciendo el principio de libre competencia. El estudio de este problema será objeto de futuras investigaciones.

Analizando un árbol multitecnológico se plantea la posibilidad de llevar a cabo un proceso de diversificación a partir de varias tecnologías que puede poseer o no la empresa (Figura 3a), y que son clave para el desarrollo del nuevo producto. El dominio de estas tecnologías clave posibilita la fabricación de un producto competitivo. Por otro lado, las empresas líderes [8] para mantener su posición competitiva en el mercado pueden introducir innovaciones, ya sea en el producto o en el proceso de fabricación a través de la adopción de una mejora tecnológica. Un proceso de diversificación permite adquirir la tecnología clave e incorporarla a su proceso productivo (Figura 3b), o introducir una innovación en el producto o proceso de fabricación. En el caso de una innovación en el proceso de fabricación, la mejora de la competitividad se podría conseguir a través de una disminución de los costes que supone la fabricación de un producto, o la mejora de la calidad del mismo. En resumen, el árbol multitecnológico puede ser desarrollado por una sola empresa incorporando a su potencial tecnológico una nueva tecnología clave, o introduciendo una innovación que mejore una tecnología.

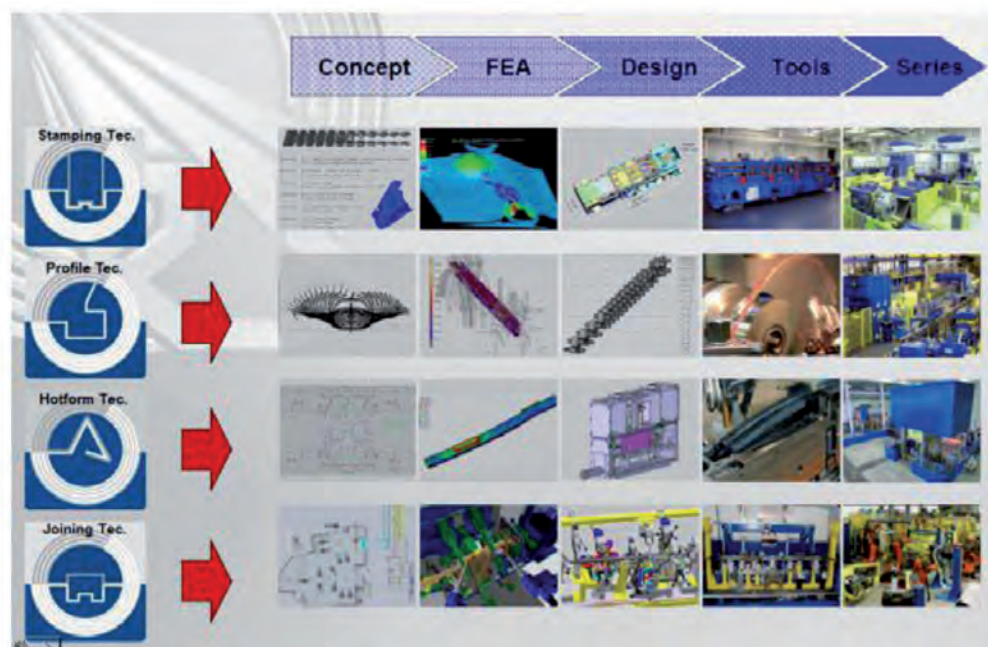


Fig. 5: Tecnologías clave de fabricación (Fuente: Linde Et Wiemann)

4. CASO DE ESTUDIO

En este apartado se presenta una aplicación de diversificación a partir del desarrollo del concepto de árbol multitecnológico de la empresa.

Linde Et Wiemann es una empresa que a nivel mundial está presente en doce países. Su sede principal se ubica en Alemania; en España la compañía posee dos sedes en la provincia de Barcelona, en los términos municipales de La Garriga y Esparreguera, y una sede en la provincia de Zaragoza, en el término municipal de Pedrola. La empresa es un suministrador de nivel 1 (Tier-1) de Daimler, GM Opel, BMW, Audi, Volkswagen, SEAT, Skoda, Ford. Su actividad es la fabricación de elementos que conforman la carrocería autoportante de un automóvil (ver Figura 4). Estos elementos son muy importantes puesto que inciden directamente sobre la seguridad del vehículo. En la fábrica ubicada en Pedrola (Zaragoza) se producen la talonera, el *cockpit*, los refuerzos de la columna A y columna B, y son los que se van a tener en cuenta en este artículo.

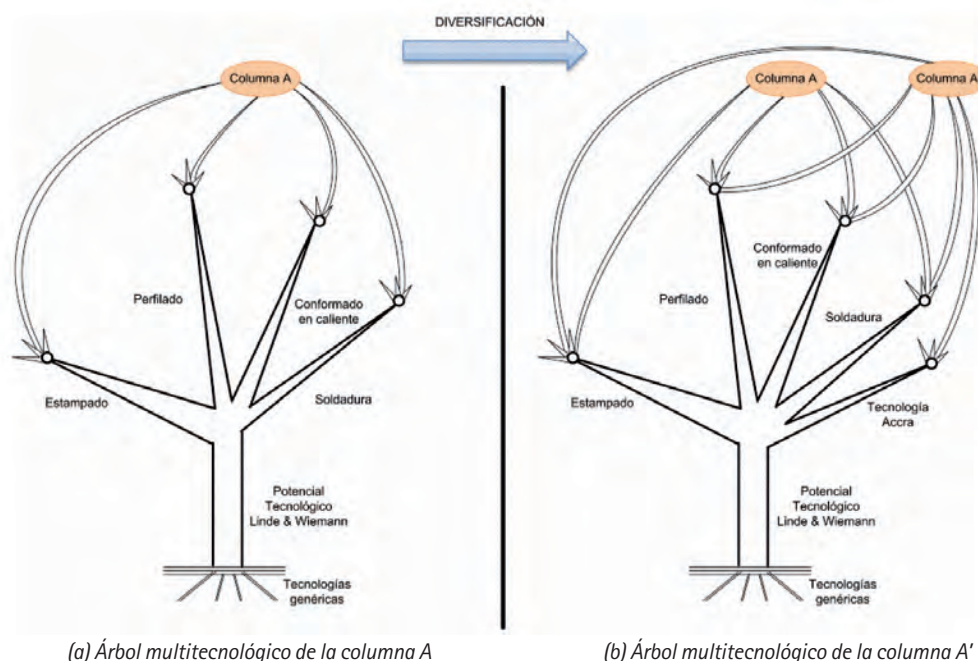


Fig. 6: Árbol multitecnológico de uno de los productos de la empresa Linde Et Wiemann

En el diseño de un componente mecánico debe tenerse en cuenta la dependencia existente entre tres factores clave: (i) Funcionalidad, (ii) Material y (iii) Proceso de fabricación. La funcionalidad de la pieza (requerimientos mecánicos a los que se verá sometido durante su vida útil) determinan el material a elegir, y a su vez, las características de dicho material determinarán la forma en que puede ser procesado. Además, se debe tener en cuenta el ensamblaje del componente en un conjunto final y el método de unión a utilizar. Por otro lado, existen procesos de fabricación que modifican la estructura interna del material que se procesa y que afecta a las propiedades mecánicas de dicho material. Por tanto, debe analizarse como afectaría este cambio a la idoneidad del componente de cara a su función final.

Los productos de la empresa considerados comparten las siguientes características:

- Muy alta exigencia mecánica durante su vida útil.
- Aptitud para ser conformados mediante procesos de deformación.
- Aptitud para ser unidos posteriormente mediante soldadura.

Las tecnologías clave que utiliza la empresa para la fabricación de los cuatro productos considerados son cuatro (Figura 5): (i) Estampado, (ii) Perfilado, (iii) Conformado en caliente, y (iv) Soldadura. Estas tecnologías son clave para la empresa puesto que su utilización supone un aumento en la eficiencia del proceso productivo, una mejora de la productividad de la empresa, no están al alcance de cualquier empresa y además, son aplicables para la fabricación de varios productos, validándose por tanto los criterios establecidos en la Sección 3.1 para determinar si una tecnología es o no clave.

Por tanto, la configuración del árbol multitecnológico de la empresa incluiría inicialmente una base con cuatro tecnologías clave (Figura 6a).

Los productos fabricados por la empresa son elementos que conforman la carrocería autoportante de un automóvil y por tanto son elementos de elevada importancia estructural en materia de seguridad del vehículo. Estos elementos están fabricados en acero. En el caso concreto del refuerzo de la columna A, se exige a la empresa una resistencia mecánica de 1500 MPa, lo que implica un elevado coste para el fabricante puesto que estas resistencias las poseen los aceros de alta gama que son además difíciles de conformar por su extremada dureza. Sin embargo, la empresa ha desarrollado una innovación tecnológica en el proceso de conformado denominado tecnología Accra siguiendo una estrategia *top-down*. Esta innovación llevada a cabo permite fabricar piezas de cualquier tipo de sección o contorno a partir de aceros con valores de resistencia convencionales, que tras el proceso de conformado se transforman en acero de Ultra Alta Resistencia gracias al tratamiento térmico sufrido durante dicho proceso.

En el proceso de fabricación del refuerzo (columna A), con este nuevo proceso utilizando la tecnología Accra (columna A') contempla las siguientes etapas de acuerdo con la mejora tecnológica introducida (ver Figura 7):

- **Etapa 1:** Perfilado inicial en frío, obteniendo el perfil base.
- **Etapa 2:** Proceso de austenización. Calentar el perfil hasta que el acero alcance los 900°C y su estructura se convierta íntegramente en austenita.
- **Etapa 3:** Colocación del perfil y cierre del útil. Una vez calentado el perfil hasta la temperatura deseada, el robot coloca la pieza en el útil de la prensa que le dará la forma

deseada. Debido a la alta temperatura, al bajar el útil de cierre se produce la primera deformación de la pieza. Una vez cerrado, se insertan en los extremos del perfil los topes por los cuales se inyectará el aire a presión y posteriormente el agua de enfriado.

- **Etapa 4:** Inyección de aire a presión. Se inyecta aire a muy alta presión mediante las bocas de los topes de los extremos para que el acero, debido a su ductilidad por la alta temperatura a la que se encuentra, se expanda hacia las paredes del útil y adquiera la forma deseada. Simultáneamente a la inyección de aire, los topes se desplazan en la dirección del eje geométrico del perfil para conseguir que el espesor final sea constante a lo largo de todas las secciones que conforman la pieza. La velocidad de desplazamiento de los inyectores de aire se calcula mediante programas de simulación y debe ser aquella que evite que se produzcan adelgazamiento en la parte central y ondulaciones en los extremos.
- **Etapa 5:** Enfriamiento rápido. Una vez el perfil ha adquirido la forma deseada, la siguiente secuencia consiste en enfriar el acero a muy alta velocidad para que se produzca una transformación en la estructura interna del material transformando toda la austenita íntegramente en martensita alcanzando así un acero de Ultra Alta Resistencia. Para ello, se inyecta agua fría por los mismos inyectores por donde se introduce el aire a presión en la etapa anterior. La velocidad de enfriamiento debe ser tal que permita que toda la estructura formada a 900°C por austenita se convierta íntegramente en martensita.
- **Etapa 6:** Extracción de la pieza final. Al finalizar el enfriamiento de la pieza, el robot extrae el perfil final conformado de acuerdo a los requisitos geométricos y de resistencia planteados. A continuación, se procede a la soldadura de una serie de piezas para conseguir el conjunto final deseado que ya puede ser integrado en la carrocería autoportante del automóvil.

Las ventajas de utilizar esta mejora tecnológica frente a la estampación en caliente tradicional son:

- Excelentes tolerancias geométricas.
- Espesor constante a lo largo de todo el perfil.
- Calentamiento y enfriamiento directo frente al indirecto de la estampación en caliente.
- Uso de menor material de partida.
- Soldadura únicamente con elementos secundarios, evita

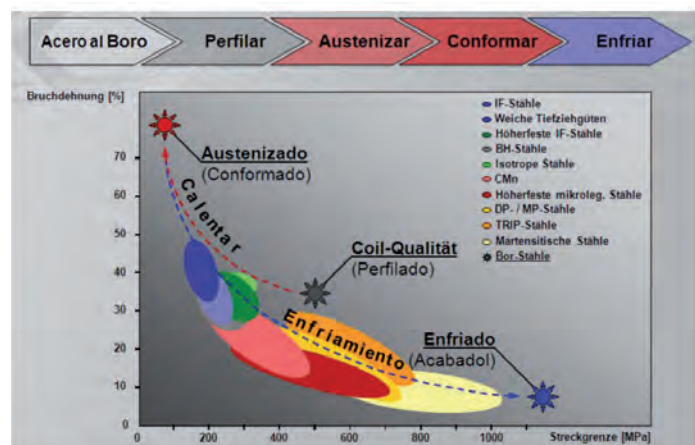


Fig. 7: Diagrama resumen del proceso de fabricación de acuerdo con la mejora tecnológica introducida

la soldadura entre diferentes zonas del perfil principal con sección distinta.

- Uso de un acero de partida más barato que un acero martensítico.

Por tanto, a través de la innovación realizada en el proceso productivo por medio de una mejora tecnológica no fácilmente accesible por las empresas del sector (P3), Linde & Wiemann logra un incremento del valor del producto originario (columna A) con una disminución de los costes de fabricación (P1), ya que partimos de un acero que no es de alta gama que es difícil de conformar y requiere mayor gasto energético sin comprometer la calidad del producto. Además, se mejora su productividad (P2) dada la reducción en tiempo de enfriamiento y calentamiento, uso de menor material de partida y reducción de la soldadura de elementos secundarios, y además esta tecnología se puede aplicar a otros productos existentes con similares características dentro del vehículo (P4), obteniéndose así una mayor competitividad tecnológica. A partir de la validación de los indicadores necesarios para determinar si una tecnología es clave o no, y atendiendo a lo anteriormente expuesto, se puede constatar que la tecnología Accra es una tecnología clave y por tanto se puede incorporar al árbol multitecnológico de la empresa.

El nuevo esquema del árbol multitecnológico se muestra en la Figura 6b donde se puede ver que ha habido una incorporación de una nueva tecnología clave en el potencial tecnológico de Linde & Wiemann, posibilitando la diversificación de producto y por tanto con capacidad para producir un nuevo producto (columna A'), mejorando la competitividad de la empresa.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Este trabajo profundiza en una metodología de desarrollo de procesos de diversificación tecnológica esbozada en trabajos anteriores de los autores, en particular, en la segunda etapa (construcción del árbol tecnológico de la empresa) de la segunda fase (selección de la estrategia de diversificación). Hasta ahora, el concepto de árbol tecnológico se había interpretado desde un punto de vista unidimensional de la tecnología. Este artículo muestra la aplicación de este concepto desde un punto de vista multitecnológico, es decir, partiendo de la necesidad de utilizar varias tecnologías clave para la fabricación de un producto y desarrollando el concepto de árbol multitecnológico.

Por otro lado, se ha propuesto la identificación de una tecnología clave (aquellas que se utilizan para desarrollar los árboles tecnológicos) en base a cuatro indicadores: Eficiencia, Productividad, Accesibilidad y Aplicabilidad, que deben ser validados para confirmar que una tecnología llegue a ser clave en una empresa.

En la Sección 4 se ha presentado el caso de estudio de la empresa Linde & Wiemann, dedicada a la fabricación de elementos que conforman la carrocería autoportante de un automóvil, donde se muestra el árbol multitecnológico de uno de los productos de la empresa que contempla la identificación de cuatro tecnologías clave: Estampado, Perfilado, Conformado en caliente, y Soldadura. Además, en éste árbol multitecnológico, se puede ver cómo a través de la incorporación de una nueva tecnología clave, se puede desarrollar un nuevo producto o una mejora de uno existente, que implica un aumento de la competitividad de la empresa. En resumen, el método de desarrollo del árbol multitecnológico, permite identificar las tecnologías claves que son necesarias para el desarrollo o mejora de un producto, que posibiliten a la empresa llevar a cabo un proceso de diversificación, aumentando así su competitividad.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ansoff, H. I. The Changing Manager. En: H.I. Ansoff, R.P. Declerck y R.L. Hayes (eds.). From Strategic Planning to Strategic Management. New York: John Wiley & sons, 1976.
- [2] Betancur, J. D. Conceptos básicos sobre la tecnología. Revista Universidad Eafit, Enero-Marzo, pp. 117-133, 1998.
- [3] Durand, T. Twelve lessons from 'key technologies 2005': The french technology foresight exercise. Journal of Forecasting, 22(2), 161-177, 2003. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/for.856>
- [4] García-Vega, M. Does technological diversification promote innovation? An empirical analysis for European firms. Research Policy, vol. 35, pp. 230-246, 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.respol.2005.09.006>
- [5] G.E.S.T, Grappes technologiques. Les nouvelles strategies d'entreprise, McGraw-Hill, Paris, 1986.
- [6] Hamel, G., y Prahalad, C. K. Competing for the future. Harvard Business Review, 72(4), 122-128, 1994.
- [7] Helfat, C. E. y Eisenhardt, K. M. Inter-temporal economies of scope, organizational modularity, and the dynamics of diversification. Strategic Management Journal, vol. 25 (13), pp. 1217-1232, 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/smj.427>
- [8] Kotler, P., y Singh, R. Marketing Warfare in the 1980s. Journal of Business Strategy. Winter 1981, pp. 30-41.
- [9] Larrodé, E., Moreno-Jiménez, J. M., y Muerza, M. V. An AHP-multicriteria suitability evaluation of technological diversification in the automotive industry. International Journal of Production Research, vol. 50(17), pp. 4889-4907, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2012.657975>.
- [10] Mahoney, J. T., y Pandian, J. R. The resource-based view within the conversation of Strategic Management. Strategic Management Journal, vol. 13(5), pp. 363-380, 1992. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/smj.4250130505>.
- [11] Moreno-Jiménez, J. M., De Arcocha, D., Larrodé, E., y Muerza, V. An AHP-multicriteria selection of products in industrial and technological diversification strategies. In F. Dargam, B. Delibasic, J. E. Hernández, S. Liu, R. Ribero & P. Zarate (Eds.), Operations Management Trends & Decision Support Systems and Solutions in Industries, University of Liverpool Management School, 2012, pp. 43-47.
- [12] Muerza, V., De Arcocha, D., Larrodé, E., y Moreno-Jiménez, J. M. The multicriteria selection of products in technological diversification strategies: An application to the Spanish automotive industry based on AHP. Production Planning & Control, vol. 25(8), pp. 715-728, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/09537287.2013.798089>.
- [13] Penrose, E. T. The theory of the growth of the firm. New York: John Wiley, 1959.
- [14] Porter, M. E. Competitive advantage: Creating and sustaining superior performance. New York: The Free Press, 1985.
- [15] Ramanujan, V., y Varadajan, P. Research on corporate diversification: A synthesis. Strategic Management Journal, vol. 10(6), pp. 523-551, 1989. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/smj.4250100603>.
- [16] Tan, B., Chang, H., y Lee, C. Relationships among industry environment, diversification motivations and corporate performance: An empirical study of the automobile industry in Taiwan. International Journal of Commerce and Management, vol. 17(4), pp. 326-343, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/10569210710844390>.
- [17] Wernerfelt, B. A resource-based view of the firm. Strategic Management Journal, vol. 5(2), pp. 171-180, 1984.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la empresa Linde & Wiemann por las facilidades dadas en la realización del caso de estudio que se plantea en este artículo y que ha sido realizado como consecuencia de un contrato de investigación entre la empresa y la Universidad de Zaragoza.

INFORME ANUAL ESTADÍSTICO DEL PROCESO EDITORIAL DE DYNA 2016

Nº DE ARTÍCULOS RECIBIDOS	267	100%
Nº DE ARTÍCULOS TRAMITADOS	198	74%
Nº DE ARTÍCULOS TRAMITADOS ACEPTADOS	41	15%
Nº DE ARTÍCULOS TRAMITADOS RECHAZADOS	157	59%
Nº DE ARTÍCULOS NO TRAMITADOS (EN PROCESO)	69	26%
FACTOR DE RECHAZO		79%

Cantidad	%
267	100%
198	74%
41	15%
157	59%
69	26%
	79%

Nº DE ARTICULOS RECIBIDOS POR DISCIPLINA		
ACÚSTICA	2	0,85%
CAMBIO Y DESARROLLO SOCIAL	2	0,85%
CIENCIA DE LOS ORDENADORES	11	4,66%
ECONOMÍA DEL CAMBIO TECNOLÓGICO	10	4,24%
ECONOMÍA SECTORIAL	2	0,85%
ELECTROMAGNETISMO	1	0,42%
FÍSICA DE FLUIDOS	1	0,42%
HISTORIAS POR ESPECIALIDADES	7	2,97%
INDUSTRIAS DE LA INFORMACION Y DEL CONOCIMIENTO	17	7,20%
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA AERONAUTICA	2	0,85%
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA DEL MEDIO AMBIENTE	10	4,24%
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA ELÉCTRICAS	9	3,81%
MECÁNICA	6	2,54%
NUEVOS MATERIALES Y NANOTECNOLOGIAS	3	1,27%
ÓPTICA	5	2,12%
ORGANIZACIÓN INDUSTRIAL Y POLÍTICAS GUBERNAMENTALES	1	0,42%
ORGANIZACIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS	34	14,41%
ORGANIZACIÓN Y PLANIFICACIÓN DE LA EDUCACIÓN	4	1,69%
PLANIFICACIÓN URBANA	1	0,42%
PROCESOS TECNOLÓGICOS	1	0,42%
PSICOLOGÍA INDUSTRIAL	3	1,27%
TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN	28	11,86%
TECNOLOGÍA DE LA INSTRUMENTACIÓN	7	2,97%
TECNOLOGÍA DE LAS TELECOMUNICACIONES	1	0,42%
TECNOLOGÍA DE MATERIALES	2	0,85%
TECNOLOGÍA DE VEHÍCULOS DE MOTOR	5	2,12%
TECNOLOGÍA DEL CARBÓN Y DEL PETRÓLEO	1	0,42%
TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICAS	8	3,39%
TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA	1	0,42%
TECNOLOGÍA ENERGÉTICA	13	5,51%
TECNOLOGÍA INDUSTRIAL	17	7,20%
TECNOLOGÍA METALÚRGICA	1	0,42%
TECNOLOGÍA NUCLEAR	2	0,85%
TEORÍA Y MÉTODOS EDUCATIVOS	5	2,12%
TERMODINÁMICA	2	0,85%
TEORÍA Y MÉTODOS EDUCATIVOS	2	0,85%

TECNOLOGÍA INDUSTRIAL	3	1,27%
TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICAS	2	0,85%
ORGANIZACIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS	3	1,27%
TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICAS	1	0,42%

Nº DE ARTICULOS APROBADOS POR DISCIPLINA		
ACÚSTICA	1	0,95%
CAMBIO Y DESARROLLO SOCIAL	1	0,95%
CIENCIA DE LOS ORDENADORES	5	4,76%
ECONOMÍA DEL CAMBIO TECNOLÓGICO	8	7,62%
FÍSICA DE FLUIDOS	1	0,95%
HISTORIAS POR ESPECIALIDADES	6	5,71%
INDUSTRIAS DE LA INFORMACION Y DEL CONOCIMIENTO	8	7,62%
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA AERONAUTICA	2	1,90%
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA DEL MEDIO AMBIENTE	5	4,76%
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA ELÉCTRICAS	5	4,76%
MECÁNICA	3	2,86%
NUEVOS MATERIALES Y NANOTECNOLOGIAS	1	0,95%
ÓPTICA	4	3,81%
ORGANIZACIÓN INDUSTRIAL Y POLÍTICAS GUBERNAMENTALES	1	0,95%
ORGANIZACIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS	18	17,14%
ORGANIZACIÓN Y PLANIFICACIÓN DE LA EDUCACIÓN	1	0,95%
PSICOLOGÍA INDUSTRIAL	1	0,95%
TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN	6	5,71%
TECNOLOGÍA DE LA INSTRUMENTACIÓN	1	0,95%
TECNOLOGÍA DE LAS TELECOMUNICACIONES	1	0,95%
TECNOLOGÍA DE MATERIALES	1	0,95%
TECNOLOGÍA DE VEHÍCULOS DE MOTOR	1	0,95%
TECNOLOGÍA DEL CARBÓN Y DEL PETRÓLEO	1	0,95%
TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICAS	4	3,81%
TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA	1	0,95%
TECNOLOGÍA ENERGÉTICA	4	3,81%
TECNOLOGÍA INDUSTRIAL	5	4,76%
TECNOLOGÍA NUCLEAR	1	0,95%
TEORÍA Y MÉTODOS EDUCATIVOS	5	4,76%
TECNOLOGÍA INDUSTRIAL	1	0,95%
TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICAS	1	0,95%
ORGANIZACIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS	1	0,95%

Nº ARTÍCULOS RECHAZADOS SIN REVISIÓN ENTRE PARES	31	12%
Nº ARTÍCULOS ACEPTADOS SIN MODIFICACIONES	0	0%
Nº DE ARTÍCULOS PUBLICADOS	53	20%
Nº TOTAL DE PÁGINAS PUBLICADAS	712	100%
Nº TOTAL DE PÁGINAS DE ARTÍCULOS	370	54%
Plazo medio publicación (recepción-publicación)	290	días naturales
Desviación plazo publicación (recepción-publicación)	103	
Plazo medio evaluación	12	días naturales
Desviación evaluación	14	

Nº EVALUACIONES POR ARTÍCULO

1	16%	10%
2	28%	18%
3	30%	19%
4	31%	19%
5	21%	13%
6	12%	8%
7	15%	9%
8	3%	2%
9	3%	2%
10	1%	1%
Nº MEDIO DE EVALUACIONES POR ARTÍCULO	3,93	

- Los artículos deberán ser originales e inéditos y no deben de haber sido enviados simultaneamente a otros medios de comunicación.
- Tendrán siempre preferencia los que versen sobre temas relacionados con el objetivo, cobertura temática y/o lectores a los que se dirige la revista.
- Todos los trabajos serán redactados en castellano o inglés y deberán cumplir los siguientes requisitos:
 - Título en castellano e inglés de 150 caracteres máximo
 - Un breve resumen (Abstract), de unas 300 palabras, en castellano e inglés.
 - Entre tres y cinco palabras clave (Key words) en castellano e inglés, que permitan identificar la temática del artículo
 - No deberían de tener más de aproximadamente 5.500 palabras, o 17 páginas formato A4 en fuente Arial 10 con interlineado simple (Consultar con DYNA extensiones superiores).
 - Bibliografía relacionada o referencias según normas DYNA en www.revistadyna.com
- Con el objeto de facilitar la "revisión entre pares", el autor deberá asignar el código DYNA de 6 dígitos correspondiente a la temática del artículo, seleccionándolo de entre los códigos disponibles en la dirección de Internet: www.revistadyna.com
- Los originales se remitirán mediante nuestra página web (envío artículos), en formatos .DOC (msword), .RTF, o .TXT. Se recomienda una calidad mínima de 300ppp para las fotografías que se adjunten con el artículo. Se harán constar: título del artículo, nombre del autor, título académico, empresa o institución a la que pertenece, dirección electrónica, dirección postal y teléfono.
- Se someterán al Consejo de Redacción cuantos artículos se reciban, realizándose la "revisión entre pares" por los expertos del Consejo o los que éste decida. El resultado de la evaluación será comunicado directamente a los autores. En caso de discrepancia, el editor someterá el trabajo a un revisor externo a la revista cuya decisión será trasladada nuevamente al autor.
- Los autores aceptan la corrección de textos y la revisión de estilo para mantener criterios de uniformidad de la revista.
- La revista se reserva el derecho de no acusar recibo de los trabajos que no se ajusten a estas normas.
- Para mayor detalle sobre estas normas, por favor visite nuestra web <http://www.revistadyna.com> (en el apartado de "autores y evaluadores").
- Paper will be original and unpublished and it must not be concurrently submitted for publication elsewhere.
- Preference will be given to articles on the main subject areas of the Journal.
- Papers should be written in Spanish or English and should fulfil the following requirements:
 - Title in both English and Spanish with a maximum length of 150 characters.
 - Brief Summary or Abstract, about 300 words, in Spanish and English.
 - Between three and five keywords in English and Spanish, that identify the paper theme.
 - Written text should not exceed 5.500 words, or 17 A4 format pages in 10 size arial font single-spaced (For longer lengths consult with DYNA)
 - Bibliographical references according to DYNA norms at www.revistadyna.com
- To facilitate the "peer review" process, the author will assign the six digits DYNA code corresponding to the paper thematic, selecting it between the codes available at the Internet address: www.revistadyna.com
- Papers should be sent by our web page (envío artículos), in .DOC (MSWord), .RTF, or .TXT format. It is recommended a minimum quality of 3000 ppp for the pictures enclosed in the article. These papers will include: Article title, author name, academic title, company or institution, email, correspondence address and telephone.
- All papers must pass the Editorial Board (EB) evaluation process. The "peer review" will be made by the Editorial experts or those that the EB decides. The evaluation result will be directly communicated to the author. In case of discrepancy, the publisher will refer the work to an external reviewer whose decision will again be transferred to the author.
- The authors accept the text correction and the style revision to maintain uniformity criteria for the magazine.
- The journal reserves the right not to accept articles which do not comply with said instructions.
- To find more details about these instructions, please visit our web page <http://www.revistadyna.com> (authors and referees section).

DYNA

Ingeniería e Industria

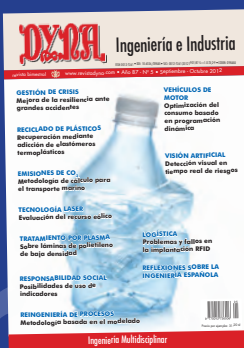
PROMOCIÓN: Suscripción a DYNA por 29,85 €/año

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.



DYNA

SUSCRIPCIÓN A LA REVISTA DE INGENIERÍA DYNA: 58% DE DESCUENTO PARA ESTUDIANTES

¿POR QUÉ SUSCRIBIRSE A DYNA?

- Fundada en 1926, DYNA es una de las revistas de ingeniería más prestigiosas e influyentes del mundo como lo acredita su inclusión en Journal Citation Reports (JCR) que edita anualmente Thomson-Reuters.
- El informe JCR publica anualmente los Factores de Impacto de las mejores revistas académicas a nivel internacional.

¿QUÉ SE OBTIENE CON LA SUSCRIPCIÓN?

El suscriptor recibe 6 números anuales de la publicación impresa en su domicilio, más una serie de servicios de valor añadido como:

- Mediante su usuario y contraseña, a través de la página web www.revistadyna.com, tienen acceso a los artículos publicados en formato Acrobat Reader. Un motor de búsqueda tipo Google permite realizar búsquedas (por palabras clave, título, autor, fecha...) en la base de datos de artículos publicados.
- Acceso web a todas las revistas digitales de DYNA: DYNA Management, DYNA Energía & Sostenibilidad y DYNA New Technologies
- Contacto con compañeros en la comunidad de lectores por medio de foros, encuestas, cartas al director...
- Mantenerse formado e informado sobre los últimos avances y noticias en la ingeniería.
- Boletín mensual por correo electrónico.
- Alertas configurables por palabras clave sobre contenidos.

¿QUÉ PRECIO TIENE?

La suscripción anual a DYNA para estudiantes cuesta **37,00€**
Ahorro del 58% sobre precio tarifa 64,00€/año.

¿CÓMO SUSCRIBIRSE?

Envía un email con tus datos de contacto a dyna@revistadyna.com, justificando que eres estudiante de la Universidad y que te acoges a la promoción especial para alumnos.



DYNA DIGITAL

<http://www.revistadyna.com>

**Publicando la actualidad de la ingeniería
desde 1926**

<http://www.revistadyna.com>

dyna@revistadyna.com