



FABRICACIÓN AJUSTADA

Reducción del desperdicio
"espera" en líneas de ensamblaje

MEDIO AMBIENTE

Eliminación eficiente de
contaminantes en una EDAR

**MOTORES DE COMBUSTIÓN
INTERNA**

Estudio físico-químico del agua
de refrigeración

TRANSPORTE RODADO

Impacto del ruido en el ACV

**TECNOLOGÍA DE
MATERIALES**

Tensiones en ejes huecos

MANTENIMIENTO

Asignación de recursos a las
actividades críticas

ECODISEÑO

Comparativa entre sistemas
constructivos de huecos para
ascensores

ACÚSTICA

Paneles fabricados con
neumáticos reciclados

SISTEMA EXPERTO

Mantenimiento de equipos
electrónicos

Impresión 3D:

Avances en RepRap

Catenaria rígida en túneles

**Segundas vidas para baterías
de coches eléctricos**

*feliz año
2014*



MANTÉNTE INFORMADO

con **DYNA**

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

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

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

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

La Revista DYNA es el Órgano Oficial de Ciencia y Tecnología de la Federación de Asociaciones de Ingenieros Industriales de España (FAIE).

Fundada en 1926, DYNA es una de las revistas de ingeniería más influyentes y prestigiosas del mundo, como lo reconoce Thomson-Reuters en la edición anual de su informe JCR. Es el medio más indicado para la comunicación de los Ingenieros Industriales Superiores y de cuantos vean en ella el medio de expresión de sus ideas y experiencia.

DYNA es una revista bimestral que edita 6 números al año: enero, marzo, mayo, julio, septiembre, noviembre.

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

<http://www.revistadyna.com>

dyna@revistadyna.com

CONSEJO DE ADMINISTRACIÓN

Presidente de Honor: Luis Manuel Tomás Balibrea (FAIE. - Madrid)

Presidente: Néstor Goicoechea Gandiaga (Asociación de Bizkaia - Bilbao)

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

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

Vocales:

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

Germán Ayora López (Asociación de Andalucía Occidental - Sevilla)

Joan Torres i Carol (Asociación de Catalunya - Barcelona)

Miguel Ángel Martínez Lucio (Asociación de Madrid - Madrid)

José María Ruíz - Tapiador Trallero (Asociación Aragón - Zaragoza)

Manuel Lara Coira (Asociación de Galicia - Santiago)

Martín Vega Uribarri (Asociación de Cantabria - Santander)

OTROS SOCIOS

Ramón Larrinoa Barreda (Colegio de Alava), **Gabriel Egaña Uranga**

(Colegio de Gipuzkoa), **Carlos Izkie Montejo** (Colegio de Navarra),

Francisco J. Marrodán Esparza (Asociación de La Rioja), **Jesús María**

Mirat Celdrán (Asociación de Extremadura), **Alfonso Panadero Martínez**

(Asociación de Albacete), **Andrés Pérez Bermúdez** (Asociación de Canarias),

Alfredo Arias Berenguer (Asociación de Baleares), **Manuel María Uruña**

Cuadrado (Asociación León - León).

CONSEJO DE REDACCIÓN

Presidente: Luciano Azpiazu Canivell (Nomantica, Palencia)

Vicepresidente: Leopoldo Espolita Carreño (Asociación de Asturias - Oviedo)

Secretario: Carlos López de Letona (Asociación de Bizkaia - Bilbao)

Vocales:

Alberto Del Rosso (Universidad Tecnológica Nacional - Buenos Aires,

Argentina), **Alfonso Parra Gómez** (Asociación de Bizkaia - Bilbao), **Andrés**

Ortuño Carbonell (Asociación de Murcia - Murcia), **Antonio Adsuar**

Benavides (Conselleria de Industria Comercio e Innovación - Valencia) -

Eduardo Valle Peña (Asociación de Cantabria - Santander), **Blas Hermoso**

Alameda (Universidad Pública de Navarra - Pamplona), **Franck Giro**

(Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers - Paris, Francia), **Fernando**

Guijarro Merelles (Universidad de Extremadura - Cáceres), **Fernando**

López Rodríguez (Agencia Extremeña de la Energía - Cáceres), **Angel Mena**

Nieto (Universidad de Huelva - Palos de la Frontera), **Ferrán Puerta Sales**

(Universidad Politécnica de Cataluña - Barcelona), **Ignacio Fernández**

de Aguirre Guantes (Instituto de Fundición Tabira - Durango), **Javier**

Barrondo Apodaca (Asociación Bizkaia - Bilbao), **José Manuel Palomar**

Carnicero (EPS Jaén - Jaén), **José María Bueno Lidón** (Green Power Tech -

Sevilla), **José Rafael Castrejón Pita** (University of Cambridge - Cambridge,

UK), **Juan M. Gers** (Gers USA LLC - Weston, Florida, USA), **Manuel Lara**

Coira (Escuela Politécnica Superior de Ferrol - Ferrol), **Néstor Goicoechea**

Larracochea (Universidad de País Vasco - Bilbao), **Nicolás Gaminde**

Alix (Asociación Bizkaia - Bilbao), **Joan L. Serarols Font** (Universidad de

Girona - Girona), **Pedro J. Otaduy** (ETICG - Oak Ridge, Tennessee, USA),

Pere Alavedra Ribot (Universidad Internacional de Catalunya - Barcelona),

Raimundo Martínez Giménez (Euroconseil - Sevilla).

CONSEJO ASESOR

Allan Joseph Wailoo (Universidad de Sheffield - Sheffield, UK), **Carlos**

García Crespo (Universidad de Mondragón - Mondragón), **Eva Martínez**

Caro (Universidad Politécnica de Cartagena - Cartagena), **Javier Santos**

García (Universidad de Navarra - San Sebastian), **Jorge Arturo Del Ángel**

Ramos (Universidad Veracruzana - Veracruz, Méjico), **Ricardo Rodríguez**

Jorge (Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez - Juárez, Méjico), **Erik**

Ocaranza Sánchez (Instituto Politécnico Nacional - Tlaxca, Méjico)

© 2014. Publicaciones DYNA S.L.

Publicaciones DYNA SL, a los efectos previstos en el artículo 32.1 párrafo segundo del vigente TRLPI, se opone expresamente a que cualquiera de las páginas de esta obra o partes de ella sean utilizadas para la realización de resúmenes de prensa. Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra (<http://www.conlicencia.com>; +34 917 021970 / +34 932 720447).

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

ENTIDAD EDITORA: Federación de Asociaciones de Ingenieros Industriales de España

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

Publicaciones DYNA S.L.,

www.dynapubli.com

Alameda de Mazarredo, 69 - 48009 BILBAO.

Tel. +34 944 237566 - Fax +34 944 234461

email: dyna@revistadyna.com

Instrucciones detalladas para los autores en la

web: www.revistadyna.com

IMPRESOR: MCCGRAPHICS

C/ Larrondo Beheko Etorbidea, edif. 4 Nave 1 - 48180 LOIU (Vizcaya)

- Tel.: +34 944 535 205. e-mail: elkar@mccgraphics.com

Formato: 21 x 29,7 cm (A4)

D.L. BI-6-1958

ISSN 0012-7361

ISSN electrónico 1989-1490

SICI: 0012-7361(20140101)89:1<>1.0.TX;2-P

CODEN: DYNAAU

DOI: 10.6036/DYNAII

Tirada de este número: 3.965 (papel) y 48.605 (digital)

Ejemplares vendidos: 3.796 (papel) y 48.605 (digital)

UNIVERSIDADES COLABORADORAS

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

ORGANIZACIONES COLABORADORAS

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

ORGANIZACIONES AMIGAS DE DYNA

Bodegas Muriel, Amic y Structuralia

DIRECCIÓN

José María Hernández Álava

Miembro de:

- Council of Science Editors
- Asociación Española de Comunicación Científica

Suscripción anual Institucional

(Estos precios no incluyen el 4% de IVA)

España	158,10 €
Número suelto	30,60 €
Extranjero	218,10 €
Número para extranjero	38,60 €
Suscripción WEB ilimitada al archivo histórico	a consultar

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

Forma de pago: Contado previo al envío de la revista

Medio de pago preferente: Domiciliación.

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

Existe un [formulario de suscripción](#) en nuestra página web:

<http://www.revistadyna.com>

Tarifas publicitarias

(Estos precios no incluyen el 21% de IVA)

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

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

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

Banner web superior de 650x80 pixels (mín. 7 dd)..... 80 €/día

Inserción en Boletín electrónico..... a consultar

Páginas visitadas al mes: 30.000 (Google Analytics)

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

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

Incluida en / Indexed in

COMPLUDOC (Universidad Complutense de Madrid)

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

DIALNET (Universidad de La Rioja)

<http://dialnet.unirioja.es>

FUENTE ACADEMICA PREMIER (Ebsco Publishing)

<http://www.ebscohost.com>

GEOREF (American Geological Institute)

<http://www.agiweb.org>

GOOGLE SCHOLAR

<http://scholar.google.es>

ICYT (Consejo Superior de Investigaciones Científicas)

<http://www.csic.es>

JCR (Journal Citation Reports (Thomson-Reuters))

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

LATINDEX (Sistema Regional de Información en línea para Iberoamérica)

<http://www.latindex.org>

PASCAL (Centre National de la Recherche Scientifique)

<http://www.inist.fr>

RECYT (Fundación Española de la Ciencia y Tecnología)

<http://recyt.fecyt.es>

SCIENCE CITATION INDEX EXPANDED (Thomson-Reuters)

<http://www.thomsonscientific.com>

SCOPUS (Grupo Elsevier)

<http://info.scopus.com>

SUMARIS (Biblioteques Universitaries de Catalunya)

<http://sumaris.cbuc.es>

TECHNOLOGY RESEARCH DATABASE (ProQuest)

<http://www.proquest.com>

ULRICH'S PERIODICALS DIRECTORY (Grupo Elsevier)

<http://ulrichsweb.com>

BOLETIN DE SUSCRIPCIÓN:

*Nombre y 2 apellidos..... Empresa

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

*CP *Población *Provincia

*Teléfono..... Móvil..... Fax

E-mail..... Web

Fecha Fecha Firma y Sello

FORMA DE PAGO SELECCIONADA:

☐ Transferencia ☐ Cheque nominativo ☐ Domiciliación bancaria

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

--	--	--	--

--	--	--	--

--	--

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

Entidad Agencia D.C. Oficina

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

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

Remitir este boletín de suscripción o sus datos por:

CORREO POSTAL: Publicaciones DYNA SL Alda. Mazarredo 69 - 3º 48009-Bilbao	CORREO ELECTRÓNICO: dyna@revistadyna.com	FAX: +34 94 423 44 61	PÁGINA WEB: http://www.revistadyna.com Donde existe un formulario de suscripción
---	--	---------------------------------	--

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

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

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

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

contenido

Enero - Febrero 2014

50



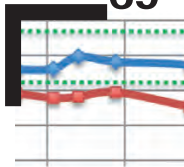
REDUCCIÓN DEL DESPERDICIO «ESPERA» EN LÍNEAS DE ENSAMBLE MEDIANTE EL USO DE HEURÍSTICAS Y ESCENARIOS DE SIMULACIÓN
WAITING WASTE REDUCTION IN ASSEMBLY LINES USING HEURISTICS AND SIMULATION SCENARIOS

61



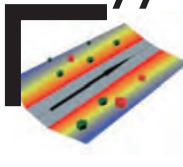
CONTROL DEL PROCESO DE CICLOS ALTERNADOS PARA LA ELIMINACIÓN EFICIENTE DE CONTAMINANTES EN UNA EDAR
ALTERNATED CYCLES PROCESS CONTROL FOR EFFICIENT POLLUTANT REMOVAL IN A WWTP

69



MOTORES MARINOS DE COMBUSTIÓN INTERNA. ESTUDIO FÍSICOQUÍMICO DEL AGUA DE REFRIGERACIÓN
MARINE INTERNAL COMBUSTION ENGINES. PHYSICOCHEMICAL STUDY OF COOLING WATER

77



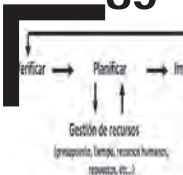
MÉTODO PARA EVALUAR EL IMPACTO DEL RUIDO DEL TRANSPORTE RODADO EN EL MARCO DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA
A METHOD TO ASSESS THE IMPACT OF ROAD TRANSPORT NOISE WITHIN THE FRAMEWORK OF LIFE CYCLE ASSESSMENT

85



TENSIONES EN EJES HUECOS CON UNA GRIETA SUPERFICIAL BAJO FLEXIÓN ROTATIVA
STRESSES IN HOLLOW AXIS WITH A SURFACE CRACK UNDER ROTATION AND BENDING

89



METODOLOGÍA PARA AUDITAR LA ASIGNACIÓN DE RECURSOS A LAS ACTIVIDADES CRÍTICAS DE MANTENIMIENTO
METHODOLOGY FOR AUDITING THE RESOURCES ALLOCATION OF CRITICAL MAINTENANCE ACTIVITIES

98



COMPARATIVA ENTRE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS DE HUECOS PARA ASCENSORES EN FUNCIÓN DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA
COMPARATIVE ANALYSIS BASED AT THE LIFE CYCLE ASSESSMENT ON HOISTWAY OF RESIDENTIAL BUILDINGS

106



ESTIMACIÓN DE LA ABSORCIÓN ACÚSTICA DE PANELES FABRICADOS CON NEUMÁTICOS RECICLADOS
STUDY OF THE ACOUSTIC ABSORPTION PROPERTIES OF PANELS MADE FROM GROUND TIRE RUBBERS

112



DESARROLLO DE UN SISTEMA EXPERTO PARA AYUDAR A LA VERIFICACIÓN DEL SISTEMA "TACAN"
EXPERT SYSTEM DEVELOPMENT TO ASSIST ON THE VERIFICATION OF "TACAN" SYSTEM PERFORMANCE

6

DYNA hace 80 años

10

AULA DYNA:
GUÍA PARA LA MEJORA DE LA PRODUCTIVIDAD INDUSTRIAL

14

Actualidad

16

Uso de las herramientas de simulación energética para el estudio del microclima urbano

18

El concepto humanístico de la ENTROPÍA en los primeros años de DYNA

24

TORRE IBERDROLA
Servicios y sistemas: confort, eficiencia y sostenibilidad

30

Aplicación de catenaria rígida en túneles

34

AVANCES EN REPRAP: Impresión 3D de código abierto

39

Comparativa de tecnologías de propulsión de sistemas de transporte público en España

46

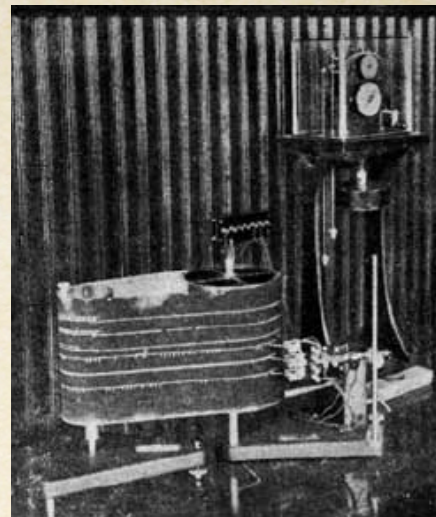
Segundas vidas para baterías de coches eléctricos:
buenas ideas – malos negocios

DYNA hace 80 años (enero - febrero 1934)

Orientación profesional y preaprendizaje

El autor describe la llamada Oficina-Laboratorio de Orientación y Selección Profesional que desde hace unos cuatro años venía funcionando en Bilbao. Para ellos *“se ha efectuado la adquisición e instalación del material, de que se hallan magníficamente dotados los gabinetes antropométrico y psicotécnico, en los que se vienen efectuando las prácticas y estudios encomendados a esta Institución...Este organismo abarca y estudia dos aspectos del trabajo del obrero, totalmente distinto entre sí. ...De una parte, la Orientación Profesional sirve para examinar y observar al joven obrero en el momento que va a decidirse por un oficio, a fin de conocer sus aficiones y sus aptitudes; la complexión de su organismo y la capacidad de sus facultades psíquicas; las taras o defectos que puedan impedirle el ejercicio de determinada profesión; la destreza para tal o cual oficio manual, etc.... Después, el aprendiz es sometido a un examen psicotécnico, por medio de aparatos ad hoc, que un médico especialista maneja en los Laboratorios de psicología experimental de esta Oficina”*.

Con esa información se espera tanto orientar adecuadamente a los que inicien una formación profesional a la que mejor se adapte a sus facultades como ayudar a las empresas u organismos públicos a seleccionar los mejores aspirantes a un puesto determinado y, además, a *“estudiar las causas productoras de los accidentes del trabajo, que más frecuentemente se producen en la industria vizcaína, proponer los medios de su evitación y formar sus estadísticas”*, así como *“las enfermedades profesionales que se desarrollan en la vida industrial de nuestro país con mayor generalidad, dictando normas para la evitación y reparación de sus daños”*.



Aparato registrador de los fallos cometidos por los conductores de vehículos

JOAQUÍN NEBREDÁ

La normalización de la revista “DYNA”

En el primer número de DYNA del año, el autor, miembro del Consejo de Redacción, expone los principales cambios habidos en la publicación, siendo de notar los habidos en la normalización del formato y la normalización de la cubierta, así como un índice del contenido.

Respecto a los primeros considera que *“a gran número de suscritores les resultaba por tanto interesante la reducción del tamaño de la revista y al hacer esta deseada reducción hemos adoptado para el nuevo tamaño, el DIN A4 de 210 X 297 mm”*. La cabecera se situará al comienzo de la revista y el índice de contenidos al final de la misma.

El texto explica detalladamente a los lectores la formación y dimensiones de los formatos, sobre todo los basados en la norma DIN 476, tanto para hojas de papel, como para sobres y otros productos. En el caso de los planos, indica también los modos y ventajas de su plegado.

DYNA

AÑO 9

Enero 1934
No. 1

Cabecera de la revista en su nuevo formato

MARTÍN BALZOLA

Análisis de la época:

En el ejemplar de DYNA de noviembre de 1933 y la sección titulada EL MOMENTO ACTUAL, se hicieron unos extensos comentarios sobre las actuaciones de la Administración del Estado, de los que por su interés reproducimos un párrafo.

Orientaciones económicas

“Efectivamente, en la actualidad se hace preciso cambiar de rumbo a muchas cosas y con prioridad lo fundamental. Ni el Ministerio de Agricultura, ni el de Trabajo, ni el de Obras Públicas pueden fiarse a persona que no posea una sólida preparación económica, y aquí vemos, por ejemplo, que hasta el de Industria y Comercio se encomienda a personas que, lejos de sentirse fortalecidas por una vasta preparación de disciplina económica, sienten verdadera aversión por tan austera especialidad, aceptando únicamente el cargo por verdadera disciplina en mandato imperativo del partido político a que pertenezca, por ese forzado encuadramiento que se hace en las combinaciones de la lista ministerial; por lo cual, lejos de resultar beneficiosa para el país la aportación personal de estos hombres, su capacidad administrativa y su competencia técnica en otros sectores de la administración resultan perjudiciales para su concurso, tanto si es de abstención y falto de iniciativa, porque en la inacción los organismos estatales se atrofian, como si en aras de una mal entendida actividad se lanzan a empresas que piensan han de rendir fecunda labor, ya que en la mayor parte de los casos, la falta de dominio en la técnica, sirve para que algún interesado colaborador obtenga particular provecho en perjuicio de los intereses generales.”

MINIJOBS, OUTSOURCING, BACKSOURCING.....

La crisis económica ha impactado en la Ingeniería de manera similar a como lo ha hecho en otros sectores económicos, siendo probablemente los más afectados; los que hemos dado en llamar Ingenieros del ejercicio libre profesional. La consecuencia ha sido una reducción registrada de proyectos en el periodo 2008-2013 llegando en determinadas zonas a una reducción de proyectos y expedientes tramitados del 70% y del 80% en inversión económica real en dicho periodo.

Las encuestas de empleabilidad indican con los índices de confianza de encuestas similares, que la Ingeniería Industrial presenta unas tasas de desempleo y precariedad laboral próximas a un 24% (Fuente: prensa).

Ante esta situación, ¿qué entorno socio- económico y laboral encuentran los Ingenieros Industriales y futuros egresados?

1º.- Desde la implantación del denominado Plan Bolonia, las Universidades están ofertando titulaciones de másteres diversos, a veces con denominaciones surrealistas. En un país con aproximadamente 81 Universidades, lo cual conlleva competir por el estudiante y por ello se está ofertando estudios de Master en Ingeniería Industrial, con accesos a partir de Grados diversos y exigencias de ECTS (*European Credit Transfer System*) que en muchos casos, no cubren las expectativas mínimas de formación de calidad, ni garantizan la adquisición de los conocimientos y capacidades necesarias para el correcto ejercicio de la Ingeniería Industrial

2º.- La legislación actualmente en desarrollo y en especial el *Anteproyecto de Ley de Servicios y Colegios Profesionales*, no da una respuesta adecuada a las expectativas profesionales en cuanto a atribuciones, reservas de actividades, LOE, Colegios Profesionales, etc.

3º.- En cuanto a la evolución de la situación económica, a pesar de que diversas instituciones vislumbran un inicio de recuperación a nivel macroeconómico, lo cierto es que los economistas y analistas más prestigiosos consideran/predicen que, "a nivel de calle", no será efectivo en tanto no fluya el crédito, lo que aún está por suceder

Desde algunos medios de comunicación social y diversas entidades públicas y privadas se transmite a la sociedad que gran parte de las expectativas de búsqueda de empleo pasan por la emigración aunque no se le dé ese nombre, sustituyéndolo por otros como expatriados, lo que empieza a estar asumido por nuestros Ingenieros, hartos de esperar un cambio. Tema bien distinto y debemos subrayarlo, de la necesaria internacionalización de las empresas, internacionalización que constituye un componente cada vez de mayor importancia, incluso en Pymes, pudiéndose afirmar que el éxito futuro de las empresas pasa por su internacionalización. Lo que a veces se plantea como la panacea es la búsqueda de trabajo en otros países, siendo Alemania el nuevo "El Dorado", lo que, a medio/largo plazo, significará una descapitalización de los mejores, porque, lógicamente, ellos serán los elegidos.

Generalmente las ofertas de trabajo que nos llegan para el extranjero exigen varios años de experiencia, formación gerencial, nivel fluido de Inglés y Alemán y si es posible otro idioma, o bien solicitan recién egresados, con varios idiomas por supuesto y algún Máster, ofreciendo a cambio los conocidos como *Minijobs*.

A la sociedad le tiene que resultar difícil entender que no se estén tomando medidas para retener el conocimiento y el talento.

Desde diversos ámbitos y entre ellos de la Ingeniería, se están alzando voces de alarma, con planteamientos que palien esta situación en tanto la crisis perdure, abogando por actuaciones proactivas, de tipo político y económico, destacando:

Reindustrialización y repatriación de actividades deslocalizadas, actuaciones que ya empiezan a tener, entre los iniciados, hasta nombre en inglés, tales como *outsourcing*, *backsourcing*, *offshoring*, etc.

Apoyo efectivo a emprendedores. No basta con la letra de la Ley existente, hace falta impulsarla y no coartarla con actuaciones de otros Organismos

Calidad en la formación frente a cantidad de egresados, lo que conlleva adaptar las ofertas de plazas en las escuelas de ingeniería acorde a las necesidades previstas, así como niveles de exigencia y de calidad de la enseñanza (implantados desde la educación primaria) que garanticen la adquisición de los conocimientos y competencias requeridas para el desarrollo adecuado de la ingeniería.

Abogemos por actuaciones que hagan que nuestros Ingenieros, debidamente formados, se expresen en diversos idiomas por efecto de la Internacionalización de las empresas y no por la implantación de actuaciones con definiciones en inglés que ni gustan ni solucionan la papeleta.

ANÁLISIS COMBINATORIO

Autor: Jerónimo Roure

En el último número de DYNA proponíamos a los lectores el problema planteado en 1933:

“Consideremos un rectángulo reticulado como el de la figura y debemos calcular el número de caminos diferentes por los que se puede ir del vértice A al vértice D sin retroceso”. Encontrar una solución para cualquier número de mallas.

ANÁLISIS COMBINATORIO
POR D. JERÓNIMO ROURE — INGENIERO DE MINAS

Consideremos un rectángulo reticulado como el de la figura 1 y vamos a calcular el número de caminos diferentes por los que se puede ir del vértice A al vértice D, sin retroceso. Este problema se puede aplicar en la obtención de la serie de Taylor.

Si a cada una de las barras del retículo las notamos conforme se indica en la figura, los caminos indicados son, siguiendo en las barras preferiblemente las superiores y de la derecha:

Fig. 1

Se comprende que si sólo tenemos en cuenta las barras verticales podemos obtener el mismo número de combinaciones y así es en efecto pues son desglosándolas de las anteriores:

$d_1 d_2 \quad c_1 c_2 \quad b_1 c_2 \quad a_1 d_2 \quad a_1 b_2$
 $c_1 d_2 \quad b_1 d_2 \quad b_1 b_2 \quad a_1 c_2 \quad a_1 a_2$

que son las mismas que obtenemos combinando cada barra vertical de índice 1 con todas las de índice 2 que están debajo o a su derecha o sea:

$a_1 a_2 \quad a_1 c_2 \quad b_1 b_2 \quad b_1 d_2 \quad c_1 d_2 \quad (5)$
 $a_1 b_2 \quad a_1 d_2 \quad b_1 c_2 \quad c_1 c_2 \quad d_1 d_2$

dando la a, cuatro combinaciones, la b, tres, la c, dos y la d, una.

Si ahora nosotros en lugar de esta notación usamos la indicada en la figura 2 en la que la letra indica el lugar en el camino a partir del vértice A y

DYNA

N.º 92. Agosto, 1933

Fig. 2

cada letra con las siguientes en la serie a b c d e y por lo tanto tienen que obtenerse las combinaciones o productos diferentes de 5 letras tomadas 2 a 2 o sea como antes hemos dicho C_5^2 .

Observemos aquí, que el mismo resultado obtendríamos tomando las barras horizontales y que por lo tanto se tiene así una demostración indirecta de que $C_5^2 = C_5^3$.

Si notamos el resultado obtenido llamado R_{2+3} al número de caminos diferentes en el rectángulo de las figuras 1 y 2 podremos condensarlo en la fórmula $R_{2+3} = C_5^2$.

Igualmente tendríamos $R_{3+2} = C_5^3$.

Haciendo iguales consideraciones en otro rectángulo con otro número diferente de mallas, llegaríamos a la misma conclusión, de modo que tendremos como fórmula general

$$R_{p+q} = R_{q+p} = C_{p+q}^p = C_{p+q}^q$$

De todos es conocido el valor de

$$C_{p+q}^p = \frac{(p+q)(p+q-1) \dots (p+q-p+1)}{p!} = \frac{(p+q)(p+q-1) \dots (q+1)}{p!} = C_{p+q}^q = \frac{(q+p)(q+p-1) \dots (p+1)}{q!}$$

A título de ejemplo podemos poner algunos valores particulares:

$p=1 \quad q=1 \quad R_{1+1} = C_{1+1}^1 = \frac{2}{1} = 2$
 $p=1 \quad q=2 \quad R_{1+2} = C_{1+2}^1 = \frac{3}{1} = 3$
 $p=2 \quad q=1 \quad R_{2+1} = C_{2+1}^1 = \frac{3}{1} = 3$
 $p=2 \quad q=2 \quad R_{2+2} = C_{2+2}^2 = \frac{4 \times 3}{2} = 6$
 $p=1 \quad q=3 \quad R_{1+3} = C_{1+3}^1 = \frac{4}{1} = 4$
 $p=2 \quad q=3 \quad R_{2+3} = C_{2+3}^2 = \frac{5 \times 4}{2} = 10$

Este último caso es el estudiado antes. En otro artículo veremos la aplicación de este problema a la serie de Taylor.

Carta del director: NUEVOS TIEMPOS, NUEVAS IDEAS

La revista DYNA cumple su 89 aniversario e inicia el año 2014 con un nuevo diseño de sus páginas. El nuevo formato busca el doble objetivo de actualizar la estética de la revista y aprovechar el siempre escaso espacio impreso, con mayor eficiencia. Lamentablemente no podemos dar cabida a todos los artículos y colaboraciones que recibimos por la limitación física que supone la versión impresa de la publicación y por ello pedimos disculpas a todos los autores que por una u otra causa finalmente no han podido publicar en 2013.

En el actual diseño 2014 se han reducido los márgenes, tamaños de fuentes de algunos apartados y sus proporciones con el objetivo de poder incrementar entre un 10 y un 15% el contenido de cada ejemplar. Aparecen nuevas secciones como "Actualidad" y desaparecen otras que nos han acompañado hasta el año pasado como "Desarrollo Sostenible" y "Noticias Breves".

Los nuevos tiempos basados en el auge del intercambio de información digital nos recomienda potenciar especialmente este medio. Internet se constituye como el sistema nervioso de nuestro entorno y la socialización de su uso cambiarán sin duda las formas de entender la comunicación y transformará los actuales modelos de negocio.

Siguiendo estas pautas vinculadas a la estrategia de Publicaciones DYNA, hemos puesto en marcha nuevas revistas especializadas, con el objetivo de dar satisfacción a lectores más interesados por disciplinas específicas del amplio campo de conocimiento de la Ingeniería Industrial. El proceso de "revisión por expertos" de los artículos antes de su publicación, es el mismo para todas las revistas y por lo tanto, garantía de la calidad editorial de sus contenidos como lo atestigua el sello de calidad FECYT.

En la primavera de 2012 iniciamos la publicación de la revista digital "DYNA Energía y Sostenibilidad" (www.dyna-energia.com) para dar cabida a la siempre interesante temática de la energía y el mantenimiento de su sostenibilidad. Este año 2013, en el momento de escribir este editorial, se han publicado 12 artículos científicos y varias decenas de noticias y colaboraciones.

En abril de 2013 se inicia la publicación de otra nueva revista digital "DYNA Management" (www.dyna-management.com) dirigida a directivos, académicos y técnicos interesados en las nuevas teorías en gestión en las organizaciones y a su aplicación práctica en la profesión. En este momento hay publicados 9 artículos científicos con contenidos diversos que van desde la conciliación laboral hasta la gestión de las relaciones con los clientes.

El pasado año 2013 ha sido reseñable para DYNA en varios aspectos:

- Seguimos incrementando a buen ritmo nuestro Factor de Impacto en JCR que actualmente es de 0,237 (JCR anterior: 0,171) y que nos sitúa como la revista en español de mayor impacto en ingeniería general.
- Hemos sido auditados y hemos obtenido el sello de Excelencia en Calidad editorial que otorga la Fundación Española de Ciencia y Tecnología (FECYT) por otros 3 años más.
- La participación de evaluadores extranjeros se ha incrementado un 35%. La internacionalización de la revista en base a las evaluaciones recibidas ha pasado de un 14% en 2012 a un 19% en 2013.

Por otra parte, queremos recordar a nuestros lectores que en la web de DYNA (www.revistadyna.com) también existen otras herramientas y contenidos no incluidos en la revista impresa como son:

- Foros y Blogs de discusión para artículos, anécdotas de la profesión, etc.
- Trabajos monográficos
- Reseñas de libros y de software
- Noticias
- Dentro de su perfil de usuario: alertas de publicación, edición de los datos de suscripción, boletín...

Les invitamos a visitarnos y hacer uso de estos recursos. Queremos hacer especial mención al foro de discusión de los artículos, donde la crítica constructiva bien entendida, ayuda a los autores a estar en contacto con los lectores y aporta puntos de vista enriquecedores. Estaremos encantados de recibir en dyna@revistadyna.com cualquier sugerencia que nos ayude a mejorar nuestra editorial.

Queremos agradecer los logros de este año especialmente a los suscriptores por su fidelidad a nuestra editorial, a todos los autores por sus aportaciones e investigaciones y a los evaluadores por su trabajo de revisión profesional y desinteresado.

FELIZ AÑO NUEVO – HAPPY NEW YEAR



GUÍA PARA LA MEJORA DE LA PRODUCTIVIDAD INDUSTRIAL

Autor: José Agustín Cruelles-Ruiz de ZADECON

¿POR QUÉ LA PRODUCTIVIDAD?

En el libro de **Michael Porter** “*Ser competitivo*”, concretamente del capítulo “*La ventaja competitiva de las naciones*”. Michael Porter, después de estudiar durante 4 años a las 10 naciones más competitivas y con mayor calidad de vida del mundo, concluyó lo siguiente:

“La prosperidad nacional se crea, no se hereda. No surge de los dones naturales de un país, de su mano de obra, de sus tipos de interés o del valor de su moneda como afirma la economía clásica.

La competitividad de una nación depende de la capacidad de su industria para innovar y mejorar. Las empresas logran ventaja frente a los mejores competidores del mundo a causa de las presiones y los retos. Se benefician de tener fuertes rivales nacionales, proveedores dinámicos radicados en el país y clientes nacionales exigentes.”...

“El único concepto significativo de la competitividad a nivel nacional es la PRODUCTIVIDAD. El objeto principal de una nación es conseguir un alto y creciente nivel de vida para sus ciudadanos. La actitud para hacerlo depende de la productividad con que se empleen la mano de obra y el capital...”

DIAGNÓSTICO

Tras años de observación del sector industrial español, se puede concluir que existe mucho despilfarro en la fabricación, y eso implica que existe una gran posibilidad de mejora. Esto es, en parte, una buena noticia. Este despilfarro es imputable tanto a la mano de obra directa como a los directivos y la causa más evidente es una falta de cultura de la productividad.

Antes de comenzar con esta breve guía, hagámonos unas preguntas acerca de qué pasa cuando no se tienen medidos los tiempos de trabajo y no se puede asegurar su cumplimiento.

- ¿Podemos planificar?
- ¿Podemos conocer los costes *a priori*?
- ¿Podemos evaluar el desempeño de los factores de la producción?
- ¿Podremos acotar las permanentes desviaciones en costes que tenemos, una vez realizada la fabricación? De hecho, ¿a caso sabemos qué son desviaciones?
- ¿Conoceremos las causas de las desviaciones?
- ¿Podemos mejorar los métodos y formas de trabajo?

La respuesta es claramente negativa.

Por lo tanto, conocer y hacer cumplir los tiempos estándar es totalmente imprescindible y las herramientas para conseguirlo son:

- El estudio de métodos y tiempos
- El control de la productividad
- Y la planeación de las operaciones

Y una vez resuelto lo anterior:

- ¿Sabías que medir los tiempos y establecer un método de trabajo puede ahorrar entre un 20 y un 50 % de la duración de la ejecución?
- ¿Imaginas la repercusión que tiene esto en los márgenes de venta?
- ¿Sabías que la mayoría de las industrias españolas no los tienen medidos e implantados...?
- ¿... y que debido a lo anterior, adquirirás una ventaja sobre tus competidores?

SOLUCIÓN: MEJORA DE LA PRODUCTIVIDAD INDUSTRIAL PASO A PASO

Suponiendo que los materiales que se utilizan son constantes, se explicará la reducción de costes a partir de la reducción del tiempo de ejecución.

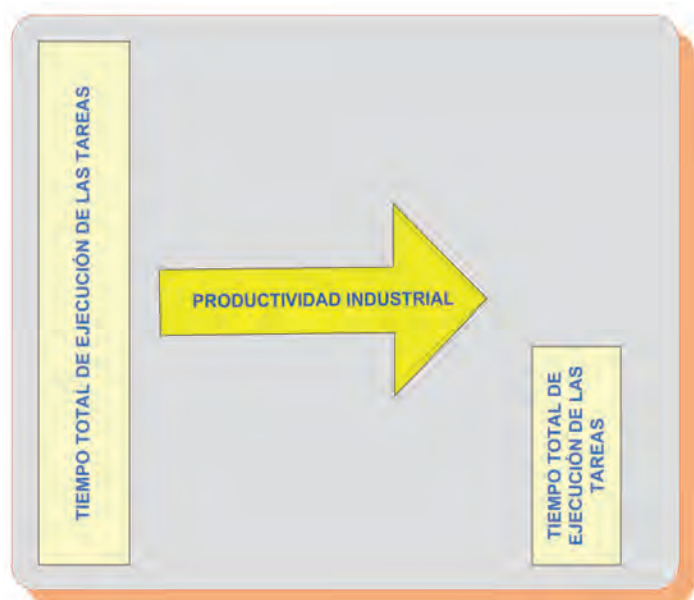


Figura 1: Finalidad de la metodología: la reducción del tiempo de ejecución de las tareas

Se muestra en la Figura 1 de manera gráfica la finalidad de esta metodología; aunque esta es el resultado, para llegar a este punto se requieren 4 grandes etapas.

PASO 1: DIAGNÓSTICO DE LA PRODUCTIVIDAD

La primero que hay que hacer, es identificar el tiempo total que se está empleando en realizar una fabricación. Qué cantidad es el tiempo necesario, qué cantidad es despilfarro o pérdidas de tiempo y cuáles son las causas de este despilfarro.

Para poder mejorar el tiempo es totalmente necesario tener desglosado dónde se pierde y sus causas, a partir de ahí se puede atacar y buscar las soluciones. Para ello, en esta primera parte se introduce el concepto de *La teoría de la medición del despilfarro* cuya finalidad es la de desglosar los componentes del tiempo que se está empleando en fabricar. La Figura 2 muestra gráficamente este paso. La primera división de tiempo que se hace es la siguiente:

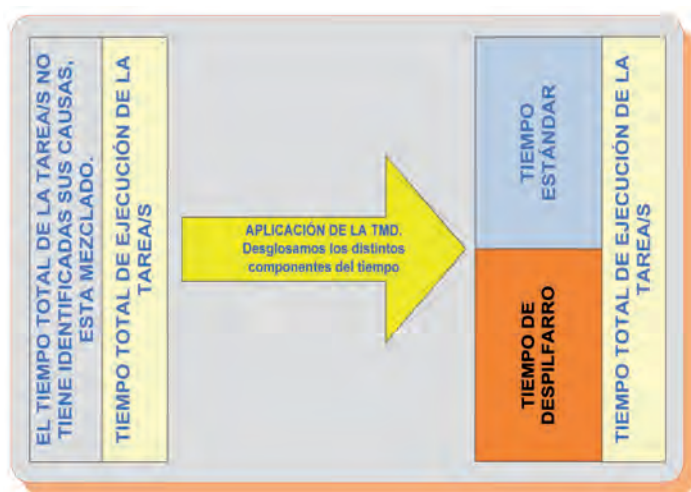


Figura 2: Aplicación de "La teoría de la medición del despilfarro" para diagnosticar

1. Tiempo estándar, es el tiempo necesario para elaborar una tarea o conjunto de tareas, con los métodos y los medios actuales.
2. Despilfarro, tiempo que se ha empleado por encima de dicho tiempo estándar.

No obstante, habrá que hacer una división más del tiempo, que es la que divide el despilfarro en dos grandes causantes y se muestra en la Figura 3:

1. Despilfarro por bajo desempeño.
2. Despilfarro por fallos de gestión.

Además existe otro despilfarro más que es el que está implícito en el propio tiempo estándar. Dado un método de trabajo, el tiempo estándar no tiene por qué ser el más bajo, por tanto existe un despilfarro debido al diseño del método de trabajo en la Figura 3 se nombra como **Despilfarro en el Diseño**. De tal manera que el tiempo estándar se divide en dos componentes:

1. Cantidad mínima de tiempo necesario (CMTN) = Σ Mejor tiempo estándar.
2. Despilfarro en el diseño del trabajo: en el método y en el proceso.

Una vez que se tiene el desglose de lo que está ocurriendo, hay que trabajar para reducir cada uno de los componentes del tiempo de fabricación.



Figura 3: Desglose del tiempo en sus grandes causas

PASO 2: ESTUDIO Y ANÁLISIS Y MEJORA DE MÉTODOS

De cualquier tarea, el primer trabajo que hay que hacer es estudiar su método de trabajo, definirlo, y una vez hecho esto se puede mejorar a partir del análisis y la crítica al método actual. En este segundo paso se actúa sobre el tiempo estándar con la finalidad de reducirlo. La finalidad del estudio y análisis de métodos es la de reducir el tiempo estándar. En la Figura 4 se ilustra en el gráfico sobre qué componente del tiempo se está actuando. Se actúa sobre el tiempo estándar a partir de la mejora de métodos, en resumen, se trabajará sobre la reducción del despilfarro en el método de trabajo.

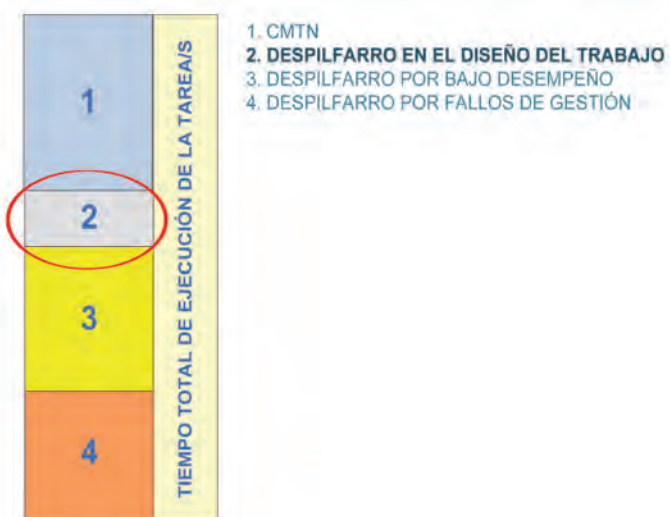


Figura 4: Actuación sobre el tiempo estándar de la tarea

En esta segunda parte se estudiará también acerca de las mejoras ergonómicas. Esta es la manera más eficaz y beneficiosa para el trabajador de mejorar un método.

PASO 3: ESTUDIO DE TIEMPOS

Una vez definido y mejorado el método de trabajo de una tarea lo que procede es medir el tiempo necesario para ejecutarla, ya sea por unidad o por lote, de esto se encarga el estudio de tiempos. En este paso se trabaja y se actúa también pues sobre el tiempo estándar, se aprenderán técnicas para su medición. En principio medir no es mejorar, no obstante, el simple hecho de cuantificar las operaciones que componen una tarea aportará inevitablemente reducciones de tiempo ya que, al tener una información desglosada, se podrán tomar decisiones.

La imagen que se corresponde con esta parte es también la de la Figura 4. Es decir, se actúa sobre el tiempo estándar, no explícitamente para mejorarlo, sino para cuantificarlo.

Hay un principio que dice que lo que se mide y se observa se mejora.

PASO 4: APLICACIÓN DE MÉTODOS Y ESTÁNDARES

El tiempo estándar es un dato que, por sí solo, no aporta nada. Los tiempos tienen que ser utilizados para gestionar la fabricación. La finalidad de la aplicación de los tiempos calculados es la de reducir el despilfarro que se da en la fabricación. El despilfarro ocasionado por errores de gestión y el despilfarro causado por el bajo desempeño. Las soluciones a estos dos despilfarros son, respectivamente, la planeación de operaciones y el control de la productividad. Realmente los métodos y tiempos son un medio para poder poner en práctica estas dos funciones, a parte de reducir el tiempo estándar.

La planeación de operaciones trata de planificar, asignar cuantía de recursos, eliminar cuellos de botella y de la toma de decisiones y actúa sobre el despilfarro por mala gestión, en la Figura 5 se representa gráfica y cualitativamente a qué parte del tiempo total de ejecución ataca.

El control de la productividad consiste en hacer cumplir los tiempos estándar a partir de la comparación entre tiempo empleado con trabajo realizado (medido en tiempo) y actúa

sobre el despilfarro por el bajo desempeño, se muestra el gráfico en la Figura 6.



Figura 6: Actuación sobre el despilfarro por bajo desempeño

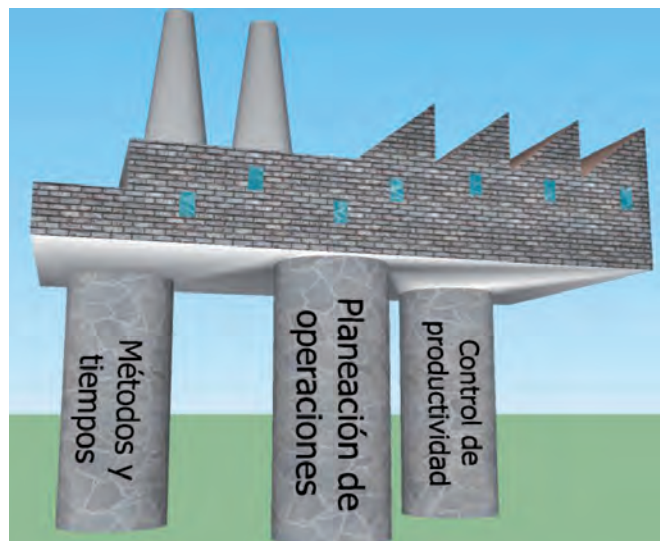


Figura 7: Los tres pilares de la productividad

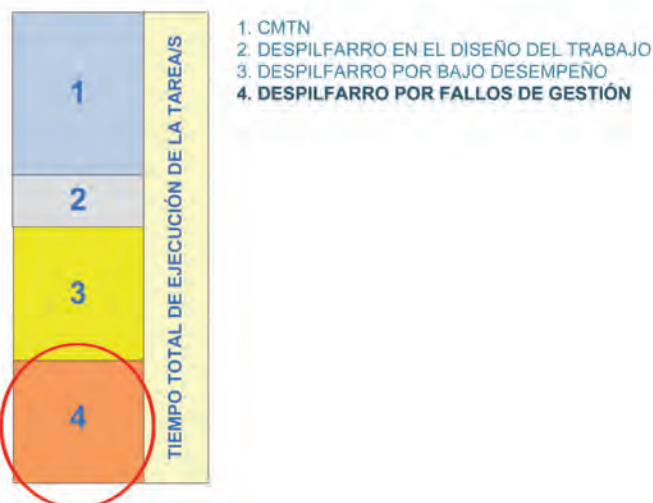


Figura 5: Actuación sobre el despilfarro por fallos de gestión

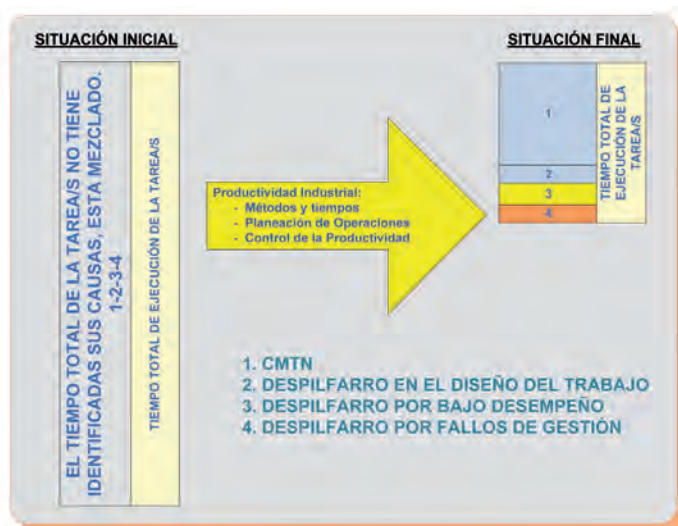


Figura 8. Resultado en el tiempo de ejecución al aplicar el estudio científico del trabajo

VINCULACIÓN ENTRE LAS TRES ACTUACIONES

Métodos y tiempos, planeación de operaciones y control de la productividad son tres funciones imprescindibles para llevar a cabo una reducción radical en los tiempos de ejecución de las tareas. Son los tres pilares de la productividad. Se van a suponer tres escenarios en los que falte una de ellas en cada uno.

Por tanto, se concluye que no se puede poner en productividad una industria si falla uno de los tres pilares y que el tiempo estándar es la materia prima de todo el proceso.

Finalmente, aplicando las tres funciones (el estudio científico del trabajo), se consigue reducir el tiempo total de ejecución. En la Figura 8 se muestra el resultado.

EN RESUMEN

El despilfarro en la industria española es elevadísimo, lo cual significa que hay un enorme margen de mejora; no es imprudente decir que las mejoras de costes de manufactura pueden estar entre un 20 y un 50 % dependiendo de la industria. Para acometer esta mejora es necesario adquirir la cultura de la productividad y poner en práctica las herramientas que se han tratado, a partir de la implantación y de la formación de los implicados.

Esperamos, con esta guía, haber ayudado a hacer comprender los pasos necesarios para la puesta en marcha de la productividad de la industria.

UN PAR DE CASOS PRÁCTICOS:

Eliminación de tareas que no debieran existir:

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/5793_1.pdf



Bajo desempeño debido a un sistema de incentivos mal hecho o corrompido:

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/5793_2.pdf



PARA SABER MÁS:

- ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO (BAJO LA DIRECCIÓN DE GEORGE KANAVATY). (1996). Introducción al estudio del trabajo. Ed. Organización Internacional del Trabajo (92-2-307108-9)
- PORTER M. (2003). Ser Competitivos. Ed. Deusto (ISBN 84-234-2113-9)
- JAMES P. WOMAK Y DANIEL T. JONES (2005). Lean Thinking. Ediciones Gestión 2000 (ISBN 84-8088-689-7)
- ROTHER M y SHOOK J. (1999). Observar para crear valor. Lean Enterprise Institute (ISBN 0-9667843-4-0)
- EQUIPO DE PRODUCTIVITY PRESS (BASADO EN HIROYUKI HIRANO). (2005). 5S Para todos: 5 pilares de la fábrica visual. Ed. Productivity Press - TGP Hoshin. (ISBN 84-87022-28-6).

THINK BIG THINK BIEMH

28 BIEMH

BIENAL ESPAÑOLA
DE MÁQUINA-HERRAMIENTA

2-7 JUNIO
2014

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

BIEMH
PRESENTATION
& NETWORKING
PREVIEW

Encuentros comerciales
internacionales previos al certamen

Colaboran



Organizan



EXPOSSIBLE

El índice de innovación mundial

Global Innovation Index rankings

Country/Economy	Score (0-100)	Rank
Switzerland	66.59	1
Sweden	61.36	2
United Kingdom	61.25	3
Netherlands	61.14	4
United States of America	60.31	5
Finland	59.51	6
Hong Kong (China)	59.43	7
Singapore	59.41	8
Denmark	58.34	9
Ireland	57.91	10

El segundo año que se ofrecen los resultados de este índice para el año 2013, realizado por la Universidad Cornell, la Escuela de Negocios INSEAD y la Organización de la Pro-

piedad Intelectual WIPO, atribuye a España la posición 26 con tres puestos de mejora sobre la 29 que se le adjudicó en 2012. Los diez primeros países de la tabla siguen siendo los mismos con

cambios diversos entre sus posiciones, excepto Suiza y Suecia que la siguen encabezando.

A diferencia de nuestro concepto de innovación empresarial que engloba la actitud tanto mental de mejora continua a través de cambios para adaptarse a las exigencias del entorno, como al esfuerzo tecnológico en I + D, estos índices se basan en un complejo sistema de valoración basado en dos sub-índices. El primero denominado “input innovativo” comprende la valoración de las Instituciones, el Capital Humano e Investigación, la Infraestructura y la Sofisticación de los Negocios. El segundo, “output innovativo”, considera el Conocimiento con la Tecnología y la Creatividad.

Los interesados en conocer el estudio completo pueden obtenerlo en:

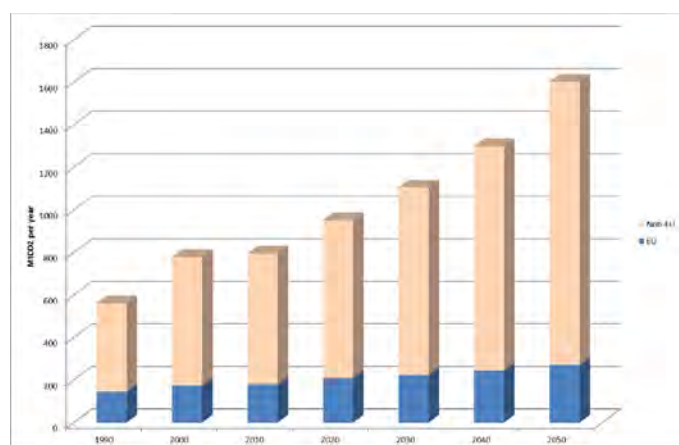
http://www.wipo.int/export/sites/www/freepublications/en/economics/gii/gii_2013.pdf

Reducción de las emisiones en el transporte marítimo

Biodiesel para buques

El transporte marítimo emite anualmente 1.000 millones de toneladas de gases de efecto invernadero,

el 3% del total de emisiones mundiales, aunque si se considera solamente la UE, sus emisiones son el 4% de las propias.

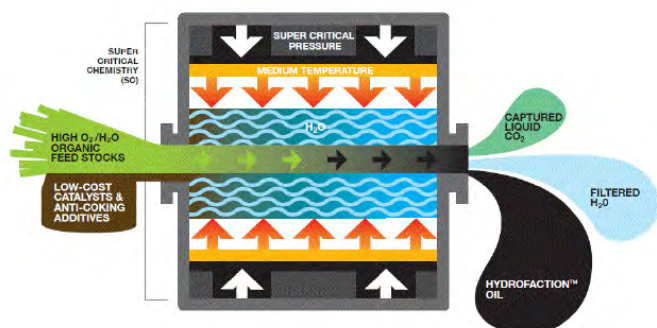


Emisiones estimadas de CO₂ del transporte marítimo en el mundo y en la UE considerando el Energy Efficiency Design Index para buques nuevos

Así como se vienen haciendo importantes progresos en el resto de los vehículos de transporte terrestres y aéreos para reducir sus emisiones, el transporte marítimo, si no adopta medidas, es probable que duplique sus emisiones para 2050, precisamente cuando se

espera que todos los demás medios las hayan reducido a la mitad respecto a los niveles de 1990.

El mes de junio de 2013, la UE emitió el Comunicado COM (2013) 479 final, marcando las pautas de la que será la política a implantar en este sentido respecto a los buques que naveguen por y/o toquen a puertos de la UE y teniendo como objetivo la reducción en 2050 de al menos un 40% de las emisiones dentro de la UE respecto a las de 2005. Como la navegación internacional no está obligada por estas medidas, se obligará a que todos los buques mayores de 5.000 T de registro bruto que toquen puertos de la Unión lleven un sistema de seguimiento, informe y verificación de sus emisiones. Posteriormente habrá que implementar objetivos de reducción



Tecnología HYDROFACTION de la empresa canadiense STEEPER Energy

y a medio-largo plazo tomar las medidas correspondientes. Como apoyo a los

Universidad de Aalborg y el Puerto de Frederikshavn en Dinamarca estudian

buques registrados en la UE, se arbitran ayudas dentro del Plan HORIZON 2020 con ese fin.

Uno de los medios para esta reducción podría estar en la utilización de biodiesel procedente de la biomasa y por ello, la

la viabilidad de un proyecto en este sentido. Frederikshavn es uno de los más activos puertos daneses, donde hacen escala varios miles de buques al año y que les suministra unas 900.000 T de carburante.

El programa de investigación se llevará entre la Universidad de Aalborg y la empresa canadiense Steeper Energy que posee la tecnología para estos procesos. La eventual planta de producción en el puerto de Frederikshavn sería de una capacidad entre 50 y 100.000 T, utilizando residuos forestales procedentes de los Países Bálticos, Rusia o Canadá.

Identificación de competencias transversales de los profesionales

Dos expertos de la UPV-EHU han realizado un estudio basado en el tratamiento estadístico de encuestas a través de colegios profesionales, con el fin de determinar la importancia que se da a las llamadas “competencias transversales”, es decir las generalmente no adquiridas en la formación académica. Aunque se ha hecho para Vizcaya, creemos que marca algunas conclusiones de interés.

Además de identificar esas competencias, han tratado de diferenciar las obtenidas para diferentes titulaciones y la influencia del género, la edad y la situación laboral en su apreciación. Ello nos podría orientar también en las necesidades de formación para cubrir sus carencias.

La encuesta se ha dirigido a profesionales de las áreas de la SALUD, SOCIO-JURÍDICAS y TÉCNICA, estando en esta última encuadrados ingenieros e ingenieros técnicos, mayoritariamente industriales. Los conceptos para los que se pedía valoración formaban cuatro grupos: HABILIDADES (10 variables), ACTITUDES (8 variables), CONOCIMIENTOS (4 variables) y VALORES (4 variables).

El análisis global muestra que las competencias más valoradas son:

- Ser íntegro, transmitiendo confianza y respetando confidencialidad (V).

- Respetar a las personas, su trabajo y su tiempo (V).
- Ser responsable, coherente y consecuente con las decisiones tomadas (V).
- Saber comunicarse de forma oral y escrita eficaz y eficientemente (H).
- Ser capaz de organizarse y priorizar, planificando el tiempo, el trabajo y los costes propios o del equipo en que esté integrado (H).
- Aplicar y compartir conocimientos con el equipo (H).

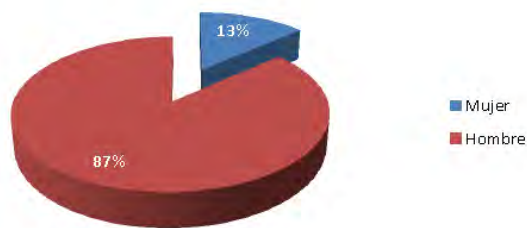
Sin embargo, en los profesionales del Área Técnica, el orden de importancia varía ligeramente, siendo, dentro de ella, específicamente para la Ingeniería Industrial:

- Respetar a las personas, su trabajo y su tiempo (V).
- Ser responsable, coherente y consecuente con las decisiones tomadas (V).
- Ser flexible adaptándose a los cambios con el aprendizaje y la mejora continua (A).
- Tener talento para

la mediación y liderazgo abierto en entornos multidisciplinares (A).

- Tomar decisiones en situaciones de riesgo e incertidumbre, incluso en entornos jerárquicos (H).
- Aplicar y compartir conocimientos con el equipo (H).

Es de notar que el Área Técnica es la que, atendiendo a la proporcionalidad existente en sus colegiados, ha tenido el menor porcentaje de mujeres y relativamente alto en jubilados.



Distribución por géneros de los encuestados en el Área Técnica



Distribución por ocupación de los encuestados en el Área Técnica

LIDERE EL FUTURO DE LA INDUSTRIA QUÍMICA



La zona expositiva se transforma en un **área de transferencia tecnológica** para crear **nuevos modelos de negocio**.

Los mayores expertos expondrán nuevos avances y soluciones que marcarán el futuro del sector: Jornadas de Análisis Instrumental y Congreso de Ingeniería Química del Mediterráneo entre muchos más.

Toda la **oferta y demanda internacional concentradas** en 4 días para optimizar resultados:

2.150 expositores.

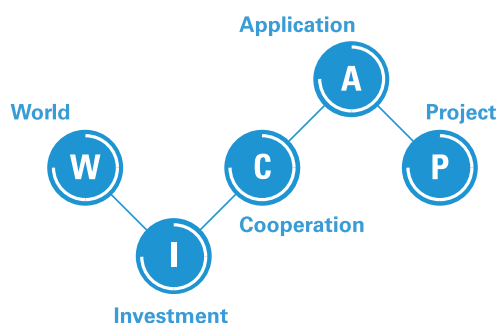
37.825 visitantes profesionales.

196 actividades paralelas.

60 países de todo el mundo.

Además este año contamos con la fórmula que cambiará el futuro de la química: WICAP.

Venga y descubra todas las actividades potenciadoras.



Conviértase en un referente para el sector. Expoquimia 2014, su gran oportunidad.

EXPOQUIMIA
Encuentro Internacional de la Química

#Expoquimia YouTube LinkedIn Facebook Twitter

EXPOQUIMIA EUROSURFAS EQUIPLAST
Encuentro Internacional de la Química Aplicada del Mediterráneo

Recinto Gran Via
30 Sep - 3 Oct 2014
www.expoquimia.com

Fira Barcelona

Uso de las herramientas de simulación energética para el estudio del microclima urbano

Irina Tumini y Ester Higuera García de la Universidad Politécnica de Madrid

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/6972>

1. INTRODUCCIÓN

El microclima urbano juega un rol importante en el consumo energético de los edificios y en las sensaciones de confort en los espacios exteriores. La urgente necesidad de aumentar la eficiencia energética, reducir las emisiones de los contaminantes y paliar la evidente falta de sostenibilidad que afecta a los espacios construidos, ha puesto la atención en el urbanismo bioclimático como referente para una propuesta de cambio en la forma de diseñar y vivir la ciudad¹. La capacidad de simular el comportamiento térmico del espacio urbano es entonces elemento fundamental en el diseño urbano bioclimático. La introducción del cálculo computarizado ha consentido lograr avances importantes en la modelización y simulación, permitiendo la obtención de resultados cada vez más cercanos al comportamiento real del espacio urbano. A diferencia de los sistemas basados en las observaciones en el espacio real, el uso de los sistemas de simulación aporta algunas ventajas entre las cuales podemos destacar la posibilidad de evaluar escenarios de proyecto, comparando así los resultados en diferentes condiciones^{2 3}.

Sin embargo las herramientas disponibles tienen características y alcances diferentes por lo que resulta difícil elegir la más oportuna en cada caso. Por eso se ha realizado una revisión crítica de algunas de las herramientas de cálculo

¹ Santamouris M, Asimakopoulos D N, Assimakopoulos V D, et al. Energy and Climate in the Urban Built Environment. . SANTAMOURIS, M. ed., Athens, Greece: University of Athens, 2001. 410 p. ISBN 978-1-873936-90-7.

² Ali-Toudert Fazia, Mayer Helmut. "Numerical Study on the Effects of Aspect Ratio and Orientation of an Urban Street Canyon on Outdoor Thermal Comfort in Hot and Dry Climate." Building and Environment, 2, 2006, vol. 41, no. 2. pp. 94-108. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.01.013.

³ Mirzaei Parham A., Haghighat Fariborz. "Approaches to Study Urban Heat Island - Abilities and Limitations." Building and Environment, 10, 2010, vol. 45, no. 10. pp. 2192-2201. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.04.001.

existentes, resaltando sus ventajas y limitaciones, proporcionando una información ordenada según una serie de parámetros objetivos que puede ser muy útil para orientar al proyectista entre las diferentes opciones de cálculo.

La selección de las herramientas ha sido enfocada hacia la búsqueda de sistemas que puedan ser empleados por los proyectistas Arquitectos, Urbanistas e Ingenieros, descartando aquellos sistemas que por complejidad, tiempo de ejecución y recursos no son efectivos durante la fase de diseño. Todas tienen un grado de complejidad de manejo medio, aunque en ciertos casos pueda ser necesario un periodo de formación en la herramienta seleccionada. Además pueden ejecutarse sin necesitar gran potencia de hardware y, a exclusión de *Autodesk Ecotec Analysis 2010*, son software libres. Las herramientas analizadas son: *SUNTOOL*⁴, *SOLENE*⁵, *RAYMAN*⁶, *URSOS*⁷, *Autodesk Ecotec Analysis 2010*⁸ y *Envi-met 3.1*⁹.

Los sistemas evaluados se enfrentan a la estimación del comportamiento urbano utilizando enfoques que implican un cierto grado de aproximación en el acercamiento al cálculo computacional. Los resultados del análisis se han organizado en tres apartados resumidos a continuación:

Sistema de Cálculo: casi todas las herramientas realizan una simulación de la componente de radiación solar y, exclusión hecha por *RayMan*, de la transmisión del calor, mientras que sólo dos de los programas examinados realizan también una valoración de la dinámica de los fluidos en la microescala. En ambos casos se basan en el cálculo numérico de CFD.

Datos de entrada: todas las herramientas estudiadas permiten la intro-

ducción de la geometría 3D, aunque con grandes diferencias en la interfaz utilizada y los datos pedidos. En relación a los datos climáticos algunas utilizan datos procedentes de bases de datos estandarizadas, mientras que otras necesitan valores obtenidos de mediciones in situ añadiendo así la dificultad de tener que realizar una campaña de mediciones *in situ*.

Valores de Salida de la Herramienta: en cuanto a los resultados hay muchas diferencias entre las herramientas seleccionadas. La mayoría están enfocadas a la eficiencia energética de los edificios y en el estudio de nuevos desarrollos y sólo dos proporcionan información sobre las condiciones de los espacios abiertos.

El trabajo demuestra que cada sistema es eficaz para algunos objetivos específicos por lo que la realización de un estudio exhaustivo del comportamiento del entorno urbano comporta el uso de diferentes herramientas. Podemos también resaltar que las herramientas que consideran el efecto del movimiento de fluidos emplean modelos más cercanos al comportamiento real, lo que supone a la vez una mayor dificultad de manejo e inversión de tiempo para el cálculo computacional.

En general podemos concluir que las herramientas actualmente disponibles en el mercado emplean métodos simplificados por lo que se deben asumir valores por defectos y limitar su flexibilidad en la introducción de variables para hacer que puedan ser empleadas por usuarios con un grado de especialización medio. Su uso se justifica en una fase de proyecto en orientar las estrategias de diseño y evaluar entre diferentes escenarios el que muestra mejores prestaciones en lugar de buscar estimaciones de valores cercanos a la

realidad. Considerar la componente microclimática en un proyecto comporta beneficios a largo plazo, ya que es muy difícil cambiar el comportamiento térmico de una porción de ciudad con una geometría determinada. Las herramientas de simulación permiten realizar una evaluación objetiva de las estrategias de diseño y por eso su uso debería apoyar los proyectistas desde las primeras fases de toma de decisiones.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado dentro del marco del proyecto de investigación ECOURBAN – “Metodología para la Evaluación del Impacto Energético y Medioambiental en el Ecodiseño de Urbanizaciones” cofinanciado por el Ministerio de Ciencia e Innovación dentro del Plan Nacional de investigación de I+D+i 2008-2011 – Numero de Referencia ENE2010-19850.

REFERENCIA

TUMINI I, HIGUERAS-GARCIA E. “ALCANCES Y LIMITACIONES DE LAS HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN PARA EL ESTUDIO DEL MICROCLIMA URBANO” DYNA Energía y Sostenibilidad. ENERO 2013. Vol. 2-1 p.[No Consta]. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/ES6921>

⁴ Robinson D, Campbell N, Gaiser W, et al. “SUNtool – A New Modelling Paradigm for Simulating and Optimising Urban Sustainability.” *Solar Energy*. 2007. vol. 81, no. 9. pp. 1196-1211. DOI: 10.1016/j.solener.2007.06.002.

⁵ <http://www.cerma.archi.fr/CERMA/expertise/solene/>

⁶ Matzarakis A., Rutz F. and Mayer, H. “Modelling Radiation Fluxes in Simple and Complex Environments—application of the RayMan Model.” *International Journal of Biometeorology*, 2007, vol. 51, no. 4. pp. 323-334. DOI:10.1016/j.jjweia.2012.02.006.

⁷ <http://gee.unizar.es/>

⁸ Marsh A. *Autodesk-Ecotect (Version 5.6)*. , 2010.

⁹ Bruse M. *ENVI-Met Website*. Online: <http://www.Envimet.Com>, 2004.

El concepto humanístico de la ENTROPÍA en los primeros años de DYNA

Los artículos de José Ricardo de Zubiría

Ignacio F. de Aguirre
COIB

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5810>

1. INTRODUCCIÓN

DYNA se inició con el nº 1 correspondiente al mes de enero de 1926, como “revista oficial de la Agrupación de Ingenieros Industriales de Bilbao”. En la cabecera figuraba su Director y un Comité de Redacción de seis ingenieros industriales, bastantes de ellos profesores de la Escuela de Bilbao. La realidad era que una buena parte de los artículos propios eran escritos por los componentes del Comité, y que eran muchas las páginas transcritas o traducidas con noticias técnicas y económicas, españolas e internacionales, en considerable proporción de origen alemán, especialmente para los temas científicos e industriales. DYNA era mensual, publicándose 12 números al año.

En los números 23 y 24, de noviembre y diciembre de 1927, se publicó, traducido del alemán, un artículo de R. Plank, que había aparecido en el *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure* (Karlsruhe) nº 25 de 1926, bajo el título **CONCEPTO DE LA ENTROPÍA** y subtítulo *Límites de validez del segundo principio de la Termodinámica*. Este texto, especialmente el último apartado sobre su aplicación a fenómenos de la vida orgánica y espiritual, influyó tanto en uno de los miembros del Comité, José Ricardo de Zubiría, que desde enero de 1928 hasta marzo de 1931, escribió numerosos textos sobre este tema, siendo en ocasiones contestado por otro de sus colegas, Mario Martínez Ruiz de la Escalera.

La máquina de vapor (ver *A todo vapor*, DYNA nº 3 de 2011), a partir de los últimos perfeccionamientos de Watt, patentados en 1784, venía siendo el más potente impulsor de la revolu-

ción industrial y el mayor generador de movimientos mecánicos de todo tipo. Por esa razón, y buscando una mejor comprensión científica y el mayor rendimiento energético posible, se había ido desarrollando una gran cantidad de conocimiento científico, sentando las bases de una nueva rama de la Física: la Termodinámica. Sin embargo, la consolidación de este término solo se hizo tras un largo recorrido de 35 años, entre 1824 y 1859.

La primera fecha está marcada por la aparición del libro del francés **Sadi Carnot**, *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres a développer cette puissance* y la última por el ingeniero escocés **William Rankine**, que a su *Manual of the Steam Engine and Other Prime Movers*, lo subtítulo Principios de Termodinámica. Pero fue el físico alemán **Rudolf Clausius** quien, primero en 1850 con el artículo *Sobre la fuerza motriz del calor y las leyes del calor que puedan ser deducidas de ella*, y sobre todo en 1854, escribiendo *Sobre una forma modificada del segundo teorema fundamental en la teoría mecánica del calor*, dejó establecidas las que desde entonces se conocen como primera y segunda leyes de la Termodinámica.

Las consideraciones hechas en las breves 65 páginas del libro de Carnot habían dejado establecidos los principios de lo que ahora conocemos como 1ª ley de la termodinámica, expresable de múltiples formas, siendo una de ellas que:

En un sistema aislado, el incremento de su energía interna es igual a la diferencia entre el calor que se le ha aportado y el trabajo realizado por él sistema ($\Delta U = Q - W$).

El experimento (fig. 1) de **Joule** sobre la equivalencia entre calor y trabajo (1843) fue la prueba práctica de ello y, por eso, una forma popular de la citada ley ha venido siendo que, en esas condiciones de sistema aislado, *la energía*

no se puede crear ni destruir, sino solo transformarse. Y claro está que nuestro universo es un sistema aislado.

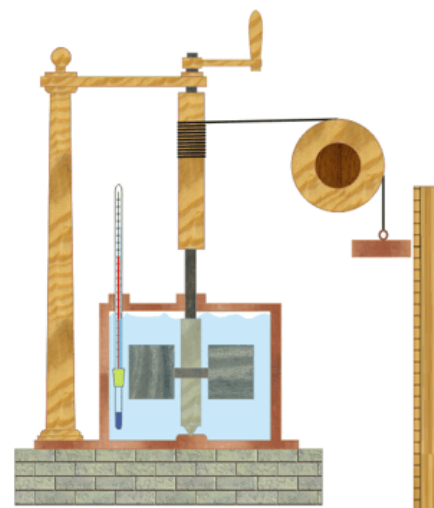


Fig. 1: Disposición de la experiencia de Joule
El descenso del peso mueve las paletas y calienta el líquido

La aplicación práctica de esta primera ley se ha plasmado en el llamado ciclo de Carnot, expresión gráfica en un diagrama cartesiano *presión/volumen* del mejor proceso posible para la producción de trabajo en una máquina térmica entre dos fuentes a alta y baja temperatura o, a la inversa, la aplicación de trabajo para reducir la temperatura de la fuente fría (máquina refrigeradora). Como concepto sin denominar aun, puesto que no se creó el nombre hasta comienzos del siglo XX, se podía estimar que todo fluido homogéneo quedaba definido por lo que finalmente se llamó **entalpía** (H) del mismo, $H = U + pV$, expresada en julios. En la fórmula, U es la energía intrínseca del fluido, p la presión que ejerce y V su volumen. Por ejemplo la variación de entalpía, con un producto presión por volumen constante, corresponderá solo a la variación de su energía interna.

Carnot no escribió nada a partir de 1824 y probablemente supuso que sus ideas caerían en el olvido, pero otro

francés, **Clapeyron**, las recogió diez años más tarde en su *Puissance motrice de la chaleur* y fue por ese medio como llegaron a Clausius.



Fig. 2: Rudolf Clausius (1822 - 1888)

Clausius no estaba completamente satisfecho con solo el principio expresado por Carnot: para conseguir cerrar su conocido ciclo había, en una de las etapas, que invertir parte del trabajo generado en otra y, además, representaba un rendimiento máximo inalcanzable en la práctica. Alguna otra ley, hasta entonces no tenida en cuenta, parecía gobernar los procesos termodinámicos entre el calor y el trabajo y, en un enfoque inicial, apuntó a la apreciable diferencia existente entre los procesos naturales reversibles y los irreversibles. Entre los primeros se hallan procesos mecánicos sin rozamiento, gravitacionales, vibratorios, etc. En cambio la transmisión de calor, la expansión de los gases, la disolución, la difusión de fluidos o la transformación del trabajo en calor siempre tendrán lugar “naturalmente” en el mismo sentido: *El calor no puede pasar por sí mismo de un cuerpo con temperatura baja a otro con temperatura más alta*. Dicho de otra forma, el trabajo no puede obtenerse “por sí mismo” del calor, aunque sí el calor del trabajo.

Culminando el desarrollo matemático de esta teoría, avanzó explícitamente en su obra el concepto de entropía (S), pero no como una idea puramente intuitiva o cualitativa, sino como una auténtica función de estado, cuantitativa y expresada para un sistema aislado como $S = Q/T$ (julios por grado K), siendo Q el contenido en calor del sistema y T su temperatura absoluta. Tengamos en

cuenta que en aquellos tiempos el concepto del calor era a modo de un fluido transmisible y la temperatura una de sus características medibles. La variación de entropía de un material aislado al que se aporta o extrae una cantidad de calor ΔQ manteniendo su temperatura será $S_1 - S_2 = \Delta S = \Delta Q/T$, positiva o negativa.

Un proceso reversible sería, por ejemplo, el llevado a cabo en un sistema aislado, un recinto que contiene a cierta altura una esfera perfectamente elástica que se deja caer sobre un suelo absolutamente rígido sin frotamiento del aire: no hay generación de calor ni cambio de temperatura, la esfera vuelve a su posición inicial y la variación de entropía es nula.

¿Y si el proceso es irreversible? Supongamos otro sistema aislado compuesto también por un amplio recinto a una temperatura de ~ 298 K (25°C) en el que se encuentra un vaso con hielo a ~ 273 K (0°C). Una cantidad de calor del recinto, ΔQ a 298 K (disminución de la entropía en $\Delta Q/298$), provocará la fusión del hielo que pasará a agua con 0°C (~ 273 K) con un incremento de entropía en $\Delta Q/273$. El resultado final será positivo, aumento de la entropía en la diferencia entre ambas, la inicial y la final: un proceso irreversible en un sistema aislado supone un aumento de entropía, los procesos “naturales” son por naturaleza irreversibles, por lo que, contemplando nuestro universo como un sistema aislado global en que continuamente se producen procesos irreversibles, su entropía estará creciendo continuamente.

2. EL ARTÍCULO DE R. PLANK Y SUS CONCLUSIONES

Para el año 1927 en que se transcribió en DYNA el artículo de R. Plank, el concepto de entropía había ya rebasado el ámbito termodinámico clásico y, en los últimos decenios del siglo XIX, había sido aplicado por Maxwell y Boltzmann a los fenómenos físico-químicos de los gases, a pesar de no ser aun generalmente aceptadas las teorías energéticas moleculares relacionadas con sus presiones o temperaturas. Por otra parte, los métodos estadísticos ya conocidos permitían analizar los procesos dividiéndolos en micro-estados sucesi-

vos y aplicar las leyes de probabilidad a las condiciones de temperatura, presión o volumen de cada transformación.

El artículo de R. Plank, que tanto impacto causó en nuestro compañero Zubiría, desarrolla ampliamente la citada formulación termodinámica del segundo principio, la interpretación de Clausius y su consecuencia para con los procesos reversibles o irreversibles, anticipando con frase lapidaria el concepto de *la entropía como medida de la evolución unilateral del mundo* y, a continuación, pasa a exponer algunas analogías y posibles similitudes con otras magnitudes, como el tiempo, debatidas en la época por la proximidad del enunciado de la Teoría de la Relatividad.

Para exponer posibles límites de validez a este principio, R. Plank se apoya en el proceso de expansión de un gas. Supongamos dos recintos iguales (fig. 2) separados por una compuerta, conteniendo el izquierdo un número determinado de moléculas del gas, que determinarán su presión y estando el derecho en el vacío más absoluto. Al abrir la compuerta, si nos atenemos a la termodinámica clásica, se producirá un proceso irreversible por sí mismo: tendremos $n/2$ moléculas en cada recinto. Pero, dado el totalmente desordenado movimiento de las mismas, se puede aceptar probabilísticamente que una reversión casual, debido a ese movimiento, que situase de nuevo todas las moléculas en el recinto izquierdo sería muy pequeña, pero no nula, y si consideramos muy pocas moléculas (presiones muy bajas), la probabilidad de reversión puede ser apreciable: el segundo principio tiene pues sus límites de validez y puede considerarse un principio de probabilidad.

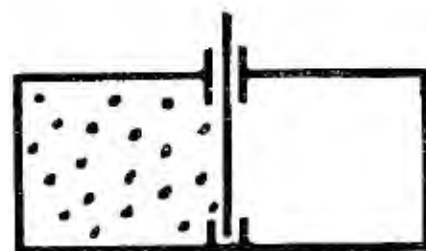


Fig. 3: Los dos recintos

No solo eso. Si la termodinámica clásica nos decía que las presiones se igualaban en ambos recintos, ahora está claro que estamos ante un fenómeno de *fluctuación* de esa presión, tanto más

apreciable cuanto menor sea el número de moléculas del estado de equilibrio con $n/2$ en cada uno. La microscopía de gran aumento permitía contemplar los *movimientos brownianos* de un coloide, no moleculares pero sí asimilables, y apreciar que en lugar de seguir la ley de la gravedad, conservan sus movimientos “debido solamente al calor del ambiente que se halla a su misma temperatura” y contradiciendo la interpretación del segundo principio.

Pero además el apartado final era apasionante: *Aplicación del segundo principio y de las leyes de probabilidad a fenómenos de la vida orgánica y de la vida espiritual*. En él empieza planteándose que quizá fuera posible encontrar leyes matemáticas causales para estudiar esos procesos, pero que dado su inmenso número de variables el intento estaría condenado al fracaso. Sin embargo, al ser de naturaleza estadística, una vía podría ser el cálculo de probabilidades y al reinar en ellos un desorden elemental, habrá también una evolución irreversible “dirigida en un

sentido, un devenir y un acabamiento”. Expone la teoría existente sobre la aparición probabilística de mutaciones en los procesos biológicos celulares, que diesen origen a nuevas especies con sus fluctuaciones en el curso de los fenómenos físico-químicos correspondientes. Citando a Spengler ⁽¹⁾, “al introducirse la irreversibilidad...los elementos formales de la vida: crecimiento, envejecimiento, duración, dirección, muerte, acuden a los primeros planos... La idea del fin del mundo aparece en el ropaje de ciertas fórmulas que en el fondo de su esencia no son ya fórmulas”.

En el plano de la vida psíquica, la contraposición reversibilidad e irreversibilidad correspondería a la de conceptos como cultura y naturaleza, cosmos y caos, evolución y revolución, sistemática e intuición, personalidad y masa, ley moral y libertad, razón y sentimiento, ciencia y arte. Ello se reflejaría en la vida espiritual de hombres preeminentes, siendo como ejemplo de carácter reversible, equilibrada, la de Goethe, Kant o Bach e irreversible, apasionada,

con una “pródiga disipación de la energía espiritual”, la de Nietzsche, Miguel Ángel, Van Gogh o Beethoven.

Y finaliza reproduciendo un párrafo completo de Chwolson ⁽²⁾:

“Afirmando que el descubrimiento del principio de la Entropía es lo más alto que el pensamiento humano ha concebido hasta ahora en todos los campos del conocimiento; que los pensamientos sobre los que se funda este principio descuellan incomparablemente en profundidad filosófica, en amplísima significación para el conocimiento de los seres y en infinita fecundidad, y que ninguna ciencia ha mostrado un resultado, una idea, que pueda sostener comparación frente a la grandeza del principio de la Entropía. La Humanidad se puede sentir orgullosa de este principio, que lleva el sello de belleza de la verdad absoluta, más que por todos los demás, por los que ha luchado y ha alcanzado... Entre las pocas verdades que la humanidad ha alcanzado es la más preeminente la ley de la Entropía”.



DYNA

Revista oficial de la Agrupación de Ingenieros Industriales de Bilbao.

REDACCIÓN Y ADMINISTRACIÓN: EN EL DOMICILIO SOCIAL. ESTACIÓN, 1, 1.º TEL. 1029

AÑO III. Núm. 25.

ENERO 1928

SE PUBLICA TODOS LOS MESES

Comité de Redacción: ANDRÉS DE BENGOA, LUIS CHECA, MARIO MARTÍNEZ R. DE LA ESCALERA, PEDRO MENDIZÁBAL, JOAQUÍN PÉREZ CARRANZA, LUIS POMBO, FÉLIX ORÁA, JOSÉ L. TORRÓTEGUI, J. RICARDO DE ZUBIRÍA. Redactor Jefe PEDRO BERROYA. Secretario RAFAEL PADRÓ INGENIEROS INDUSTRIALES.

Precios de suscripción: Bilbao, 10 Ptas. año. Resto de España 12. Extranjero, 15 Francos oro. Número suelto, 1,25. Atrasado, 1,50

S U M A R I O

	PAG.		PAG.
Observación sobre la interpretación estadística.		Revista de Revistas.....	11
Por D. J. R. de Zubiría, Ingeniero Industrial...	1	Información económico-industrial.....	22
Estudios sobre entrefenimiento del material móvil		Sección editorial.....	35
Por D. C. Laffite, Ingeniero Industrial.....	5	Crónica de la Agrupación.....	37
Tensión de transporte más económica para las		Nombramientos y destinos, Miscelánea.....	38
líneas eléctricas.—Por D. Mario Martínez de la		Bibliografía.....	39
Escalera, Ingeniero Industrial.....	7		

Fig. 4: Cabecera del número de DYNA con el primer artículo de J.R. de Zubiría

¹ Oswald Spengler (1880-1936), filósofo e historiador alemán, que en su obra *La Decadencia de Occidente*, propone un ciclo para las civilizaciones que finaliza con su declive

² Orest Danilovich Chwolson (1852-1934), físico ruso, activo en los campos de la electricidad, el magnetismo, la fotometría y la cosmografía.

3. LOS ARTÍCULOS DE J. R. DE ZUBIRÍA

Es a partir de entonces cuando surge la intensa aportación escrita de J.R

literario de la época. En cambio, Mario Martínez Ruiz de la Escalera que le replicó y puntualizó en tres ocasiones, era profesor de la Escuela de Bilbao, domi-

sa de muy pocas ideas. Básicamente, que los “sabios” avanzan proponiendo teorías contradictorias, por lo que no se debe tomar como inmutable cualquiera

AÑO	MES	TÍTULO DEL ARTÍCULO
	ENERO	Nota sobre el segundo principio de termodinámica Observación sobre la interpretación estadística
	FEBRERO	Nota sobre el segundo principio de termodinámica El “demonio” de Maxwell y la ley de los grandes números
	MAYO	Nota sobre el segundo principio de termodinámica Carácter circunstancial y antropomórfico del segundo principio
	JULIO	Nota sobre el segundo principio de termodinámica ¿Demuestra la mecánica estadística el segundo principio?
	AGOSTO	Nota a la “Nota sobre el principio del aumento de la entropía” por Mario Martínez Ruiz de la Escalera
1928	SEPTIEMBRE	Lamentaciones de un espectador por José Pérez Salado
	SEPTIEMBRE	Nota sobre el segundo principio de termodinámica Sobre un posible desdoblamiento del factor de degradación en los fenómenos de agitación térmica
	OCTUBRE	El segundo principio fundamental de la termodinámica clásica (1ª parte) por Mario Martínez Ruiz de la Escalera
	NOVIEMBRE	Nota sobre el segundo principio de termodinámica Algo en las sociedades humanas que interesa al segundo principio (1ª parte)
	DICIEMBRE	Nota sobre el segundo principio de termodinámica Algo en las sociedades humanas que interesa al segundo principio (2ª parte)
	FEBRERO	El segundo principio fundamental de la termodinámica clásica (2ª parte) por Mario Martínez Ruiz de la Escalera
	MARZO	Los sabios y la entropía
1929	SEPTIEMBRE	Nota sobre el segundo principio de termodinámica Una sola clase de energía
	DICIEMBRE	Nota sobre el segundo principio de termodinámica Sobre la utilidad de las obras de vulgarización científica Beethoven y beethovenes
	FEBRERO	Nota sobre el segundo principio de termodinámica Algunos conceptos fundamentales. Empleo de un símil
1930	AGOSTO	Nota sobre el segundo principio de termodinámica Alcance de una hipótesis de dos factores
1931	MARZO	Nota sobre el segundo principio de termodinámica Demostración (continuará)

Tabla 1: Los artículos de J.R. de Zubiría (■) y las réplicas publicadas (■)

de Zubiría a lo largo de los tres años siguientes. Ingeniero Industrial, graduado por la Escuela de Barcelona en 1902, trabajó en Altos Hornos de Vizcaya, siendo nombrado Adjunto a la Gerencia en 1933. Casi todos los textos de los artículos que escribió son puramente discursivos, con una fuerte carga filosófica, y redactados en el retórico estilo

naba los aspectos técnicos y matemáticos de las teorías expuestas y proponía los desarrollos pertinentes a las cuestiones planteadas.

¿Tenía en mente J.R. de Zubiría la magnitud de su dedicación a este tema? Probablemente no, pero la realidad es que produjo cuatro artículos en los seis meses siguientes conteniendo la defen-

de sus consideraciones y que la interpretación probabilística del 2º principio nos puede hacer dudar de las afirmaciones de Clausius sobre el crecimiento de la entropía. Y, por no decir que del “demonio” de Maxwell no puede deducirse más que una confirmación de la imposibilidad práctica de su actuación; o que el apelar a la probabilidad para

explicar hechos “brutos” (reales) se hace solo por no poder conocer la profunda complejidad de un fenómeno.⁽³⁾ En resumen, que las leyes de la Ciencia pueden ser exactas para los hechos científicos, pero que para los hechos naturales “solo Dios puede estar en posesión de la verdadera ciencia”, lo que hace que aquellas nunca deben ser tomadas como dogma.

La reacción de Mario Martínez, considerándose aludido como científico, no se hizo esperar, y en un artículo de respuesta defendió el poder demostrativo de la Ciencia, desarrollando en parte y alegando excesiva extensión para completar las formulaciones, la coherencia del 2º principio con la teoría cinética de los gases. Al mes siguiente, un lector escribió solicitando un debate más claro que hiciera accesibles a los lectores los fundamentos de esta teoría sin prejuicios previos de quienes abordaban el tema.

A partir de este momento, las publicaciones de ambos autores siguen derroteros diferentes. Por ejemplo M. Martínez publicará un solo trabajo en dos partes exponiendo, a modo de apuntes didácticos para “mejor comprender los interesantes estudios del Sr. Zubiría”, lo que es el planteamiento técnico del 2º principio siguiendo la termodinámica clásica. Sin embargo, J.R. de Zubiría lanzará ese mismo año dos artículos más, el primero en la misma línea de los anteriores pero el segundo, de considerable extensión y en dos partes, planteando sus teorías sobre las características comparativas del fenómeno entrópico en relación con las sociedades humanas.

Según ellas, las personas de un pueblo pueden considerarse como las moléculas de un fluido y las actuaciones de sus individuos, si se efectúan de forma caótica, lo que llama “democracia por choque”, va resultando en una degra-

dación similar al aumento de la entropía. Si a esa democracia se le suman virtudes cívicas cristianas, se produce una “sobregradación”, una reducción de la entropía. Eso también lo puede conseguir un líder, y pone el ejemplo de Mussolini en lo político o Ford en lo industrial, que organizan y “sobregradan” a colectivos anárquicos, pero con consecuencias que pueden ser funestas por la falta de libertad, aunque a veces se considere un mal menor. Lo mismo que actuamos técnicamente sobre los fluidos para obtener trabajo de la agitación térmica, llega a afirmar que para evitar que la libertad no se convierta en libertinaje, en el caso de la anarquía, “la dictadura debe ser un paso hasta que el pueblo vuelva a adquirir las virtudes ciudadanas”, para volver a concederle el máximo de libertad y llevarle con una adecuada dirección.

La producción de artículos en el año siguiente es bastante menor. Comienza con una presentación de las considerables discrepancias entre los sabios sobre la entropía, reproduciendo la polémica planteada en la revista *L'Électricien* sobre una alocución del presidente de la *Institution of Electrical Engineers* habida el año 1903. Sigue otro, defendiendo que, a su juicio, no es posible hablar de energías más o menos degradadas, sino que todas las energías deben situarse al mismo nivel, y que si no lo vemos así es por no disponer aun del conocimiento preciso sobre los fenómenos de transformación. En el último, incide en la necesidad de la vulgarización científica, por ejemplo sobre la entropía, de modo que los *ignorantes* sean capaces de asimilar lo dicho en el lenguaje de los sabios y que éstos vean físicamente lo que redactan matemáticamente, lo mismo que un compositor sabe lo que representan sus signos que ponen la música al alcance de los simples mortales.



Fig. 5: Altos Hornos de Vizcaya en la época de los artículos

³ James Clerk Maxwell (1831-1879), expuso lo siguiente en 1871 en su libro “Theory of Heat”, sección “Limitación de la segunda ley de la Termodinámica”:

Uno de los hechos más relevantes de la termodinámica es que no se puede producir una diferencia de temperatura y/o presión en un sistema adiabático a volumen constante sin ejercer trabajo sobre el sistema. Esta es la segunda ley de la termodinámica y se cumple mientras tratamos solo con las propiedades macroscópicas de los cuerpos y no podemos percibir o manipular las moléculas que los componen. Si concebimos un ser cuyos sentidos son tan agudos que puede seguir la trayectoria de cada molécula, entonces este ser, cuyos atributos son tan finitos como los nuestros, podría hacer lo que es imposible para nosotros. Hemos visto que para una caja llena de gas a temperatura constante las velocidades de las moléculas no son constantes aunque la velocidad media se mantiene constante para un número grande de ellas. Supongamos ahora que la caja se divide en dos con un pequeño agujero en la división y que un ser que ve las moléculas, abre y cierra el agujero dejando pasar las moléculas rápidas para un lado y las lentas para el otro. Así crea una diferencia de temperatura entre los dos lados sin hacer trabajo, contradiciendo la segunda ley de la termodinámica.



Fig. 6: ENTROPÍA, escultura de Jorge Elizondo en la Universidad de Monterrey (México)

Los artículos que J.R. de Zubiría publica en los dos años posteriores son menos aún, solamente tres, pero de una mayor coherencia. Trata de comparar el ciclo de Carnot con la operación de cribado de una arena compuesta por granos y fino, asimilándola a la energía con parte útil y parte “degradada”, presenta una hipótesis de dos factores (degradación y *sobregradación*) frente a la de Clausius de un solo factor y finaliza en marzo de 1931, iniciando una demostración de esta hipótesis que pro-

mete continuar, continuación que nunca se produjo.

4. EVOLUCIONES POSTERIORES DEL CONCEPTO DE LA ENTROPÍA

Desde la época en que se escribieron los artículos de J.R. de Zubiría han pasado más de 80 años y el concepto de la entropía contemplado por diferentes ámbitos técnicos o humanísticos, con

propuestas rigurosas o banales, sigue alimentando certezas y controversias. Disponemos de la ley de Boltzmann, $S = k \cdot \ln W$, que representa la entropía de un macroestado gaseoso compuesto por W microestados posibles y de las posteriores leyes de Bose-Einstein para las partículas denominadas bosones y la de Fermi-Dirac para los fermiones (ver el modelo estándar en *Algo más sobre los aceleradores de partículas* DYNA n°2 de 2012). También se afronta la paradoja del demonio de Maxwell con el argumento de que la adquisición de su conocimiento y de la información necesaria supone una importante inversión en energía.

Y qué decir de las aplicaciones del término entrópico a la química, a las matemáticas, a la métrica, a la informática o a la cosmología. Pero centrándonos en el aspecto humanístico que contemplamos, es de notar la extensión del concepto entropía a la información, para medir la incertidumbre de un texto fuente o de un conjunto de datos, a la biología para sostener que los sistemas biológicos evolucionan hacia estados en equilibrio energético con su entorno o a la economía, en la que hay quien denuncia el posible agotamiento de los recursos, salvo una decisión universal que lo evite. En sociología y en política, la incertidumbre o degradación de lo que va sucediendo con los acontecimientos instalados en un sistema social será medida por la variación de su entropía

¿Son las leyes físicas de la energía las que motivan todo acontecimiento temporal en cualquier aspecto material o inmaterial? El Universo procede de un estado sencillo, restringido, condensado y homogéneo y va haciéndose cada vez más complejo, disperso y granular en continua aceleración. Dejamos abiertas estas incógnitas, que tanto preocuparon en su tiempo a nuestro compañero Zubiría ⁽⁴⁾, para que los lectores del siglo XXI que lo deseen nos transmitan sus aportaciones a la luz de las nuevas tecnologías de las que disponemos ahora los ingenieros industriales. ¿Resultaría posible reanudar actualmente el debate que se inició en DYNA hace más de 80 años?.

⁴ Los artículos de José Ricardo de Zubiría son accesibles en nuestra web (www.revistadyna.com) por medio del Buscador de Contenidos (Archivo histórico) y en el año y mes correspondiente a cada uno.

TORRE IBERDROLA

Servicios y sistemas: confort, eficiencia y sostenibilidad

Jon Zubiaurre-Sasia Ingeniero Industrial.
IDOM, Ingeniería y Consultoría, S.A.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5051>

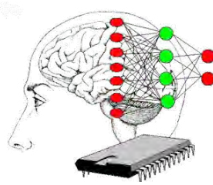
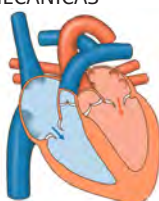
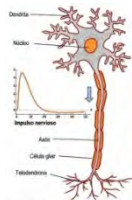
1. INTRODUCCIÓN

Los nuevos edificios tecnológicamente avanzados requieren de una ingeniería compleja cuya sofisticación resulta comparable a los equipamientos de los productos típicamente industria-

lizados, tales como la maquinaria de precisión y los aparatos de última generación. A este respecto la Torre Iberdrola constituye un ejemplo de edificio de oficinas con sistemas estructurales, electromecánicos y de comunicaciones, que pueden calificarse como “High-Tech”, cuyo objeto es la consecución de ambientes aptos para el desarrollo de la actividad de los usuarios. El edificio, que presenta una solución estructural engarzada con las peculiaridades ar-

quitectónicas, dispone de unos sistemas que garantizan un adecuado confort higrotérmico y una exigente calidad del ambiente interior, con una iluminación inteligente. Asimismo se aseguran las comunicaciones dentro de los estándares más exigentes, así como la seguridad y la vigilancia, la gestión del tráfico interno, la flexibilidad de uso y su adaptación a configuraciones futuras. Todo ello subordinado al objetivo subyacente de la sostenibilidad y la eficiencia.

La Torre Iberdrola se presenta como un edificio de 165 m. sobre rasante, que dispone de 41 plantas con 50.000 m² sobre la cota de acceso y 5 niveles inferiores para servicios e instalaciones, además de un aparcamiento con 485 plazas. El diseño arquitectónico conceptual ha sido llevado a cabo por

Sistema	Subsistema	Sistema	Subsistema
ESTRUCTURA 	• Vaciado de la Parcela • Cimentación • Cimentación directa • Cimentación profunda • – Núcleo. • Muro Núcleo • Elementos de rigidización • Muro interior del núcleo • – Pilares • Perimetrales mixtos • Metálicos • Hormigón • – Forjados • De hormigón armado • De hormigón postesado • Chapa colaborante	SEGURIDAD Y TELECOMUNICACIONES 	• Sistema de detección de incendios • Sistema de detección de monóxido de carbono • Sistemas de vigilancia y prevención de la intrusión • Sistemas de alarmas y mensajería • Infraestructura de telecomunicaciones • Sistemas de redes de voz y datos • Sistemas de telefonía • Building Management System (BMS)
INSTALACIONES MECÁNICAS 	• Climatización y Ventilación • Sistemas de extinción de incendios • Fontanería, Saneamiento y recuperación y tratamiento de aguas • Instalación Receptora de Gas Natural • Producción y Distribución de Vapor • Almacenamiento y Trasiego de combustibles • Sistema de evacuación de humos en caso de incendio • Equipamiento de apoyo a la intervención externa de bomberos • Sistemas de ventilación para asistencia a la evacuación de personas	INSTALACIONES AUDIOVISUALES 	• Sistemas de transmisión de imagen y sonido • Sistemas de traducción simultánea
INSTALACIONES ELÉCTRICAS 	• Electricidad Media Tensión (MT) y Baja Tensión (BT) • Iluminación • Instalaciones de extensión y conexión en MT • Protección contra el rayo y sobretensiones • Redes de tierras • Suministros Complementarios	TRANSPORTE 	• Sistemas de Transporte Vertical

Desglose de los sistemas de Ingeniería de Torre Iberdrola

el estudio de arquitectura de Cesar Pelli e IDOM ha desarrollado los proyectos de ingeniería de estructuras e instalaciones, así como la Dirección de Obra de la edificación en su conjunto.

2. CLIMATIZACIÓN, EFICIENCIA ENERGÉTICA Y SOSTENIBILIDAD

De acuerdo a la Directiva 2010/31/UE relativa a la Eficiencia Energética en los Edificios, el sector de la edificación en la Unión Europea es responsable del 40% del consumo de Energía Primaria de la Unión y dentro de esta categoría, las necesidades de los sistemas incluidos en el acrónimo HVAC (Heat Ventilation and Air Conditioning) presentan un peso significativo. Siendo una realidad que el Acondicionamiento de Aire es responsable de una porción importante del consumo energético de los países desarrollados, es en Europa donde existe una especial conciencia al respecto. Esta sensibilidad está impulsando restricciones en los sistemas de Climatización y Ventilación, que de manera creciente impulsarán edificios paulatinamente más eficientes. A este respecto la Torre Iberdrola incorpora un diseño, tanto arquitectónico como de sistemas, orientado a la eficiencia.

A este respecto la fachada de los edificios en altura se configura como un gran intercambiador de calor y tiene gran influencia en el consumo del sistema de Aire Acondicionado, así como en el confort de los ocupantes. El intercambio de masa y energía a través de la fachada presenta en ciertos momentos balances que fomentan el ahorro y en otros el efecto contrario. Incluso en los casos en los que la transmisión de calor es favorable a la eficiencia, existen

efectos de desconfort local, tales como asimetrías radiantes, que desvirtúan los balances estrictamente termodinámicos. Dotar a las fachadas de los edificios de un comportamiento activo inteligente es uno de los desafíos en el diseño de los edificios modernos.

La eficiencia energética está asimismo relacionada con la flexibilidad. La necesidad de que se consuma energía sólo en aquellas zonas en las que se necesita obliga de diseñar sistemas flexibles, que permitan arrancar o parar en función de su uso. De este modo la Torre Iberdrola dispone de una organización optimizada de los sistemas que consumen energía tales como la climatización y la iluminación, tratando de relacionar el consumo de las instalaciones con el uso real del servicio y minimizando las pérdidas en sistemas generales de distribución. A este respecto, el arranque de compresores de gas refrigerante se asigna directamente al usuario y no se centraliza. La utilización de este principio evita por una parte consumos en equipos parásitos de distribución de energía y adicionalmente fomenta el ahorro por parte del propio usuario.

Por otra parte existe una centralización de la supervisión del funcionamiento y la posibilidad de condicionar estrategias y limitaciones del grado de libertad del usuario, que redunden en el ahorro de energía, tales como apagar unidades que se hayan quedado encendidos a la noche por error, limitar las fluctuaciones térmicas dentro de unos rangos, fomentar la refrigeración gratuita nocturna bajo ciertas condiciones, recibir información de parámetros de funcionamiento en tiempo real, que permitan un mantenimiento preventivo y en algunos casos predictivo de los equipos.

La flexibilidad está también implícita en el diseño de sistemas que puedan ser adaptables a diferentes configuraciones interiores de oficina. Las modificaciones propias de estos edificios se pueden reconfigurar básicamente mediante modificaciones de software.

2.1. LA FACHADA Y SU ACOPLAMIENTO CON EL SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO

La Torre Iberdrola ha sido diseñada con una fachada activa, que por una par-

te regula la transferencia de la radiación solar hacia el interior de forma dinámica y por otra establece una zona de “buffer” térmico entre el exterior y el interior, mediante el paso de una corriente de aire forzada activada por el sistema de ventilación.

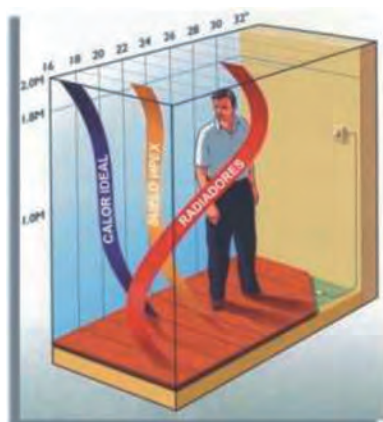
Respecto al concepto de fachada activa existe una variada bibliografía. Transcribimos aquí un párrafo de ASHRAE Handbook of Fundamentals que en su capítulo relativo a “Fenestration” que señala lo siguiente:

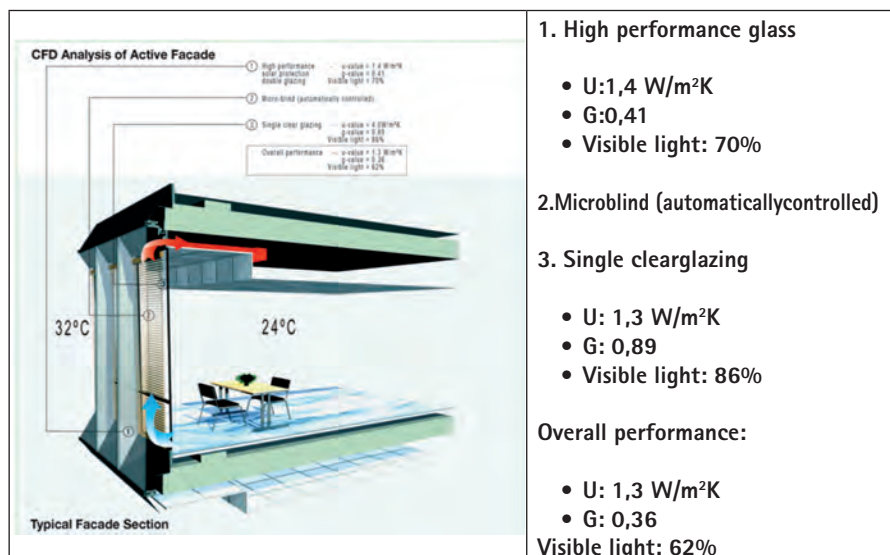
“If properly managed, airflow between panes of a double-glazed window can improve fenestration performance... These systems can control window heat transfer under many different operating conditions. Brandle and Boehm (1982) and Sodergren and Bostrom (1971) give details on airflow or exhaust windows”.

El diseño de la fachada de Torre Iberdrola presenta las siguientes características conceptuales:

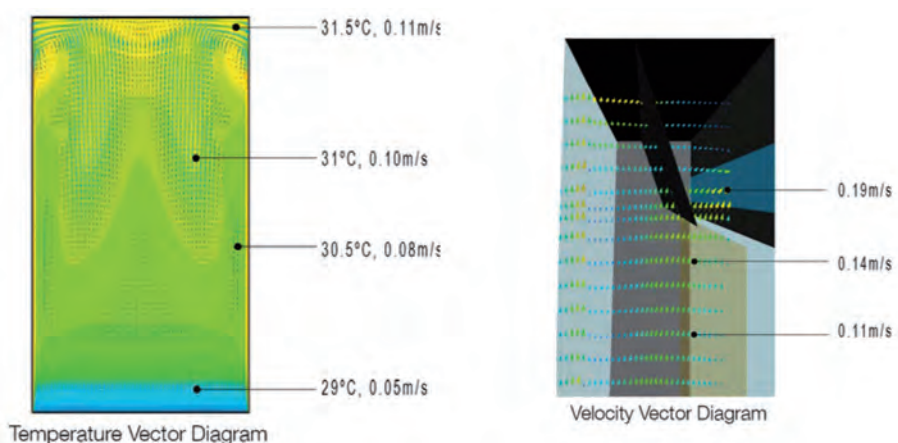
- Vidrio exterior con un factor solar y un coeficiente de transmisión térmica exigentes
- Cámara intermedia que transfiere el aire interior del recinto hacia el retorno del sistema de aire acondicionado favoreciendo la evacuación de calor del intersticio
- Vidrio interior de características convencionales
- Persiana veneciana intermedia motorizada y controlada mediante un sistema automatizado de seguimiento solar y sonda de luminosidad que gestiona la transmisión radiante al interior de los espacios climatizados.

El esquema de funcionamiento abunda en la idea de aprovechar el nivel térmico del aire que se expulsa al exterior mediante el sistema de ventilación por medio de una cámara “buffer” entre la zona interior y el ambiente exterior. El aire que se expulsa al exterior se hace circular por la cámara intermedia de fachada con el efecto de limitar las diferencias térmicas habituales de las fachadas acristaladas y de reducir el calor perdido en invierno o ganado en verano. La cortina existente en esta cámara limita la entrada de radiación directa en verano y la corriente de aire evacúa el calor acumulado en la cámara. Como resultado, la fachada activa permite gestionar la transmisión térmica por radiación y convección de una manera

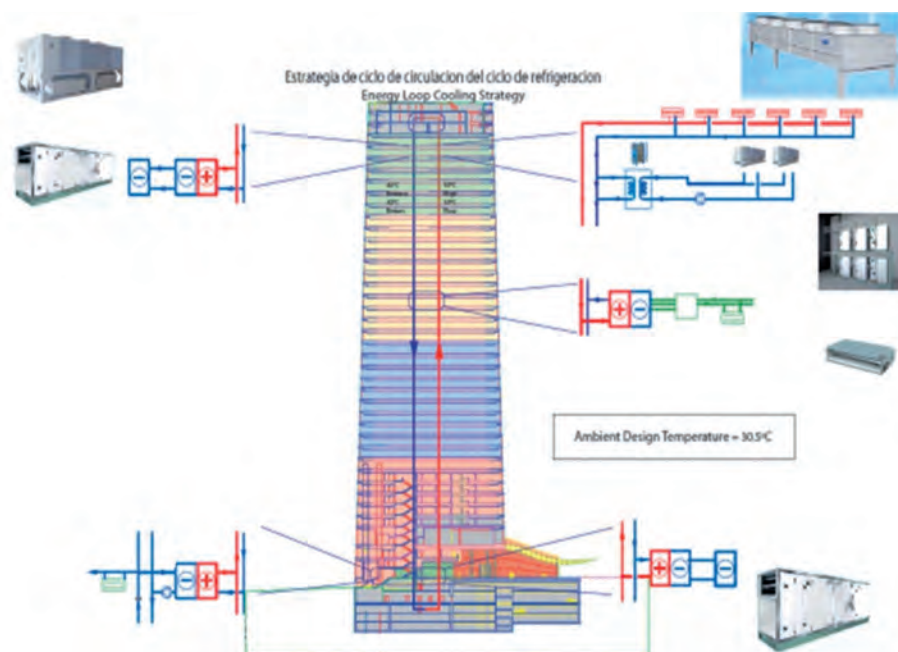




Esquema de la fachada activa. Imagen propiedad de Torre Iberdrola AIE



Estudio de distribución de temperaturas y velocidades en el interior de la fachada. Imagen propiedad de Torre Iberdrola AIE



Esquema general del sistema de climatización. Imagen propiedad de Torre Iberdrola AIE

dinámica optimizando el consumo en función de las condiciones exteriores y fomentando un mayor confort en los espacios de oficina cercanos a la fachada.

2.2 CONFIGURACIÓN CONCEPTUAL DEL SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN

La instalación de acondicionamiento de aire del edificio se organiza mediante un anillo de agua atemperada sobre el que toman o disipan energía los diferentes equipos de climatización distribuidos por el edificio. La disipación de calor en ciertos espacios y la captación en otros, fomenta una transferencia de energía entre zonas cálidas y frías del edificio, que genera una recuperación de calor entre áreas. El balance global entre el calor emitido al anillo de agua y el disipado, es resuelto a través de la cubierta mediante equipos aerorefrigeradores o calderas.

La utilización de equipos de aire acondicionado con compresores distribuidos conectados a un sistema de distribución de energía centralizado, permite realizar transferencias de calor entre zonas deficitarias y excedentarias a la vez que reduce a cero el consumo asignado a locales individualizados en ausencia de demanda. El diseño combina por tanto las ventajas de los sistemas centralizados, que consideran el edificio como un ente global y de las instalaciones distribuidas, que se ajustan fácilmente a las demandas de los ambientes individuales.

La organización del sistema de aire acondicionado en los espacios interiores garantiza unos exigentes niveles de ventilación, así como la capacidad de compensación de las cargas de refrigeración y calefacción, que pueden ser importantes y variables en el tiempo. La posible utilización de espacios destinados a Centros de Proceso de Datos o a otras aplicaciones específicas generadoras de calor, requiere de una planifica-



Aerorefrigeradores. Imagen propiedad de Torre Iberdrola AIE



Sistema de ventilación y equipos interiores en una planta tipo

ción previa para garantizar la disipación de este calor y su aprovechamiento en áreas necesitadas utilizando el anillo energético como modo de transferencia. Adicionalmente los equipos de cubierta incorporan sistemas de “back-up” para afrontar eventuales situaciones de climatología extrema y demanda punta.

El sistema de aire acondicionado en el interior de las plantas de oficina se organiza permitiendo diferentes módulos por planta (módulos de aprox. 200 m²). Cada uno de estos módulos dispone de su equipamiento de aire acondicionado con compresores propios conectados al anillo de agua atemperada (bucle energético). Estos equipos utilizan múltiples unidades interiores que climatizan los diferentes espacios compartimentados en los que se permite un control térmico individualizado. Con el objeto de minimizar los efectos de las futuras modificaciones en la distribución de espacios,

tales como un cambio de posición de despachos, la sustitución de un espacio diáfano por una sala de reuniones, etc. se ha realizado un diseño de falsos techos que reduce al mínimo las actuaciones necesarias para adaptarse a la nueva situación. Gran parte de las modificaciones se realizan de forma virtual mediante cambios en la programación de los equipos.

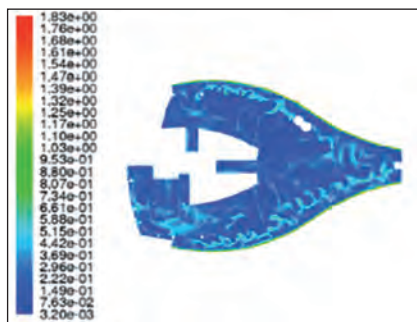
En términos de recuperación de calor, existen mecanismos adicionales que efectúan un trasiego de energía entre las propias unidades interiores de un módulo de oficina. Así se puede enviar calor a las zonas de fachada desde los propios compartimentos interiores de la misma oficina mediante el empleo de equipos que balancean la energía antes de recurrir al anillo energético que los conecta con el sistema central.

3. CLIMATIZACIÓN DEL LOBBY Y OTRAS ÁREAS SOCIALES DEL EDIFICIO

El lobby de la Torre Iberdrola configura un espacio singular de gran volumen en el que se ubica la recepción y un amplio lugar de encuentro además de un auditorio. Los espacios con diferentes sistemas individualizados de control térmico han sido sometidos a un análisis de difusión de aire mediante el uso de software CFD (Computational Fluid Dynamics).



Atrio de entrada. Imagen propiedad de Torre Iberdrola AIE



Estudio de velocidades residuales de aire mediante CFD. Imagen propiedad de Torre Iberdrola AIE



Unidad de tratamiento de aire del lobby. Imagen propiedad de Torre Iberdrola AIE

Los equipos de climatización de estos espacios disponen de Unidades de Tratamiento de Aire individualizadas por zonas, que realizan la filtración y la compensación térmica requerida para garantizar las condiciones de confort adecuadas.

Existen otras zonas sociales en los niveles inferiores: restaurante, salas de congresos, etc. que son climatizadas mediante equipos situados en una sala de máquinas cercana que equipa además sistemas de preparación de Agua Caliente Sanitaria que se precalienta mediante la recuperación de calor generado en otras áreas del edificio.

4. SISTEMA DE VENTILACIÓN Y CONTROL DE HUMEDAD EN LOS AMBIENTES

Una adecuada ventilación es el fundamento para obtener ambientes salubres en el interior de los edificios. En el caso de la Torre Iberdrola, la calidad del aire interior está fundamentada en la consecución de unos volúmenes importantes de ventilación, en la adecuada filtración mecánica del aire introducido, su adecuación higrométrica mediante la dosificación de vapor de agua y el control de contaminantes mediante sondas combinadas de V₂O y CO₂ para controlar la Calidad del Aire Interior. Por otra parte, los elementos constructivos del edificio han sido certificados como no emisivos de Compuestos Órgano Volátiles (COV_s). La totalidad del proceso para garantizar los resultados, es monitorizada como parte de los requerimientos de la certificación de Sostenibilidad LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) en la que el edificio ha sido certificado con la calificación “Platino”.

El grado de higienización de los ambientes resulta especialmente cuidado en el proyecto, de manera que los espacios corporativos de IBERDROLA equipan unidades con sistemas de filtración biológica mediante fotocatalisis.

La ventilación de los espacios utiliza Unidades de Tratamiento de Aire, que también intercambian calor con el anillo energético de distribución de agua atemperada, a través de bombas de calor agua-agua.

Las Unidades de Tratamiento de Aire se encargan de distribuir aire filtrado y tratado higrotérmicamente a la

Equipos	Unidades
Aerorrefrigeradores	9 Uds.
Plantas enfriadoras Principales	4 Uds.
Generadores de calor Principales	3 Uds.
Unidades de Tratamiento de Aire	17 Uds.
Equipos de climatización de oficina	155 Uds. exteriores/1.874 Ud. interiores
Transformador Aire Acondicionado	

Equipamiento de climatización

totalidad del edificio. Las citadas unidades disponen de las siguientes secciones:

- Recuperación de calor entálpico rotativo con eficacia del 70%.
- Filtración mecánica del aire de impulsión y retorno (filtro final F-8 s/ EN13779). En algunas áreas existe filtración adicional mediante sistema de fotocatalisis.
- Batería para refrigeración/Calefacción del aire alimentada por agua a 7°C/50°C.
- Compuertas motorizadas que en función de su posición permiten la gestión del enfriamiento gratuito

Sistemas integrados en el SCADA (Supervisory Control and Data Adquisition)		
Incendios	Grupos de Presión	Cortinas
Ascensores	Plantas Técnicas	Climatización
Cuadros eléctricos	Climatizadores	Seguridad
Centros de Transformación	Iluminación	Grupo Electrógeno

(free-cooling entálpico).

- Sistemas de control de humedad en ambientes mediante dosificación de vapor en el flujo de aire.
- Ventiladores con variadores de frecuencia para asegurar un régimen de trabajo con un consumo optimizado.

El diseño de estas UTAs (Unidades de Tratamiento de Aire) permite asegurar unos volúmenes de ventilación muy superiores a los estrictamente obligatorios por normativa. El tratamiento de aire incluye una filtración exigente y la recuperación de energía del aire expulsado. Adicionalmente el sistema de control del equipo decide en que momentos resulta más eficiente la recuperación de calor o la simple introducción de aire en las condiciones higrotérmicas exteriores.

Por otra parte, como medida de ahorro energético adicional, el edificio utiliza un sistema de circulación del aire

de ventilación a través del lobby del edificio, que se comporta como un medio de recuperación de calor añadido.

El control de humedad de los ambientes se garantiza mediante una instalación de producción, distribución y dosificación de vapor.

La instalación produce vapor saturado seco a 4 bar, se realiza en una caldera específica y se distribuye a los elementos terminales de dosificación (lanzas de vapor) que incorporan un control automatizado. El sistema incorpora una red de recuperación de condensado y los correspondientes sistemas de control de la salinidad mediante tratamiento del agua de aporte y control de purgas automatizado.

5. SISTEMA DE GESTIÓN TÉCNICA CENTRALIZADA

La totalidad del edificio está gober-



BMS. Relación de disciplinas supervisadas. Imagen propiedad de Torre Iberdrola AIE



BMS. Supervisión de zonas de alumbrado. Imagen propiedad de Torre Iberdrola AIE



BMS. Supervisión de sistemas de protección solar. Imagen propiedad de Torre Iberdrola AIE



Imagen de una Unidad de Tratamiento de Aire de Ventilación. Imagen propiedad de Torre Iberdrola AIE



Dosificación de vapor en el aire de ventilación. Imagen propiedad de Torre Iberdrola AIE



Medida de presión de aire para control de ventiladores. Imagen propiedad de Torre Iberdrola AIE

nada por un Sistema de Gestión Centralizado o BMS (Building Management System), que supervisa y controla por encima de 6.000 puntos físicos además de un número muy superior de puntos virtuales. El sistema comunica y gobierna multitud de equipos adicionales que disponen de autómatas con inteligencia propia. Los aspectos gobernados por el sistema alcanzan diferentes aspectos de la vida del edificio, desde las consignas de climatización, la posición de las cortinas de la fachada, los niveles de iluminación, el arranque y paro de equipos, la monitorización de niveles, etc. La programación de los parámetros permi-

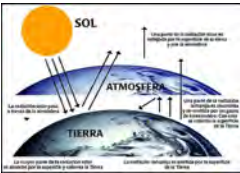
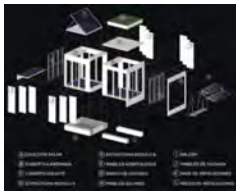
te establecer estrategias de gestión para maximizar el confort y fomentar la eficiencia.

El BMS gestiona asimismo múltiples interoperabilidades entre sistemas.

6. SOSTENIBILIDAD. CERTIFICACIÓN LEED (LEADERSHIP IN ENERGY AND ENVIRONMENTAL DESIGN)

El concepto de sostenibilidad que procede de la biología describe a los sistemas que se mantienen diversos y

productivos con el transcurso del tiempo. Esta idea que ha sido trasladada a diferentes entornos de nuestra sociedad acostumbra a ser evaluada en el ámbito de la edificación mediante programas de certificación normalizados. En este caso Torre Iberdrola ha adoptado el prestigioso sistema de certificación LEED. La citada certificación valora aspectos diversos que alcanzan desde la propia construcción hasta el diseño y la explotación del edificio. Dentro de las posibles graduaciones que la certificación LEED ofrece, Torre Iberdrola ha alcanzado la categoría "Platino", que representa el máximo nivel posible.

CERTIFICACIÓN DE SOSTENIBILIDAD LEED (LEED RATING SYSTEM)		
	• Emplazamiento sostenible	• Prevención de la polución en la construcción • Selección del emplazamiento • Conectividad con la comunidad • Recuperación de terrenos contaminados • Transporte público • Facilidades para el transporte alternativo: eléctrico, bicicletas, etc. • Protección y desarrollo del hábitat • Control y limpieza de la escorrentía • Evitar efectos de isla de calor • Control de la polución lumínica • Involucrar a los inquilinos
	• Eficiencia en la gestión del agua	• Uso eficiente del agua en la urbanización • Tecnologías innovadoras de aprovechamiento de aguas residuales • Uso eficiente del agua en el interior
	• Energía y atmósfera	• "Commissioning" de los sistemas energéticos • Eficiencia energética • Gestión de los refrigerantes utilizados • Medición y verificación de los consumos a todos los niveles de uso • Uso de energía "verde" o renovable
	• Materiales y recursos	• Uso de materiales reciclables • Gestión de los residuos en la construcción • Reutilización de materiales • Uso de materiales regionales • Uso de madera certificada como reciclada
	• Calidad ambiental interior	• Control de la Calidad del Aire Interior durante la construcción y el uso del edificio • Monitorización de la calidad del aire utilizado • Incremento del nivel de ventilación • Utilización de materiales bajo emisivos de COVs • Control de los sistemas de confort térmico • Fomento de la iluminación natural de espacios
	• Innovación en el diseño	• Sistemas innovadores en el diseño del edificio • Empleo de personas oficialmente acreditadas por LEED

Aplicación de catenaria rígida en túneles

Jesús Montesinos Ortuño* y Carlos Arbeloa Antoñanzas**
* ADIF y ** Formarail S.L.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5583>

1. INTRODUCCIÓN

La transmisión de la energía eléctrica al ferrocarril se realiza a través del pantógrafo que contacta con el sistema de conductores, denominado, en el argot ferroviario, *catenaria*.

En los últimos tiempos, la apertura de túneles ferroviarios mediante máquinas tuneladoras ha minimizado sus secciones, de manera que los gálibos se han reducido considerablemente. Las alturas libres en la bóveda para la instalación del sistema de tracción eléctrica en muchos casos no son suficientes para el montaje de una catenaria convencional (catenaria flexible), con lo cual se tiene que recurrir al uso de catenarias rígidas. Pero las características de montaje, mantenimiento y uso de cada tipo de catenaria no son iguales, de manera que hay que establecer una serie de parámetros que sirvan de base para elegir entre un tipo u otro.

Existen básicamente dos sistemas de alimentación aérea a los trenes:

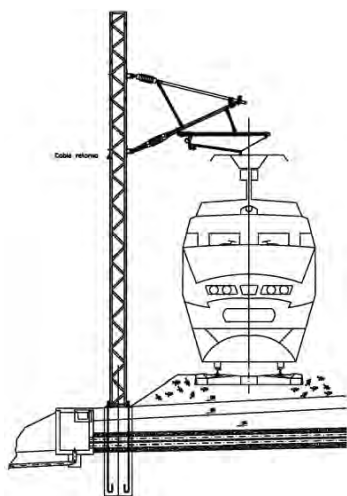


Fig. 1: Alimentación por catenaria convencional y pantógrafo

- *Catenaria convencional*, catenaria flexible o simplemente catenaria, y que corresponde a un conjunto formado por un conductor de cobre denominado hilo de contacto que está soportado por otro conductor de cobre que se denomina sustentador. El elemento por el cual el hilo de contacto pende del sustentador es la péndola. Los motores del tren captan la corriente eléctrica mediante el roce del pantógrafo con el hilo de contacto (Fig. 1).
- *Catenaria rígida*, es la formada por un perfil de aluminio que actúa como viga entre dos soportes y que en su parte inferior soporta al hilo de contacto. La catenaria rígida o perfil conductor aéreo surgió por la necesidad de instalar sistemas de alimentación a la tracción ferroviaria en zonas de gálibo reducido con captación de corriente mediante pantógrafo y como alternativa a la catenaria convencional.

Tanto el sistema de catenaria convencional como el de catenaria rígida tienen la misma misión: permitir el con-

tacto con el pantógrafo para alimentar los motores eléctricos de los trenes.

A través del siguiente artículo se pretende marcar las diferencias entre la catenaria convencional y la catenaria rígida. Estableciendo los parámetros que ayuden a elegir entre una y otra dependiendo de cada caso.

2. CATENARIA CONVENCIONAL VERSUS CATENARIA RÍGIDA

2.1. CATENARIA CONVENCIONAL

En la catenaria convencional, para poder mantener el hilo de contacto paralelo a la vía, necesitamos del sustentador, y en función del peso y de las tensiones mecánicas a las que estén sometidos dichos cables, las péndolas tendrán una determinada longitud, siendo siempre mayores en las inmediaciones del apoyo que en el centro del vano (Fig. 2 y 3).

Con estas características así como por otras causas como pueda ser la elasticidad del sistema, desplazamientos por efecto del viento transversal, etc., se determina el vano máximo (distancia entre dos postes consecutivos) de la catenaria convencional.

En condiciones normales, las distancias entre el hilo de contacto y el sustentador en el apoyo, suelen ser 1,40 m,

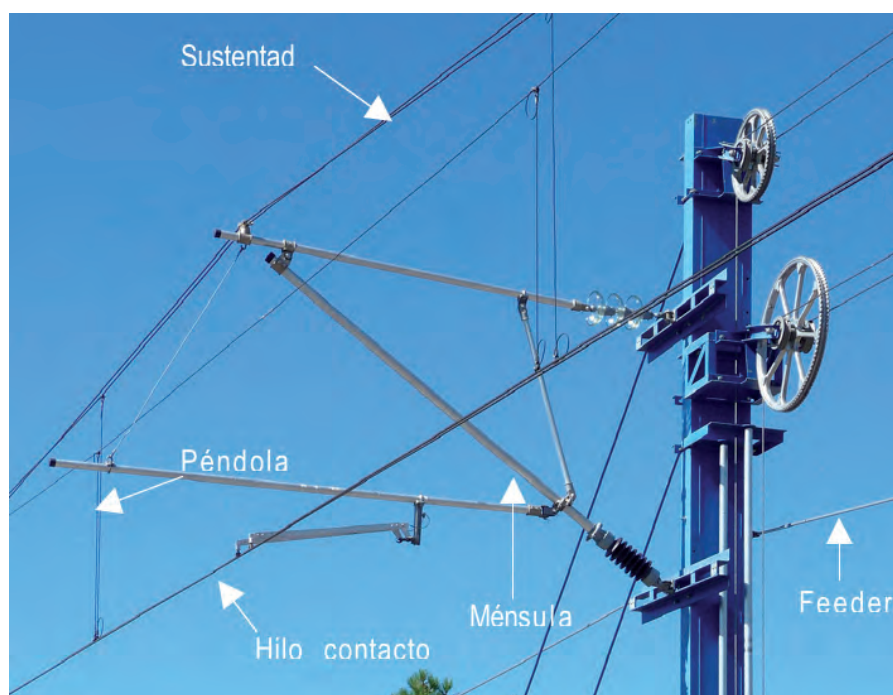


Fig. 2: Catenaria convencional



Fig. 3: Vía doble con catenaria convencional

para una longitud de vano de 60-65 m. Para estos valores la longitud de la péndola mínima en el centro del vano es de al menos 350 mm.

La distancia mínima que se necesita para instalar la catenaria convencional debe ser igual a la altura mínima correspondiente al sistema de captación eléctrica (4,60 m para trenes convencionales) más la altura necesaria para la instalación del sistema de catenaria, a lo cual hay que añadir la distancia de aislamiento de acuerdo con el valor de tensión utilizado.

La distancia necesaria para la instalación de la catenaria convencional en los túneles, implica que la altura del túnel sea mayor, lo cual representa un coste importante en el proceso constructivo.

2.2. CATENARIA RÍGIDA

En el sistema de catenaria rígida se prescinde del cable sustentador, sustituyéndose éste por un perfil de aluminio que, con la rigidez suficiente, soporta un hilo de contacto, permitiendo la captación de corriente por el pantógrafo (Fig. 4).

Tanto el hilo de contacto como el perfil que lo soporta no están sometidos a esfuerzos de tracción, condición más favorable que en el caso de una línea de contacto convencional.

Al tratarse de un perfil metálico, con un elevado momento de inercia, la flecha máxima del conjunto formado por el perfil de aluminio y el hilo de contacto es de 10 mm (en función de la longitud del vano utilizado), teniendo todo el conjunto una altura máxima (según el tipo de perfil) de 200 mm aproximadamente.

A esta altura del conjunto perfil+hilo de contacto, hay que añadir la correspondiente a los sistemas de aislamiento, por lo que la altura necesaria para el sistema es de 250-400 mm.

La reducida distancia que necesita la instalación del sistema de catenaria rígida, permite ahorros significativos en la construcción de túneles.



Fig. 4: Catenaria rígida instalada en un túnel

3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL SISTEMA DE CATENARIA RÍGIDA

El sistema de catenaria rígida está constituido por una viga de aluminio, generalmente en forma de pentágono invertido donde el vértice inferior está diseñado en forma de pinza para poder alojar la cabeza del hilo de contacto. Dicha viga va fijada a la estructura superior mediante soportes aislados.

La forma de pentágono invertido es el resultado del estudio para obtener la mejor relación rigidez-peso propio, de forma que permita conseguir la menor flecha posible entre apoyos.

El conjunto perfil hilo de contacto, debido a su gran sección conductora, sustituye en la mayoría de los casos al conjunto sustentador-hilos de contacto, incluso a los feeders de acompañamiento (Fig. 5).



Fig. 5: Catenaria rígida en interior de túnel

La sección conductora en aluminio para el perfil bajo análisis es de 2.214 mm², lo que representa una equivalencia en cobre por igualdad de resistencia óhmica de 1.408 mm². Con un hilo de contacto de 150 mm² la sección total es de 1.558 mm².

El perfil está fabricado a partir de una aleación de aluminio extruido, en longitudes a determinar previo replanteo de la instalación, con valores de 14, 12 y 10 m.

El aluminio del perfil y el cobre del hilo de contacto, sólo pueden ser combinados de manera conductora en una atmósfera libre de electrolitos para que no exista corrosión. Pero en la práctica éste no es el caso, así que para impe-

dir que se produzcan corrosiones se han adoptado las siguientes medidas:

- Cada perfil va provisto en su parte plana de unos orificios de modo que la acumulación de agua de condensación dentro del perfil, que siempre contiene gases disueltos o elementos agresivos, pueda ser evacuada o evitada por medio de la aireación.
- Al colocar el hilo de contacto, éste ha de ser lubricado, lo que se hace con un manguito conectado a una bomba engrasadora. La grasa especial que se emplea tiene una función protectora y favorece el flujo de corriente entre el aluminio y el cobre evitando fenómenos de corrosión por electrólisis.
- En el sector de las entradas de túnel, en zonas de gran proximidad a la obra civil donde el aislamiento de aire es insuficiente ($e < 150$ mm) y en zonas con humedad, el perfil se protege con una cubierta plástica dieléctrica (Fig. 6).

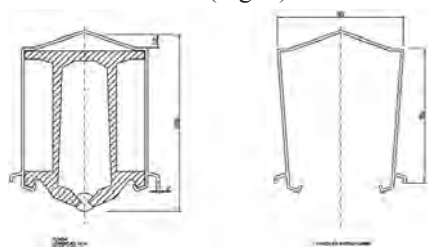


Fig. 6: Esquema de la funda dieléctrica

Por lo que concierne a la forma de sujeción de este sistema de catenaria rígida sobre las vías, se utiliza un herraje de perfil laminado normalizado que soporta un aislador cilíndrico y que a su vez soporta el perfil de aluminio. El conjunto de herraje y aislador se denomina soporte unificado (Fig. 7).

4. MONTAJE Y MANTENIMIENTO DE LA CATENARIA RÍGIDA

Como ya se ha indicado, el montaje de la catenaria rígida debe ser muy preciso y cumplir en todo momento con las tolerancias especificadas previamente.

La distancia necesaria entre la cota mínima de pantógrafos y la obra civil que se necesita implantar la catenaria rígida es de 250 mm.



Fig. 7: Soporte unificado de catenaria rígida

La altura mínima de la catenaria sobre el carril debe ser de 4,60 m. Debiendo ser asegurada esta cota con la temperatura más alta y en la posición más alta del plano de rodamiento, teniendo en cuenta las tolerancias de montaje de la catenaria.



Fig. 8: Brida de unión entre perfiles de catenaria rígida



Fig. 9: Aguja aérea realizada con catenaria rígida

A fin de conseguir una perfecta captación de corriente, la diferencia de nivel entre dos apoyos consecutivos, deberá ser como máximo del 0,1% de la longitud del vano. La flecha en el centro del vano no debe de exceder del 0,1% de la distancia entre dos apoyos.

Las alturas se medirán siempre mediante una línea perpendicular al plano de rodamiento de las vías.

La rigidez mecánica del perfil permite instalar radios de hasta 120 m. Si el perfil se ha curvado previamente de forma mecánica, se pueden incluso equipar vías con radios de 45 m.

La unión de las barras se realiza durante el montaje mediante bridas de unión de características físicas similares a las de los perfiles, manteniendo las propiedades eléctricas a lo largo de toda la longitud del cantón. No obstante para mejorar el contacto eléctrico entre perfil y brida, éstas van previstas de estrías longitudinales que al dar el apriete a los tornillos permiten mejorar el contacto (Fig. 8). Una vez unidas todas las barras que forman el cantón, se realiza el montaje del hilo de contacto.

Para el montaje o desmontaje del hilo de contacto que va alojado en el perfil de aluminio, se utiliza un carro que permite la apertura de la pinza a medida que se desplaza apoyado sobre las alas longitudinales del perfil.

Por lo que respecta a los problemas de dilatación que puedan originarse en estas catenarias rígidas, la experiencia acumulada hasta ahora aconseja resolverlos de la siguiente forma:

- Se tenderá el perfil de aluminio en longitudes máximas de 500 m (41 barras embridadas) estableciendo un punto fijo en la parte central de cada uno de estos tramos. Se logrará de esta forma que la longitud a dilatar a cada uno de los lados del punto fijo sea igual o inferior a 250 m.
- Cada tramo tendido estará separado del contiguo por un solape de catenaria rígida o seccionamiento que permitirá dilataciones sin impedimento, dando continuidad para el paso del pantógrafo. Estos solapes o seccionamientos tienen la finalidad de separar mecánicamente los tramos o la doble función de separación mecánica y eléctrica.

En los seccionamientos, los soportes

unificados (conjunto herraje y aislador) se dispondrán de manera que sujeten a los dos carriles, pero permitiendo su dilatación.

Las agujas aéreas o desvíos se constituirán solapando un tramo de catenaria rígida a la catenaria de la vía a la que se da continuidad (Fig. 9). La longitud de los solapes es del orden de 5-6 m, tanto en seccionamientos como en agujas.

Siempre que un perfil de catenaria rígida comience o termine (en sus extremos), tanto en agujas como en seccionamientos, lo hará con una rampa para que el contacto con el pantógrafo sea suave y progresivo (Fig. 10). Estas barras serán suministradas con la curvatura necesaria, en ningún caso se realizará en obra.

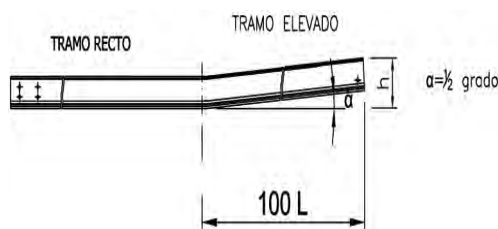
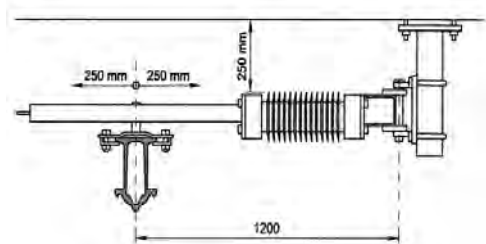


Fig. 10: Esquema de la curvatura de la barra en su extremo

Cuando se instale catenaria rígida en túneles no tubulares y de mayor altura, se colocarán ménsulas o pórticos rígidos contruidos mediante perfiles laminados, normalmente angulares de 60. En estos pórticos o ménsulas, se fijarán



las barras unificadas sobre cada eje del plano de rodamiento (Fig. 11).

Fig. 11: Esquema de ménsula rígida

Cada seccionamiento llevará un punto fijo, en el punto medio de su longitud y podrá dilatarse por sus extremos. La continuidad entre un seccionamiento y el siguiente se logra mediante el solape de sus barras extremas para que

el conjunto pueda dilatarse libremente. Descontando estos solapes cuyo valor será determinado durante el replanteo de la instalación y que tendrá un valor aproximado de 6 m, la longitud útil de un seccionamiento queda reducida a 486 m aproximadamente.

Para iniciar correctamente el replanteo es conveniente comenzar fijando la disposición de los ejes del solape, y a partir de este punto marcar la posición de todos los soportes hacia uno y otro lado.

Puesto que las bóvedas con las que están contruidos los túneles tubulares pueden ofrecer algún inconveniente para fijar en ellas un soporte en un punto exacto (juntas entre dovelas, armaduras, etc), se establece una tolerancia de 300 mm en sentido longitudinal del túnel pero no acumulativa, sino a contar desde donde se comenzó a replantear, es decir el eje de seccionamiento más próximo. No obstante se dispondrá en obra de un stock de aproximadamente un 3% de barras de catenaria rígida extralargas, con objeto de poder corregir cualquier error de replanteo, acumulación de defectos o cualquier otro que se pueda solucionar intercalando una barra de longitud algo superior a la normal.

En planta los solapes se dispondrán formando un conjunto de dos barras de catenaria, centrando con el eje del plano de rodamiento, sin más descentramiento de las barras que el indispensable para lograr su separación.

La separación entre barras en los solapes será de 170 mm entre ejes si debe de haber separación eléctrica y de 110 mm si van puenteadas.

5. CONCLUSIONES

Las ventajas e inconvenientes de la catenaria rígida comparados con la catenaria convencional son los siguientes:

Ventajas:

- Necesita un gálibo reducido, por tanto rebaja los costes en la ejecución de los túneles.
- Tiene una gran sección conductora, por tanto presenta unas caídas de tensión menores.
- Bajo mantenimiento.
- Reducido número de averías (elevada fiabilidad).
- Sencillez y rapidez de montaje.

Inconvenientes:

- Velocidad máxima de circulación reducida (máximo 120-140 km/h).
- Coste de materiales elevado.

A partir de las ventajas e inconvenientes indicados, el montaje de un sistema u otro está definido por el grado de importancia que pueda tener cada uno de los distintos puntos en determinadas aplicaciones. Así por ejemplo, si se trata de una línea de Alta Velocidad, donde el elemento fundamental es la velocidad, aunque sea en un túnel, el sistema a adoptar será el de catenaria flexible; es el caso del túnel de Guadarrama.

Sin embargo, si por las características del trazado, la elevada velocidad no es el objetivo principal, entonces el montaje de catenaria rígida podría ser la opción a elegir. Éste sería el caso del futuro túnel para trenes de Alta Velocidad entre Madrid Atocha y Chamartín.

En los casos en que el condicionante principal es un gálibo reducido, la instalación de catenaria rígida será la opción ideal, junto con las instalaciones metropolitanas en túneles, donde se necesitan velocidades relativamente reducidas (<120 km/h), alta disponibilidad y bajo mantenimiento. Estos son los casos de Metro, Tranvías e incluso trenes de Cercanías (Túnel de Cercanías de Sol, Cercanías de Barcelona, etc).

La catenaria rígida es relativamente joven, los primeros montajes se realizaron a mediados de los años 70, y al igual que la catenaria convencional ha evolucionado desde velocidades máximas de 100 km/h hasta velocidades comerciales de 350 km/h, la catenaria rígida evolucionará mejorando prestaciones y permitiendo mayores velocidades.

En este sentido, por parte de distintas empresas y administraciones ferroviarias, se trabaja en el desarrollo de nuevos perfiles de aluminio y soportes, de tal forma que permita alargar la distancia entre soportes o bien aumentar la velocidad.

PARA SABER MÁS:

[1] Montesinos Ortuño Jesús, Carmona Suárez Manuel. *Sistemas De Alimentación A La Tracción Ferroviaria*. 1ª edición. Madrid: Formarail, 2013. ISBN: 978-84-615-9536-5

AVANCES EN REPRAP: Impresión 3D de código abierto

Alfonso Guerrero de Mier y María del Mar Espinosa. Ingeniería del Diseño, ETSII – UNED

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5659>

1. INTRODUCCIÓN

La comunidad *RepRap*, fundada por **Adrian Bowyer** de la *Universidad de Bath* en febrero de 2004, promueve el diseño de una impresora 3D de prototipado rápido auto-replicante, como un hardware con licencia GPL (*General Public License*).

En este trabajo vamos a analizar el estado actual de la iniciativa *RepRap*, estudiando las diferentes máquinas que ya están en funcionamiento en el mercado, así como las posibilidades técnicas que abre esta tecnología desde el punto de vista de la ingeniería.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1. INTRODUCCIÓN AL PROTOTIPADO RÁPIDO

El prototipado rápido, también denominado impresión 3D, es el término generalizado para denominar a todas las tecnologías de tipo aditivo mediante las que se pueden fabricar objetos. Es muy usada para la fabricación de prototipos de elementos industriales para su estudio, antes de proceder a la fabricación en serie. De este modo se pueden evaluar de forma correcta propiedades que son difíciles de apreciar en los planos del producto, tales como facilidad de manejo, tamaño, aspecto visual, etc.

Las tecnologías de prototipado rápido se basan en el principio de dispersión-acumulación. Los cuerpos a prototipar se modelizan en tres dimensiones mediante programas de diseño asistido, y posteriormente se descomponen en series de capas planas de pequeño espesor, que son apiladas juntas para formar el cuerpo original (Figura 1).

2.2. TECNOLOGÍAS DE PROTOTIPADO RÁPIDO

Las tecnologías de prototipado rápido pueden ser clasificadas según sea el estado del material usado para formar el prototipo: líquido, sólido o pulveriento. Las principales tecnologías son las siguientes [2]:

- **Basadas en líquidos:** El material está inicialmente en estado líquido, y es transformado en sólido mediante un proceso de curado.

- **Curados por láser:** basada en la fotopolimerización de monómeros líquidos inducida por la radiación ultravioleta de un láser. Es una técnica de alta precisión, y puede producir cuerpos muy pequeños con gran calidad superficial. Necesita de postprocesado y de un curado posterior para garantizar la integridad del prototipo. Dentro de esta categoría podemos encontrar, entre otros, los siguientes sistemas:

- **Estereolitografía** (*Stereolithography* o SL). Fue el primer sistema comercial de prototipado rápido, creado en 1988 por *3D Systems Inc.*

- **Sistema de creación de sólidos** (*Solid Creation System* o SCS). Desarrollado por *Sony Corporation*, *JSR Corporation* y *D-MEC Corporation* en 1990.

- **Impresión láser ultra violeta de sólidos** (*Solid Object Ultra-violet Laser Printer* o SOUP) Desarrollado por *CMET Inc.* en 1990.

- **Curados por lámpara UV enmascarada:** la fotopolimerización es producida al mismo tiempo en toda la superficie del líquido por una lámpara ultravioleta a través de una máscara que se modifica para cada capa. Tras el curado, el líquido es sustituido por cera que permite un apoyo sólido para la próxima capa, que debe ser pulida antes de la siguiente deposición. Es un método muy rápido y no necesita elementos auxiliares de soporte, pero es caro, la cera debe ser retirada posteriormente y genera residuos. Fue desarrollado por *Cubital Ltd.* en 1991 con la denominación de *Solid Ground Curing* o SGC.

- **Impresión por inyección:** los elementos son formados mediante la inyección gota a gota de un fotopolímero que es curado con luz ultravioleta. Desarrollado por *Object Geometries Ltd.* en 2000, bajo la denominación de *Inkjet Rapid Prototyping* o Polyjet.

- **Basadas en sólidos:** el material base se encuentra inicialmente en estado sólido, y es recortado/pegado o bien fundido/solidificado para formar el prototipo.

- **Fabricación laminada:** mediante láser u otro medio se cortan las láminas que forman los elementos, que son apiladas y encoladas con resinas. Tiene elevada precisión, pero el postprocesado es lento y genera residuos. *Cubic Technologies Inc.* desarrolló el sistema en 2000, y patentó el término *Laminated Object Manufacturing* (LOM).

- **Modelado por fusión y solidificación con boquilla:** los cuerpos se forman mediante la extrusión de

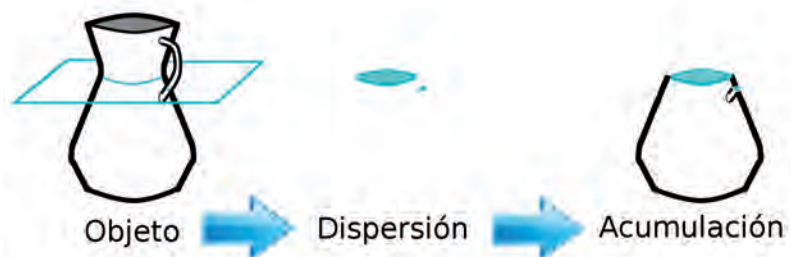


Fig. 1: Principio de Dispersión - Acumulación



Fig. 2: Flujo del proceso de prototipado rápido

un material viscoso fundido, que se deposita por una pequeña boquilla sobre las capas anteriores, aglutinándose por enfriamiento al aire. Se usan materiales termoplásticos como ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) o PLA (ácido poliláctico). El material es calentado y fundido en la boquilla, y posteriormente extruido para formar el elemento. *Stratasys Inc.* desarrolló la tecnología en 1988, y patentó el término *Fused Deposition Modeling*. Es un sistema muy económico, es menos preciso que la estereolitografía o el sinterizado por láser y puede tener problemas de deformaciones al enfriarse. Es la tecnología utilizada actualmente por las máquinas *RepRap*.

• **Modelado por fusión y solidificación con cabeza de impresión:** esta técnica se diferencia de la anterior en que usa una o varias cabezas de impresión con numerosos pequeños inyectores en lugar de una boquilla. Se han desarrollado varios sistemas en esta categoría, entre otros:

• **MultiJet Modeling System (MJM)**, desarrollado por 3D Systems Inc. en 1999, con múltiples cabezas en paralelo que se mueven en un eje.

- **ModelMaker y Pattern Master** de Solidscape, con una sola cabeza de impresión que se mueve en dos ejes.

- **Basadas en materiales pulverulentos:** el material base se encuentra ini-

cialmente en forma de polvo, que es sinterizado mediante el calentamiento selectivo o por la adición de un aglomerante.

• **Sinterizado por láser:** el elemento se forma en base a un polvo fino que se sinteriza al ser calentado por un rayo láser. Esta técnica no requiere de estructuras auxiliares de soporte ni de curados posteriores, pero consume mucha energía y el acabado de las superficies es ligeramente rugoso, aunque muy preciso. Fue desarrollado por 3D Systems bajo la denominación de *Selective Laser Sintering (SLS)*

• **Impresión tridimensional:** los elementos son formados mediante la inyección gota a gota de un aglomerante sobre un polvo. Además, el inyector puede aportar tinta de color con lo que el polvo base puede colorearse de forma selectiva. No necesita estructuras auxiliares de soporte, y se pueden usar diversos materiales con diferentes aglomerantes

Especificación	Valor
Precio de todos los materiales	aprox. 400,00 €
Coste anual (aceite ocasional)	aprox. 5,00 €
	Puede imprimir sus propias piezas de remplazo al coste del material
Tamaño	500 mm (largo)
	400 mm (ancho)
	360 mm (alto)
Peso	7,0 kg
Tamaño máximo construible	200 mm (largo)
	200 mm (ancho)
	140 mm (alto)
Materiales	PLA, HDPE, ABS ...
	Usa filamento de 3 mm de diámetro
Coste del material	PLA: 22,00 €/kg
	HDPE: 11,00 €/kg
	ABS: 17,00 €/kg
Velocidad de extrusión	15,0 cm ³ /h
Velocidad de los ejes X e Y	725 mm/s
Precisión	
Diámetro de la boquilla	0,5 mm
Espesor mínimo	2,0 mm
Precisión en posicionamiento	0,1 mm
Espesor de capas horizontales	0,3 mm
Volumen de piezas impresas aptas para replicar	1.110 cm ³

Cuadro 1: Especificaciones de la RepRap Mendel [6]

(cerámicos, metales y polímeros), que además pueden ser de diferentes colores. El acabado es ligeramente rugoso. Aunque actualmente se denomina impresora 3D a cualquier máquina de prototipado rápido de tamaño pequeño, el término *3D Printer* fue usado por primera vez por *Z Corporation* en 1994 para denominar a este sistema de prototipado.

2.3. CARACTERÍSTICAS DEL PROTOTIPADO RÁPIDO

El prototipado rápido tiene las siguientes características, compartidas en prácticamente todos los tipos de tecnologías:

- Se realiza mediante modelos digitales desarrollados en programas de diseño asistido por ordenador.
- Es muy flexible. Se pueden construir elementos complejos tridimensionales de diferentes formas sin necesidad de adaptar la maquinaria, y en la mayoría de los casos se puede cambiar el material de forma sencilla.
- Comparada con otras tecnologías, el prototipado rápido tiene mucha menos duración desde el diseño a la ejecución, y el coste es independiente del número de piezas construidas (no hay economía de escala), exceptuando la amortización de la maquinaria.
- Las fases en las que se ejecutan los prototipos son las siguientes (ver Figura 2):

1. El modelo tridimensional es creado con algún programa de diseño asistido y transformado a algún formato estandarizado (normalmente STL, que fue creado por *3D Systems* en 1988 para una máquina de estereolitografía [1]).
2. El elemento es discretizado en capas de pequeño espesor.
3. Las capas son enviadas a la máquina de prototipado de forma consecutiva, normalmente mediante Código G (el código estándar usado por máquinas de mecanizado, desarrollado por el MIT en los años 50).
4. Generalmente las piezas requieren de postprocesado (eliminación de estructuras de soporte auxiliares, pulido, retoques, pintado,...), y algunos materia-

les precisan de un tiempo adicional de curado.

2.4. PROBLEMAS TRADICIONALES DEL PROTOTIPADO RÁPIDO

Hay una serie de problemas comunes a las tecnologías de prototipado rápido, que son:

- **Tensión residual:** los cambios de estado del material base conllevan altas variaciones de temperatura en la mayoría de los casos, que producen tensiones residuales que se traducen en curvaturas no deseadas en zonas planas [8] [5] (ver Figura 3). La deformación puede reducirse o eliminarse procurando que el enfriamiento sea gradual.
- **Número limitado de materiales disponibles:** los materiales que pueden usarse en prototipado rápido son limitados, debido a los requisitos que deben cumplir según la tecnología que sea utilizada.
- **Precisión limitada:** la precisión está limitada por la tecnología y los materiales utilizados. La mejora de precisión requiere normalmente un postprocesado, lo que limita la flexibilidad y rapidez.
- **Dicotomía entre precisión y velocidad:** el tiempo de construcción de una pieza es inversamente proporcional al cubo de la precisión, por lo que pequeñas mejoras en precisión producen grandes incrementos de tiempos de fabricación.
- **Estructuras de soporte:** algunas tecnologías precisan de estructuras provisionales de soporte para poder construir voladizos, que pueden hacerse de material soluble que se elimina en el posprocesado, o con poca resistencia y eliminarse manualmente.

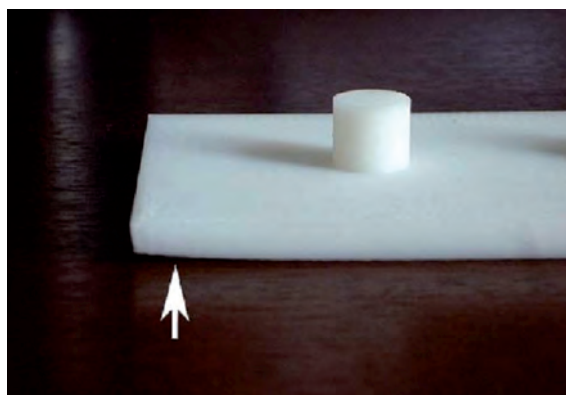


Fig. 3: Deformación típica de tensión residual [5]

- **Limitación de tamaño:** el tamaño de las piezas está limitado por la máquina que las produce.
- **Coste de fabricación:** la maquinaria para el prototipado rápido suele tener un coste elevado.

2.5. INTRODUCCIÓN A LA COMUNIDAD REPRAP

RepRap es una máquina de prototipado rápido del tipo modelado por fusión y solidificación con boquilla, auto-replicante, y de código abierto. Está siendo desarrollado por una comunidad abierta en *RepRap.org*, que fue fundada por Adrian Bowyer en la Universidad de Bath en 2004. Al estar el término *Fused Deposition Modeling* registrado por *Stratasys*, la comunidad *RepRap* ha acuñado el término *Fused Filament Fabrication* (FFF) que puede ser usado por cualquiera sin restricción [4].

RepRap es auto-replicante porque es capaz de generar una fracción significativa de sus propios componentes. El resto de ellos han sido seleccionados entre materiales estándares disponibles a bajo precio en cualquier tienda especializada.

RepRap está registrado por la Universidad de Bath, y es de código abierto porque está licenciado bajo una licencia GPL versión 2 [3]. Bajo estas condiciones, cualquier persona puede distribuir y modificar la máquina *RepRap*, pero debe mantener las modificaciones realizadas bajo esta licencia. Es decir, los cambios deben seguir siendo públicos. Como la máquina es libre y de código abierto, cualquier persona puede, sin pago de derechos de ningún tipo, construir un número ilimitado de copias, para él o para cualquier otro, usando las propias máquinas *RepRap* para construir las partes plásticas de las copias.

Los fundadores de *RepRap* plantearon la reproducción de la máquina de prototipado con un símil biológico, comparándolo con una relación de mutualismo (en las que dos seres vivos se benefician mutuamente de su interacción) también conocida como simbiosis. En esta relación, la máquina se beneficia del humano mediante su ayuda para la reproducción,

ya que el humano tiene que completar el montaje de la nueva máquina con las piezas que no son auto-replicables y montar la máquina. Y el beneficio del humano es el uso que hace de la máquina para crear los prototipos que desee. Debido a la inspiración biológica de su creación, las máquinas RepRap han sido bautizadas con los apellidos de conocidos biólogos (Charles Darwin, Gregor Mendel, Thomas Henry Huxley y Alfred Russel Wallace).

2.6. CARACTERÍSTICAS Y MODELOS DE REPRAP

Las impresoras 3D desarrolladas por la comunidad RepRap tienen las siguientes características:

- Son máquinas del tipo FFF (*Fused Filament Fabrication*), y usan como material compuestos termoplásticos (normalmente ABS y PLA).
- Ya se han desarrollado hasta la fecha cuatro modelos (Darwin, Mendel, Huxley y Wallace) con diversas variantes (Prusa Mendel, MendelMax, RepRapPro Huxley y RepRapPro Mendel).
- La precisión de los modelos viene dada por el diámetro de la boquilla, que suele ser de 0,4-0,5 mm.
- Las especificaciones de la máquina RepRap Mendel (la última generación estable de RepRap) vienen recogidas en el cuadro 1.

La máquina RepRap versión I (Darwin) fue la primera en construirse (en 2007). La versión II se denomina Mendel y es la máquina RepRap que más éxito ha tenido, al menos por la cantidad de derivadas.

La RepRap Prusa Mendel es una versión de Mendel mejorada. Es mucho más fácil de construir, modificar, imprimir y reparar.

La versión III se denomina Huxley. Es una versión más pequeña y transportable que la Mendel. La comunidad pretende seguir desarrollando las derivadas de Huxley y Mendel al mismo tiempo, siendo Huxley la versión más simple y rápida, mientras Mendel tendrá todas las innovaciones posibles.

Los modelos derivados y las mejoras surgen de modo continuo, dadas las características de la comunidad RepRap. Entre otros modelos se han desarrollado la RepRapPro Mendel, la RepRapPro Huxley, y la Printerbot, la

versión más simple y barata de la impresora RepRap, y su evolución, el modelo Wallace.

2.7. COMPONENTES BÁSICOS DE LAS MÁQUINAS REPRAP

Los componentes básicos de las máquinas RepRap son los siguientes:

-Componentes plásticos: es la fracción auto-replicante de los componentes de la máquina, ya que pueden ser construidos por otra máquina RepRap. En las máquinas Darwin y Mendel representan un 48% del total de los elementos [5].

-Componentes estructurales no replicables y componentes electrónicos: llamados “vitaminas” por los miembros de la comunidad RepRap, incluyen el resto de componentes estructurales necesarios para fabricar la máquina (barras roscadas y lisas, arandelas, tuercas, rodamientos, piezas especiales para el extrusor, correas, etc.) y los componentes electrónicos (microordenador y placa electrónica, motores paso a paso, sensores de temperatura y fin de carro, resistencias para calentar el extrusor y la base, cables, sensores de fin de carro, etc.)

-Software: necesario para que funcione el equipo, tanto el instalado en el microordenador de la RepRap (firmware) como el instalado en el ordenador que se conecte a la impresora.

compleja. Adquirimos un kit completo en RepRap BCN [7] con las siguientes características:

- Algunas de las piezas imprimibles están realizadas en SLS, y el resto en PLA.
- El kit incluye una base caliente de aluminio, para evitar deformaciones por enfriamiento rápido.
- La electrónica está formada por un *Arduino Mega* y una RAMPS v1.4.
- Los sensores de fin de carro son mecánicos.

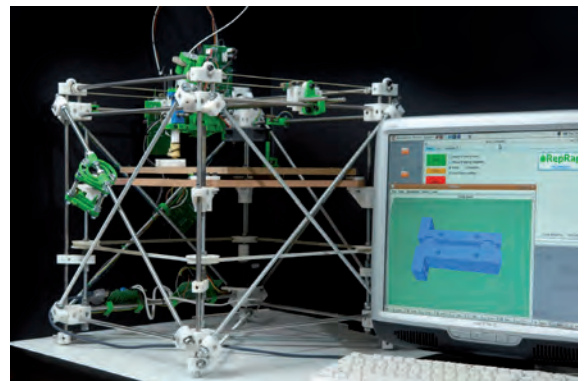


Fig. 4: RepRap Darwin [6]

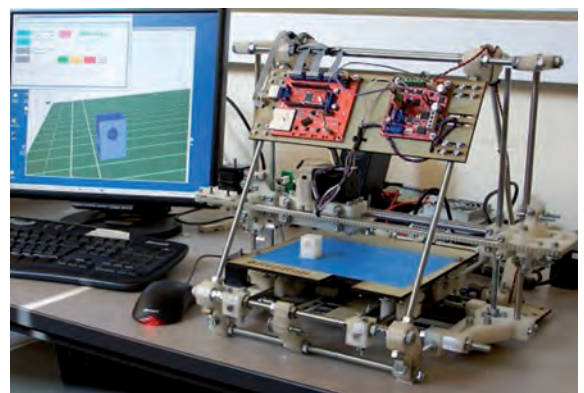


Fig. 5: RepRap Mendel [6]

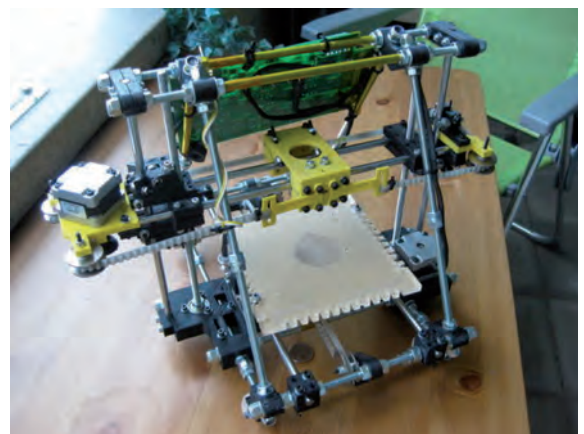


Fig. 6: RepRap Huxley [6]

3. RESULTADOS MONTAJE DE UNA REPRAP PRUSA

El montaje de una RepRap no es una tarea

Los problemas normales de RepRap son los indicados anteriormente para las máquinas de prototipado rápido, excepto el precio, ya que se puede adquirir un kit completo de una impresora RepRap por aproximadamente 600 €. Además, las máquinas RepRap tienen los problemas derivados de que el montaje debe realizarlo uno mismo. También puede adquirirse una RepRap ya montada aunque a mayor precio.

Montamos y probamos la máquina RepRap, detectando los siguientes problemas en el proceso (ver Figuras 7 y 8):

-Las instrucciones de montaje no están actualizadas. Los kits que se venden incluyen mejoras que están poco documentadas.

-El firmware instalado no era compatible con la versión del microordenador Arduino, que era más moderno. Hubo que modificar el firmware ligeramente para eliminar los errores de compilación.

-Para la calibración de la máquina tan solo hubo que ajustar el tipo de termistor y modificar la calibración de los ejes después de imprimir la primera pieza. El resto de valores por defecto dio un resultado satisfactorio en el primer uso.

-Para no dejar un ordenador permanentemente conectado a la RepRap (lo que puede incrementar el presupuesto notablemente), el software de control puede ser instalado en diversos ordenadores. Es necesario llevar un control sobre el firmware instalado y sus variaciones, y tenerlo accesible a los diversos usuarios.

4. CONCLUSIONES

En el presente documento, se han descrito las principales tecnologías de prototipado rápido y se ha realizado una revisión del estado actual de la iniciativa de hardware libre RepRap, consistente en una máquina de prototipado rápido del tipo modelado por fusión. RepRap ha entrado con fuerza en muchos entornos tecnológicos y creemos que en breve entrará en la dinámica de la empresa industrial, haciendo competitivo el diseño y fabricación de prototipos como nunca hasta ahora.

Esta irrupción de la tecnología RepRap nos recuerda a la implantación de los ordenadores personales compatibles (PC), también en código abierto, en los años ochenta del siglo pasado. Hasta entonces las empresas disponían de grandes orde-

nadores que realizaban el trabajo, pero la aparición del PC permitió a muchas pequeñas y medianas empresas tener su propio ordenador, y en muy pocos años todas las familias disponían de uno, para dedicarlo a tareas que entonces eran impensables.

La tecnología RepRap va a permitir que muchas pequeñas empresas y estudios de ingeniería o arquitectura tengan su propia máquina de prototipado. Incluso, si vemos cómo está evolucionando el mercado, más de un aficionado tendrá una máquina en su domicilio como un juguete -o una máquina de bricolaje-, del que obtendrá unos resultados que hoy por hoy sólo podemos prever a medias.

PARA SABER MÁS:

- [1] 3D Systems, Inc. *Stereolithography interface specification*, P/n. 50065-S01-00, 1989.
- [2] Chua C K, Leong K F, Lim C S. *Rapid Prototyping. Principles and Applications*. 3ra edición. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2010, p. 19-21. doi:10.1142/9789812388834_0001.
- [3] Free Software Foundation. *Licencias*. [en línea] Disponible en Web: <http://www.gnu.org/licenses/licenses.es.html> [Consulta 1 de diciembre de 2012]
- [4] Jones R, Haufe P, Sells E et al. *Reprap: the replicating rapid prototyper*. Robotica, 2011. Vol.29 p.177-191. <http://dx.doi.org/10.1017/S026357471000069X>.
- [5] Pei Eujin, Campbell R Ian, de Beer Deon, (2011) *Entry-level RP machines: how well can they cope with geometric complexity?*, Assembly Automation, Vol. 31, p.153-160. <http://dx.doi.org/10.1108/0144515111117737>.
- [6] RepRap Community. *RepRap*. [en línea] Disponible en Web: <http://www.reprap.org> [Consulta 1 de diciembre de 2012]
- [7] RepRapBcn. *Full kit + Greg's Extruder*. [en línea] Disponible en Web: <http://www.reprapbcn.com/catalog/index.php/full-kits/full-prusa-kit-all-you-need.html> [Consulta 1 de diciembre de 2012]
- [8] Yan Y, Li S, Zhang R et al. *Rapid prototyping and manufacturing technology: Principle, representative technics, applications, and development trends*. Tsinghua Science and Technology, 2009. Vol.14 p.1-12. [http://dx.doi.org/10.1016/S1007-0214\(09\)70059-8](http://dx.doi.org/10.1016/S1007-0214(09)70059-8)

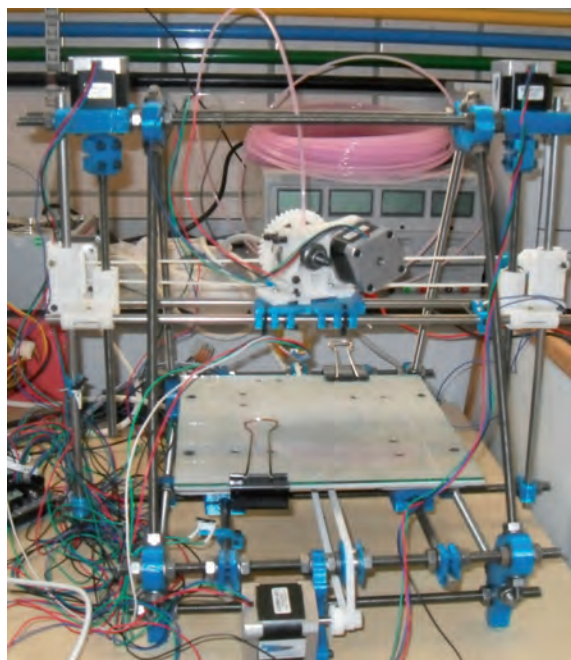


Fig. 7: RepRap Prusa Mendel

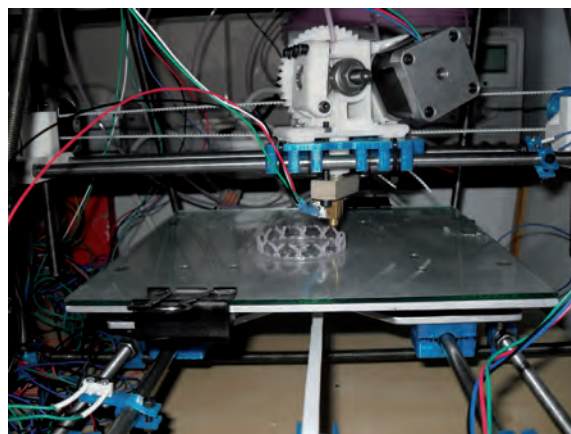


Fig. 8: RepRap Prusa Mendel en funcionamiento

Comparativa de tecnologías de propulsión de sistemas de transporte público en España

Elvira Maeso-González, Guadalupe González-Sánchez y Pablo Pérez-Cerón de la Cátedra de Gestión del Transporte de la Universidad de Málaga

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5738>

1. INTRODUCCIÓN

La creciente preocupación por el medio ambiente, el agotamiento progresivo del petróleo y la incertidumbre de su precio está generando cada vez una mayor concienciación a favor de una movilidad más sostenible. Son numerosos los argumentos que promueven el cambio de modelo de transporte actual.

Por un lado, el consumo diario mundial de petróleo asciende a 84 millones de barriles, siendo la dependencia de éste del sector del transporte de la Unión Europea de un 96% y estimándose en 40 años las reservas probadas del petróleo. Así pues, encontrar y desarrollar soluciones alternativas al mismo se convierte en una necesidad estratégica de futuro.

Por otra parte, el impacto en el medio ambiente del uso de combustibles fósiles por el sector del transporte representa el 33% del total de emisiones de CO₂ y, particularmente, el transporte urbano es responsable de casi el 25% de las emisiones totales.

Es por ello que actualmente en el marco político y legislativo se manifiesta una decidida voluntad de la Unión Europea por promover el cambio hacia un transporte más limpio, marcando objetivos de reducción de emisiones contaminantes y fomentando el uso de nuevas alternativas de combustibles a través de distintos reglamentos, directivas y planes.

Aunque los vehículos privados son cada vez más eficientes energéticamente, el transporte colectivo es una pieza clave para el desarrollo de la movilidad sostenible. El transporte público urba-

no constituye un segmento prioritario de mejora, ya que contribuye decisivamente a paliar los problemas que genera la movilidad desde las exigencias medioambientales, energéticas y económicas.

En este sentido estamos siendo testigos de los avances tecnológicos que se están poniendo en práctica en las diferentes ciudades.

1.1. ESTADO DEL ARTE DE LOS COMBUSTIBLES Y SISTEMAS DE PROPULSIÓN

Actualmente existen distintas alternativas de sistemas de propulsión y combustibles para los vehículos de transporte público. La principales son: Diésel, Biodiésel, Bioetanol, Gas Natural Comprimido (GNC), Gas Licuado de Petróleo (GLP), Eléctrico, Híbrido Eléctrico (diésel-eléctrico y GNC-eléctrico) e Hidrógeno (tecnología de celdas).

1.1.1. Diésel Estándar

Los motores diésel llevan ya una larga evolución de desarrollo continuo y se trata de una tecnología confiable y durable. Por ello, actualmente es la tecnología más utilizada junto con los motores de gasolina en los turismos y en autobuses ha sido la más extendida con diferencia durante muchos años.

Actualmente los vehículos diésel son mucho más limpios de lo que eran en el pasado, aunque la mayoría de ellos siguen emitiendo niveles más altos de óxidos de nitrógeno (NO_x) y de partículas (MP) que los vehículos de gasolina. Para controlar estas emisiones los fabricantes adoptan varias medidas, como el uso de catalizadores, tecnología de recirculación de los gases de escape (EGR), tecnología de reducción catalítica selectiva (SCR) o utilización de filtros diésel de partículas (DPF). Sin embargo, los motores diésel emiten algo menos de dióxido de carbono

(CO₂) que los de gasolina para la misma potencia, por lo que en muchos casos se adopta el diésel con sistemas adecuados de reducción de emisiones de partículas y de NO_x como mejor alternativa desde un punto de vista medioambiental.

No obstante, gran parte de la responsabilidad de la contaminación derivada del transporte recae sobre los vehículos diésel. Por ello, es necesario meditar sobre combustibles y vehículos alternativos que, una vez alcanzada una economía de escala, disminuyan las emisiones de contaminantes a la atmósfera y la dependencia energética de los países.

1.1.2. Biodiésel

El biodiésel, biocombustible derivado de aceites vegetales que puede reemplazar al gasoil mineral, se obtiene mediante operaciones de transesterificación y refinado de aceites vegetales puros (colza, girasol, palma y soja, por ejemplo) y también de aceites vegetales usados y de grasas animales. El producto así obtenido es empleado en motores diésel como sustituto del gasóleo, ya sea en mezclas con éste o como único combustible.

Las notaciones abreviadas, B20, B30, B50 o B100, indican el porcentaje por volumen de biodiésel en la mezcla.

El biodiésel aspira a ser una herramienta más dentro de la gama de combustibles y no persigue establecerse como única fuente alternativa a los combustibles fósiles, ya que para producir mediante biodiésel una cantidad de energía equiparable a la de los combustibles fósiles podría generar una crisis alimentaria global por sustitución de tierras de cultivo para la generación de energía y efectos ambientales perjudiciales derivados de la destrucción de ecosistemas y del uso de determinados fertilizantes y abonos.

El funcionamiento de la propulsión de vehículos con biodiésel no difiere del de los vehículos diésel estándar; de hecho, los motores son los mismos y cualquier vehículo que utilice diésel puede utilizar biodiésel. No obstante, el B100, producto muy ecológico, requiere modificaciones en los motores de vehículos anteriores a 1994.

En cuanto a las emisiones, son mucho menores que las del gasóleo fósil. El uso de biodiésel puro al 100% (bastante infrecuente) reduciría las emisiones

netas de CO₂ entre un 40% y un 50%, y el uso del 20% disminuye éstas entre un 8% y un 10%. Hay que reseñar que este cálculo se basa en el “ciclo de vida” completo del biodiésel, desde su cultivo hasta su uso en el vehículo. El biodiésel también reduce las emisiones de gases contaminantes, aunque las emisiones exactas de este biocarburante varían en función del tipo de vehículo diésel y de la especificación del combustible.

1.1.3. Bioetanol

El bioetanol es otro biocarburante fabricado a partir de materias primas ricas en azúcar o en almidón y de materiales celulósicos. En este caso se trata de un aditivo de la gasolina.

El bioetanol puede emplearse en una proporción de 5% de bioetanol y 95% de gasolina, con arreglo a la norma de calidad europea EN 228, sin que necesite modificación alguna del motor. Algunos fabricantes de vehículos especifican que esta mezcla no debe sobrepasar este 5% para no anular la garantía del vehículo, mientras que otros fijan como máximo el 10%. También puede mezclarse en porcentajes desde el 10 al 85%, pero en este caso sí que se requieren modificaciones en los vehículos.

La ventaja principal de emplear bioetanol como carburante es que reduce las emisiones netas de gases de efecto invernadero en comparación con el uso de la gasolina. El empleo de bioetanol puro al 100% reduciría las emisiones netas de CO₂ sobre la base de su “ciclo de vida útil” entre un 50% y un 60% dependiendo de las materias primas empleadas, con lo que el uso de una mezcla con el 5% de bioetanol disminuiría éstas entre un 2,5% y un 3%.

1.1.4. Gas Natural Comprimido (GNC)

El GNC es esencialmente gas natural almacenado a altas presiones, con valores de presión que varían en función de cada país. Este gas natural es principalmente metano, que al tener un alto índice de hidrógeno por carbono, produce menos CO₂ por unidad de energía entregada que otros hidrocarburos más pesados.

Los vehículos de gas natural (VGN) tienen menores emisiones atmosféricas que los diésel de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos (HC) y partículas (PM). Sin embargo, son mayores las emisiones

de metano, importante gas de efecto invernadero. Para oxidar y eliminar estos niveles, relativamente altos, de metano libre, los VGN monocombustibles suelen llevar catalizadores específicos de tres vías, pero no pueden ser instalados en los VGN a doble combustible.

Las emisiones de CO₂ de un VGN funcionando a cargas razonablemente altas se reducen en un 20% respecto a las de sus equivalentes de gasolina, y entre un 5 y 10% de los diésel. Cabe señalar que en ámbito urbano esta ventaja de los VGN se ve invalidada, por el mejor rendimiento de los motores diésel a bajas cargas, que iguala las emisiones de CO₂ en este caso.

En cuanto a la contaminación acústica, el motor de GNC reduce ésta sustancialmente, de 5 a 8 dB, al funcionar de forma más suave y silenciosa.

1.1.5. Gas Licuado de Petróleo (GLP)

El GLP es una mezcla de propano (C₃H₈) y de butano (C₄H₁₀). La proporción de ambos gases es variable en función del país y del tipo de vehículo. Por ejemplo, en España para vehículos turismo de automoción, la composición volumétrica es de un 30% de propano y 70% de butano, mientras que para vehículos monocombustible, como los autobuses, es de un 70% de propano y 30% de butano. Los GLP son extraídos a partir de los procesos de refinado y de los yacimientos de gas natural húmedo.

En condiciones normales de presión el GLP es un gas, no obstante, se licua al someterlo a una baja presión (en torno a los 10 bares). Así, el almacenamiento del GLP en los vehículos se hace en estado líquido y su combustión en el motor en estado gaseoso.

Las emisiones contaminantes de NO_x, CO, HC y partículas de los vehículos GLP son inferiores a las de los carburantes convencionales (gasolinas y gasóleos). En cuanto a las emisiones de CO₂ son inferiores a los de gasolina y similares a las del diésel.

1.1.6. Eléctrico

El vehículo eléctrico obtiene la tracción de los motores eléctricos. Dentro del concepto de vehículo eléctrico existen varias posibilidades en función de la fuente de energía eléctrica: funcionamiento con células de combustible, placas solares, etc. Este epígrafe se centra en los vehículos alimentados exclusiva-

mente por baterías por ser la tecnología más desarrollada actualmente.

El vehículo eléctrico se compone de una batería que almacena la energía, uno o varios motores eléctricos y un sistema de gestión de la energía (controlador). El motor o motores eléctricos de tracción están conectados a las ruedas motrices, el ordenador controla, gestiona y regula la potencia y el cargador conectado a la red eléctrica permite la recarga de las baterías a través de un enchufe convencional doméstico.

Los vehículos eléctricos no tienen emisiones atmosféricas en el punto de uso, por lo que se trata de una buena alternativa a los vehículos de motor térmico en zonas urbanas donde el tráfico es intenso [5]. Sin embargo, un análisis exhaustivo de los beneficios medioambientales de estos vehículos debe incluir las emisiones derivadas de la producción y el suministro de la electricidad para la recarga de las baterías. Dichas emisiones varían en función del modo de producción de la electricidad (centrales térmicas de combustibles fósiles, energías renovables, etc.). No obstante, la contaminación global asociada a los vehículos eléctricos siempre es inferior a la de los vehículos térmicos que utilizan combustibles convencionales como gasolina o diésel.

En algunos casos disponen de sistemas de frenado regenerativo, que permiten recuperar parte de la energía cinética propia del movimiento del vehículo durante la frenada, pudiendo suponer hasta un 30% de la energía consumida.

1.1.7. Híbridos Eléctricos: Diésel-eléctrico y GNC-eléctrico

Los vehículos híbridos poseen, además del motor de combustión interna, un motor eléctrico (en serie o en paralelo). El funcionamiento de estos vehículos se basa en el manejo eficiente de las energías mecánicas y eléctricas en el sistema de propulsión, conjugando un motor térmico, un motor eléctrico, un generador eléctrico y un sistema de acumulación de electricidad (baterías). Muchos de ellos también están provistos de frenos regenerativos.

La propulsión de las ruedas es accionada tanto por el motor térmico como por el eléctrico, simultáneamente o no según las necesidades. En las paradas del vehículo se detiene el motor térmico, en los arranques y aceleracio-

nes el motor eléctrico ayuda al térmico y en las frenadas y retenciones el generador eléctrico recarga las baterías. Nor-

malmente el motor térmico es un motor Otto o Atkinson, que puede ser diésel o de gas natural.

El funcionamiento del vehículo es el mismo independientemente del combustible utilizado, la variación del uso

	Ventajas	Inconvenientes
Diésel	Tecnología confiable y durable. Menor precio combustible. Menor coste adquisición vehículo.	Deterioro de la calidad del aire por elevadas emisiones de NO _x y PM.
Biodiésel	Reducción de contaminantes (gaseosos y partículas), según proporción de biodiésel en la mezcla. Producto biodegradable. Mayor seguridad en el almacenamiento (punto de inflamación mayor). Alarga vida del motor. Reciclaje aceite usado. Menor coste de adquisición vehículo (similar al diésel).	Menor potencia vehículo. Mayor consumo que diésel. Problemas a bajas temperaturas. Necesidad de adaptación de algunos motores convencionales. Inversión en las instalaciones de suministro.
Bioetanol	100% biodegradable (siempre conforme a la proporción en que se utilice). Menor contenido de azufre y metales pesados. Menores emisiones, hasta un 30% menos de CO ₂ con proporción del 85%. Mejora las prestaciones del motor y aumenta el rendimiento. Potencial ahorro de 36% de energía fósil.	Producción más cara que el procedente del crudo. Poder calorífico más bajo (incrementa un 70% el consumo). Agresivo para algunos plásticos. Irritante en piel y mucosas. Necesidad de modificar el motor para mezclas superiores al 10%.
GNC	Reducciones importantes de todas las emisiones. Menor ruido. Accesibilidad y comodidad en el suministro (red de gas).	Necesidad de infraestructura de repostaje. Mayor coste de adquisición vehículo. Menor autonomía. Mayor dificultad en distribución y almacenamiento. Mayor tiempo de llenado.
GLP	Rendimiento y potencia de los vehículos similares a sus equivalentes en gasolina. Fiabilidad técnica similar al motor diésel. Reducción de emisiones contaminantes. Reducción de niveles de ruido hasta un 50%. No contiene azufre ni plomo ni partículas.	Mayor coste del combustible. Mayor peso de los vehículos. Menor autonomía que vehículos diésel, sólo apto para servicio urbano. Necesidad de infraestructura de suministro, almacenamiento, bombeo y equipos surtidores.
Eléctrico	No requiere combustible. Cero emisiones en el punto de uso. Mínimo ruido y mayor confortabilidad (vibraciones mínimas). No consume energía cuando se encuentra parado (paradas, semáforos, atascos). Freno regenerativo. Bajos costes de mantenimiento. Menores gastos de funcionamiento.	Coste de adquisición de vehículo. Autonomía limitada (unos 120 Km entre operaciones de recarga). Carga lenta. Velocidad máxima de 50 Km/h. Problemas de potencia en rampas pronunciadas. Baterías grandes y pesadas. Reciclaje de las baterías. Vida de las baterías limitada (de 2 a 3 años).
Híbridos	Menores emisiones que motores convencionales. Buenas prestaciones de velocidad (similares a vehículos convencionales). Aceleración potente y regular. Menor ruido (un 30% menos). Menores costes de mantenimiento y funcionamiento. Alcance del combustible un 25-50% mayor. Mayor autonomía que eléctrico (hasta 500 Km al recargar las baterías mediante el motor Diésel/GNC). Freno regenerativo.	Coste adquisición vehículo. Escasa oferta de vehículos en el mercado. Consumo adicional de energía. Posibles problemas de potencia en rampas pronunciadas. Baterías pesadas. Reciclaje de las baterías. Si es de GNC, necesidad de infraestructura.
Pila Hidrógeno	Impacto ambiental en marcha nulo (sólo emite vapor de agua). Buen rendimiento. Muy silencioso. Buena autonomía (unos 300 Km con velocidad máxima de 80 Km/h). Supera pendientes de hasta el 8%. Reducción peso batería. Materia prima ilimitada para producción de H ₂ .	Alto coste aplicación y mantenimiento. Necesidad de estación de repostaje para producción y/o almacenamiento de H ₂ , así como compresión y carga. Necesidad de optimizar producción de H ₂ . Emisiones de CO ₂ , si no se utilizan energías renovables en la producción de H ₂ .

Tabla 1: Resumen de características de los combustibles

		Barcelona			Madrid			Málaga			Valencia		
		2010	2011	2012	2010	2011	2012	2010	2011	2012	2010	2011	2012
Diésel		670	548	439							44		
Biodiésel	B10										361	44	
	B20				1.610	1.419	1.291	187	186	186		361	405
	B30	120	120	120									
Bioetanol					5	5							
GNC		295	375	410	465	651	688	4	4	4	75	75	75
Eléctrico					20	20	20	1	1	1			
Híbrido	Diésel-eléctrico	4	20	90									
	GNC-eléctrico	1	1	1			7						
Total flota		1.090	1.064	1.060	2.100	2.095	2.006	192	191	191	480	480	480

Tabla 2: Evolución de las flotas de autobuses urbanos según tecnología y combustible (2010-2012)

de Gas Natural viene dada en términos económicos, de consumo, de contaminación y de ruido.

Los vehículos híbridos son capaces de reducir las emisiones de CO₂ en un 30% respecto a los diésel. En cuanto a las otras emisiones reguladas (CO, HC, NO_x y partículas), los vehículos híbridos son muy atractivos para su empleo en el espacio urbano por su reducción potencial de la contaminación.

1.1.8. Hidrógeno: tecnología de celdas

El funcionamiento de los vehículos con pila de combustible de H₂ se basa en la combinación de dicho combustible con el oxígeno, generando electricidad. Únicamente emiten a la atmósfera vapor de agua, lo que implica grandes beneficios medioambientales.

Sin embargo, aunque el H₂ se encuentra presente en todo organismo viviente, rara vez aparece en estado libre, por lo que hay que extraerlo y este proceso de extracción del H₂ genera emisiones contaminantes. Este proceso puede realizarse a través de diversas tecnologías, como la electrolisis del agua, el reformado de hidrocarburos, la gasificación de biomasa y de hidrocarburos y otras tecnologías aún no desarrolladas. A día de hoy, la de electrolisis del agua a partir de electricidad generada mediante fuentes renovables es la única tecnología sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

A partir de lo expuesto y de la consulta directa a los operadores de trans-

porte público urbano de ciudades españolas con importante flota de autobuses se llevó a cabo una comparativa de las ventajas e inconvenientes de cada una de las tecnologías planteadas y se analizaron las experiencias de estos operadores en el uso de los distintos sistemas de propulsión.

2. RESULTADOS

2.1. ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS Y COMBUSTIBLES DE LAS FLOTAS DE AUTOBUSES URBANOS

El análisis sobre las flotas de autobuses se ha realizado comparando las experiencias de Barcelona, Madrid, Málaga y Valencia.

En primer lugar se describe la composición actual de la flota de cada una de las ciudades, según tipo de combus-

tible y su experiencia con la tecnología utilizada.

En la Tabla 2, se observa en el conjunto de las ciudades estudiadas un claro predominio de los autobuses que utilizan biodiésel, seguidos de los que utilizan GNC con tendencia creciente y en último lugar los vehículos diésel que progresivamente van siendo sustituidos. En menor proporción se encuentran autobuses híbridos y eléctricos. Ninguna de las ciudades consultadas posee autobuses de GLP ni de pila de hidrógeno.

La Fig.1 representa el porcentaje de autobuses respecto al total de la flota en función de la tecnología y combustible utilizado.

Respecto a la experiencia con los distintos combustibles, Barcelona aún posee un porcentaje importante de autobuses diésel aunque se han empezado a incorporar filtros de alto rendimiento para reducir las emisiones de óxidos de

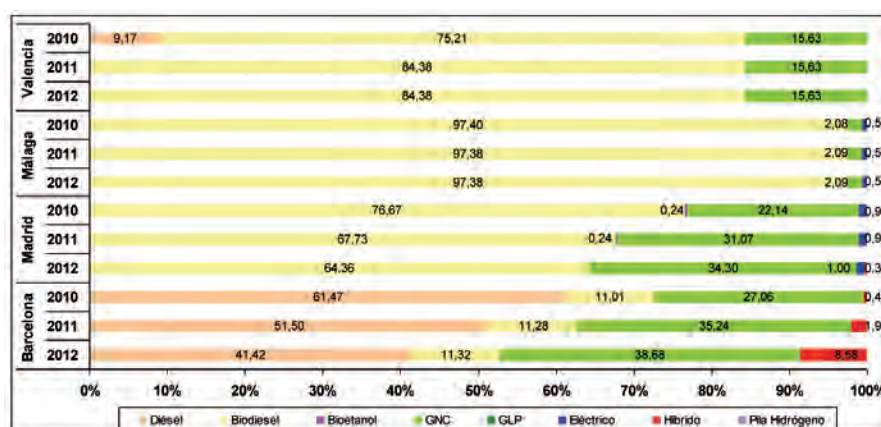


Fig. 1: Evolución de la distribución de las flotas según tecnología y combustible

nitrógeno y partículas en suspensión con calificación Euro I-II-III (anteriores a 2005).

En el uso del biodiésel destaca Málaga, donde más del 97% de la flota lo utiliza. En el otro extremo se encuentra Barcelona, con el 11% de su flota. Las mezclas de biodiésel son diversas: en Barcelona es B30, en Madrid y Málaga B20, y en Valencia han pasado de utilizar B10 en 2010 a B20 en 2012.

Tan sólo Madrid contaba con autobuses de bioetanol en 2010 y 2011 aunque su presencia en la flota era minoritaria, 0,24%. Estos autobuses eran fruto del proyecto BEST (Bioethanol for Sustainable Transport), la mezcla se componía de 95% bioetanol puro y 5% producto desnaturalizante, los autobuses utilizados eran de motor ciclo diésel con algunas modificaciones. No obstante, en 2012 dejan de funcionar debido a que no eran económicamente rentables.

Los autobuses de GNC también se encuentran presentes en todas las ciudades, siendo en Barcelona donde más se utilizan. En Málaga el uso de estos autobuses es sólo del 2%.

En relación a los autobuses de GLP no se han utilizado en ninguna de las ciudades consultadas.

Actualmente, Madrid y Málaga cuentan con microbuses eléctricos en sus flotas. En Madrid empezaron a introducirse a finales de 2007 cuando adquirieron 20 unidades por las vías del centro histórico y más adelante se quiere dotar así de líneas pequeñas a barrios con calles muy estrechas donde no cabrían otros vehículos. Málaga posee un microbús eléctrico con el que se han realizado dos experiencias piloto, en diciembre de 2008 se puso en servicio la línea "Centro" que recorría las calles del casco antiguo de la ciudad con el objeto de incentivar las compras en el periodo navideño, dejando de funcionar el servicio en enero de 2009. De dicha experiencia, y a través de la consulta a los comerciantes de la zona para conocer sus necesidades, se volvió a poner en marcha a finales de 2009 con un nuevo recorrido adaptado hasta enero de 2010, en el que deja de utilizarse principalmente por criterios económicos.

Barcelona dispone de autobuses híbridos y además participa en varios proyectos para el impulso de estos vehículos, como el Proyecto Retrofit, que plantea la hibridación del motor diésel.

*Microbús de 7m de longitud y capacidad para 30 pasajeros. Incluye coste de la batería (50.000€)

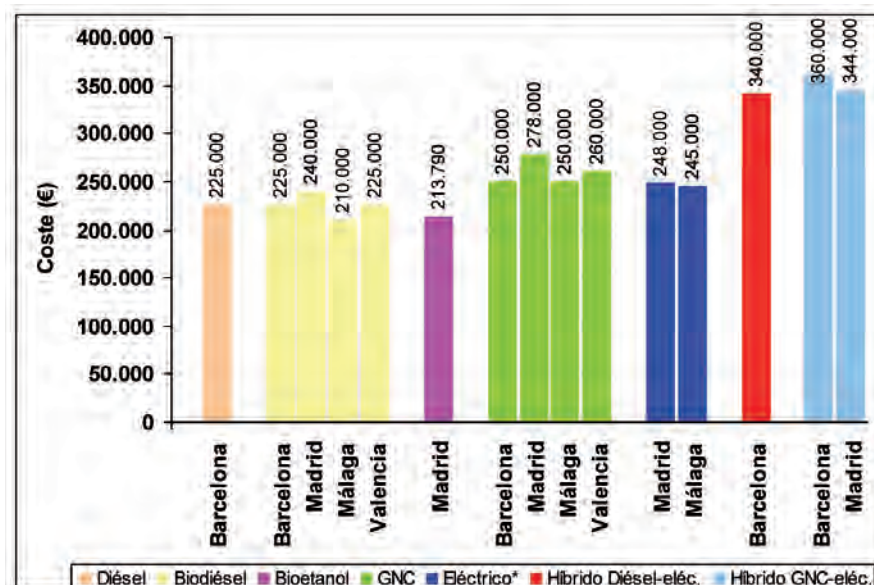


Fig. 2: Coste de los autobuses según tecnología y combustible

En Madrid en junio de 2012 se han puesto en servicio 7 unidades. En Málaga, en septiembre de 2011 con motivo de la Semana Europea de la Movilidad se realizó una prueba piloto con dos autobuses híbridos, Volvo y Castrosua, para comprobar su comportamiento en servicio urbano. En términos de funcionamiento presentaron resultados muy positivos, similares a los autobuses convencionales, sin embargo, desde el punto de vista económico, aunque los costes de explotación fueron un 15% menores que los diésel, tienen mayor coste de adquisición y de mantenimiento, sobre todo por la necesidad de sus-

titución de las baterías, lo que supone un sobrecoste de alrededor de 40.000 € cada 5 años.

No se han encontrado autobuses de pila de hidrógeno en las ciudades estudiadas, aunque en Madrid y Barcelona se realizaron algunas experiencias piloto con autobuses de hidrógeno dentro del Proyecto HyFleet CUTE (Clean Urban Transport for Europe) de la Unión Europea. Este proyecto, con siete años de duración y cerrado definitivamente en 2009, hizo el seguimiento y demostración de la viabilidad de la operación de 47 autobuses propulsados por hidrógeno (33 de pila de combustible y

*Microbús de 7m de longitud y capacidad para 30 pasajeros.

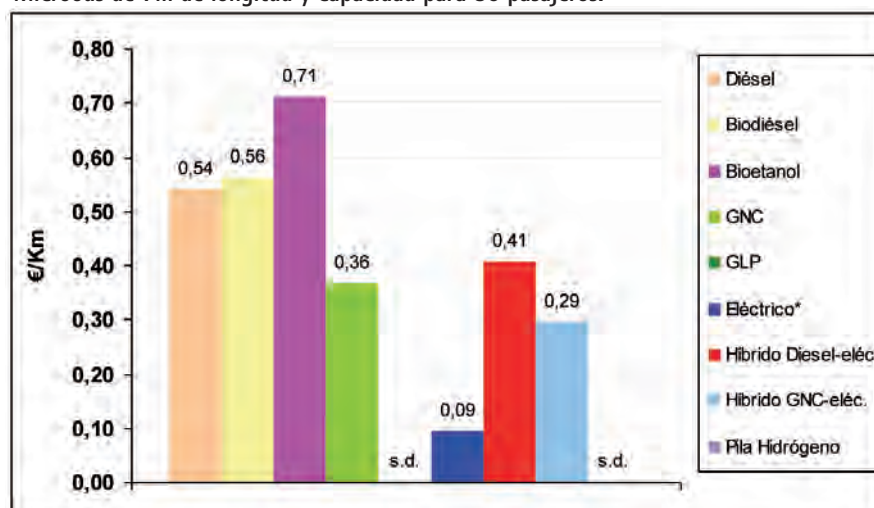


Fig. 3: Coste del combustible o energía equivalente/Km

		Barcelona			Madrid			Málaga			Valencia		
		CO ₂	NO _x	PM	CO ₂	NO _x	PM	CO ₂	NO _x	PM	CO ₂	NO _x	PM
Diésel		47,000	0,220	0,002									
Biodiésel	B10										265,000	s.d.	s.d.
	B20				47,247	0,320	0,007	136,000	13,000	0,200	260,000	s.d.	s.d.
	B30	48,000	0,230	0,002									
Bioetanol	E95				53,567	0,340	0,010						
GNC		55,000	0,017	0,001	46,600	0,047	0,000	124,000	5,000	0,050	215,000	s.d.	s.d.
Eléctrico					0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000			
Híbrido	Diésel-eléctrico	35,000	0,165	0,002									
	GNC-eléctrico	38,500	0,012	0,001									

Tabla 3: Emisiones de CO2, NOx y PM según el combustible y tecnología utilizados

14 de motor de combustión interna) en el servicio regular de transporte público en 10 ciudades de tres continentes. Tanto Madrid como Barcelona participaron con la puesta en servicio durante tres años de tres autobuses accionados por pila de hidrógeno en cada ciudad operando en líneas regulares. Además Madrid también participó anteriormente, en 2003, en otra iniciativa europea denominada City Cell y liderada por IVECO en la que dispuso de un primer autobús propulsado por hidrógeno, pero mientras en el proyecto CUTE toda la energía era suministrada por la pila de combustible en el City Cell sólo proporcionaba un tercio. Las experiencias con estos autobuses en general arrojaron unos resultados positivos en términos de funcionamiento, no obstante, económicamente no resultaron viables debido al requerimiento de infraestructuras específicas para la producción y suministro del hidrógeno y al alto coste de adquisición de los vehículos.

En cuanto a los costes de los autobuses según los distintos sistemas de propulsión y combustibles utilizados en las ciudades anteriores, ver Fig. (2), hay que tener en cuenta que el tamaño de los autobuses considerados ha sido estándar (de 8-12 m de longitud y con capacidad para 70-120 pasajeros) a excepción del eléctrico que se trata de un microbús, por no ser viable un vehículo más grande y pesado actualmente con tal tecnología.

Según los datos proporcionados, el vehículo más económico es el que utiliza bioetanol, unos 213.790 €, esto es

así debido a que se considera un motor de combustión convencional. Le siguen los que utilizan diésel o biodiésel, con 225.000 € de media. El vehículo eléctrico sube a 246.500 €, a continuación el de GNC con 259.500 € y los híbridos diésel-eléctrico en 340.000 € y GNC-eléctrico en 352.000 €. Las ciudades consultadas no poseen vehículos GLP ni propulsados mediante pila de hidrógeno, no obstante sus costes se estiman en 300.000 y 600.000 €, respectivamente.

Los precios aportados son los actuales según las operadoras de transporte. Lógicamente variarán con el paso del tiempo cuando maduren ciertas tecnologías y se produzca a gran escala.

Atendiendo al coste del combustible o energía equivalente por Km. según la tecnología del motor, ver Fig. (3), destaca que el autobús más económico de adquirir (bioetanol) tiene mayor coste de funcionamiento, ya que además de ser más caro el combustible tiene también mayor consumo, mientras que el más económico es el eléctrico. Los autobuses con sistema de propulsión híbrido tienen costes de funcionamiento menores que los convencionales aunque su adquisición es más cara. En general, a mayor coste de adquisición menores costes de funcionamiento, sin embargo cabe esperar que a medida que maduren las nuevas tecnologías se reduzcan los precios de adquisición por la mayor escala de producción.

Desde una perspectiva medioambiental, la Tabla 3 recoge las emisiones de CO₂, NO_x y PM en g./pasajero Km.

según el combustible y tecnología utilizados. Aunque las emisiones de CO₂ en el punto de uso del motor con biodiésel son mayores que con diésel, considerando el ciclo de vida completo del biodiésel, desde su cultivo hasta su uso, las emisiones son prácticamente nulas ya que se compensan. También hay que tener en cuenta que la ocupación media por Km. del autobús y los litros consumidos por cada Km. varían de una ciudad a otra, de ahí las diferencias existentes entre las emisiones un mismo combustible.

3. COMENTARIOS

Como hemos visto, existe un amplio abanico de alternativas de tecnologías de vehículos y combustibles capaces de reducir la dependencia del petróleo y los problemas medioambientales derivados de su consumo. La elección de una u otra depende principalmente del estado de desarrollo de la tecnología y de las condiciones específicas que se requieran de movilidad. En particular, deben evaluarse aspectos como el flujo de pasajeros, la disponibilidad del combustible y volatilidad del precio, el costo del vehículo, mantenimiento, fiabilidad, las políticas gubernamentales y el impacto ambiental.

En numerosos casos, la elección del tipo de vehículo viene marcada por las limitaciones de las tecnologías existentes para un determinado servicio de transporte. Es el caso del vehículo eléctrico puro, que sólo es viable para tra-

yectos cortos principalmente por razones de autonomía y peso de las baterías. La electrificación completa de vehículos mayores con la tecnología actual es prácticamente inviable. Es por ello que las ciudades están avanzando hacia la tecnología híbrida como solución intermedia a corto y medio plazo.

En referencia al costo de las distintas tecnologías, aunque el autobús más económico es el que utiliza bioetanol, por poder utilizarse con motor convencional para porcentajes inferiores al 10%, la producción es más cara que la de los combustibles procedentes del crudo y también es mayor su consumo por su menor poder calorífico, lo que hace que las ciudades no estén apostando por esta tecnología. En GLP y GNC, ante el mismo precio del vehículo, las ciudades prefieren los autobuses de GNC por sus mejores resultados de funcionamiento. El alto coste de los autobuses de hidrógeno junto con todos los obstáculos que presentan a día de hoy debido a su bajo nivel de desarrollo, hacen que no sea una opción actualmente. Pese a que el alto coste de adquisición de ciertos vehículos sea una de las grandes barreras para la diversificación sostenible de las flotas de autobuses, hay que tener en cuenta que en muchos casos presentan menores gastos de funcionamiento que los autobuses convencionales con motor de combustión interna y también la existencia en algunos casos de incentivos para fomentar el uso de tecnologías limpias.

Todas las ciudades analizadas, en su evolución hacia una movilidad más sos-

tenible, están transformando sus flotas de autobuses mediante la introducción de vehículos con combustibles alternativos al tradicional gasóleo. Las tecnologías preferidas a día de hoy son el biodiésel y el GNC debido a su elevada fiabilidad por ser tecnologías maduras y a su rentabilidad económica. La tecnología híbrida se está introduciendo y se apuesta por ella como la mejor alternativa a corto y medio plazo. Destacar que todas ellas han participado o están inmersas en proyectos de investigación en este ámbito, obteniendo resultados bastante positivos en su experiencia con el uso de autobuses eléctricos e incluso de hidrógeno, lo que hace tener esperanza en su potencial.

AGRADECIMIENTOS

Los trabajos realizados forman parte de la aportación de la Cátedra de Gestión del Transporte de la Universidad de Málaga al Proyecto *E-Mobility Accelerator*, cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) y encuadrado en el Programa Interregional POWER *Low Carbon Economies* (INTERREG IVC).

A Transports Metropolitans de Barcelona, a la Empresa Municipal de Transportes de Madrid, a la Empresa Municipal de Transportes de Valencia por proporcionar los datos necesarios para llevar a cabo este trabajo y, en particular, a la Empresa Malagueña de Transportes por su continua colaboración.

PARA SABER MÁS

- ATUC/IDAE. Gestión Eficiente del Transporte Colectivo: Guía Técnica. Madrid: ATUC, 2009. ISBN: 978-84-613-4065-1
- Contreras V. "Los autobuses del futuro" [en línea]. Diario Sur. 25 septiembre 2011. <http://www.diariosur.es/v/20110925/malaga/autobuses-futuro-20110925.html> [consulta: 24 octubre 2011].
- EMTMADRID. Informe anual 2010: Un enfoque desde la responsabilidad social corporativa. Madrid: EMTMADRID, 2011.
- Ente Vasco de la Energía. "Biocombustibles: una alternativa sostenible" DYNA Ingeniería e Industria. Noviembre 2004. Vol. 79-8 p.73-76
- IDAE. Combustibles y vehículos alternativos: Combustibles y nuevas tecnologías de vehículos que reducen las emisiones de gases de efecto invernadero y de contaminantes. Madrid: IDAE, 2005.
- López-Martínez J, Jiménez-Alonso F. "Requerimientos energéticos de los vehículos híbridos de transporte urbano de alto tonelaje" DYNA. Abril 2011. Vol. 86-2 p.182-189. <http://dx.doi.org/10.6036/3875>
- Maeso-González E, González Sánchez G. "Soluciones Sostenibles para el Transporte Público Urbano en Autobús". En: Jornadas Técnicas Greencities, (Málaga, 6-8 octubre 2011), [S.I.]: [s.n.], 2011.
- Terrón J A. "El punto de vista del gestor de transporte público: Vehículos eléctricos e híbridos" [en línea]. Seminario de Gestión Ambiental: El coche eléctrico, (Valladolid, 9 de junio de 2010), [S.I.]: [s.n.], 2010. http://www.fundaciongasnaturalfenosa.org/SiteCollectionDocuments/Actividades/Seminarios/VALLADOLID%202010%2006%2009/5_Juan%20Angel%20Terror.pdf [consulta: 31 octubre 2011].
- Tricas A. "La acción de la Comisión en el área de la movilidad urbana y en el transporte limpio". En: Primeras Jornadas sobre Avances en el Transporte de Carga en Área Urbana, (Santander, 6-7 de abril de 2011), [S.I.]: [s.n.], 2011.
- TUSAM. Proyecto de Microbuses Eléctricos [en línea]. Sevilla: TUSAM, s.d. [ref. 26 octubre 2011]. Disponible en Web: <http://www.tusam.es/index.php?id=158>

DYNA

Ingeniería e Industria

PROMOCIÓN: Suscripción a DYNA por 29,70 €/año

Reciba la revista dyna impresa en su domicilio por solo 29,70 €/año

La revista DYNA ha llegado a un acuerdo de colaboración con algunos Colegios de Ingenieros Industriales para ofrecer a sus colegiados la revista impresa con un 35% de descuento.

Promoción válida para los Ingenieros Industriales colegiados en:

Araba, Asturias, León, Bizkaia, Burgos y Palencia, Canarias, Cantabria, Extremadura, Galicia y Murcia.

Si está interesado, envíe un email a dyna@revistadyna.com mencionando que se acoge a la promoción e indicando su n° de colegiado y el nombre de su Colegio de Ingenieros Industriales.



Segundas vidas para baterías de coches eléctricos:

buenas ideas – malos negocios

■■■
 Lluc Canals-Casals, Beatriz Amante-García y
 Margarita González-Benítez
 Universidad Politécnica de Cataluña

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5763>

1. INTRODUCCIÓN

El mundo de la automoción está viendo como el coste de los combustibles fósiles aumenta al mismo tiempo que se ven reducidas las reservas mundiales de petróleo. Asimismo, las sociedades industrializadas empiezan discretamente a despertar del letargo medio-ambiental y a ver con buenos ojos las alternativas menos agresivas con el medio ambiente. Con todo, la aparición del Vehículo Eléctrico (VE en adelante) se presenta como una opción no indiferente para el transporte individual de personas. Aunque dista mucho aún de ser “eco-friendly” o respetuoso con el medio ambiente, sí es cierto que puede representar un primer paso hacia un cambio de mentalidad. El reto al que se enfrenta la industria automovilística es la reducción del alto coste que actualmente tienen las baterías capaces de dar la potencia, energía y duración requeridas para este tipo de vehículos. Cerca de la mitad del precio final de un VE proviene del valor de la batería, provocando que este componente sea clave en la reducción de costes.

Una de las posibilidades que barajan las empresas del sector es dar una segunda vida a las baterías cuando éstas ya no sean capaces de soportar las exigencias de movilidad requeridas por los VE. Un buen ejemplo es el proyecto europeo *Batteries 2020* que lidera el centro tecnológico Vasco IK4-IKERLAN. De esta forma, el precio de venta para un segundo uso de la batería puede sustraerse al precio inicial de compra del vehículo y así intentar incentivar la venta de estos modelos eléctricos respecto a la aplastante mayoría de combustión

interna (CI) que actualmente impera en el mercado.

En efecto, las baterías que más potencial de uso tienen en aplicaciones de automoción, (basadas mayormente en la tecnología química del litio: ión de litio, LFP, LMO...) son baterías con mucha más densidad energética, de potencia y una larga duración si son comparadas con las baterías utilizadas en otras aplicaciones más usuales como en instalaciones aisladas. Por este motivo se cree que, una vez que ya no sean válidas para su uso en un VE, sigan siendo interesantes para otras aplicaciones, como podrían ser: para afianzar las energías renovables, para estabilizar y mejorar la calidad de la red eléctrica, para equipos aislados...

De hecho, el menor precio de baterías de plomo ácido ha facilitado que en muchas aplicaciones sea más rentable cambiarlas a los pocos años que poner otras de tecnologías químicas distintas con mejores prestaciones pero más caras. Así pues, el menor coste que se estima para las baterías usadas puede llegar a hacer más interesante la utilización de estas baterías “viejas”.

Hay cierto consenso en el hecho que el precio de las baterías a litio se verá drásticamente reducido en cuanto la fabricación de este tipo de baterías sea masiva y en consecuencia la explotación de su material aumente. Este aumento se supone mayormente debido al incremento de las ventas de los VE.

El precio estimado para baterías nuevas dentro de 10 años es cercano al 40% del precio actual, mientras que la compra de baterías usadas rondará el 10%. Con esta suposición y sabiendo que actualmente la batería cuesta la mitad del precio del VE, se constata que la reducción que percibe el comprador de un VE nuevo por el hecho de poder aprovechar su batería es de un 5% del precio total del vehículo. Si, como se ha comentado inicialmente, el precio del

VE es casi el doble de uno equivalente de CI, entonces dicha reducción no equilibra suficientemente las balanzas económicas y, por ende, no es suficiente para incentivar la venta de dichos vehículos.

Aun así, se analizarán distintas aplicaciones de segundas vidas para poder ver si su rendimiento económico tiene suficiente margen. Por ello se intenta encontrar un modelo de negocio que permita no solamente el beneficio empresarial sino también la posibilidad de repercutir dicho beneficio en una reducción del precio de venta de las baterías nuevas para automoción.

2. SEGUNDAS APLICACIONES ANALIZADAS

Se presentan 6 modelos de negocio diferentes realizando una reflexión en función de la bibliografía encontrada sobre sus posibilidades de rendimiento. Los modelos presentados son: acumuladores y soportes a la red eléctrica, afianzamiento de las energías renovables, balance de energía en residencias y comercios, sistemas de proyectos aislados, productos portátiles o relativamente ligeros, sistema de carga rápida para otros VE.

2.1. ACUMULADORES Y SOPORTE A LA RED ELÉCTRICA

En primer lugar analizaremos los grandes sistemas de acumulación de energía, utilizados para soporte de red eléctrica. Hay varios estudios en los que se unen módulos de baterías de 50 kilovatios o más para conseguir demostrar que técnicamente es posible crear grandes instalaciones de mega o incluso gigavatios con baterías. Pero las aproximaciones económicas presentadas ofrecen unos resultados bastante desalentadores. Estos resultados indican unos períodos de retorno de las inversiones, en el mejor de los casos basado en sistemas de calidad de la distribución en la red eléctrica, cercanos a los 7 años y con un rendimiento anual menor al 5%. Otros análisis apuestan por un negocio basado en el *leasing* de las baterías, de modo que el coste se iría pagando mensualmente en forma de alquiler. El caso observado presenta un eufórico resultado

con un rendimiento económico del 35% al final de la vida de las baterías. Puede parecer interesante, pero el rendimiento anual, sabiendo que se contabilizó a lo largo de 15 años, es cercano al 2,3%. Estos resultados, además, cuentan con que el mejor momento, en términos económicos, para hacer el cambio de baterías de un primer a un segundo uso, se sitúa entre los 3 y los 4 años. La reposición de baterías reporta un trabajo no menospreciable para el fabricante del vehículo (una batería se cambiaría cada 3 años, sabiendo que la vida media de los coches en el estado español es de 15 años, un coche pasaría 5 veces por el concesionario a cambiar las baterías y deberían hacerlo sin sobre coste para el cliente).

Por estos motivos las aplicaciones en grandes instalaciones eléctricas de baterías aprovechadas de VE no acaban de ser suficientemente atractivas, a corto plazo, para el mundo empresarial que busca grandes márgenes de beneficio económico.

2.2 AFIANZAMIENTO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

Varios autores afirman que la mejor opción para acumular energía pasa por una mezcla de sistemas de almacenamiento de energía (bombeo de agua, volantes de inercia, aire comprimido y baterías) y no centrándose en uno solamente. Es más, los sistemas basados en baterías son considerados como la última de las opciones. En cierto modo, este punto no deja de ser una continuación del anterior, pues su finalidad es la de mantener cierta constancia en la red y, por lo tanto, los rendimientos económicos son similares. Su interés subyace, básicamente, en el fortalecimiento de las energías renovables como alternativa.

El sistema energético español no está diseñado a día de hoy, para sacar el máximo rendimiento de trabajo a las instalaciones generadoras, sino que las infraestructuras están dimensionadas para poder dar el máximo de potencia que requiere la red en algún momento puntual del año. La aparición de sistemas de almacenamiento de energía potenciando un alto rendimiento de trabajo de las centrales y la implementación de redes inteligentes o *smart grids* pueden suponer el cierre de centrales

generadoras de energía. Este cambio se espera que sea un proceso lento, pero se tenderá a una mayor eficiencia del sistema.

2.3 BALANCE DE ENERGÍA EN RESIDENCIAS Y COMERCIOS

Por otro lado se tiene que los balances de energía en residencias y comercios son las aplicaciones más recurrentes a pequeña escala, es decir, en instalaciones de unos pocos kilovatios. El balance de energía consiste en cargar las baterías en horas valle cuando el coste de la energía es del orden de 3 veces menos que en las horas pico y aprovechar la batería cuando la energía es cara (o incluso venderla a la red si esto fuera posible). Pocas cosas en el mundo pasan a valer 3 veces más en unas pocas horas, por esto es sugerente la idea. Hay, pero, 4 factores clave que hacen perder encanto al proyecto. El primero es la amortización de la batería; el segundo es que la capacidad de la batería de coche (20 kWh) es mucho mayor a la que una vivienda requiere (8 kWh/día) y por lo tanto habría que desmontar el paquete de baterías o poner de acuerdo algunos vecinos (2 o 3) para que no fuese muy costoso; en tercer lugar la ley no permite la aparición de es-

tos sistemas propios de redes inteligentes alegando razones de seguridad. De momento los sistemas de acumulación de energías se permiten solamente para el autoabastecimiento o en caso de fallada del sistema de alimentación; y por cuarto, si finalmente se implementaran de forma masiva, el nivel de demanda de energía a lo largo del día tenderá a nivelarse y desaparecerá el margen entre horas valle y horas pico y con ello el interés económico. Esta es, en realidad, una aplicación cortoplacista que podría entenderse a nivel individual, pero no como práctica habitual. Es más, solamente la aparición de un 5% de VE del parque automovilístico español que cargara por la noche representa una reducción de la diferencia entre el máximo y el mínimo de demanda de potencia cercano al 15%. ¿Qué pasará cuando las baterías usadas de estos coches estén haciendo lo mismo? Como se explica más adelante, las baterías de plomo ácido y las de Litio "usadas" se estima que tendrán precios similares, por lo tanto, si el negocio fuese tan provechoso ya se estaría utilizando de forma habitual con esta conocida tecnología química de baterías.

Las siguientes opciones analizadas se basan en aplicaciones fuera de la red,



es decir, mercados en donde el uso de baterías ya existe y la idea es solamente la sustitución de una por la otra.

2.4 SISTEMAS DE PROYECTOS AISLADOS

Estas aplicaciones partirían de la misma base que el caso inmediatamente anterior, con la única diferencia que no pueden disponer, ni dependen, de la red de distribución. Entonces el análisis de coste se limita solamente a la comparación de los costes de las baterías y sus prestaciones. De hecho, en algún trabajo ya se indica que incluso con baterías nuevas, a largo plazo, es recomendable el uso de baterías basadas en litio que podrían llevar algunos VE (LiFePO_4). Entonces, si al final de la vida de los vehículos estas valen un 10% menos, aunque hayan perdido parte de su potencial, seguirán siendo una buena opción. Es más, estimando que su capacidad de carga se reduce en un 20-25% y que su esperanza de vida es de 2/3 el de una batería nueva ideada para tal fin, el coste de amortización por año de una batería usada se consideraría cercano a 1/3 al de una batería nueva del mismo material (base litio).

Es pues un resultado positivo que vale la pena profundizar, para ello os animamos a leer el siguiente punto.

2.5 PRODUCTOS PORTÁTILES O RELATIVAMENTE LIGEROS

Analizando los productos portátiles que ya existen, vemos que la utilización de baterías de segundo uso sigue siendo una sustitución de una batería por otra. En muchas aplicaciones actuales se utilizan baterías de plomo ácido. Miremos, por ejemplo, las baterías de arranque de los coches de CI. Estas tienen baterías de unos 500 vatios hora y, nuevas, cuestan en el mercado entre 50 y 80€. Actualmente las baterías de VE están formadas por pequeños paquetes de celdas con dimensiones similares a las de este tipo de vehículos. Pero al tener más densidad de energía y potencia tendrían unas prestaciones mayores. Si se considera que pueden desmontarse de tal forma que cumplan las necesidades de cada aplicación, siendo el coste energético estimado de unos 100€/kWh, estaríamos hablando de baterías que costarían unos 50€. Es decir un rango similar de precio de compra, con algunas mayores prestaciones teóricas pero

con cierta incógnita respecto a la fiabilidad del estado de las baterías usadas.

Este razonamiento puede emplearse, en principio, para casi cualquier otro tipo de sustitución de batería de dimensiones similares de celda o paquetes. Así encontraríamos centenares de aplicaciones posibles: en barcos para alimentar todos los equipos eléctricos y electrónicos, en equipos portátiles, para aplicaciones en pequeños robots de asistencia, etc.

Así pues, su aplicación en este ámbito también tiene posibilidades de éxito. Aun así nos encontramos que estos resultados se basan en el precio de venta de 100€/kWh y este, como se ha visto en un principio, no repercute suficientemente en el precio inicial de venta del VE. Si se encarece este precio para poder reducir costes del VE nuevo, pierden entonces el interés competitivo en estas segundas aplicaciones. Y hay aún otro detalle importante a tener en cuenta: muchas de las baterías de litio cuentan con sistemas de refrigeración que deberían añadirse al coste de las mismas para este tipo de aplicaciones.

2.6 SISTEMA DE CARGA RÁPIDA PARA OTROS VE

Por último presentamos los sistemas de carga rápida. La idea es cargar lentamente las baterías “viejas” y, una vez cargadas, volcar en forma de carga rápida su energía a la batería del VE. Se ha realizado un estudio propio en una flota de taxis donde cada batería tiene que poder cargar al menos 4 taxis por día. Esta propuesta, además, sería un proyecto que seguramente encontraría fácilmente subvención por ser muy vistoso y hacer buena propaganda en la ciudad donde se implante. La idea parte del hecho que un taxi eléctrico debe recargar, como mínimo, una vez al día durante la jornada de trabajo (la autonomía en ciudad de los VE actualmente en el mercado es cercana a los 130km y la media recorrida por los taxistas de la ciudad de Barcelona es de 185km). Este sistema permite, con una instalación simple de baja potencia, cuatro cargas diarias por batería sin tener que hacer una instalación de carga a tensiones elevadas.

Además se ha estimado que las batería de segundo uso deberían cambiarse cada año al ser usadas 4 veces al día (2000€/batería), sumando la amortiza-

ción a diez años de la instalación de carga, más el coste del consumo eléctrico para las cargas (consumo de 0.15kWh/km con un coste de 0.1509€/kWh), comparando con los gastos de aprovisionamiento de combustible de un vehículo diesel habitual (consumo de 0.07l/km y un coste de 1.36€/l) supondría un ahorro anual de cerca de 2400€ al usuario del taxi eléctrico. Pero entonces se deben comparar los costes de compra de vehículos, dónde aparece una diferencia cercana a 12.000€ en detrimento del VE (ejemplo de una Renault Kangoo diésel vs eléctrica). Otro factor clave es que con los 2000 ciclos de vida de una batería solamente se podrá usar durante 4 años, mientras que el diésel puede aguantar cuanto menos el doble. Así pues, los 2400€ de ahorro en combustible se ven “evaporados” por los 12.000€ del sobrecoste de un VE respecto a uno de combustión interna y por el hecho de tener que renovar la batería cada cuatro años.

Otro hándicap importante es el ratio de baterías gastadas por año en este segundo uso, pues es mucho mayor a la de taxis que agotarían la batería inicial de su vehículo. Hasta que no haya un mercado importante de VE este proyecto no servirá para incentivar las ventas de VE pues en realidad depende de ellas, es una idea a la inversa. Se podría ver de ir haciendo crecer la flota poco a poco, a medida que vayan aumentando las matriculaciones de VE.

El mismo concepto serviría como base en un sistema de cargas de emergencia. La idea aparece para redimir el miedo de muchos usuarios a quedarse “tirados” por el relativamente corto alcance o autonomía del VE. Esto es, la misma aseguradora podría tener una red de talleres con baterías viejas cargadas que, colocándola en el vehículo de asistencia, podría ir a buscar y cargar, en una media hora el VE al 80%, con esto tendría otra vez casi la entera autonomía. Al estimar este tipo de incidentes muy remoto (una vez por año por vehículo) la cantidad de usuarios que pagarían la batería sería elevada. Así pues, podría ser la propia compañía aseguradora la que ofreciese este servicio por el módico precio de 10€ al año (o otros sistemas puntuales de pago por uso más caros según prefieran los clientes, alternativas de financiación hay muchas).

Para este último caso, no hay nece-

sidad de tener muchas baterías (el ratio es de 1 por cada 1000 coches), y además es económicamente viable. Pero justamente este es su problema, al necesitar pocas baterías, enseguida suple la necesidad y entonces se acaba el proyecto. Para toda la región de Cataluña, se estimó que con 100 baterías (un taller cada 60km aproximadamente) se podría abastecer la mayoría del territorio y la mayoría de ellas no se deberían cambiar hasta pasados 10 años. Por lo tanto, el impacto que tendría este proyecto en la reducción de costes de compra de un VE es, de nuevo, ínfimo.

4. CONCLUSIONES

Ideas y proyectos que serían, en términos de técnica y aprovechamiento de recursos, viables y mayormente aconsejables para el futuro del planeta, existen en cantidad casi infinita. El ingenio, la capacidad inventiva y el interés por hacer las cosas como corresponde no tienen límites. Los proyectos aquí presentados no ofrecen, casi ninguno de ellos, pérdidas económicas, pero tampoco grandes ganancias para incentivar la inversión privada. Por ese motivo aparecen las subvenciones públicas, como los 8.4M€ que aporta la UE para el proyecto "Batteries 2020", que aborda algunos de los casos aquí comentados para los segundos usos de baterías de VE.

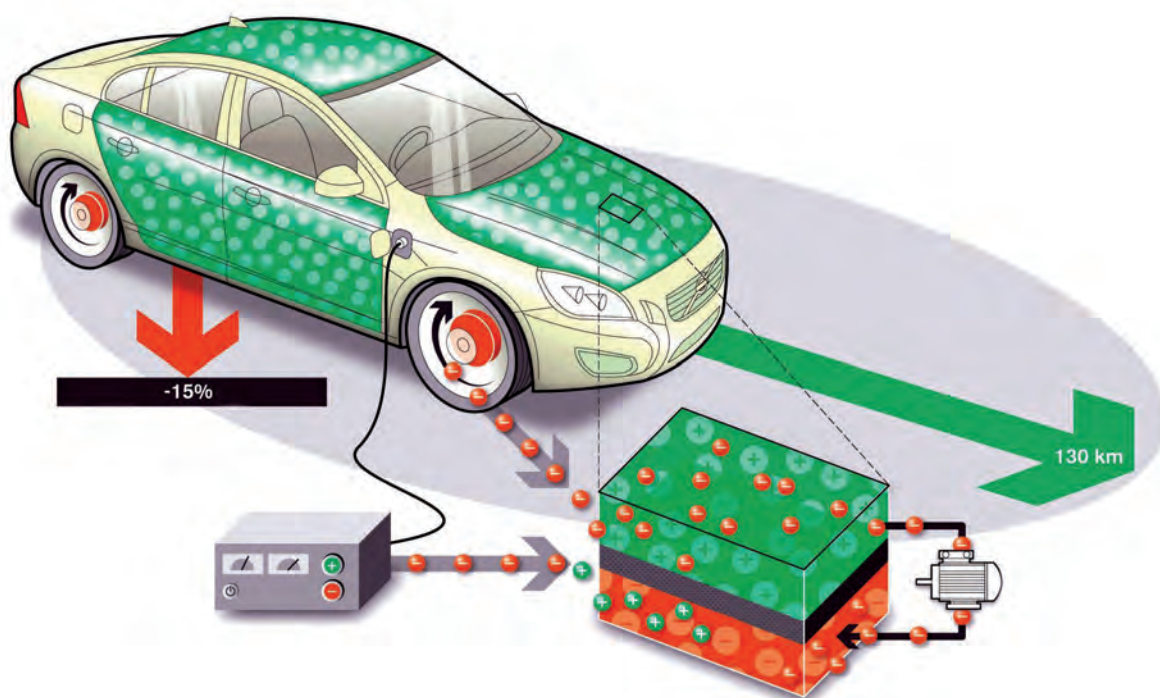
Si bien a largo plazo, con la entrada

inevitable de las redes inteligentes y el aumento incesante de las energías renovables, tanto las aplicaciones de soporte a la red eléctrica como las de afianzamiento de energías limpias van a tener su mercado, estos proyectos no servirán para la reducción de los costes de las baterías que se necesita hoy.

Por ello, en estos momentos nos encontramos con que no se venden coches eléctricos por ser caras las baterías y las baterías no ven reducidos drásticamente sus precios porque los VE no se venden como se esperaba. Si añadimos que los proyectos de segundas vidas de baterías que podrían reducir costes no son demasiado rentables, nos encontramos con que el prometedor círculo económico de reducciones continuas pierde fuerza y las expectativas tendrán que revisarse.

PARA SABER MÁS

- Jeremy S Neubauer, Ahmad Pesaran, Brett Williams, et al. "A Techno-Economic Analysis of PEV Battery Second Use_ Repurposed Battery Selling Price and Commercial and Industrial End_User Value". 2012 SAE World Congress and Exhibition, April 24-26, 2012. <http://dx.doi.org/10.4271/2012-01-0349>
- Fabian Kley "New business models for electric cars—A holistic approach". Elsevier B.V. Energy Policy Vol.39 issue 6 (June 2011) p.3392-3403. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.03.036>
- Vilayanur V. Viswanathan and Kintner-Meyer Michael "Second Use of Transportation Batteries_ Maximizing the Value of Batteries for Transportation and Grid Services". IEEE transactions on vehicular technology, vol.60, N°.7, September 2011. <http://dx.doi.org/10.1109/TVT.2011.2160378>
- Burke Andrew "Performance, charging, and second - use considerations for lithium batteries for plug-in electric vehicles". The Electricity Storage Association Meeting, Session on Transportation and the Grid. May 2009, UCD-ITS-RR-09-17
- Wang, Xingchi , Adelman, Peter, Reindl, Thomas "Use of LiFePO 4 Batteries in Stand-Alone Solar System". Energy Procedia Vol.25 January 2012 p.135-140, <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.07.018>
- Abdou Tankari Mahamadou, Bailo Camara Mamadou, Dakyo Brayima, et al "Wind power integration in hybrid power system with active energy management". COMPEL: COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 30 Iss: 1, p.246 - 264. DOI: 246-264. 10.1108/03321641111091548
- Wen-Chen Lih., Jieh-Hwang Yen, Fa-Hwa Shieh, et al "Second Use of Retired Lithium-ion Battery Packs from Electric Vehicles: Technological Challenges, Cost Analysis and Optimal Business Model". Consumer and Control (IS3C), 2012 International Symposium on Computer. <http://dx.doi.org/10.1109/IS3C.2012.103>.



Reducción del desperdicio «espera» en líneas de ensamble mediante el uso de heurísticas y escenarios de simulación



WAITING WASTE REDUCTION IN ASSEMBLY LINES USING HEURISTICS AND SIMULATION SCENARIOS

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5833> | Recibido: 07/05/2013 • Aceptado: 10/06/2013



José Alfredo Jiménez-García¹, Javier Yáñez-Mendiola²,
José Martín Medina-Flores², Efrén Mezura-Montes⁴

¹ Universidad Politécnica de Guanajuato. Avda. Universidad Norte, s/n - 38483 Cortazar, Gto. (México). Tfno: +01 461 4414307. jjimenez@upgto.edu.mx

² Instituto Tecnológico de Celaya. Dpto. Ingeniería Industrial. Avda. Tecnológico y A. García Cubas, s/n - 38010 Celaya, Gto. (México). Tfno: +01 461 611 75 75

³ CIATEC (PICYT. Programa Interinstitucional en Ciencia y Tecnología). Omega #201 Industrial Delta - 37545 León de los Aldama, Gto. (México). Tfno: +01 477 7100011

⁴ Universidad Veracruzana. Dpto. de Inteligencia Artificial. Sebastián Camacho #5, Centro - 91000 Jalapa Ver. (México). Tfno: +52 228 8172957

ABSTRACT

• In this paper we propose a methodology based on clusterizations, simulation and a heuristic assignment with the purpose of identifying forklift drivers which will send materials from the various storages throughout the production cells and thereby reduce waiting times due to material shortages in manufacturing plants that operate under Lean Manufacturing philosophy. Several clusters were compared, which were, obtained through empirical methods, hierarchical clustering methods and the Hungarian method.

To implement and validate the proposed methodology, a simulation model was used, representing the production system for constant velocity joints, which consists of stores, productive cells and forklift drivers to send materials. In this model the performance of each of the clusters was tested and the loss percentage due to material shortage in each cell was calculated, depending on the cluster. Through the proposed methodology was possible to analyze the performance of different clustering strategies and determine which one is more efficient without the need of compromising business productivity.

• Key Words: simulation, clusters, waiting period due to material shortage, Lean Manufacturing.

RESUMEN

En este trabajo se propone una metodología basada en clústeres, simulación y una heurística de asignación con la finalidad de identificar carretilleros encargados de entregar materiales desde los distintos almacenes hacia las células de producción y con esto reducir los tiempos de espera por falta de suministro en plantas manufactureras que operan bajo la filosofía de *Lean Manufacturing*. Se compararon varios clústeres, obtenidos mediante métodos empíricos, el método de análisis clúster jerárquico y el método Húngaro.

Para implementar y validar la metodología propuesta se utilizó un modelo de simulación, representativo de un sistema de fabricación de transmisiones homocinéticas para vehículos, el cual consta de almacenes, células de producción y carretilleros encargados del suministro materiales. En el modelo de simulación se puso a prueba el funcionamiento de cada uno de los clústeres y se calcularon los porcentajes de esperas por falta de suministro en cada célula.

Mediante la metodología propuesta fue posible analizar el funcionamiento de diferentes estrategias para formar clústeres y determinar cuál de ellas es más eficiente sin tener la necesidad de poner en riesgo la productividad de la empresa.

Palabras Clave: simulación, clústeres, esperas por falta de suministro, Lean Manufacturing.

1. INTRODUCCIÓN

El *Lean Manufacturing* es una de las iniciativas que gran cantidad de las principales industrias manufactureras de todo el mundo tratan de adoptar con el fin de seguir siendo competitivas [1]. De acuerdo con Shah se identifican 22 prácticas “lean” que se pueden clasificar en 4 categorías como son Justo a Tiempo (JIT, por sus siglas en inglés), Gestión de la Calidad, Mantenimiento Productivo y Gestión de Recursos Humanos. Dichas prácticas están asociadas con un mejor rendimiento en la fabricación, las empresas que no las implementan, están en desventaja con relación con las empresas que sí lo hacen [2].

Por otra parte Cusumano menciona que la filosofía del *Lean Manufacturing* presenta ciertas limitaciones como son la necesidad de producir lotes pequeños y entregas frecuentes de materiales [3]. Sin embargo, se ha demostrado que aplicando herramientas de *Lean Manufacturing* es posible eliminar desperdicios como son: inventarios, transportes, esperas, sobreproducción, reprocesos y movimientos. [4]. Dos formas importantes de estos desperdicios

son una excesiva obra en curso (WIP por sus siglas en inglés) y los atrasos innecesarios en tiempo de flujo. Estos desperdicios se pueden reducir aplicando técnicas de flujo de producción definidas dentro de la categoría JIT [1,2]. Cuando se aplican las técnicas de flujo mencionadas no se pone atención a un efecto secundario que se manifiesta al intentar reducir cada vez más los tamaños de lote, la obra en curso y los tiempos de cambio de utillajes. En este trabajo se consideran dichos efectos, los cuales se presentan cuando las células se quedan sin material por falta de suministro, una vez que se termina el cambio de utillajes. Para que las células puedan trabajar, todos los materiales deben ser entregados justo a tiempo, o de lo contrario, la célula detendrá su flujo de producción debido a la falta de suministro. Se tiene evidencia de un trabajo donde se propone un novedoso esquema de suministro consistente en entregar los materiales cuando se está realizando el cambio de utillajes, justo en el momento en que se necesitan con la finalidad de reducir al mínimo la cantidad de obra en curso [5].

Ohlmann destaca la importancia de realizar proyectos relacionados con el Lean Manufacturing y propone la solución del cálculo de rutas de vehículos con ventana temporal (VRPTW, por sus siglas en inglés) en una empresa que opera bajo principios "lean". En su trabajo considera una red de suministro donde se recogen materiales y se entregan a un conjunto de depósitos que siguen esos principios, siendo el objetivo mantener el WIP lo más bajo posible y una producción nivelada. El problema lo resuelve mediante una estrategia de dos fases, en la primera establece un plan de rutas donde establece la frecuencia de visita de los vehículos proveedores y sus rutas y en la segunda fase define el momento exacto de la visita para mantener un programa nivelado [6].

En relación al trabajo que se presenta en esta investigación, hasta donde llega el conocimiento de los autores, no se tiene evidencia de trabajo similar, aunque se tiene cierta similitud con el problema del cálculo de rutas de vehículos, ya que los carretilleros deben tomar materiales de los distintos almacenes para entregarlos a los clientes (células de producción). En este trabajo todos los elementos se ubican dentro de la misma planta. Dada la complejidad que genera el hecho de tener n almacenes, r carretilleros y c células, se propone que los carretilleros encargados de la entrega de materiales se limiten a entregarlos sólo a las células a las que fueron asignados, a lo que denominamos **clúster**, lo que reduce el número de combinaciones posibles que existe para entregar los materiales.

Existen diferentes métodos para la obtención de un **clúster**: Jain realizó un análisis exhaustivo de los diferentes métodos [7], Bhattacharyya realizó un trabajo para clusterizar considerando diferentes números de datos [8], Goldelberg propuso un método de clusterización jerárquica para agrupamiento de datos basado en el método Húngaro, donde se podía definir con anticipación el número de clústeres [9]. El método Húngaro fue propuesto originalmente Kuhn en 1955, los pasos para su aplicación se pueden encontrar en [10] y se ha aplicado exitosamente a problemas relacionados con la asignación de recursos [11,12]. Los resultados de las asignaciones pueden someterse a modelos de simulación, para validar su funcionamiento. Actualmente la aplicación de simulación es parte clave en la toma de decisiones [13]. En proyectos relacionados con Lean Manufacturing se recomienda aplicar simulación antes

de tomar las decisiones, pues con ello se han logrado buenos resultados [14-15]. En este trabajo se propone aplicar diferentes estrategias de clusterización y analizar su funcionamiento en un modelo de simulación para solucionar uno de los efectos secundarios al implementar el Lean Manufacturing y que en la literatura especializada no ha sido atendido, como lo es la *espera por falta de suministro de material*. La aportación de este trabajo es una metodología que integra diferentes herramientas como son simulación y diferentes métodos de clusterización para resolver el problema de suministro de materiales en empresas que operan en ambientes de Lean Manufacturing.

2. METODOLOGÍA

El presente trabajo propone un método que servirá para analizar la conveniencia de realizar abastecimiento de materiales aplicando diferentes métodos de *clusterización*. A continuación se plantean las etapas de la metodología propuesta, más adelante se pone en práctica en una situación real:

Etapas 1. Definición del problema.

Etapas 2. Elaboración del VSM de la planta.

Etapas 3. Construcción del modelo de simulación del sistema real.

Etapas 3.1 Verificación del modelo de simulación.

Etapas 3.2 Validación del modelo de simulación.

Etapas 3.3 Determinación del periodo *warm-up*.

Etapas 4. Definir clústeres mediante métodos diferentes.

Etapas 5. Someter cada uno de los clústeres en el modelo de simulación y medir su funcionamiento.

2.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA A RESOLVER

Se tienen n almacenes de donde se toman los materiales, se tienen c células de producción cada una de ellas encargadas de producir una familia de productos, se tienen r carretilleros encargados de tomar materiales de los diferentes almacenes y transportarlos hacia la célula de producción que lo requiera. Cada célula de producción tiene cierto programa que hay que cumplir, dicho programa se encuentra registrado en la caja *heijunka*. En el vocabulario del *Toyota Production System* para un sistema productivo, *heijunka* significa nivelación de la producción, que en la práctica sugiere producir pequeñas cantidades de todos los modelos de productos [6]. Todos los materiales deben de estar en el momento justo de iniciar la producción del modelo de cierto producto de acuerdo a su pro-

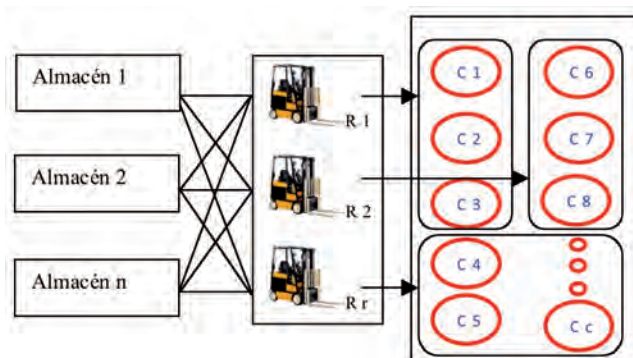


Fig. 1: Esquema de abastecimiento de materiales con n almacenes, r carretilleros y c células

gramación y después del cambio de modelo de producto. Si hace falta un material, la célula quedara en espera por falta de suministro de materiales. El problema consiste en encontrar el *clúster* (conjunto de células a suministrar por cada carretillero) que minimice las esperas por falta de suministro. Para su entendimiento ver Fig.1.

2.2. MAPA DEL FLUJO DE VALOR

El mapa del flujo de valor (VSM, por sus siglas en inglés) es una colección de todas las actividades que agregan y que no agregan valor que requiere un producto (o un grupo de productos que usan los mismos recursos) a través de los flujos principales, empezando desde la materia prima y terminando con el cliente. El VSM contribuye en gran medida a reducir el tiempo de entrega y el WIP [1], se construye con la finalidad de detectar áreas de oportunidad para eliminar desperdicios. En la metodología servirá para identificar y destacar las áreas de oportunidad en busca de mejorar el flujo del producto y reducir las esperas por falta de suministro.

2.3. MODELO DE SIMULACIÓN

Un modelo de simulación permite poner en práctica cada uno de los experimentos, en este caso cada experimento consiste en la definición de un escenario que a su vez consiste en una asignación que está compuesta por diferentes *clústers*. La simulación es una poderosa herramienta que sirve para analizar el comportamiento de sistemas en diferentes circunstancias, identificando posibles cambios y sus consecuencias [13]. Para asegurar el éxito en la implementación de proyectos relacionados con el *Lean Manufacturing*, Grimard y Standridge recomiendan hacer uso de la simulación antes de implementar los cambios propuestos [14, 15]. Para la construcción del modelo de simulación se recomiendan los pasos propuestos por Harrell [16]. En relación a la verificación y validación, Sargent presenta un conjunto de técnicas que se adaptan a diferentes tipos de sistemas [17]. En la construcción del modelo de simulación, se utilizó el *software Promodel*, debido a su gran capacidad para simular sistemas de producción discretos. Sin embargo pueden usarse otro *software* que cumple el mismo propósito como son *Arena*, *Quest*, *Taylor*, etc.

2.4. MÉTODO HUNGARO DE ASIGNACIÓN

El método Húngaro es una heurística que fue propuesta originalmente por Kuhn en 1955 cuyo propósito es resolver

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } i \text{ se asigna a } j \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}$$

$$\text{sa: } \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad \forall(i, j)$$

(1)

el problema de asignación [10-12]. El problema de asignación que se menciona en este trabajo se puede expresar matemáticamente como se muestra en la Ec. (1).

Dónde: x_{ij} es la asignación del carretillero i a la célula j , c_{ij} es el porcentaje de espera por falta de suministro al asignar el carretillero i a la célula j . La función objetivo nos indica la suma de los porcentajes de las esperas por falta de suministro en todas las células; en otras palabras, el objetivo es minimizar el porcentaje de tiempo que duran las células paradas debido a la falta de suministro. La restricción 1 asegura que solo un carretillero sea asignado a una célula y la segunda restricción asegura que solo una célula sea asignada a un carretillero. Para la solución del problema de asignación mediante el método Húngaro se utilizó el software de investigación operativa *Win QSB*.

2.5. CLUSTERIZACIONES

El análisis de *clúster* (agrupación) es la colección de un grupo de patrones basados en su similitud. Se propone realizar un análisis de *clúster* jerárquico (ACJ), ya que es una herramienta exploratoria diseñada para definir las agrupaciones naturales (conglomerados o *clústeres*) dentro de un conjunto de datos. Es el más útil cuando se desea agrupar un número pequeño de objetos. El criterio básico para cualquier agrupación es la distancia. Los objetos que estén cerca uno del otro pertenecerían al mismo conglomerado o *clúster*, y los objetos que estén lejos uno del otro pertenecerán a distintos *clústeres* [7, 9]. La distancia entre células, será el criterio para definir los *clúster* mediante ACJ, de manera que pertenecerán al mismo *clúster* las células que se encuentren lo más cercanas entre sí.

Adicional al ACJ, se propone aplicar el método Húngaro de asignación para definir un *clúster* y además se permitirá la participación de personal experimentado conocedor del sistema para plantear diferentes *clústeres*, tomando como criterio su propia experiencia.

3. RESULTADOS

La metodología propuesta se aplicó a una empresa dedicada a la fabricación de transmisiones homocinéticas para el sector de la automoción de diferentes marcas tales como Ford, VW, Nissan, Hyundai, GM, entre otras. Dicha empresa cuenta con tres almacenes, denominados Mecanizados, Misceláneos y Plásticos. Además cuenta con 4 carretilleros, encargados de tomar los materiales de los almacenes y entregarlos a las células de producción. Se cuenta con 20 células de producción, aunque solo se programan 16, dependiendo de la demanda de los clientes. A continuación se desarrolla cada una de las etapas:

Etapas 1. Definir problema. El problema consiste en definir las agrupaciones de células (*clústeres*) a las que les dará servicio el carretillero 1, el carretillero 2, el carretillero 3 y el carretillero 4, de tal manera que todas sean atendidas y que el tiempo de espera por falta de suministro sea mínimo o cercano al mínimo, respetando las restricciones dadas por un programa nivelado de producción (registrado en la caja *heijunka*) y manteniendo al mínimo el WIP.

Etapa 2. Elaboración del VSM de la planta. Para la construcción del VSM, se tomó papel y lápiz y se realizó un recorrido de puerta a puerta, desde la recepción de materiales hasta el almacén de los productos terminados [18]. El VSM estado actual de la empresa, se puede observar en Fig.2, donde se identifican mediante el símbolo “explosiones-kaizen” las actividades necesarias para poder alcanzar el estado futuro. El VSM estado futuro se observa en la Fig.3.

Etapa 3. Construcción del modelo de simulación del sistema real. En la Fig.4 se puede observar el layout del modelo de simulación construido con el software *Promodel*. Las características del modelo conceptual son las siguientes: se tienen tres almacenes, cuyos nombres asignados por la empresa son Mecanizados, Misceláneos y Plásticos, en los que se ubican los componentes del ensamblado según su tipo y características. Los carretilleros deben tomar los materiales en el momento que se necesitan, justo cuando se está llevando a cabo el cambio de modelo y entregarlos en la célula que fue asignado, esto con el fin de reducir el WIP, y además llevan el lote de producto terminado al área nombrada *safe launch* para ser inspeccionado. Es ahí donde termina su trabajo.

Cuando la célula de producción termina un cambio de utillajes y le suministraron las partes necesarias para producir el lote que tiene programado en la caja *heijunka*, puede iniciar su producción. Sin embargo si hace falta cualquier material, ya sea mecanizados, misceláneos o plásticos, entonces la célula

estará en espera por falta de suministro. El modelo de simulación construido con el software *Promodel*, permite correr los escenarios sugeridos. Cada escenario consiste en una asignación, en total se proponen 6 diferentes. Cuatro asignaciones son los clústeres sugeridos por los supervisores de la empresa, una asignación es la obtenida por el método ACJ y una más es el obtenido por la heurística del método Húngaro.

Dentro de cada asignación se definen cuatro clústeres, debido a que son cuatro los carretilleros que han de ser asignados a las células. El modelo de simulación permitirá determinar cuál será el funcionamiento de la célula sin tener que probarlo en el sistema real [13-15].

Etapa 3.1 Verificación del modelo de simulación. Verificación es determinar si el modelo funciona como se tiene previsto [16]. Se aplicó una técnica de depuración que el mismo software *Promodel* ofrece. En la Fig.5 se presenta una imagen del depurador del software, destacando el error, el cual indica que hace falta definir la salida de la entidad denominada *BATCHE_L12*. La verificación se realizó al tiempo de construcción del modelo y cada vez que se le agregaban elementos se realizaba una corrida para depurarlo.

Etapa 3.2 Validación del modelo de simulación. La validación es determinar si el modelo de simulación es una representación significativa y exacta del sistema real [16]. Se aplicaron algunas técnicas sugeridas por Harrell y Sargent [16-17] tales como animación y validación con datos históricos. La animación consiste en darle seguimiento a las partes mientras

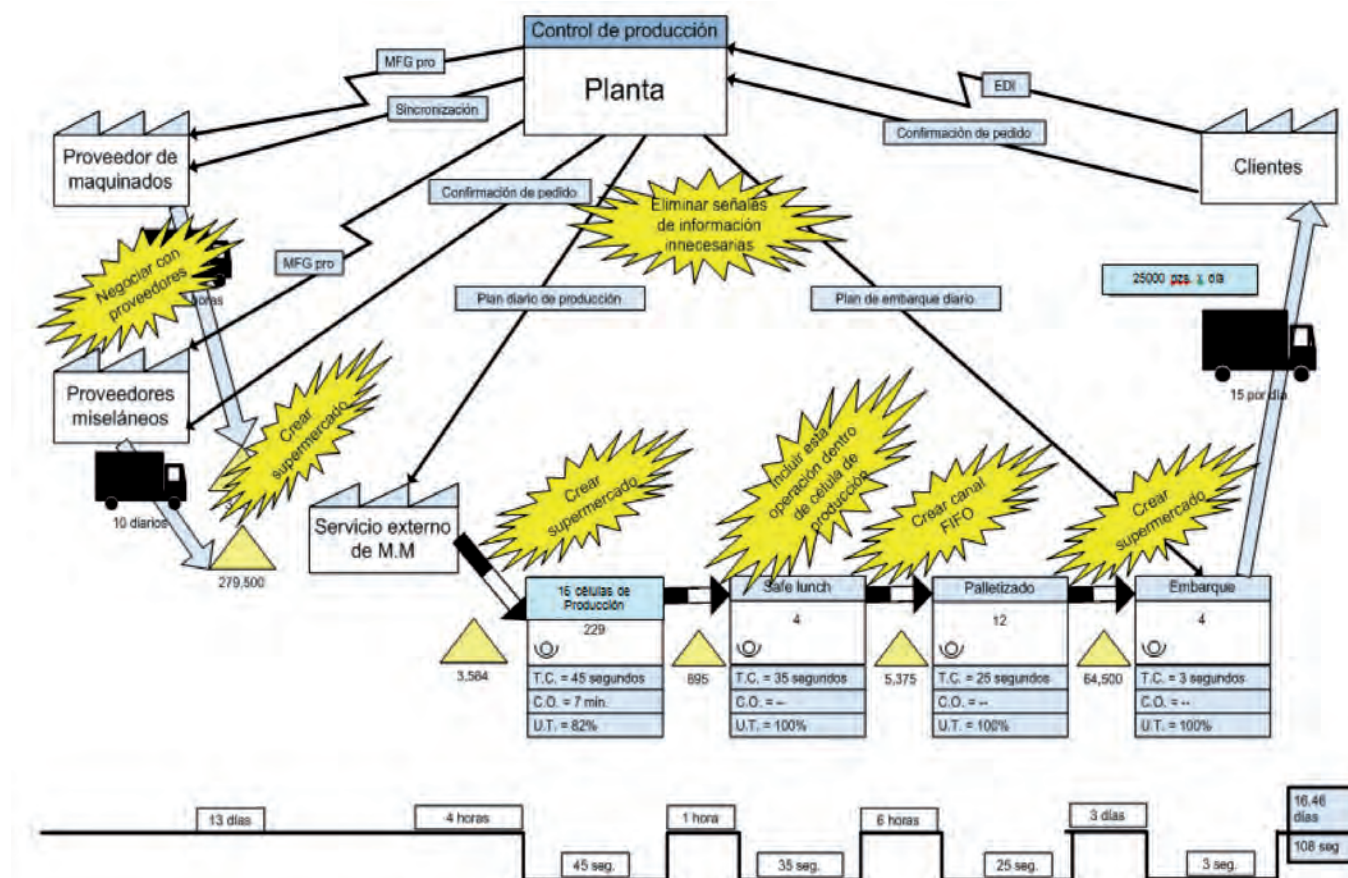


Fig. 2: VSM estado actual y sus “explosiones kaizen”

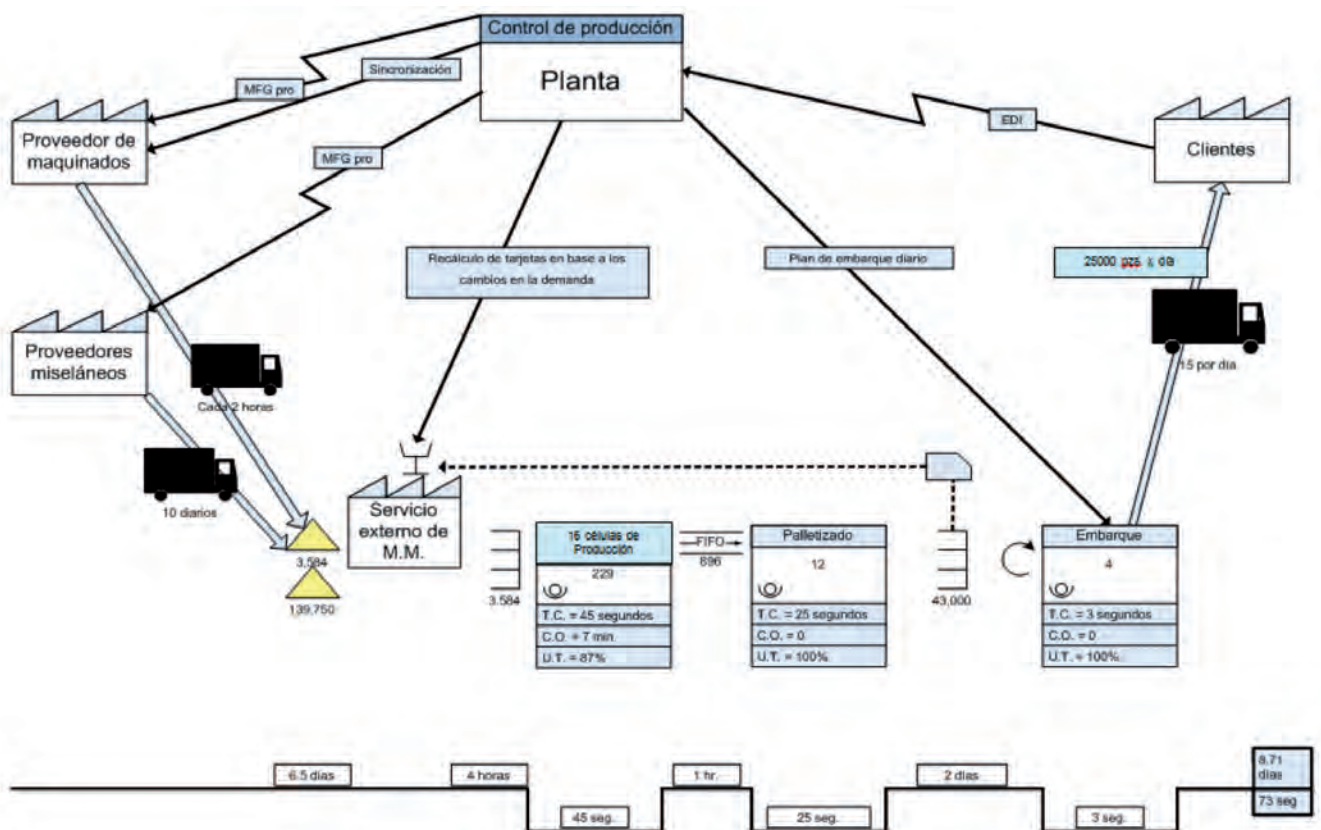


Fig. 3: VSM estado futuro

se ejecuta la simulación. La validación con datos históricos consiste en utilizar los mismos datos recolectados para construir el modelo de simulación y compararlos contra las salidas del modelo conceptual. Los parámetros más importantes que se cotejaron fueron los tiempos de cambio de utillajes, los productos terminados y las esperas por falta de suministro.

Con relación a la animación, se corrió el modelo, se ob-

servaron los movimientos de los carretilleros y se validó que efectivamente suministran materiales a la célula que fue asignado y que los movimientos realizados por el mismo fueran lógicos dentro del modelo. También se validó que entregaran todas las partes que la célula necesita, y nos aseguramos que las células realicen los ensambles una vez que tienen todas las partes que componen la transmisión homocinética.

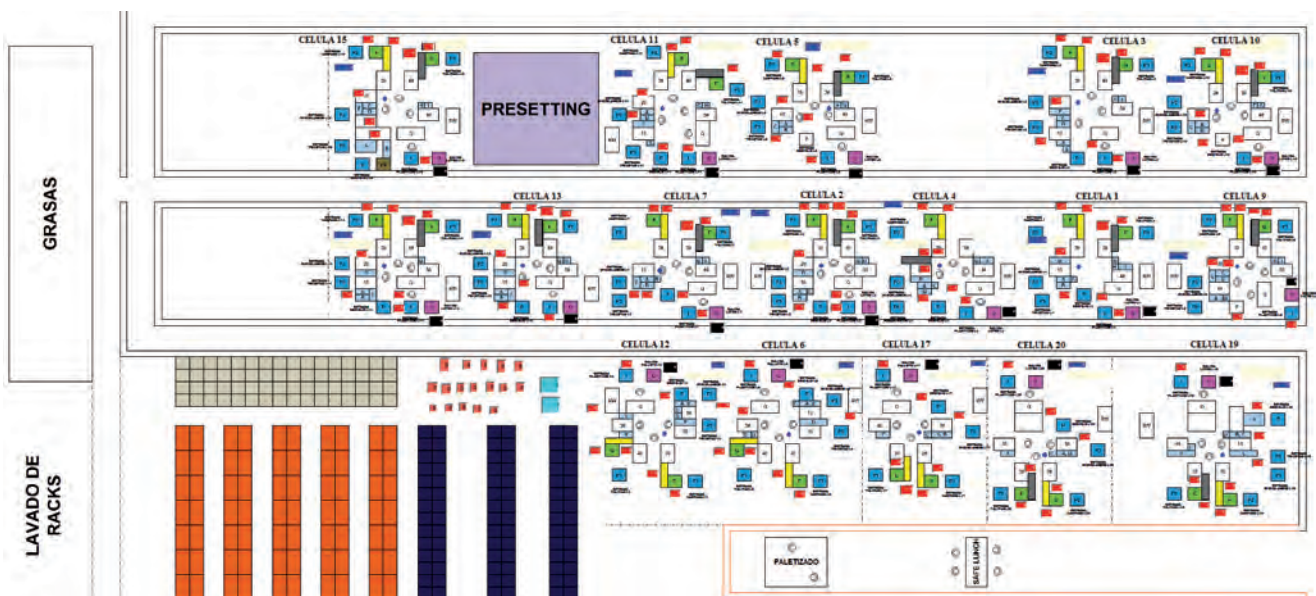


Fig. 4: Modelo de simulación con el software Promodel

Con respecto a la validación con datos históricos, se realizó una comparación de datos proporcionados por la empresa, de acuerdo al funcionamiento del sistema real. Estos valores se compararon contra el intervalo de 95% de confianza obtenido por los resultados de 15 réplicas simuladas. Los resultados se encuentran en la Tabla 1, donde se puede apreciar que el valor del funcionamiento del sistema real, cae dentro del intervalo de confianza, lo que indica que el modelo de simulación tiene un comportamiento estadísticamente semejante al sistema real.

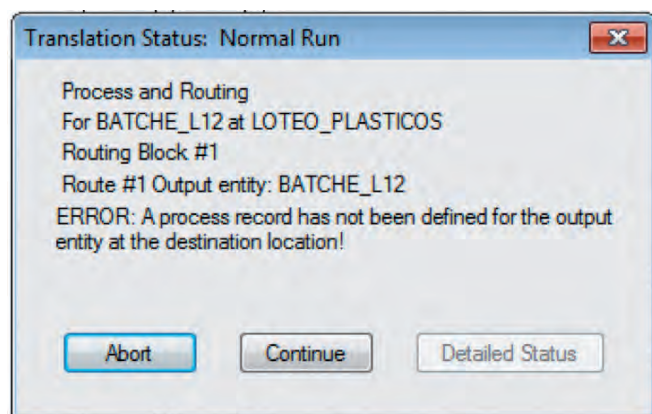


Fig. 5: Verificación mediante depurador del software Promodel

Etapa 3.3 Determinación del periodo warm-up. Debido a que se tiene un repentino inicio de la simulación, el desempeño del sistema simulado no es representativo del correspondiente sistema real tanto no haya alcanzado su régimen estable. Por consiguiente los datos obtenidos durante el periodo inicial de operación deben excluirse del análisis. Esto se logra definiendo un periodo de warm-up [16].

En este problema, la simulación inicia con un sistema vacío, se estabiliza en el momento en que todas las células han recibido al menos el suministro del primer lote de materiales para iniciar su operación. Una vez que todas las células han sido suministradas por primera vez, se determina que el sistema se encuentra en estado estable. Por esta situación se corrieron 15 réplicas iniciales, para determinar el tiempo en el que todas las células han sido suministradas y han podido iniciar operaciones. En el modelo de simulación se definió una variable que cuenta desde 0 hasta 16, donde 0 indica que ninguna célula ha iniciado operaciones y el 16 indica que todas las células han iniciado el ensamble de al menos el primer lote. Una vez que la variable indica 16, el sistema operará en estado estable. A continuación en la Fig.6, se muestran 15 tiempos en valores mínimos en los que el sistema ha alcanzado su estado estable. El valor mayor de los mínimos es 17.431,8 segundos (290,53 minutos o 4,84 horas); de esta manera se establece

CELULA	CAMBIO DE MODELO		PRODUCCIÓN		ESPERAS POR FALTA DE SUMINISTRO	
	PROMEDIO DE TIEMPO DE CAMBIO DE UTILAJES DEL SISTEMA REAL (Minutos)	INTERVALO DE CONFIANZA SIMULACION (Minutos)	PROMEDIO DE PRODUCCION SISTEMA REAL (piezas producidas por día)	INTERVALO DE CONFIANZA SIMULACION (piezas producidas por día)	PORCENTAJE PROMEDIO DE ESPERAS POR FALTA DE SUMINISTRO SISTEMA REAL (%)	INTERVALO DE CONFIANZA SIMULACION (%)
C1	18	15.92-29.16	1900	1888-1941	7.5	6.43-8.96
C2	21	13.71-24.23	1900	1917.1-1952.2	8.2	6.91-9.46
C3	15	14.78-21.96	1890	1885-1968.4	10.7	10.6-12.37
C4	17	13.26-19.6	1450	1423.1-1459.1	5.28	4.77-6.16
C5	18	17.71-36.36	1300	1299.5-1393.2	5.79	5.71-8.48
C6	16	12.73-18.02	1890	1873.1-1930.5	7.92	7.65-9.04
C7	15	11.12-16.27	1780	1761.2-1842.5	7.85	7.19-8.94
C9	14	13.78-20.5	1700	1638.2-1719.3	11.93	11.78-12.79
C10	18	15.46-30.84	1450	1424.7-1453.2	11.88	10.47-12.96
C11	18	18.04-27.38	1850	1811.7-1875.6	8.41	7.08-9.76
C12	18	15.45-30.84	1250	1207.6-1289.2	8.68	7.54-9.73
C13	25	19.06-27.59	1510	1501.3-1562.2	5.91	5.11-6.74
C15	21	16.1-23.24	1500	1497.3-1515.3	9.15	6.51-10.3
C17	65	44.84-82.77	1380	1350.9-1483.1	6.92	6.81-8.06
C19	22	17.37-26.03	1530	1505.3-1574.6	5.83	4.56-6.4
C20	18	15.102-23.83	1535	1530.9-1571	5.49	4.36-6.84

Tabla 1: Validación del tiempo de cambio de modelo, producción y esperas por falta de suministro del sistema real contra resultados de simulación

General Report (07-marzo - All Reps)						
General	Locations	Location States Multi	Location States Single	Resources	Resource States	
ASIGNACION Hungaro (ok).MOD (07-marzo - All Reps)						
Name	Replication	Number Observations	Minimum Value	Maximum Value	Avg Value	
Warm	1	14.00	17362.80	82229.40	50702.31	
Warm	2	15.00	16136.40	80812.20	49404.44	
Warm	3	16.00	14692.20	85252.80	50244.79	
Warm	4	15.00	14701.80	86394.00	50831.52	
Warm	5	16.00	14768.40	83737.80	48727.05	
Warm	6	15.00	16609.80	83398.20	49907.80	
Warm	7	14.00	15586.80	82450.80	48933.17	
Warm	8	15.00	15395.40	83029.20	49339.16	
Warm	9	15.00	15855.60	84202.80	49166.20	
Warm	10	15.00	17431.80	80964.60	49397.00	
Warm	11	15.00	15718.20	80875.20	49493.56	
Warm	12	14.00	16072.20	82259.40	47809.41	
Warm	13	15.00	15463.20	85540.80	51047.56	
Warm	14	14.00	16968.00	84793.80	50507.44	
Warm	15	15.00	17130.60	85700.40	52104.04	

Fig. 6: Tiempo en segundos donde las 16 células han sido suministradas y han iniciado la producción de su primer lote

que cinco horas es un tiempo de warm-up razonable. El software de simulación Promodel se programa con un tiempo de corrida de 24 horas y se define un warm-up de 5 horas, por lo que el tiempo de simulación es de 29 horas.

Etapas 4. Definir clústeres mediante diferentes métodos. Para este estudio se sugiere que sean tres métodos: experiencia de supervisores, análisis de clúster jerárquico (ACJ) y heurística de método Húngaro, con el objetivo de reducir el tiempo en espera de las células por falta de suministro.

Con relación a la experiencia de supervisores de la empresa, se definen cuatro propuestas de asignación basadas en el conocimiento que tienen del sistema, conformadas cada una de cuatro clústeres. Por ejemplo, en la primera asignación el carretillero uno satisface al clúster compuesto por las células 19, 20, 5 y 10; el carretillero dos satisface al clúster conformado por las células 7, 17, 11 y 4; el carretillero tres satisface al clúster conformado por las células 6, 12, 15 y 9; el carretillero cuatro satisface al clúster que contiene las células 1, 2, 3 y 13. Las cuatro asignaciones se muestran en la Tabla 2. El criterio para definir las asignaciones aparte de la experiencia, fue que dentro de cada asignación no se repitieran células y en

cada fila aparezcan 16 células diferentes, con la finalidad de no duplicar asignaciones, donde el mismo rutero aparezca en dos ocasiones asignado a la misma célula.

Para definir la quinta asignación, los resultados de la simulación de los 4 primeros escenarios, fueron utilizados para mejorar el funcionamiento del sistema, introduciendo la matriz de porcentajes de esperas por falta de suministro obtenidos (ver Tabla 4) a una matriz del módulo de redes (*Network Modeling*) del software *Win QSB*, donde se resolvió el problema mediante el método Húngaro de asignación consiguiendo los resultados que se muestran en la Fig.7.

De acuerdo con los resultados arrojados por el software *Win QSB* (Fig.7) se presenta un

resumen en la Tabla 3 con los clústeres bien definidos.

La sexta asignación se propone aplicando el *análisis de clúster jerárquico* (ACJ). Para ello se recolectó información acerca de la ubicación de cada célula dentro de la planta como se muestra en la Fig.8, ubicando la distribución de las células sobre un plano cartesiano, a través del cuadrante I, donde los almacenes que se encuentran ubicados en el origen y se tomaron como referencia asignándoles la posición (0,0). A partir de esta ubicación se definieron las distancias entre los almacenes y cada una de las células. Como herramienta de análisis estadístico se utilizó el software *Minitab* donde se introdujeron los valores de cada una de las ubicaciones de las células y aplicando el ACJ basado en distancias se obtuvieron los *clústeres* de la sexta asignación los cuales se pueden apreciar en el dendograma de la Fig.9, donde cada color representa un clúster.

De acuerdo al dendograma de la Fig.9, se aprecia que la sexta asignación se define de la siguiente manera: en color rojo, el clúster uno se compone de las células C1, C9, C3 y C10; en color verde, el segundo clúster está formado por las células C2, C4, C6, C17 y C12; en color amarillo, el clúster tres, está formado por las células C19 y C20; y finalmente, en color azul, el cuarto clúster está formado por las células C5, C11, C7, C13 y C15.

CARRETILO	CELULAS															
	ASIGNACIÓN 1				ASIGNACIÓN 2				ASIGNACIÓN 3				ASIGNACIÓN 4			
1	19	20	5	10	4	15	13	9	20	17	1	6	11	2	3	7
2	7	17	11	4	20	2	19	6	9	10	13	3	20	15	1	5
3	6	12	15	9	11	1	3	12	4	5	7	2	19	10	17	13
4	1	2	3	13	5	17	10	7	15	11	19	12	12	4	9	6

Tabla 2: Asignaciones propuestas por supervisores con cuatro clústeres cada una

Etapa 5. Someter cada uno de los clúster en el modelo de simulación y medir su funcionamiento: Para obtener los porcentajes de espera por falta de suministro, se corrió el modelo de simulación desarrollado en el software *Promodel* con seis escenarios, representando cada escenario una asignación diferente. En la Tabla 4, se pueden observar los resultados para cuatro escenarios distintos correspondientes a las asignaciones 1, 2, 3 y 4, descritas en la Tabla 2. Interpretando los resultados, se puede observar que la asignación 1, está definida por el carretillero 1 quien suministra las células 5, 10, 12 y 19, las cuales tienen 4,79%, 11,95%, 10,32% y 4,50% en espera por falta de suministro respectivamente. Considerando la asignación 2, el carretillero 1 debe suministrar las células 4, 9, 13 y 15, dando como resultado 4,09%, 12,46%, 6,10% y 7,65% en esperas por falta de suministro respectivamente. Considerando la asignación 3, el carretillero 1 suministra las células 1, 6, 17 y 20, los porcentajes de espera por falta de suministro son de 6,57%, 3,77%, 5,97% y 3,68% respectivamente. En la asignación 4, el carretillero 1 suministra las células 2, 3, 7 y 11 y los porcentajes de espera por falta de suministro son 5,91%, 6,37%, 10,47% y 4,62% respectivamente. El resto de las filas de la Tabla 4, se interpreta de la misma manera que se hizo con la fila 1, donde se definen las esperas por falta de suministro cuando los carretilleros son: 2, 3 y 4. Cada asignación se distingue por colores, los cuales se identifican en la parte inferior de la Tabla 4.

Otra forma de interpretar la Tabla 4 es mediante el siguiente ejemplo: el valor de 4,79 que aparece en la fila 1, columna 5, significa que las esperas por falta de suministro que sufre la célula $j = 5$, cuando es suministrada por el carretillero $i = 1$, considerando la asignación 1, es de 4,79%. El resto de los valores que aparecen en la tabla se interpretan de la misma forma. Todos los valores nos indican las esperas por falta de suministro, que sufren las células, dependiendo del carretillero y la asignación de que se trate.

Finalmente, se sometió el sistema de suministro bajo un escenario donde los carretilleros fueron asignados a los clústeres de acuerdo al método de ACJ, dando origen a lo que

CLUSTER	CARRETILLERO	CELULA ASIGNADA	PORCENTAJE DE ESPERA POR FALTA DE SUMINISTRO
1	1	C20	3.68
	1	C5	4.79
	1	C3	6.37
	1	C12	10.32
2	2	C19	3.77
	2	C2	5.87
	2	C1	5.92
	2	C11	4.85
3	3	C4	4.35
	3	C17	5.86
	3	C15	7.46
	3	C7	8.12
4	4	C9	12.02
	4	C6	4.34
	4	C10	10.70
	4	C13	6
			6.53

Tabla 3: Asignación cinco con cuatro clústeres definidos por método Húngaro

The screenshot shows the 'Network Modeling' software interface. The title bar reads 'Network Modeling'. The menu bar includes 'File', 'Format', 'Results', 'Utilities', 'Window', and 'Help'. The toolbar contains various icons for file operations and calculations. The main window displays the 'Solution for Hungaro: Minimization (Assignment Problem)' for the date '05-05-2013'. It features a table with 7 columns: 'From', 'To', 'Assignment', 'Unit Cost', 'Total Cost', and 'Reduced Cost'. The table lists 16 assignments, each involving a 'CARRETILLERO' (1-4) and a 'CELULA' (1-20). The final row shows the 'Total' 'Objective' 'Function' 'Value' as '104.42'.

05-05-2013	From	To	Assignment	Unit Cost	Total Cost	Reduced Cost
1	CARRETILLERO 1	CELULA 20	1	3.68	3.68	0
2	CARRETILLERO 2	CELULA 19	1	3.77	3.77	0
3	CARRETILLERO 3	CELULA 4	1	4.35	4.35	0
4	CARRETILLERO 4	CELULA 9	1	12.02	12.02	2.384186E-07
5	CARRETILLERO 1	CELULA 5	1	4.79	4.79	0
6	CARRETILLERO 2	CELULA 2	1	5.87	5.87	0
7	CARRETILLERO 3	CELULA 17	1	5.86	5.86	2.384186E-07
8	CARRETILLERO 4	CELULA 6	1	4.34	4.34	0
9	CARRETILLERO 1	CELULA 3	1	6.37	6.37	0
10	CARRETILLERO 2	CELULA 1	1	5.92	5.92	0
11	CARRETILLERO 3	CELULA 15	1	7.46	7.46	0.00
12	CARRETILLERO 4	CELULA 10	1	10.70	10.70	0
13	CARRETILLERO 1	CELULA 12	1	10.32	10.32	0
14	CARRETILLERO 2	CELULA 11	1	4.85	4.85	0
15	CARRETILLERO 3	CELULA 7	1	8.12	8.12	0
16	CARRETILLERO 4	CELULA 13	1	6	6	0
	Total	Objective	Function	Value =	104.42	

Fig. 7: Solución del problema mediante el método Húngaro en Win QSB

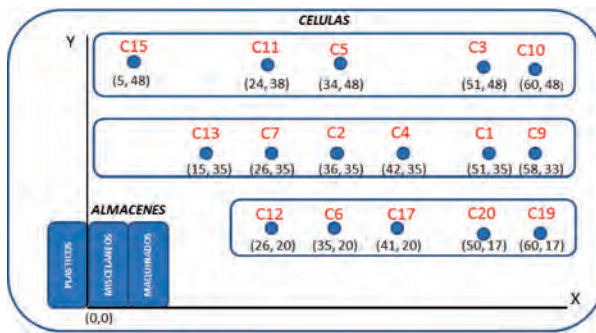


Fig. 8: Ubicación de las células en un plano cartesiano

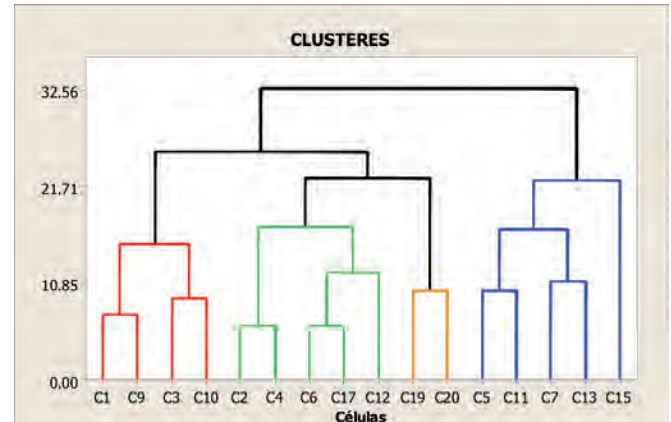


Fig. 9: Dendrograma que define la quinta asignación

identificamos como asignación 6. Al correr el escenario en el modelo de simulación se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 5 donde se aprecia que el promedio de esperas por falta de suministro es de 7,38%.

4. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo con los VSM's plasmados en las Fig.2 y Fig.3, es posible reducir el *Lead Time* (tiempo de entrega) de 16,46 a solo 8,71 días. Esto en gran medida se logra reduciendo el

WIP (obra en curso) y suministrando los materiales de acuerdo con los *clústeres* definidos por la heurística del método Húngaro. En los resultados que se presentan en la Tabla 6, se establece que si el abastecimiento se realizara de acuerdo con las asignaciones 1 a 6, en promedio, cada una de las células de producción tendrían esperas por falta de abastecimiento de alrededor del 7.895%. 7.28%, 7.96%, 7.46, 6.53 y 7.38% para las asignaciones 1, 2, 3, 4, 5, y 6 respectivamente.

CARRETERILLEROS	CELULAS															
	1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	13	15	17	19	20
1	6.57	5.91	6.37	4.09	4.79	3.77	10.47	12.46	11.95	4.62	10.32	6.10	7.65	5.97	4.50	3.68
2	5.92	5.87	8.76	4.57	3.15	6.02	8.27	12.89	11.33	4.85	21.00	5.82	7.51	7.12	3.77	4.74
3	7.63	8.73	9.43	4.35	6.71	12.61	8.12	12.41	12.85	5.43	12.53	6.3	7.46	5.86	4.41	4.29
4	6.6	7.06	13.52	4.13	5.86	4.34	7.8	12.02	10.70	6.99	19.85	6.00	9.76	6.41	4.00	4.47
1	6.57	5.91	6.37	4.09	4.79	3.77	10.47	12.46	11.95	4.62	10.32	6.10	7.65	5.97	4.50	3.68
2	5.92	5.87	8.76	4.57	3.15	6.02	8.27	12.89	11.33	4.85	21.00	5.82	7.51	7.12	3.77	4.74
3	7.63	8.73	9.43	4.35	6.71	12.61	8.12	12.41	12.85	5.43	12.53	6.3	7.46	5.86	4.41	4.29
4	6.6	7.06	13.52	4.13	5.86	4.34	7.8	12.02	10.70	6.99	19.85	6.00	9.76	6.41	4.00	4.47
1	6.57	5.91	6.37	4.09	4.79	3.77	10.47	12.46	11.95	4.62	10.32	6.10	7.65	5.97	4.50	3.68
2	5.92	5.87	8.76	4.57	3.15	6.02	8.27	12.89	11.33	4.85	21.00	5.82	7.51	7.12	3.77	4.74
3	7.63	8.73	9.43	4.35	6.71	12.61	8.12	12.41	12.85	5.43	12.53	6.3	7.46	5.86	4.41	4.29
4	6.6	7.06	13.52	4.13	5.86	4.34	7.8	12.02	10.70	6.99	19.85	6.00	9.76	6.41	4.00	4.47
ASIGNACIÓN 1																
ASIGNACIÓN 2																
ASIGNACIÓN 3																
ASIGNACIÓN 4																

Tabla 4: Porcentaje de espera por falta de suministro considerando las cuatro asignaciones propuestas por los supervisores de la empresa

CLUSTER	CARRETIILLERO	CELULA ASIGNADA	PORCENTAJE DE ESPERA POR FALTA DE SUMINISTRO
1	1	C1	9.2
	1	C9	12.52
	1	C3	11.74
	1	C10	10.66
2	2	C2	6.68
	2	C4	4.71
	2	C6	6.86
	2	C17	3.1
	2	C12	12.44
3	3	C19	3.46
	3	C20	3.5
4	4	C5	6.57
	4	C11	7.08
	4	C7	7.79
	4	C13	4.23
	4	C15	7.46
PROMEDIO			7.38

Tabla 5: Asignación seis con cuatro clústeres definidos por agrupamiento jerárquico (ACJ)

Se puede observar que el mejor funcionamiento se obtuvo asignando carretilleros a los diferentes *clústeres* mediante el método Húngaro, por lo que se sugiere realizar la asignación mediante éste método. Al expresar la solución en términos de los resultados que le interesan a la empresa, significa que el carretillero 1, debe abastecer al clúster 1, compuesto por las células C20, C5, C3 y C12; el carretillero 2, debe abastecer el

ASIGNACIÓN	METODO	PORCENTAJE PROMEDIO DE PERDIDAS POR FALTA DE ABASTECIMIENTO
1	Sugerido por supervisor	7.895%
2	Sugerido por supervisor	7.28%
3	Sugerido por supervisor	7.96%
4	Sugerido por supervisor	7.46%
5	Húngaro	6.53%
6	ACJ	7.38%

Tabla 6: Promedio de esperas por falta de abastecimiento para cada clúster

clúster 2, integrado por las células C19, C2, C1 y C11; el carretillero 3, debe abastecer el clúster 3, formado por las células C4, C17, C15 y C7, finalmente, el carretillero 4 debe abastecer el clúster 4, integrado por las células C9, C6, C10 y C13.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una metodología para analizar diferentes alternativas de realizar suministro de materiales desde los almacenes hacia células de producción en empresas que operan bajo principios de *Lean Manufacturing* que permitió encontrar la mejor clusterización de células para suministro de materiales.

Los resultados de los seis escenarios propuestos permitió observar que la asignación de carretilleros a los diferentes clústeres mediante la heurística del método Húngaro, es la que nos proporciona esperas por falta de suministro en las células menores. La utilización de la simulación en proyectos de Lean Manufacturing ha permitido ahorrar grandes cantidades monetarias al permitirnos experimentar los diferentes escenarios en lugar de hacerlo directamente en el sistema real.

La metodología propuesta ha demostrado ser válida debido a que se sometió a diferentes pruebas sugeridas por Harrell y Sargent como son animación y validez con datos históricos, logrando con ello demostrar primeramente que el modelo de simulación se comporta fielmente como lo hace el sistema real. Posteriormente se realizó una validación inversa; las predicciones obtenidas con el modelo de simulación se aplicaron en el sistema real, logrando con ello validar que las predicciones del modelo de simulación, siguiendo la metodología propuesta, son confiables.

Con este trabajo se lograron definir clústeres mediante diferentes métodos con lo que se facilita el funcionamiento del sistema de suministro de materiales en una empresa que opera bajo los principios de la Lean Manufacturing. De otra manera sería sumamente complicado determinar la forma de entregar materiales en un sistema que cuenta con tres almacenes, cuatro carretilleros y 16 células. Para el caso estudiado, el número de combinaciones posibles, considerando la producción de 6 productos diferentes en una célula, 4 carretilleros y 3 almacenes se tendrían $64^6 = 68.719.476.736$ formas diferentes para entregar los materiales (son 64 las formas diferentes para entregar los materiales para la producción del primer lote). Al clusterizar se reduce el número de combinaciones posibles de suministro y se facilita el trabajo de programar la entrega de materiales. En este caso cada carretillero tendría que hacer solo 72 entregas de materiales (1 carretillero x 3 almacenes x 4 células x 6 tipos de producto).

Los resultados de este trabajo se complementan con las tendencias de la filosofía lean, en donde se pretende reducir desperdicios mediante la aplicación de una gran cantidad de herramientas entre las que destacan reducir el WIP, reducir el tiempo de cambio de producto y producir lotes pequeños de diferentes tipos que pertenecen a familias de productos. La metodología que se propone es clave para implementar el Lean Manufacturing con éxito, facilitando la aplicación de herramientas relacionadas con la categoría JIT. Los resultados de este trabajo están limitados a aquellas empresas que operan

bajo principios de Lean Manufacturing y que tienen en su sistema de producción almacenes, carretilleros para el transporte de materiales y células de producción encargadas de elaborar familias de productos. No tiene sentido implementarlo en empresas que no aplican Lean Manufacturing.

Considerando que antes de la implementación del sistema de suministro que se propone, las esperas por falta de suministro en la empresa llegaban a ser hasta de 8%, se tiene una mejora de 1,47% (para el caso donde se definen los clústeres de acuerdo a los resultados del método Húngaro). Este 1,47% de mejora permite a la empresa tener una mayor capacidad de producción. Si se multiplica 24 horas por 1,47% y el resultado se convierte a segundos disponibles para producción, se tienen 1.270,08 segundos. Si consideramos un tiempo ciclo promedio de las células de producción de 45 segundos, se pueden producir 28,22 transmisiones homocinéticas adicionales por día en cada célula, en promedio.

Como sugerencia para trabajo futuro, se puede resolver el mismo problema explorando la gran cantidad de combinaciones posibles para suministrar materias primas mediante metaheurísticas, como son búsqueda tabú y algoritmos genéticos, las cuales son capaces de explorar gran espacio combinatorio y arrojar soluciones de buena calidad en tiempo razonablemente corto [19].

AGRADECIMIENTOS

El presente estudio se desarrolló gracias al apoyo económico del CONACyT, a través de una beca No. 228973 para la manutención de mis estudios doctorales y al CIATEC, donde recibí cátedra en mi formación doctoral.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Abdulmalek FA y Rajgopal J. "Analyzing de benefist of Lean Manufacturing and value stream mapping via simulation: a process sector case study". *International Journal of production economics*. Septiembre 2006. Vol. 107. p.223-236. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.09.009>.
- [2] Shah R y Ward PT. "Lean Manufacturing: context, practice bundles and performance". *Journal of operations management*. Marzo 2003. Vol. 21 No. 2, p. 129-149. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0272-6963\(02\)00108-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0272-6963(02)00108-0).
- [3] Cusumano MA. "The limits of lean". *Solan Managgement Review*. 1994. Vol. 35, No. 4. p. 27-32.
- [4] Padilla L. "Lean Manufacturing". *Revista Electrónica Ingeniería Primero*. Enero 2010. No.15. p.64-69. ISSN: 2076-3166
- [5] Jiménez-García JA, Medina-Flores JM, Yáñez-Mendiola J y et al. "Diagnostico en el surtimiento de materiales en líneas de ensamble de flechas de velocidad constante Utilizando Promodel". En: *Actas del 1er Congreso Internacional de investigación e innovación 2012. Multidisciplinario*, (26 y 27 de abril de 2012). ISBN: 978-607-95635.
- [6] Ohlmann JW, Fray MJ, Thomas BW. "Route Design for Lean Production Systems". *Transportation Science*. Agosto 2008. Vol. 42. No.3. p.352-370. DOI: <http://dx.doi.org/10.1287/trsc.1070.0222>.
- [7] Jain AK, Murty MN, Flynn PJ. "Data clustering: a review", *ACM Computing Surveys*. Septiembre 1999. Vol. 31, No.3. p.264-323. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/331499.331504>.

- [8] Bhattacharyya DK. y Das A. "A new distributed algorithm for large data clustering". *IDEAL 2000. LNCS 1983*. p.29-34. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/3-540-44491-2_5.
- [9] Goldberger J, Tassa T. "A hierarchical clustering algorithm based on the Hungarian method". *Pattern recognition letters*. Abril 2008. Elsevier. p.1632-1638. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.patrec.2008.04.003>.
- [10] Kuhn HW. "The Hungarian method for the assignment problem". *ONR Logistics Project*. 1955. p.83-97. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-68279-0_2.
- [11] Medina-Acosta GA, Delgado-Penin JA. "On the feasibility of a channel-dependent scheduling for the SC-FDMA in 3GPP-LTE (mobile environment) based on a prioritized bifacet Hungarian method". *EURASIP journal on Wireless Communications and Networking*. Septiembre 2011. p.1-8. DOI: <http://dx.doi.org/10.1186/1687-1499-2011-71>.
- [12] Burkard RE. "A general Hungarian method for the algebraic transportation problem". *Discrete mathematics*. Septiembre 1977. p.219-232. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0012-365X\(78\)90055-9](http://dx.doi.org/10.1016/0012-365X(78)90055-9).
- [13] Villanueva-Castrillón J. "Simulación de procesos clave en la toma de decisiones". *DYNA Ingeniería e Industria*. Mayo 2008. Vol.83. No. 4. p.221-227.
- [14] Grimard C, Marvel JH. "Validation of the re-design of a manufacturing Work cell using simulation". *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*. p.1836-1391. ISBN:0-7803-9519-0
- [15] Standridge CR, Marvel JH. "Why lean needs simulation". *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*. p.1907-1913. ISBN: 1-4244-0501-7
- [16] Harrell C, Gosh BK y Bowden R. *Simulación Using Promodel 3a ed.* United States of America: Mc Graw Hill Hihger Education, 2000. 603p. ISBN: 0-07-234144-0.
- [17] Sargent RG. "Verification and validation of simulation models". *Proceedings of the 30th conference on Winter simulation*. Department of Electrical Engineering and Computer Science. 1998. p.121-130. ISBN: 0-7803-5134-7.
- [18] Castro-Lopez JD. "Metodología basada en herramientas de manufactura esbelta para mejorar el desempeño de la cadena de suministro". Director: Jiménez-García JA. Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Celaya, Departamento de Ingeniería Industrial, Septiembre 2012.
- [19] Dero J, Siarry P, Michalewicz Z y et al., *Metaheuristics for Hard Optimization*, Springer, 2008. 372p. ISBN: 978-3-540-30966-6.

Control del proceso de ciclos alternados para la eliminación eficiente de contaminantes en una edar



ALTERNATED CYCLES PROCESS CONTROL FOR EFFICIENT POLLUTANT REMOVAL IN A WWTP

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5823> | Recibido: 29/04/2013 • Aceptado: 11/10/2013

Pedro Tomás Martín de la Vega-Manzano, Miguel Ángel Jaramillo-Morán, Enrique Martínez de Salazar-Martínez

UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA. Escuela de Ingenierías Industriales. Avda. de Elvas, s/n- 06006 Badajoz.
Tfno.: +34 924 289600. pedromm@unex.es

ABSTRACT

• In this work a rule-based control strategy is proposed in order to update the management of a Wastewater Treatment Plant by means of the alternating aeration/non-aeration process with the aim of improving the removal rate of the pollutant nitrogen and phosphorous the plant receives along with a decrease in the electric energy consumption. This process is to be carried out without jeopardizing the success in removing the organic matter and suspended solids the current regulations impose about water quality driven into surface streams. The control system has been tested in an actual plant and an efficiency of 85 % in nitrogen removal was obtained as against 35 % previously reached. For phosphorous the removal efficiency raised from 13% to 55%. An electric energy saving of 31% was also reached. On the other hand the organic matter removing rate showed a little increase from 90% to 92%. A reduction in sludge generation along with an improvement in the stability of microorganisms processing pollutants have been also reported, two facts that improve working and maintenance processes.

• Keywords: Wastewater Treatment Plant, Control, Alternating Cycles.

RESUMEN

En el presente trabajo se propone una estrategia de control basada en reglas para actualizar la gestión de una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) mediante el proceso de alternancia de ciclos de aireación/no aireación con el objetivo de mejorar el rendimiento en la eliminación de la carga contaminante de nitrógeno y fósforo que la planta recibe, así como obtener una reducción de su consumo energético. Todo ello sin comprometer la eficiencia en la eliminación de materia orgánica y sólidos en suspensión que exige la normativa vigente de calidad del agua vertida a los cauces receptores. El proceso ha sido probado en una planta real obteniéndose una eficiencia en la eliminación del nitrógeno del 85% frente al 35% original y del 55 % frente al 13 % para el fósforo. Se consiguió también un ahorro del consumo eléctrico del 31%. La eficiencia en la eliminación de la materia orgánica pasó del 90% original al 92%. Se ha verificado la reducción de la producción de fangos y la mejora en la estabilidad de los microorganismos encargados del proceso de reducción de contaminación, con las consecuencias positivas sobre los procesos de operación y mantenimiento.

Palabras clave: Estación Depuradora de Aguas Residuales, EDAR, Control, Ciclos Alternados.

1. INTRODUCCIÓN

Las sociedades desarrolladas se han acostumbrado a disponer de agua potable de forma barata e ilimitada, por lo que enormes cantidades son consumidas a diario. Ello da lugar a la generación paralela de unas cantidades análogas de aguas residuales que suelen ser vertidas a los cauces de agua próximos. El grave problema de contaminación que se genera es obvio: las aguas residuales contaminan las fuentes de las que se extraen las potables. En consecuencia, para poder seguir disponiendo de este recurso en las cantidades demandadas por la sociedad, empieza a ser fundamental el tratamiento de las aguas residuales producidas por la actividad humana. El problema es de tal magnitud que la disponibilidad futura de agua para el consumo humano puede verse comprometida si no se adoptan medidas para que las aguas vertidas a los cauces sean lo menos contaminantes posible. Para ello los gobiernos han empezado a emitir directivas cada vez más restrictivas sobre cargas contaminantes permisibles en los vertidos de aguas residuales, imponiendo la necesidad de construir plantas para su tratamiento antes de ser vertidas a los cauces naturales, con el objetivo de eliminar la mayor parte de la carga contaminante que llevan.

En esta línea, la Directiva Europea 91/271/CE ya exigía la implantación de depuradoras en aglomeraciones urbanas de más de 10.000 habitantes-equivalentes (definiendo a la par el concepto de habitante-equivalente como la necesidad de consumir 60 gr de O_2 por día en los procesos depurativos) antes de enero de 2001, y antes de enero de 2006 a las de más de 2.000 habitantes-equivalentes. Dicha directiva es trasladada al marco legal español mediante el RD 509/1996, en el que se fijan, entre otros, los requisitos de calidad que deben cumplir los vertidos procedentes de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDARs), identificándose contaminantes orgánicos, medidos en forma de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) o Demanda Química de Oxígeno (DQO), contaminantes particulados, medidos en forma de Sólidos en Suspensión Totales (SST), y, finalmente, nutrientes, en este caso nitrógeno y fósforo. Se definen, así mismo, Zonas Sensibles, esto es, regiones con límites muy restrictivos en la contaminación.

Posteriormente, en la Resolución del 10 de julio de 2006 de la Secretaria General para el Territorio y la Biodiversidad se amplía la declaración de las Zonas Sensibles en las Cuencas Hidrográficas Intercomunitarias (CHI), modificando el mapa depurativo español al incrementar significativamente el número de EDARs afectadas. Como consecuencia, prácticamente la totalidad de las poblaciones españolas superiores a 10.000 habitantes-equivalentes pasan a ser consideradas como Zonas Sensibles.

La aplicación de estas normas tiene una repercusión especialmente importante en la Comunidad Autónoma de Extremadura, puesto que las dos cuencas hidrográficas que la atraviesan, la del Guadiana y la del Tago, son CHI, por lo que el número de EDARs afectadas representa un porcentaje bastante alto del total. Además, la peculiar distribución de la población, caracteriza por la existencia de un gran número de pequeñas poblaciones muy separadas entre sí, hace que se genere un gran volumen de contaminación difusa incontrolada.

Como es lógico, la construcción de nuevas plantas depuradoras se hará teniendo en cuenta las exigencias técnicas impuestas en la normativa actual, mientras que las plantas ya construidas deberán modificar su funcionamiento para adaptar sus capacidades depurativas a esas normativas.

La mayor parte de las plantas existentes en la región son

del tipo de Aireación Prolongada, con reactores biológicos aireados por soplantes (especialmente en instalaciones medianas y pequeñas) que funcionan según una programación de tiempos *on/off*, siendo habitual que la dosificación de oxígeno sea insuficiente ante picos de carga orgánica, lo que provoca una deficiente eliminación de materia orgánica, y excesiva ante cargas diluidas, lo que provoca un desperdicio de energía [1]. Habitualmente, este proceso trabaja en las fases de respiración endógena de la curva de crecimiento, es decir, baja carga con un tiempo de aireación prolongado, lo que implica una alta disponibilidad volumétrica [2]. Es por ello que los problemas de sobreaireación aparecen habitualmente en este tipo de EDARs, provocando que las descargas de nitrógeno (fundamentalmente en la forma de nitratos) y los consumos energéticos sean realmente altos. Teniendo en cuenta que el mayor porcentaje de consumo energético en estas plantas se lo llevan los procesos de aireación, variando entre un 50% y un 90% del consumo total, la actualización del control de la aireación para garantizar una eliminación eficiente de los contaminantes podría llevar aparejada una disminución de los costes de explotación de la planta, lo que representaría un valor añadido al proceso nada desdeñable.

Por todo ello se decidió abordar la actualización de una EDAR que fuese representativa del conjunto de las de mediano tamaño, instaladas en Extremadura desarrollando un sistema de control de los ciclos de aireación/no aireación que permitiese una gestión eficiente del proceso. Se partió de la premisa de desarrollar un sistema de fácil y rápida implantación, robusto y con accesibilidad remota, el cual, basado en la gestión de la eliminación de la materia orgánica a través de los procesos de oxidación-reducción que tienen lugar en la masa líquida, permitiera una correcta eliminación de contaminantes junto con el ahorro energético que suponen las paradas de las soplantes. El control planteado, basado en la gestión de la materia orgánica en la propia cuba de aireación, aseguró, además, la estabilidad de la biota, evitando los fenómenos de desequilibrio en el proceso de decantación. A este hecho se unió una reducción apreciable de la producción de fangos, con el consecuente ahorro energético y ventajas para los procesos de operación y mantenimiento.

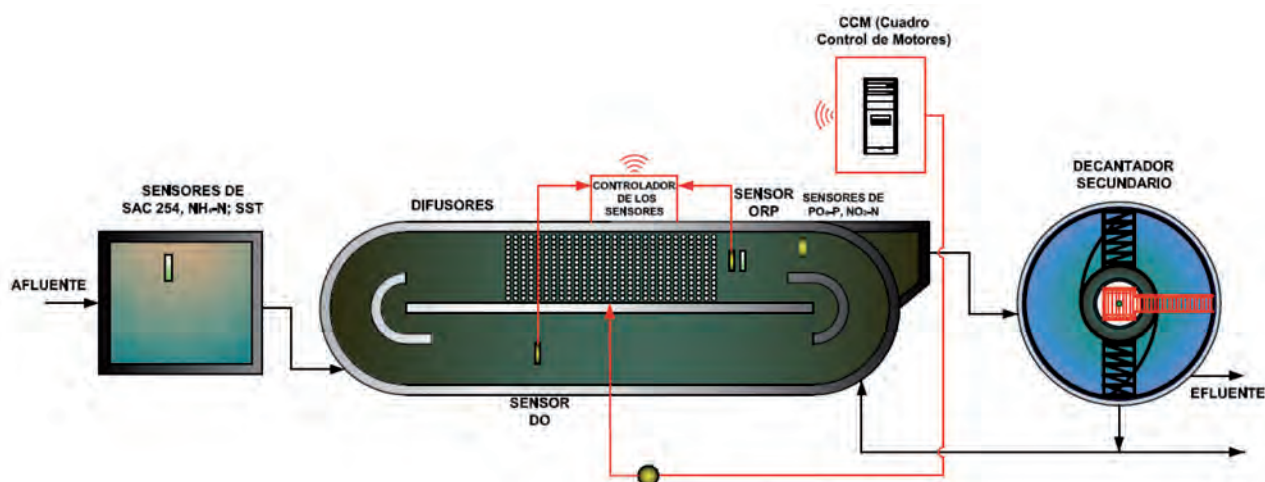


Fig. 1: Esquema de uno de los dos reactores utilizados en la planta real con indicación de la localización de los sensores empleados

2. MATERIALES Y METODOS

2.1. EL PROCESO DE AIREACIÓN PROLONGADA EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LODOS ACTIVOS

2.1.1. Eliminación de materia orgánica

El funcionamiento de una EDAR se basa en un tratamiento biológico de las aguas residuales en el que, en una vasija, se agita y airea una mezcla de ese agua con un fango formado por microorganismos, los cuales utilizan la materia orgánica aportada como alimento. A continuación, en otro recipiente, el fango decanta recogiendo en los niveles inferiores. Una parte es purgada del sistema y otra es devuelta al reactor biológico. El proceso de Aireación Prolongada representa una de las posibles opciones de funcionamiento de estas instalaciones. Se basa en el mantenimiento de una relación de materia orgánica/microorganismos baja con un tiempo de contacto entre ambos alto. De esta forma se fomenta la respiración endógena, entendida como un proceso de lisis microbiana para mantener la biomasa activa.

En cuanto a la configuración hidráulica del reactor biológico, suele emplearse el denominado esquema de dique de oxidación (Fig. 1) donde el tanque de aireación tiene una estructura de canales, operando con velocidades de flujo altas generadas por aceleradores de corriente. Se consigue de esta forma asegurar un nivel de homogeneidad en la mezcla de agua contaminada y microorganismos alta.

A pesar de poseer un buen rendimiento en la reducción de contaminación, acompañado de la generación de un fango en exceso con alto porcentaje mineral, presenta un alto consumo eléctrico por aireación y una alta disponibilidad de volumen. Es por ello, y también por ser uno de los procesos con mayor nivel de implantación a nivel nacional, por lo que se va tratar de optimizar su control mediante la inclusión de un proceso de alternancia de ciclos de aireación/no aireación.

2.1.2. Eliminación de nitrógeno mediante el proceso de alternancia de ciclos

Aunque la adecuada aireación del proceso de metabolismo bacteriano permite eliminar una gran parte de la materia orgánica contaminante, la eliminación de nitrógeno no está garantizada. Solo hace unos pocos años se ha empezado a estudiar su tratamiento impulsado por las normativas medioambientales que imponen su eliminación. Este proceso pasa por la generación de las condiciones necesarias para fomentar un tipo de bacteria que oxide el amonio afluente a nitrato, de forma que, mediante un ciclo de no-aireación adecuado en el que se alcance un régimen de ausencia de oxígeno, se propicie la desnitrificación mediante la reducción del nitrato a nitrógeno gaseoso, que será liberado a la atmósfera. De esta forma, aprovechando que todo el proceso puede llevarse a cabo en un mismo reactor, se implementará un sistema de control de ciclos alternos de aireación y no aireación para garantizar la eliminación tanto de la materia orgánica como del nitrógeno. Durante los ciclos aireados la materia orgánica es eliminada mediante digestión bacteriana aerobia a la par que se fuerza una oxidación del nitrógeno presente en forma de amonio a la forma de nitrato. En el ciclo de no aireación siguiente los nitratos

generados son transformados en nitrógeno gas, requiriéndose, en este caso, una cierta cantidad de materia carbónica residual para que no haya inhibición de este último proceso. La utilización de estos ciclos alternos de aireación/no aireación ya ha sido estudiada, proporcionando buenas tasas de eliminación del nitrógeno presente en las aguas residuales [3-6]. La clave para la obtención de buenos rendimientos energéticos y depurativos está en la cuantificación de la materia orgánica que el ciclo de aireación no oxida, siendo esta empleada para fomentar la reducción de nitratos en el subsiguiente ciclo de no aireación.

2.1.3. Eliminación de fósforo mediante el proceso de alternancia de ciclos

En las plantas de tratamiento de fangos activos convencionales la eliminación de fósforo está ligada al crecimiento bacteriano, ya que es utilizado por estos microorganismos en sus procesos de crecimiento celular. Por este medio se consume entre el 10 y el 30 % de la carga de fósforo que recibe la planta [2], siendo necesario en muchos casos recurrir a procesos de precipitación química para la eliminación de este nutriente de las aguas, por norma general basados en la adición de cloruro férrico, con el consiguiente incremento de los costes de gestión que esto supone. Con el fin de aumentar su tasa de eliminación se ha desarrollado el proceso conocido como *Eliminación Biológica de Fósforo Potenciada* (EBPR, *Enhanced Biological Phosphorous Removal*), con el cual se persigue un aumento del porcentaje de eliminación de esta sustancia mediante el enriquecimiento del fango en exceso con organismos acumuladores de fosfatos (PAO, *Polyphosphate Accumulating Organisms*), evitando así el tratamiento químico. Estas bacterias tienen la peculiaridad de acumular fósforo, en la forma de polifosfatos, más allá de sus necesidades metabólicas durante la fase aerobia. Su aparición se fomenta mediante el proceso de alternancia de ciclos de aireación/no aireación, siempre que en los ciclos de no aireación se consiga alcanzar un estado de ausencia de oxígeno y nitratos, esto es, alcanzar regímenes anaerobios [7]. Necesitan, además, la presencia de ácidos grasos de cadena corta, que suelen encontrarse presentes en las aguas residuales urbanas en una proporción del 5-8 %, [8]. Así, en la fase anaerobia, en la que debe haber disponible suficiente materia orgánica carbonosa, los PAOs metabolizan es-

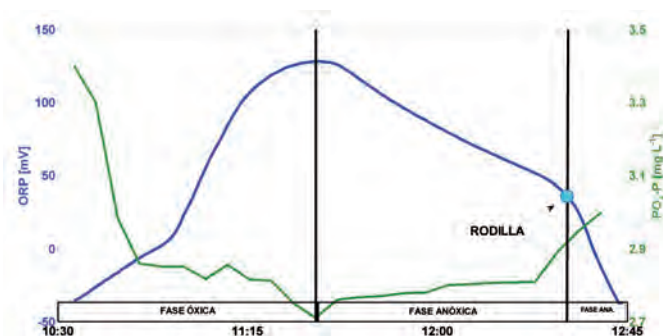


Fig. 2: Evolución de la concentración del fósforo en la vasija del reactor durante una alternancia de ciclos. La transición entre la fase anóxica (soplantes apagadas) y anaerobia (ausencia de oxígeno y nitratos) viene marcada por una brusca caída en la curva de ORP (rodilla)

tos compuestos de carbono liberando una parte de los polifosfatos, que se acumulan en el medio que les rodea en forma de ortofosfatos [9]. En la siguiente fase aerobia el proceso se invierte, al asimilar los PAOs el exceso de fosfatos presentes en el reactor con el objetivo de poder ser utilizado en la siguiente fase anaerobia. El proceso puede verse claramente en la Fig. 2. Si en la etapa aerobia se elimina del reactor parte del fango, se eliminará también el fósforo que acumula la población bacteriana. La regeneración de la población bacteriana así forzada facilita aún más la eliminación del fósforo al consumirlo para su crecimiento.

2.2. PLANTA REAL

La planta en la que se ha aplicado el control desarrollado es la de la localidad de Oliva de Fronteras, situada al suroeste de la provincia de Badajoz. Su principal actividad económica es la industria agroalimentaria, por lo que se puede afirmar que las aguas residuales a tratar serán principalmente de carácter urbano.

Esta planta comparte el mismo sistema de tratamiento que el 70% de las de la provincia de Badajoz: el de Aireación Prolongada. Cuenta con dos reactores con estructura de dique de oxidación (Fig. 1). Fue diseñada para 12.000 habitantes-equivalentes. Cada reactor cuenta con dos turbocompresores, cada uno de ellos con dos velocidades de funcionamiento: una con una potencia de 31 kW y otra con una potencia de 41,2 kW. El control de la planta estaba diseñado para utilizar únicamente la potencia más baja de cada turbocompresor, lo que hacía que la potencia consumida durante un ciclo de aireación fuera de 62 kW.

El control de la aireación lo realizaba un sistema SCADA a partir de la medida proporcionada por una

sonda de oxígeno, desconectándola cuando se medía un valor superior a los 2 mg/l y conectándola cuando éste llegaba a cero.

La gestión de la aireación ha sido actualizada mediante la inclusión de un nuevo controlador que actúa directamente

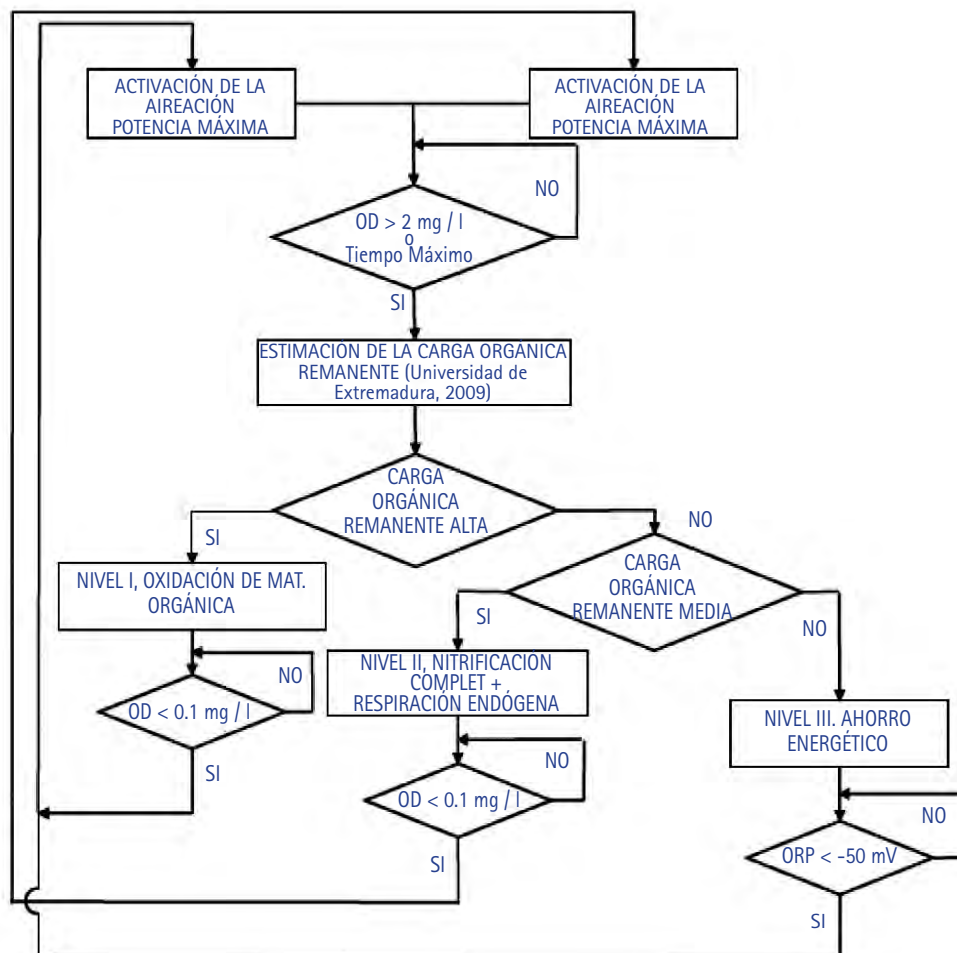


Fig. 3: Diagrama de flujo del proceso de control de los ciclos de aireación y no aireación

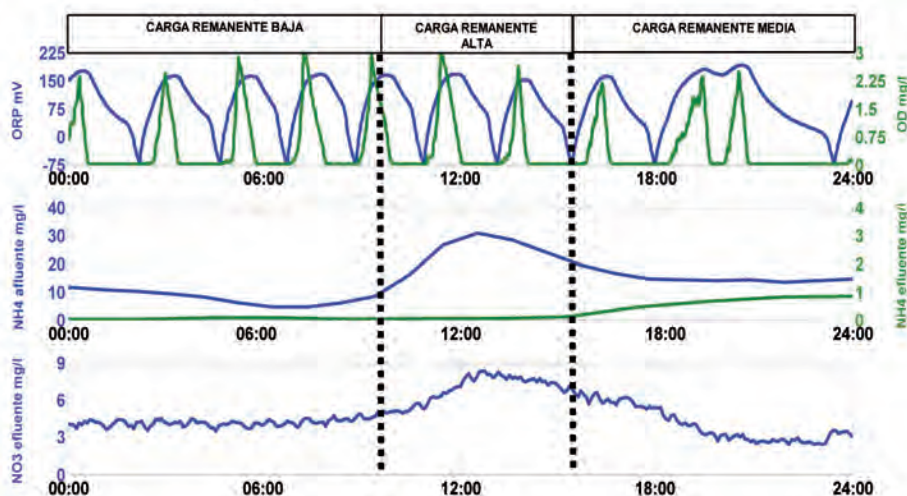


Fig. 4: Perfil diario de las señales utilizadas para el control del proceso, OD y ORP, y de las empleadas

sobre el cuadro de control y mando (CCM) de las soplantes en base a la interpretación de las señales de dos sensores: uno de oxígeno disuelto (OD) y otro de *Potencial de Oxidación-*

de las soplantes a la máxima potencia, generando, por tanto, una fase de aireación. Su objetivo es proporcionar un aumento del nivel de oxígeno disuelto. Las soplantes permanecerán co-

La implantación del sistema es sencilla, por lo que los costes de implantación son realmente bajos



Reducción (ORP, del inglés Oxidation Reduction Potential). Estas señales se transmiten mediante una red inalámbrica desde el controlador de dichos sensores al CCM, en el que un módem GPRS realiza la conexión remota y la gestión tanto de los parámetros de control como de los datos acumulados.

2.3. SENSORIZACIÓN DE LA PLANTA REAL

Son numerosos los autores que han utilizado las mediciones de OD, ORP o pH como variables para controlar los procesos de alternancia de ciclos aireación/no aireación [3, 4, 10, 11]. Es por ello que se han seleccionado dichos parámetros para realizar el control del proceso. El pH ha sido descartado, ya que su valor varía poco debido a la gran dilución empleada en el reactor. Ello supone que, para realizar el control de la planta, únicamente se necesita añadir una sonda de ORP cuyo coste no es muy alto.

2.4. CONTROL INTELIGENTE DEL PROCESO DE AIREACIÓN

El control del proceso de aireación busca el ajuste de la duración de los ciclos de encendido y apagado de las soplantes con el objetivo de cumplir tres premisas de eficiencia: eliminación de materia orgánica, eliminación de nitrógeno (y en paralelo también de fósforo) y ahorro energético. Las dos primeras persiguen el cumplimiento de la normativa vigente sobre vertidos y constituyen el objetivo básico de todo el proceso de actualización de la planta. La tercera, al no estar ligada al cumplimiento de esa normativa, se podría considerar como un objetivo secundario del control. Sin embargo, la obtención de un ahorro en los costes de explotación, facilitado por la reducción del consumo eléctrico, puede hacer que el control propuesto sea más atractivo para las empresas encargadas de la explotación de las instalaciones, representando un valor añadido al proceso de actualización de las EDAR existentes.

Para determinar la duración de los ciclos de encendido y apagado se ha diseñado un control inteligente basado en reglas que ajusta el nivel de potencia de los aireadores. Se ha optado por un control inteligente para poder hacer uso de la información recopilada sobre la dinámica de la planta y convertirla en una serie de supuestos y reglas que, como se verá a continuación, pueden ser programados de forma sencilla.

El proceso de control (Fig. 3) se inicia con el encendido

de las soplantes a la máxima potencia, generando, por tanto, una fase de aireación. Su objetivo es proporcionar un aumento del nivel de oxígeno disuelto. Las soplantes permanecerán co-

nectadas mientras no se supere una referencia preestablecida de oxígeno, cuyo valor se ha prefijado en 2 mg/l. Aunque este valor ha sido obtenido a partir de la bibliografía [12, 13], las numerosas pruebas realizadas han demostrado que esta referencia de oxígeno es apropiada para obtener una transformación eficiente de amonio en nitrato, así como para permitir que una fracción de la materia carbónica se acumule en el reactor.

Una vez paradas las soplantes se inicia un ciclo de no aireación, momento en el que se estima la materia orgánica remanente según una técnica patentada por los autores [14]. A partir de esta estimación se optará por una de tres posibles acciones de control, cada una asociada a una premisa de eficiencia:

- **CARGA ALTA** (Fig. 4). El controlador dará prioridad a la eliminación de materia orgánica con el objetivo de asegurar la oxidación de la misma, aun a costa de propiciar un aumento de la generación de nitratos causada por una excesiva nitrificación. Para ello se conectan las soplantes a la máxima potencia cuando el valor de OD caiga por debajo de 0.1 mg/l, iniciándose un nuevo ciclo de aireación.
- **CARGA MEDIA** (Fig. 4). El controlador dará prioridad a la eliminación de nitrógeno, aprovechando la materia orgánica remanente para propiciar la reducción de los nitratos que genera el proceso de CARGA ALTA. Como se aprecia en la Fig. 4, los nitratos experimentan un descenso. El proceso de aireación se reinicia cuando el valor de OD cae por debajo de 0.1 mg/l, conectando las soplantes a una potencia intermedia.
- **CARGA BAJA** (Fig. 4). El controlador dará prioridad al ahorro energético, manteniendo las soplantes apagadas hasta que el valor de ORP caiga por debajo de un umbral predeterminado, que puede ser ajustado en función del compromiso entre ahorro energético y eficiencia depuradora que se desee conseguir. Cuando este umbral se sobrepasa se asegura una correcta remoción del nitrógeno sin comprometer la calidad del efluente desde el punto de vista de la materia orgánica, ya que esta fase conlleva el uso de materia orgánica como elemento donador de electrones. Una vez se sobrepasa el umbral antes indicado se vuelve a iniciar un ciclo de aireación conectando las soplantes a media potencia. En este caso se ha fijado

un umbral de -50 mV, suficiente para asegurar que el sistema biológico pasa por una fase de ausencia de oxígeno y un muy bajo nivel de nitratos, lo cual propicia las condiciones de anaerobiosis que facilitan la eliminación biológica del fósforo (Fig. 2).

El control inteligente programado dispone también de ciertas restricciones, incluidas como control de emergencias, que eviten que se produzcan ciclos de aireación o no aireación excesivamente largos por causa de circunstancias anómalas o mediciones erróneas de las sondas:

- Cuando el reactor recibe una carga orgánica por encima de sus posibilidades de tratamiento, los sistemas de aireación no poseen capacidad suficiente para elevar la concentración de OD (debido al gran consumo de oxígeno que una alta carga orgánica provoca), por lo que el umbral de 2 mg/l establecido para desconectar la aireación no se alcanzará y el controlador mantendrá la aireación constantemente encendida, lo que evitaría que se pase a la fase de no aireación en la que los nitratos son reducidos a nitrógeno gaseoso. Esta circunstancia haría que el nitrógeno se acumule en el reactor y no se elimine, incumpliendo la normativa sobre vertidos. Para evitarlo se ha impuesto un tiempo máximo de aireación de 150 minutos. De esta forma, la introducción de un ciclo intermedio de no aireación, favorece en cierta medida, la eliminación de un porcentaje de nitrógeno, manteniendo un límite de vertido aceptable.
- Cuando la relación materia orgánica remanente/nitratos es baja, el controlador prolongará la fase de no aireación hasta alcanzar el límite de -50 mV, de forma que, con el objetivo de evitar una acumulación excesiva de amonio por falta de oxidación, se ha establecido la restricción de imponer una duración máxima de 180 minutos para el ciclo de desnitrificación.

3. RESULTADOS

3.1. RENDIMIENTO DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA

La evaluación del rendimiento en la eliminación de la materia orgánica se ha realizado a partir del rendimiento de la reducción de la DQO. De esta forma, y a partir de los datos analíticos de un año de trabajo, se concluye que se ha experimentado un ligero incremento en el rendimiento, alcanzándose el 92%, cuando el valor obtenido antes de la actualización era algo superior al 90%. El control propuesto ha permitido gestionar la eliminación de la materia orgánica de forma eficiente, manteniendo las prestaciones ya alcanzadas, pero realizando también un tratamiento adecuado del nitrógeno y del fósforo que facilita su eliminación. La inclusión de ciclos de no aireación no ha afectado al rendimiento en la eliminación de materia orgánica ya que ha sido eficientemente tratada mediante su oxidación cuando su eliminación era prioritaria. En los ciclos de no-aireación la materia orgánica remanente puede ser también eliminada al donar sus electrones en el proceso de reducción de nitrato a nitrógeno gaseoso.

3.2. RENDIMIENTO DE REMOCIÓN DE MATERIAL NITROGENADO

Previamente a la actualización de la EDAR el sistema estaba sometido a un proceso de sobreaireación, en el cual los nitratos se acumulaban en el reactor biológico al no poderse transformar a nitrógeno gaseoso, incumpliendo los límites legales de vertido. Tras la actualización, los niveles de nitrógeno en la salida de la planta se redujeron de forma significativa, incrementándose el rendimiento de remoción de un 35 % a un 85 %. Una comparativa del rendimiento antes y después de la actualización se muestra en la Fig. 5, donde pueden verse los niveles medios de amonio y nitratos en el efluente medidos por quincenas durante todo un año. Como puede apreciarse claramente, la caída en la concentración tanto de amonio como de nitratos es drástica tras la implantación de la actualización del control por ciclos alternados.

3.3. RENDIMIENTO DE REMOCIÓN DE FÓSFORO

La reducción del fósforo en un proceso de ciclos alternados requiere que se alcancen niveles de anaerobiosis, esto es,

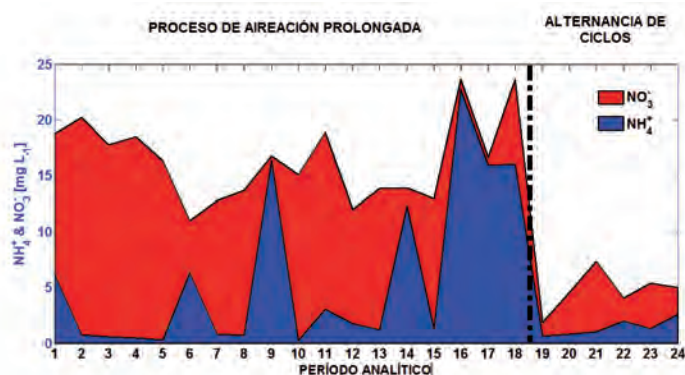


Fig. 5: Niveles de amonio y nitratos en el efluente de la planta medidos como medias quincenales a lo largo del año de prueba (el nitrato se ha añadido al amonio, de forma que la línea superior de la gráfica muestra el nitrógeno total). La línea discontinua marca el momento de actualización de la planta

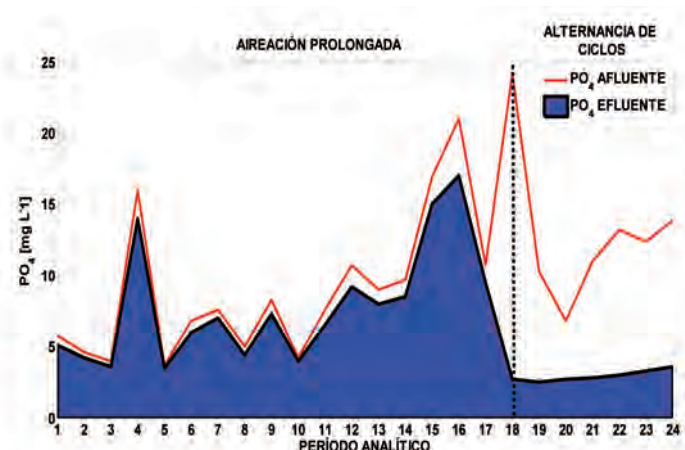


Figura 6: Niveles de fósforo a la entrada y a la salida del proceso. El área marcada en azul marca el fósforo a la salida, mientras que la línea roja marca el fósforo a la entrada

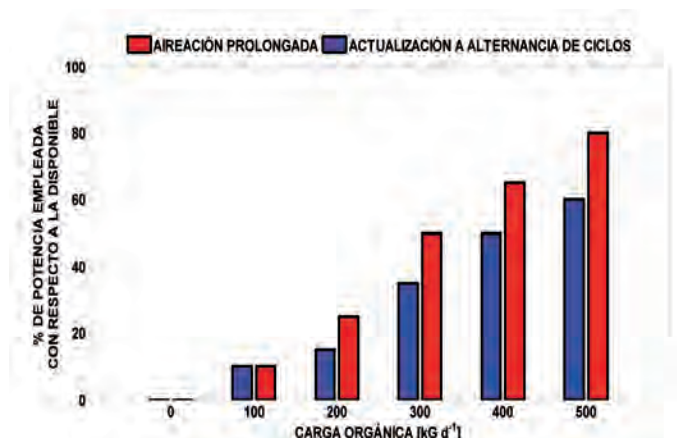


Fig. 7: Comparación de las potencias de aireación aplicadas antes y después de la actualización de la planta frente a la carga orgánica recibida por la planta

ausencia de oxígeno y de nitratos, para que su ciclo metabólico se realice de la forma anteriormente comentada (Fig. 2). Por ello su ejecución estará supeditada a que el proceso de reducción de nitratos en los ciclos de no-aireación se complete. Estas circunstancias se alcanzan cuando se está ante una carga remanente baja que activa un ciclo de ahorro energético. La remoción del fósforo se obtiene, como ya se ha comentado anteriormente, por la eliminación durante la fase aeróbica de parte del biolodo, del que forman parte las bacterias metabolizadoras del fósforo. Gracias a la alternancia de ciclos se ha pasado de un rendimiento medio en la eliminación del fósforo del 13 % antes de la implantación de la actualización propuesta a un 55 % después de ella, como muestra la Fig. 6, en la que se observa un descenso notable del fósforo en la salida y, por tanto, un incremento del rendimiento de remoción.

3.4. REDUCCIÓN DE CONSUMO ELÉCTRICO

A la hora de establecer resultados de consumo eléctrico es preciso destacar que la gestión previa de la aireación de la EDAR se basaba en el encendido y apagado de turbosoplantes en base a consignas de oxígeno, con unos tiempos de aireación de 12-14 horas al día. De esta forma se establecía un consumo medio por habitante equivalente de $0.067 \text{ kWh dia}^{-1}\text{h-e}^{-1}$. El ahorro energético obtenido fue de un 31%. Evaluando dicho ahorro energético con respecto al nivel de carga entrante a la planta se pudo comprobar cómo éste aumentaba conforme aumentaba la carga orgánica que la planta recibía, tal y como puede comprobarse en la Fig. 7, un hecho que avala las buenas prestaciones del sistema de control propuesto.

3.5. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA EDAR

Como se ha indicado anteriormente, la aireación representa entre el 50 y el 90 % del consumo de una EDAR. Del resto destacan la energía necesaria para el bombeo de biolodos y la que se consume en el proceso de espesado, estabilización y deshidratación de los que se eliminan. En la EDAR estudiada en este trabajo, al igual que en la totalidad de las de poblaciones comprendidas entre los 2.000 y los 150.000 habitantes, el

fango en exceso se almacena en espesadores, con el objeto de incrementar su concentración y estabilizarlo, para pasar a continuación por un proceso de reducción de su contenido en agua (centrifugación en la planta estudiada) antes de ser retirado en camiones para su gestión posterior. Gracias al sistema de control implementado se ha obtenido una menor producción de fangos, cuantificada por una reducción del número de horas de centrifugado y de las toneladas de residuo seco obtenido tras dicho proceso. Se verificó una reducción del 15% en las horas de centrifuga, manteniéndose el rendimiento de reducción del contenido en agua, proporcionando una reducción final del residuo almacenado del 13 %. Esta mejora en la gestión del biolodo residual se obtuvo gracias al empleo de la materia orgánica en los ciclos de anoxia en la forma descrita anteriormente, optimizándose el proceso de gestión de fangos en la EDAR, consiguiendo una reducción del consumo energético en bombeo de fango recirculado del decantador al reactor de un 10% y de bombeo de purga al espesador de un 15 %.

En lo que respecta a las operaciones de mantenimiento, dos de los problemas más frecuentes que suelen ocupar gran parte de estas operaciones y que comparten las plantas análogas a la descrita en este trabajo son los conocidos como “foaming” y “desnitrificación incontrolada”.

El primero consiste en la formación de una capa de espumas en la superficie del reactor debido a que, en los momentos de CARGA BAJA, el exceso de aireación permite que bacterias filamentosas crezcan en exceso frente a las bacterias formadoras de flóculo. Esas bacterias confieren un carácter hidrófobo al flóculo, de forma que la agitación y la aireación tienden a hacer flotar una notable masa de fango activo, generando una capa de espumas en la superficie que dificulta la operación y mantenimiento de este tipo de instalaciones. Este fenómeno ha sido reducido de forma drástica con el control propuesto, ya que la inclusión de ciclos anóxicos favorece a las bacterias formadoras de flóculo frente a las filamentosas, a lo que hay que unir el hecho de que la gestión de la materia orgánica realizada controla los fenómenos de competencia, evolucionando el sistema hacia la estabilidad bacteriana, reduciendo al máximo los riesgos de “foaming”.

El segundo problema se asocia a la falta de ciclos de anoxia, lo que permite que los nitratos se almacenen en el sistema, concretamente en los decantadores, en los que el manto de fangos tiende a consumir el oxígeno. Se produce así una reducción de dichos nitratos, que se transforman en nitrógeno gaseoso, el cual, en su ascenso hacia la superficie del decantador, arrastra capas de fango, comprometiendo la salida de la instalación. Este problema se acentúa en los climas cálidos, puesto que la temperatura acelera la producción de nitratos. El sistema de control propuesto evita este grave problema al incluir ciclos de anoxia controlados por la materia orgánica remanente que evitan esa formación de nitrógeno gaseoso.

El control de la alternancia de ciclos propuesto no sólo evitó los fenómenos antes mencionado sino mejoró la calidad del fango, como puede comprobarse mediante observaciones al microscopio. Tanto la microestructura de fango, asociada a la comunidad de protistas y a las características físicas del flóculo, como la macroestructura del flóculo, asociada a la mejora de la sedimentabilidad, mejoraron en 25 puntos según el índice propuesto por [15], de forma que se minimizan muchas

de las operaciones de mantenimiento llevadas a cabo, permitiendo trabajar al sistema con un nivel de microorganismos constantes.

4. DISCUSIÓN

La gestión de las EDARs suele ser llevada a cabo por empresas privadas contratadas por la administración pública mediante concurso. Es por ello que la obtención de un ahorro energético en su gestión sin comprometer la eficiencia depuradora de la planta representa un objetivo muy atractivo, ya que permite aumentar los beneficios de la empresa. En esta línea, la presente investigación plantea una estrategia de actualización del control del proceso de aireación basada en la alternancia de ciclos de aireación y no aireación que permite modificar el control del proceso disminuyendo el tiempo de conexión de las soplantes, obteniéndose una mejora en la eliminación de contaminantes (materia orgánica, nitrógeno y fósforo), consiguiéndose, además, una reducción de la producción de fango en exceso, con el consecuente ahorro en los procesos de operación y mantenimiento de la estación depuradora. La implantación del sistema es sencilla, por lo que los costes de implantación son realmente bajos, lo que permite su amortización en un corto período de tiempo. Utiliza los valores proporcionados por una sonda de OD y otra de ORP. Aplicado a una planta real ha proporcionado un incremento notable en las tasas de eliminación de nitrógeno y fósforo, así como una disminución muy importante en el consumo de energía eléctrica, todo ello manteniendo (en realidad superando levemente) las tasas de eliminación de la materia orgánica.

Es preciso resaltar que la actualización que se plantea se ha realizado sobre un proceso de aireación prolongada en dique de oxidación, puesto que se trata de la configuración más extendida en el territorio nacional, si bien, este tipo de proceso de alternancia de ciclos puede ser aplicado sobre configuraciones más clásicas, como puede ser un reactor de mezcla perfecta, o bien, sobre configuraciones más actuales, como puede ser un reactor de membranas.

Los resultados alcanzados justifican la continuación de la investigación para conseguir mejoras aún más significativas en la eliminación de nutrientes, sobre todo en lo que respecta al fósforo. La utilización de herramientas inteligentes más sofisticadas que las aquí descritas, como por ejemplo el control basado en la lógica borrosa, junto con el estudio de los perfiles de las curvas de oxidación pueden facilitar un mejor ajuste de la aireación que redunde en una eliminación más eficiente de los contaminantes mencionados, así como en una reducción aún mayor del consumo energético.

AGRADECIMIENTOS

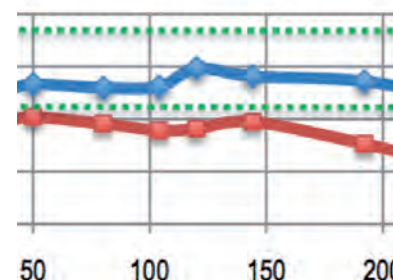
Esta investigación fue iniciada gracias al proyecto GEEDAR (IDI20080686), financiado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico (CDTI) del gobierno de España.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Martín de la Vega P.T., Fernández A., Martínez de Salazar E., Jaramillo M.A. 2011. "Evaluation of municipal wastewater treatment plant with different technologies at Extremadura". En: Actas del congreso internacional SmalWat'11 Wastewater in small communities, (Sevilla 25-28 de abril de 2011), v. III. [S.l.]: CENTA, 2011. P. 113-114
- [2] Tchobanoglous G., Burton F., Stensel H. D. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*. 4ª edición. Nueva York: Mc Graw Hill, 2003, 1848p. ISBN: 978-00-711-2250-4.
- [3] Battistoni P., De Angelis A., Boccadoro R., et al. "An automatically Controlled Alternate Oxidic-Anoxic Process for Small Municipal Wastewater Treatment Plants" *Ind. Eng. Chem. Res.* 2003. Vol. 42 p. 509-515. <http://dx.doi.org/10.1021/ie020376g>
- [4] Nardelli P., Gatti G., Eusebi A.L., et al. "Full-Scale Application of the Alternating Oxidic-Anoxic Process: An Overview". *Ind. Eng. Chem. Res.* 2009. Vol. 48 p.3526-3532. <http://dx.doi.org/10.1021/ie8014796>
- [5] Yanchen L., Hanchang S., Lan X. et al. "Study of operational conditions of simultaneous nitrification and denitrification in a Carrousel oxidation ditch for domestic wastewater treatment" *Biosour. Technol.* 2010 Vol. 101 (3) p. 901-996. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.09.015>. PMID:19818603
- [6] Martín de la Vega P. T., Martínez de Salazar E., Jaramillo M. A., et al. "New contributions to the ORP & DO time profile characterization to improve biological nutrient removal" *Bioresource Technology*. 2012 Vol. 114 p.160-67. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.039>. PMID:22483572
- [7] Hu Z., Wentzel M. C., Ekama G. A. "Anoxic growth of phosphate-accumulating organisms (PAOs) in biological nutrient removal activated sludge systems". *Water Research*. 2002 Vol. 36 (19) p.4927-4937. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00186-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00186-0)
- [8] Aguado D., Montoya T., Borrás L., et al. "Using SOM and PCA for analyzing and interpreting data from a P-removal SBR". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2008 Vol. 21 p. 919-930. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2007.08.001>
- [9] Guerrero J., Guisasaola A., Baez, J. A. "The nature of the carbon source rules the competition between PAO and denitrifiers in systems for simultaneous biological nitrogen and phosphorus removal". *Water Research*. 2011 Vol. 45 p. 4793-4802. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2011.06.019> PMID:21774957
- [10] Fatone F., Bolzonella D., Battistoni P., et al. "Removal of nutrients and macropollutants treating low loaded wastewaters in a membrane bioreactor operating the automatic alternate-cycles process". *Desalination*. 2005 Vol. 35, p.395-405. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2005.02.055>
- [11] Paul, E., Plisson-Saune P. E., Mauret, S., et al. "Process state evaluation of alternating oxidic-anoxic activated sludge using ORP, pH and DO". *Water Science and Technology*. 1998 Vol. 38 (3) p. 299-306. [http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1223\(98\)00469-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1223(98)00469-7)
- [12] Martins A. M. P., Heijnen J. J., van Loosdrecht M. C. M. "Effect of feeding pattern and storage on the sludge settleability under aerobic conditions". *Water Research*. 2003 Vol. 37 p. 2555-2570. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00070-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00070-8)
- [13] Serralta, J., Ribes, J., Seco, A., et al. "A supervisory control system for optimizing nitrogen removal and aeration energy consumption in wastewater treatment plants". *Water Science and Technology*. 2002 Vol. 45 p.309-316. PMID:11936648
- [14] Universidad de Extremadura. *Procedimiento para controlar la aportación de oxígeno en sistemas biológicos*. Patente española. nº P200931106. 2012-3-08.
- [15] Martín de la Vega P., Larrea L., Rojas F. J. et al. *Manual de Gestión de EDAR. Depuración biológica de las aguas residuales urbanas. Problemática en sistemas de eliminación de nitrógeno*. Sevilla: GBS, 2012. ISBN: 978-84-615-5433-1.

Motores marinos de combustión interna. Estudio fisicoquímico del agua de refrigeración

MARINE INTERNAL COMBUSTION ENGINES. PHYSICOCHEMICAL STUDY OF COOLING WATER

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5809> | Recibido: 12/04/2013 • Aceptado: 06/11/2013

M^a Luisa Fernández-Feal, M^a Mercedes del Coro Fernández-Feal, Luis R. Sánchez-Fernández, Santiago Seoane-López, José Ramón Pérez-Prado

UNIVERSIDADE DA CORUÑA. Centro de Investigaciones Tecnológicas. C.I.T. Campus de Esteiro – 15403 Ferrol.
Tfno: +34 981 337400 Ext. 3419. combust@cdf.udc.es

ABSTRACT

- As a prelude for their use in the engine, it is studied in the laboratory how some physicochemical characteristics of the "anticorrosive emulsifiable oil/water" emulsions employed as cooling water in marine internal combustion engines vary in the course of time. This cooling water has been kept at the engine's standard working temperature in order to evaluate the maximum time interval for which the predetermined optimal values of these characteristics were kept. The tests have been carried out on 2% (v/v) solutions of anticorrosive emulsifiable oil in water, using two different oils. The study has been performed on the previously mentioned solutions which were kept at 85°C for 0, 32, 50, 80, 104, 120, 144, 192 at 242 hours; after which, the same physicochemical characteristics were measured. These characteristics are: pH, specific conductivity, chlorides, hardness and the percentage of anticorrosive emulsifiable oil dissolved in water.
- Keywords: cooling water, water quality, internal combustion engines.

RESUMEN

Como paso previo a su utilización en el motor, se estudia en laboratorio cómo varían con el tiempo algunas características fisicoquímicas de las emulsiones "aceite anticorrosivo emulsionable/agua" que se utilizan como "aguas de refrigeración" en determinados motores marinos de combustión interna. Estas "aguas de refrigeración" se han mantenido a la temperatura en que prestarían servicio en el motor, con el fin de evaluar el tiempo máximo en que mantienen sus propiedades en valores óptimos preestablecidos.

Los ensayos se realizan sobre disoluciones preparadas al 2% (v/v) con dos "aceites anticorrosivos emulsionables" comerciales distintos y agua. El estudio se lleva a cabo sobre las disoluciones anteriormente mencionadas mantenidas a 85°C durante 0, 32, 50, 80, 104, 120, 144, 192 y 242 horas, transcurridas las cuales se procede a determinar en las mismas las características más significativas para establecer su estado: pH, conductividad específica, cloruros, dureza y porcentaje de aceite emulsionable anticorrosivo disuelto.

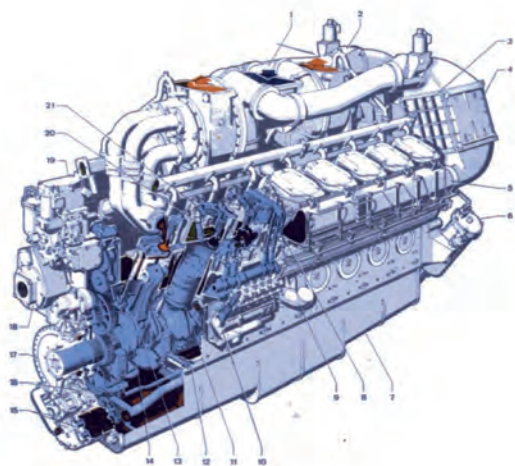
Palabras clave: agua de refrigeración, calidad de agua, motores de combustión interna.

1. INTRODUCCIÓN

El trabajo tiene como objetivo establecer a partir del estudio de las características fisicoquímicas más significativas de las emulsiones formadas con el agua, cuál de los dos aceites comerciales anticorrosivos emulsionables ensayados (identificados como T.O. y T.S2.) es el más idóneo para constituir el termofluido que va a actuar en el sistema de refrigeración de un motor MTU 956 (motor marino de combustión interna) utilizado como sistema propulsor en las corbetas tipo DESCUBIERTA y patrulleros tipo LAZAGA y ANAGA de la *Armada Española*. Se comprueba si estas características se mantienen, a lo largo del tiempo, entre los límites que se establecen como óptimos.

El motor diesel 16V 956 TB91 es un motor de propulsión marina de cuatro tiempos, con una cilindrada total de 152,8 L, regulador de velocidad, activación secuencial de ocho turbocompresores de alta y baja presión controlados por válvulas electro-neumáticas, refrigeración del aire de sobrealimentación externo por agua salada, activación hidráulica de corte de bancadas, sistema de enfriamiento y lubricación individual por pistón, control de las rpm diferencial entre cigüeñal y árbol de levas y reducción de carga automática.

En el sistema de refrigeración del motor MTU 16V 956 TB91, el agua de refrigeración es impulsada por una bomba centrífuga movida por el eje cigüeñal a través de una rueda intermedia. Esta bomba aspira el agua del circuito de refrigeración y la descarga en



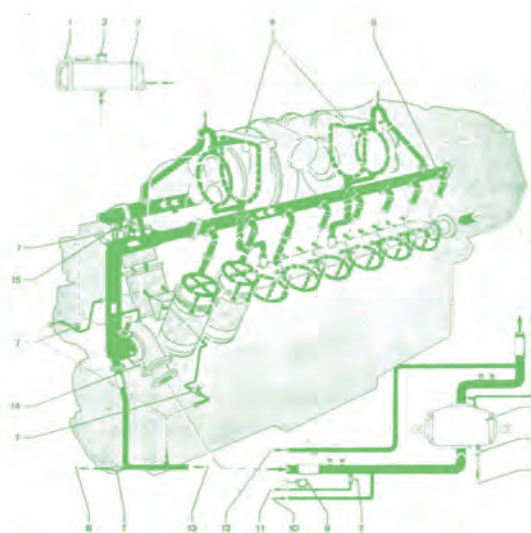
1. Turbosobrealimentador.
 2. Chapaleta de cierre instantáneo.
 3. Conducto de salida del agua refrigerante.
 4. Refrigerador del aire de carga.
 5. Tubo conductor del aire de carga.
 6. Filtro de discos de tamiz para el aceite del motor.
 7. Cáster de aceite.
 8. Distribución.
 9. Codo de llenado de aceite.
 10. Bomba de inyección de combustible.
 11. Pistón.
 12. Bloque motor.
 13. Biela.
 14. Eje cigüeñal.
 15. Bomba del aceite del mecanismo.
 16. Bomba del aceite de refrigeración de los pistones.
 17. Pletina de salida de fuerza, lado HKS.
 18. Bomba de agua no tratada.
 19. Regulador del motor.
 20. Inyector de combustible.
 21. Culata.
- Agua refrigerante del motor.
 Aceite del motor.
 Aire.
 Gases de escape.

Fig. 1: Motor Diesel de Propulsión Marina MTU 16V 956 TB91
Fuente: Publicación n°57. Escuela de Energía y Propulsión de la Armada

circuito cerrado a través del enfriador de agua dulce, entrando en el colector de refrigeración del motor para refrigerar las camisas de abajo hacia arriba y entrando en las culatas a través de los orificios que comunican el bloque con la culata. Una vez que refrigera las culatas, el agua sale por un tubo de cada una de las mismas y de éstas hacia un colector en forma de “V” para ser aspirada por la bomba. De los colectores de salida de las culatas sale un tubo por cada lado del motor para refrigerar las dos turbosoplantes. A la salida de las turbosoplantes el agua es conducida desde el colector general de retorno a la aspiración de la bomba. En la parte más alta del motor va montado un tanque de compensación, en comunicación con el circuito de refrigeración que sirve para desaireación y para compensar las posibles pérdidas de agua que haya en el circuito.

El motor dispone de un sistema de precalentamiento que permite calentar el agua de refrigeración como mínimo hasta 40°C para facilitar el arranque, evitar los desgastes anormales por arranque en frío y la formación de carbonillas en la cámara de combustión. La temperatura del agua de refrigeración se mantiene dentro de los límites establecidos gracias a un enfriador tubular de flujo cruzado incorporado al sistema de refrigeración del motor.

De forma general, el sistema de refrigeración de un motor



1. Conducto de reboso.
 2. Válvula de cierre.
 3. Depósito de compensación del agua refrigerante.
 4. Turbosobrealimentador.
 5. Colector de salida del agua de refrigeración.
 6. Refrigerador del agua de refrigeración.
 7. Válvula de bloqueo.
 8. Desagüe.
 9. Presostato.
 10. Conducto de llenado.
 11. A la indicación mecánica de la presión.
 12. Al equipo de precalentamiento.
 13. Desde el equipo de precalentamiento.
 14. Bomba de agua de refrigeración del motor.
 15. Termostato.
- M. Punto de medición.
 () Kp/cm².

Fig. 2: Circuito de refrigeración motor MTU 16V 956 TB91
Fuente: Publicación n°57. Escuela de Energía y Propulsión de la Armada

marino de combustión interna consta de dos circuitos independientes, uno cerrado que emplea un fluido que circula a través de él, termofluido que va a ser el que absorba el calor sobrante generado en la cámara de combustión y otro abierto, exterior, que emplea como termofluido el agua de mar. Como circuito de refrigeración propiamente dicho se considera al primero, el cerrado. Este circuito presenta la desventaja de que potencia la acción agresiva de los componentes nocivos que contenga el termofluido que circula por él.

La base del termofluido que suele emplearse en los circuitos cerrados de refrigeración de los motores de combustión interna es el agua dulce por sus excelentes cualidades físicas, su gran capacidad de transmisión de calor, su bajo costo y su gran abundancia en la naturaleza. El “agua de refrigeración” no puede ser agua pura o destilada o agua natural ya que originaría graves problemas en los circuitos de refrigeración, problemas que derivan por una parte de la propia composición del agua empleada y por otra parte de la naturaleza del material del que esté formado el circuito de refrigeración.

A la hora de valorar la calidad del agua uno de los factores a tener en cuenta es su dureza: la concentración de compuestos minerales, de cationes polivalentes que hay en una determinada cantidad de agua, en particular sales de magnesio y calcio. Las sales que contiene el agua forman una delgada película compuesta principalmente de carbonato cálcico (CaCO₃) que dificulta el paso del oxígeno disuelto hacia la superficie del

metal produciendo un mecanismo de protección de las superficies metálicas en contacto con el agua dulce, frente a la corrosión por la formación de sales insolubles.

Tipo de agua	mg/L CaCO ₃	°fH	°dH
Agua blanda	0 - 60	0,0 - 6,0	< 3,35
Agua moderadamente dura	61-120	6,1 - 12,0	3,35- 6,70
Agua dura	121- 180	12,1 - 18,0	6,71-10,05
Agua muy dura	> 180	>18,0	>10,05

Grado francés (°f/ TH): Equivale a 10,0 mg CaCO₃/L de agua

Grado alemán (°dH): Equivale a 17,9 mg CaCO₃/L de agua

Tabla I: Clasificación de la del agua por su Dureza OMS (Organización Mundial de la Salud)

Todas las aguas en la naturaleza contienen una cierta cantidad de sales disueltas; un agua blanda, en la que la concentración de sales de calcio y magnesio es baja, no puede formar la película protectora de carbonato de calcio por lo que resulta más corrosiva que las denominadas aguas duras en las que la concentración de sales de calcio y magnesio es elevada; el exceso de estas sales en solución puede también hacer no adecuada el agua para su uso como agua de refrigeración de motores, en este último caso se requiere darle al agua un tratamiento para remover completamente, o disminuir a valores tolerables el contenido de sales en solución. Un agua de excesiva dureza, deberá ser tratada para disminuir esta a valores tolerables.

En la Tabla II y en la Figura 3 se muestran los tipos de agua existentes en las distintas partes de España de acuerdo al valor de la dureza de las mismas y valores concretos de la dureza de algunas ciudades españolas. Pero la dureza del agua no es por sí sola el único factor que determina si es posible la formación de la película protectora en el sistema de refrigeración, otros factores que influyen son la alcalinidad total, el pH y los sólidos disueltos.

El agua empleada como termofluido en un circuito de refrigeración de un motor de combustión interna debe cumplir unos requisitos fisicoquímicos determinados, por lo que se necesita acondicionar dicha agua para que resulte menos corrosiva a los elementos más sensibles del motor en los que se emplea: hay que establecer el tipo de sustancia o sustancias idóneas para que al adicionarlas al agua se forme el “agua de refrigeración” adecuada para el circuito; estas sustancias únicamente pueden utilizarse en sistemas de circulación cerrada, en los que, a excepción de las pérdidas debidas a fugas y a la evaporación, no presentan un consumo significativo.

En motores marinos de combustión interna la tendencia actual es utilizar como sustancias acondicionadoras del agua de refrigeración aceites anticorrosivos emulsionables, anti-congelantes anticorrosivos o anticorrosivos solubles en agua. Existen en el mercado varias empresas que fabrican y distribuyen estos productos, tanto en el mercado nacional como en el internacional, existiendo incluso especificaciones que deben cumplir las mencionadas sustancias acondicionadoras:

- MTL 5047: Aceite anticorrosivo emulsionable.
- MTL 5048: Anticongelante anticorrosivo.

- MTL 5049: Anticorrosivo soluble en agua.

Algunos fabricantes de motores marinos de combustión interna como MTU (MTU Friedrichshafen GmbH) o MAN (MAN Diesel & Turbo), recomiendan como termofluido a emplear en los circuitos de refrigeración de sus motores una emulsión “aceite anticorrosivo emulsionable /agua”. Los aceites anticorrosivos emulsionables están formados por un aceite base de naturaleza parafínica, acompañado de aditivos anticorrosivos y emulsionantes. Estos aceites forman una fina película de aceite en el sistema de refrigeración que impide la corrosión sin disminuir la conductividad y mantienen el circuito en las buenas condiciones de uso, es decir, sin fangos, lodos, incrustaciones o corrosiones, a la vez que el peligro de intoxicaciones se reduce o minimiza. No es adecuado su uso, si el agua refrigerante puede llegar a tener, durante el funcionamiento del motor o en reposo, una temperatura inferior a 0°C o superior a 90-95°C.

Los aceites anticorrosivos emulsionables se requieren en caso de temperaturas altas o enfriamientos notables. Son utilizados en barcos con motores MAN y motores MTU series 595, 1163 y 956 sin intercambiadores de calor de placas. En la actualidad se recomienda su sustitución y eliminación progresiva en base a la cada vez más restrictiva legislación contra la contaminación ambiental.

Un correcto control del pH favorece la utilización de las emulsiones de “aceite anticorrosivo emulsionable/agua” como termofluido en los sistemas de refrigeración: se debe mantener el valor de su pH en zona básica ya que en esta zona el agua deja de ser agresiva para los metales ferrosos; el hierro aumenta su pasividad al encontrarse en presencia de álcalis y oxígeno disuelto, con lo cual disminuye sensiblemente su velocidad de corrosión; pero no se deben alcanzar valores de pH superiores a 9,8 porque entonces se aceleraría la corrosión de los metales no férricos, como es el caso del cobre y del aluminio. En esta zona de pH se favorece la formación de los

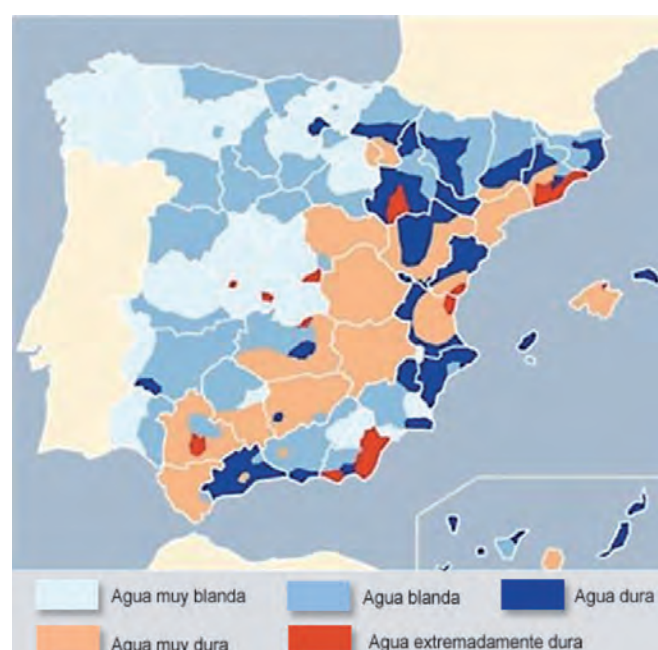


Fig. 3: Mapa de la dureza del agua en España

<http://www.sistemagua.com/informacion-sobre-el-agua/69-dureza-del-agua-en-espana.html>

correspondientes hidróxidos y su posterior precipitación.

Otro factor a favor del empleo de esta emulsión en los circuitos de refrigeración de motores marinos de combustión interna lo determina el hecho de que la emulsión posee un punto de ebullición superior al punto de ebullición del agua empleada en su preparación lo que garantiza, junto a la temperatura de trabajo que se encuentra en torno a los 85°C, que no se producirá, en régimen de trabajo normal, la ebullición

Comunidad autónoma *Provincia – **Ciudad	DUREZA mg/L Ca CO ₃	Tipo de agua
Andalucía *Córdoba – Málaga		Moderadamente dura Blanda
Aragón *Huesca **Zaragoza	284	Dura Media
Asturias		Moderadamente dura
Baleares		Moderadamente dura
Canarias		Moderadamente dura
Cantabria		Moderadamente dura
Castilla La Mancha *Toledo *Guadalajara *Cuenca *Albacete		Blanda Moderadamente dura Dura Muy dura
Castilla-León *Salamanca, Avila, Segovia, Soria, Burgos *Valladolid, Palencia *Burgos		Blanda Moderadamente dura Dura
Cataluña *Lleida, Girona, Barcelona *Tarragona **Barcelona	315	Moderadamente dura Dura
Comunidad Valenciana *Alicante, Valencia *Castellón **Valencia	354	Dura Muy dura
Extremadura *Badajoz *Cáceres		Blanda Moderadamente dura
Galicia **A Coruña	26,3	Blanda
La Rioja		Moderadamente dura
Madrid **Madrid	25	Blanda
Navarra		Moderadamente dura
País Vasco *Alava **Bilbao	200	Blanda Moderadamente dura
Ceuta y Melilla		Dura

Tabla II. Tipo de agua en función de la Dureza en España
www.naturatips.com/agua/agua-en-espana.html

del “agua de refrigeración” por lo que se evitan problemas de condensaciones, fugas o posibles corrosiones.

La formación de una capa protectora de aceite junto al aumento de la presión de vapor del termofluido por la adición del aceite minimizan los posibles problemas de erosión por cavitación que pueden surgir en el circuito como consecuencia de la circulación forzada del termofluido a través del mismo.

El agua de refrigeración formada por la mezcla del “aceite anticorrosivo emulsionable” y el agua dulce debe mantener sus características fisicoquímicas dentro de unos límites fijados por el constructor del motor, al objeto de conseguir que el circuito de refrigeración se encuentre en las mejores condiciones de funcionamiento.

pH	8,5 – 9,8
% de aceite emulsionable	1 – 2% (v/v)
Cloruros	< 100 mg/L
Aniones totales	< 200 mg/L
Dureza total	<9,5 °dH = 17 °F

Tabla III: Características fisicoquímicas de la emulsión

Los límites óptimos de las características fisicoquímicas del agua dulce utilizada para preparar la emulsión son las establecidas por el astillero (NAVANTIA) a partir de las recomendadas por la empresa diseñadora del motor (MTU):

	NAVANTIA NM- 1984e	MTU A001061/34E
pH	= 6,5 – 8,0	= 6,5 – 8,0
Cloruros	< 40 mg/L	< 100 mg/L
Aniones totales	< 100 mg/L	< 200 mg/L
Dureza total	< 9,5 °dH = 17 °f	< 15,0 °dh =26,85 °f

Tabla IV: Características fisicoquímicas del agua dulce

La preparación del agua de refrigeración en estos motores puede hacerse fuera del motor, calentando el agua a 80°C, añadiendo a ésta y mezclando bien el aceite anticorrosivo necesario para a continuación llenar el tanque de almacenamiento y desde este el circuito de refrigeración o, llenando el circuito con el agua de características adecuadas y tras desgasificar y esperar a que la temperatura sea la de régimen, sacar del circuito unos 10 litros de agua a los que adicionar el aceite necesario para la capacidad total del circuito que una vez tratados se devolverán al circuito con el motor en marcha.

2. METODOS DE ENSAYO

Para la determinación de cada una de las características objeto del estudio las muestras se han analizado siguiendo la normativa establecida al efecto:

- 1) Concentración de iones hidrógeno, pH a 20°C: ASTM D1293-12. Standard Test Methods for pH of Water.
- 2) Conductividad específica: ASTM D1125- 95 (2009). Standard Test Methods for Electrical Conductivity and

Resistivity of Water.

3) Determinación de Cloruros: ASTM D512-10. Standard Test Methods for Chloride Ion In Water.

4) Determinación de la concentración de aceite anticorrosivo en el líquido refrigerante: IP 137/55. Methods of test for petroleum and its products. Oil content of soluble cutting oil dispersion.

Prescripciones MTU relativas a fluidos y lubricantes A001061/34E.

Rotura de la emulsión por adición de HCl concentrado.

5) Dureza cálcica y magnésica: ASTM D1126-12. Standard Test Method for Hardness in Water.

Todos los métodos han sido puestos a punto y validados conforme a los requisitos establecidos en los procedimientos.

3. RESULTADOS

Para cada una de las emulsiones formadas, la media de los resultados obtenidos a lo largo del tiempo de estudio, de cada una de las características establecidas en el ensayo y determinadas según los procedimientos citados en el apartado anterior, se recogen en las Tablas V y VI.

Durante el periodo de ensayo y según ha transcurrido el tiempo se ha procedido a determinar sobre alícuotas de las muestras de las “aguas de refrigeración” formadas por adición de dos “aceites anticorrosivos emulsionables” identificados como T.O. y T.S2., a agua dulce y mantenidas a 85°C, los valores correspondientes de pH, conductividad específica, concentración de cloruros, porcentaje de aceite emulsionado detectado en la misma y dureza.

A la vista de los resultados obtenidos, hay que resaltar lo siguiente:

3.1. pH A 20°C

El agua pura se encuentra débilmente ionizada y tiene un pH de 7,0 a 20°C, en estas condiciones se produce un ataque lento al hierro puro originándose una corrosión del mismo, depositándose sobre su superficie una película de óxido ferro-

so. Este proceso en la zona de pH de 4,0 a 10,0 presenta una velocidad de corrosión que es independiente del valor del pH y que sólo depende de la velocidad de difusión del oxígeno en la superficie del metal. La barrera de difusión principal compuesta por óxido ferroso hidratado se renueva continuamente por el proceso de corrosión. Dentro de este intervalo de pH, de 4,0 a 10,0 unidades, la superficie del hierro está siempre en contacto con una solución salina saturada de óxido ferroso hidratado cuyo pH es aproximadamente 9,5.

Para valores de pH inferiores a 4,0 “zona ácida”, la película de óxido ferroso se disuelve, el pH de la superficie del metal disminuye; el metal queda en contacto más o menos directo con el medio acuoso con lo que aumenta la velocidad de corrosión.

Para valores de pH superiores a 9,5-10,0, “zona básica”, se produce una disminución de la velocidad de corrosión del hierro ya que este aumenta su pasividad en presencia de álcalis y oxígeno disuelto. Sin embargo, los metales no férricos como el cobre y el aluminio aumentan su corrosión en esta zona.

El pH de las disoluciones al 2% (v/v) de “aceite anticorrosivo emulsionable/agua potable” es superior, más básico, al que presenta el agua de partida utilizada para su constitución (6,591). Los valores de pH de las disoluciones ensayadas disminuyen, se van haciendo más ácidas a medida que aumenta el tiempo como se observa en la Figura 4 en la que se ha marcado en trazo punteado el intervalo de pH que se considera óptimo.

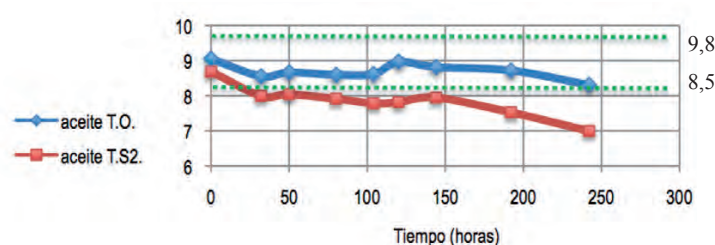


Fig. 4: Variación del pH a 20°C de las disoluciones “aceite anticorrosivo emulsionable/agua” frente al tiempo

DISOLUCIÓN	TIEMPO	CLORUROS	pH a 20°C	CONDUCTIVIDAD ESPECÍFICA a 20°C	ACEITE DISUELTO	DUREZA TOTAL*
	HORAS	mg/L		μS/cm	% (V/V)	°f /TH
AGUA POTABLE	0	36	6,591	95,1	0,0	3,20
ACEITE “T.O.”	0	50	9,054	236,0	2,0	3,85
	32	36	8,555	216,5	2,0	4,35
	50	36	8,667	235,0	2,0	4,65
	80	37	8,598	248,5	1,9	5,10
	104	36	8,621	232,5	1,9	5,20
	120	38	8,968	238,5	1,8	5,65
	144	37	8,820	228,0	1,8	5,70
	192	36	8,720	208,0	1,8	5,80
	242	37	8,310	202,5	1,8	6,00

* grados hidrotimétricos franceses (°F/TH). 1°F = 10 mg/L CaCO₃

Tabla V. Características fisicoquímicas del agua potable y la disolución de “aceite anticorrosivo emulsionable T.O./agua” en función el tiempo

DISOLUCIÓN	TIEMPO	CLORUROS	pH a 20°C	CONDUCTIVIDAD ESPECÍFICA a 20°C	ACEITE DISUELTO	DUREZA TOTAL*
	HORAS	mg/L		μS/cm	% (V/V)	°f / TH
AGUA POTABLE	0	36	6,591	95,1	0,0	3,20
ACEITE "T.S2"	0	77	8,687	353,0	2,0	3,25
	32	39	7,997	332,0	1,9	4,20
	50	40	8,044	358,0	1,9	4,55
	80	40	7,914	352,5	1,8	4,60
	104	44	7,785	327,0	1,8	4,20
	120	42	7,819	319,5	1,7	4,20
	144	43	7,948	302,0	1,7	5,30
	192	45	7,527	294,0	1,7	6,20
	242	43	6,995	271,5	1,7	7,55

* grados hidrotimétricos franceses (°f/TH). 1°f = 10 mg/L CaCO₃

Tabla VI: Características fisicoquímicas del agua potable y la disolución de "aceite anticorrosivo emulsionable T.S2./agua" en función el tiempo

La diferencia entre los valores de pH obtenidos en relación al tiempo es menor para las disoluciones formadas a partir de aceite T.O. (0,740 unidades de pH) que para las formadas a partir de aceite T.S2. (1,692 unidades de pH). Las disoluciones de "aceite anticorrosivo emulsionable" T.O. se acidifican en el transcurso del tiempo llegando a un valor cercano al límite óptimo establecido a las 192 horas de funcionamiento.

En este estudio se pone de manifiesto que las emulsiones formadas con el "aceite anticorrosivo emulsionable" comercial identificado como T.S2. no cumplen con los requisitos de pH óptimo establecidos para el correcto funcionamiento del sistema de refrigeración, puesto a que a su continua acidificación se suma que ya en el momento de la constitución de la emulsión el valor del pH se encuentra al límite.

De acuerdo a los datos, el pH será un factor determinante para establecer el número de horas de funcionamiento a las que fijar el control del "agua de refrigeración" dado que se produce una acidificación no deseable del agua de refrigeración con el tiempo.

3.2. CONCENTRACIÓN DE CLORURO

Las sales corrosivas más abundantes en el agua potable son los cloruros.

Rara vez es el ión cloruro el causante de la corrosión, pero debido a su pequeño tamaño tiene una gran movilidad lo que le permite acelerar las reacciones de corrosión, esta aceleración es proporcional a su concentración debido a la capacidad que presenta este ión para penetrar e incrementar la velocidad de disolución del hierro y su contribución al contenido de electrolitos. La concentración máxima de ión cloruro en el agua potable para una dureza media es de 100 mg/L, superado este valor la corrosión crece rápidamente.

En aleaciones una elevada concentración de cloruros produce ataque intragranular y en el acero inoxidable corrosión en picaduras profundas; además los cloruros actúan potenciando el poder corrosivo de los sulfatos.

Los valores obtenidos para la concentración de cloruro en las disoluciones ensayadas, para ambos aceites, a lo largo del estudio es inferior a las presentada en el momento de la constitución de las disoluciones (0 horas-85°C.).

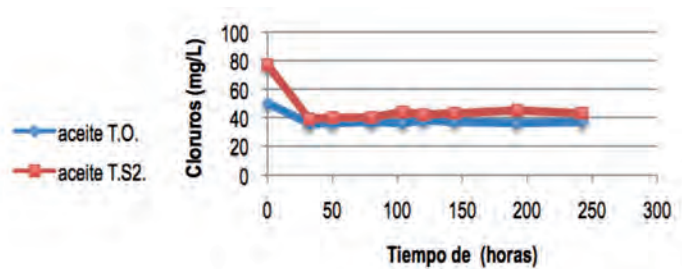


Fig. 5: Variación de concentración de cloruros de las disoluciones "aceite anticorrosivo emulsionable/agua" frente al tiempo

Como se observa en la Figura 5, la concentración de cloruro permanece prácticamente estable a lo largo del tiempo de duración del ensayo y por debajo de los 100 mg/L establecidos como óptimos en el ensayo. Las emulsiones formadas a partir de ambos aceites presentan la misma variación. La concentración de cloruros no se ve afectada por el tiempo.

3.3. % DE ACEITE ANTICORROSIVO EMULSIONABLE DISUELTO

Los requisitos técnicos desarrollados para la aplicación de este tipo de emulsiones establecen que el porcentaje de "aceite anticorrosivo emulsionable" debe estar entre un 1 y un 2% en (v/v) para que la protección anticorrosiva del circuito sea efectiva.

En el estudio llevado a cabo las emulsiones se han constituido con un 2% (v/v) de "aceite anticorrosivo emulsionable".

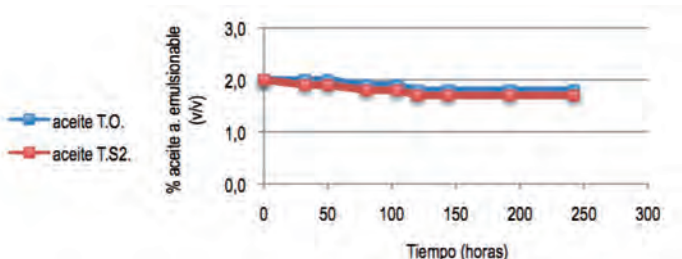


Fig. 6: Variación de % (v/v) aceite anticorrosivo emulsionable de las disoluciones "aceite anticorrosivo emulsionable/agua" frente al tiempo

Los niveles en % de “aceite emulsionado han sido controlados durante el tiempo de estudio poniéndose de manifiesto que dicho nivel permanece constante en el tiempo tanto para emulsiones constituidas a partir del aceite T.O. como para las constituidas a partir del T.S2. Los valores encontrados para las disoluciones del aceite T.O. se apartan un 10% del valor inicial frente al 15% de separación del aceite T.S2.

La Figura 6 permite observar que los valores obtenidos de % de aceite emulsionado se encuentran dentro de los límites establecidos como óptimos o adecuados.

3.4. CONDUCTIVIDAD ESPECÍFICA

Existe una relación entre el contenido de sales disueltas y su conductividad. Es necesario conocer la temperatura de la determinación dado que esta juega un papel determinante en la solubilidad de las sales presentes.

Para disoluciones formadas a partir de ambas clases de “aceite anticorrosivo emulsionable” comprobamos que este parámetro aumenta su valor al principio del ensayo a medida que aumenta el tiempo para luego comenzar a disminuir progresivamente a partir de las 120 horas en el caso del aceite T.O. y de las 104 horas el aceite T.S2.

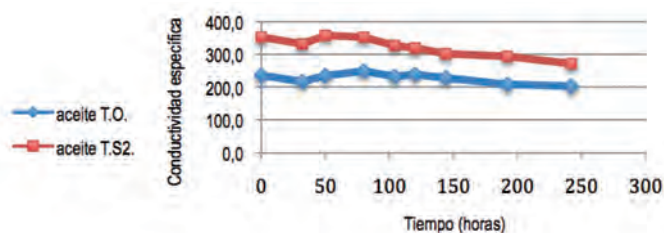


Fig. 7: Variación de la conductividad específica de las disoluciones “aceite anticorrosivo emulsionable/agua” frente al tiempo.

Los valores concuerdan con la variación sufrida por el pH durante el tiempo en que se ha llevado a cabo el estudio como se aprecia en las Figuras 8 y 9.

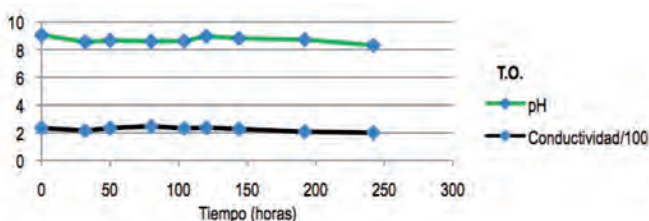


Fig. 8. Comparación de la variación del pH y la conductividad específica de las disoluciones de “aceite anticorrosivo emulsionable T.O./agua” frente al tiempo

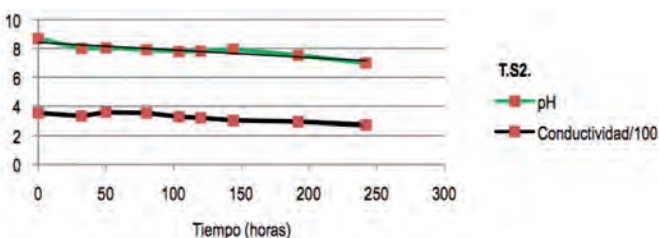


Fig. 9: Comparación de la variación del pH y la conductividad específica de las disoluciones de “aceite anticorrosivo emulsionable T.S2./agua” frente al tiempo

3.5. DUREZA TOTAL

La dureza del agua es la medida de la concentración de compuestos minerales de cationes polivalentes (principalmente divalentes y específicamente los alcalinotérreos) que hay en una determinada cantidad de agua, en particular sales de magnesio y calcio.

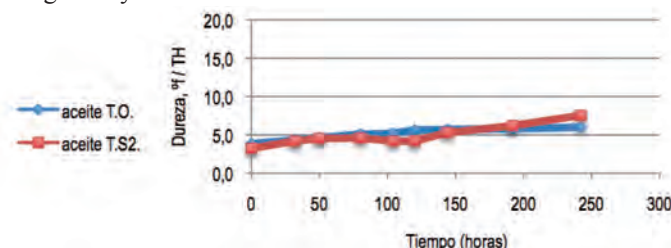


Fig. 10: Variación de la dureza de las disoluciones “aceite anticorrosivo emulsionable/agua” frente al tiempo

De acuerdo a los límites preestablecidos, el valor de la Dureza Total del agua potable empleada en la preparación del “agua de refrigeración” debe de ser como máximo de 9,5 °dH / 17 °f, es decir, debe utilizarse agua dura al objeto de que las disoluciones formadas no originen problemas por posibles depósitos calcáreos en los circuitos de refrigeración ni presenten una gran tendencia a la formación de espuma, ya que una baja concentración de calcio y magnesio no sería capaz de apantallar la tendencia a la espumación que le confieren a los aceites empleados los aditivos anticorrosivos que poseen. Esto conlleva el enmascaramiento del volumen real de las mismas y la absorción excesiva de oxígeno en su seno con el consiguiente riesgo de provocar procesos de corrosión en el circuito.

El agua dulce de partida en este estudio es blanda, las disoluciones preparadas a partir de la misma aumentan su dureza a medida que transcurre el tiempo del ensayo y esto ocurre con las disoluciones formadas a partir de ambas clases de “aceite anticorrosivo emulsionable”. Esta tendencia se confirma en ensayos realizados con agua dulce de superior dureza, lo que constata que el valor de la dureza se convierte en un factor a tener en cuenta para establecer el número de horas de funcionamiento a las que fijar el control del “agua de refrigeración” aunque dado que el valor límite fijado para esta característica es bastante alto no se convierte en un valor determinante a la hora de establecer las horas de funcionamiento.

4. DISCUSIÓN

El acondicionamiento y preparación del refrigerante debe efectuarse antes de la primera puesta en marcha de la instalación o tras un nuevo llenado del circuito. Mediante el acondicionamiento y preparación del refrigerante se generan capas protectoras o de recubrimiento en las paredes de las cámaras y espacios de refrigeración que evita los fenómenos de: corrosión, erosión y cavitación.

La carga de líquido refrigerante se prepara a base de agua dulce y un aditivo apropiado, pero para el buen funcionamiento del motor es indispensable realizar la comprobación de las propiedades del agua dulce con la que se forma la emulsión y la vigilancia permanente de las características fisicoquímicas del líquido refrigerante que va a actuar como termofluido.

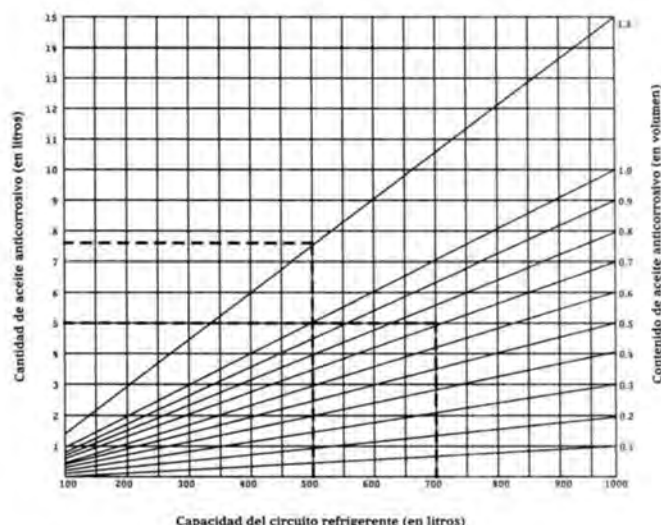


Tabla VII: Formación de la mezcla de agua dulce de dureza adecuada

Si el agua dulce de partida es de alta dureza debe ser sometida a un proceso previo de ablandamiento para disminuir la dureza a valores aceptables utilizando un método de precipitación química, mediante el uso de resinas intercambiadoras de iones de ciclo sódico o mediante la adición de agua destilada de acuerdo a los datos obtenidos utilizando la Tabla VII.

Si el agua disponible es demasiado blanda, puede que el pH baje de 6,5 y que el contenido de CO₂ pueda ser demasiado elevado; en este caso podemos desgaseificar el agua antes de su utilización calentándola a 80°C, con lo que su pH aumentará a valores adecuados.

Hay que tener en cuenta que cuando se llena por primera vez el circuito de refrigeración o tras una limpieza del mismo, se debe preparar la emulsión con un 0,5% más de aceite anticorrosivo emulsionable ya que aproximadamente este porcentaje de aceite es el que quedará adherido a las paredes del circuito de refrigeración mejorando la protección contra la corrosión.

Es indispensable que las “aguas de refrigeración” de los motores marinos de combustión interna se sometan periódicamente a controles para comprobar que las características fisicoquímicas fijadas por el fabricante del motor en que prestan servicio se mantienen en valores adecuados. Se recomienda comprobar diariamente el nivel del tanque de compensación y establecer la periodicidad con la que hacer los controles en los que determinar las características fisicoquímicas del fluido refrigerante y si no se encuentran dentro de los niveles de funcionamiento óptimo establecidos tomar las medidas correctoras oportunas.

Antes de la puesta en servicio del termofluido en el sistema de refrigeración del motor se constata como útil y extremadamente recomendable el realizar, en el laboratorio, un estudio previo de las características fisicoquímicas de la emulsión, aceite anticorrosivo emulsionable/agua, que se va a utilizar como “agua de refrigeración”. Este estudio previo sirve de filtro a la hora de la elección del aceite anticorrosivo emulsionable comercial a utilizar en su constitución y permite preestablecer los periodos de vigilancia sobre las características fisicoquímicas del “agua de refrigeración”, estos periodos se ajustarán en función de los datos obtenidos durante el funcionamiento del motor.

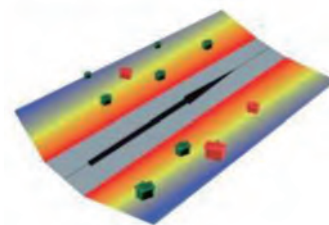
Actualmente la normativa de la empresa constructora, MTU, de los motores marinos de combustión interna sobre los que hemos basado el estudio recomienda la vigilancia a las 250 horas de funcionamiento con independencia del aceite anticorrosivo empleado en la constitución del “agua de refrigeración”. El programa de mantenimiento establece que transcurrido este tiempo se tomarán dos muestras del agua de refrigeración para su análisis, una para análisis “in situ” y otra que se enviará al Laboratorio. Los datos obtenidos se incorporan al software de seguimiento y diagnóstico diseñado y controlado por el Astillero (NAVANTIA) constructor del buque. Tras el estudio realizado, generalizar este tiempo para cualquier aceite anticorrosivo emulsionable, en principio adecuado, parece algo excesivo si se trabaja sin conocer previamente el comportamiento de la emulsión formada. Recomendamos tras este estudio bajar el tiempo de vigilancia preestablecido a 170/200 horas de funcionamiento.

Los datos volcados al software permiten a los responsables del mantenimiento tomar las acciones correctoras más adecuadas en caso de desviaciones puntuales o accidentales de los parámetros óptimos de funcionamiento del sistema así como determinar el momento en que se ha producido la desviación y analizar sus causas.

Por último, de los dos aceites anticorrosivos emulsionables comerciales estudiados, el T.S2. no resulta adecuado para su uso de acuerdo a los requisitos preestablecidos: el pH en las emulsiones con un 1-2% de contenido de aceite no se encuentra dentro de los límites preestablecidos como óptimos por el fabricante.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] American Society for Testing and Materials (A.S.T.M.). Manual de Aguas para Usos Industriales. 3ª edición. México: Editorial LIMUSA, 1991. 456p. ISBN: 978-968-18-0451-0.
- [2] Bartz WJ. "Ecological and environmental aspects of cutting fluids". Lubrication Engineering. 2001. Vol.57-3p.13-16.
- [3] Bartz WJ. "Handbook of tribology and lubrication engineering. Dealing with cutting fluids". Tribologie und Schmierungstechnik. 2008. Vol.55-4p. 67-68.
- [4] Dado M. "Environmental risks associated with cutting fluids". Journal Strojirenská Technologie.2007. Vol.12 p.33-36.
- [5] Beceiro Yáñez, F.; González Iglesias, F. Motor propulsor Bazán-MTU-Modelo 16V 956 TB91. Escuela de Energía y Propulsión de la Armada. Dirección de Enseñanza Naval. 1997.
- [6] Federal specification. Cutting fluids: Emulsifiable oils. VV-C-846D, 27.09.2010. USA.
- [7] Federal specification. Cutting fluids: Emulsifiable oils. VV-C-846C, 19.08.2005. USA.
- [8] Federal specification. Cutting fluids: Emulsifiable oils. VV-C-846B, 16.10.1998. USA.
- [9] Federal specification. Cutting fluids: Emulsifiable oils. VV-C-846, 01.01.1987. USA.
- [10] Luo J, Ma L. "The film formation mechanism of high water-based emulsions". Conference Proceedings del STLE/ASME 2010 International Joint Tribology Conference, (San Francisco 17-20 de octubre de 2010), p.439-441. ISBN:978-079184419-9.
- [11] MTU_ValueService Technical Documentation. Fluids and Lubricants Specification. A001061/34E. Germany, MTU Friedrichshafen GmbH: 2010. 106p.
- [12] MTL 5047 "Kühlmittelzusätze Emulgierbares Korrosionsschutzöl. Emulsifiable corrosion-inhibiting oils". Germany.
- [13] Navantia. Unidad Productiva Motores. Refrigerantes de Motor. NM-1984: 26.09.2007.
- [14] Schmid SR,Wilson WRD. "Lubrication mechanisms for oil-in-water emulsions". Lubrication Engineering. 1996.Vol.52-2 p.168-175.



Método para evaluar el impacto del ruido del transporte rodado en el marco del análisis del ciclo de vida

A METHOD TO ASSESS THE IMPACT OF ROAD TRANSPORT NOISE WITHIN THE FRAMEWORK OF LIFE CYCLE ASSESSMENT

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5804> | Recibido: 27/03/2013 • Aceptado: 07/10/2013



Enrique Moliner*, Rosario Vidal*, Vicente Franco*,
Daniel Garraín**

*UNIVERSITAT JAUME I. Dpto. Ingeniería Mecánica y Construcción.
Avda. Sos Baynat, s/n - 12071 Castellón. Tfno: +34 964 729252.
kike.moliner@gmail.com

**CENTRO DE INVESTIGACIONES ENERGÉTICAS,
MEDIOAMBIENTALES Y TECNOLÓGICAS. Dpto. de Energía. Avda.
Complutense, 22 - 28040 Madrid.

ABSTRACT

• Life Cycle Assessment (LCA) is a widely used tool for assessing the environmental impacts of a product or service throughout its life cycle. This includes transportation, which causes various environmental problems such as noise. Noise has special characteristics (dependence on local factors, lack of linear additivity of emissions, etc.) which complicate the assessment of its impact. The lack of data on noise has been an additional problem. However, the recent publication of the strategic noise maps offers the opportunity to overcome these limitations.

This paper provides a method to assess the impact of noise from road transport and integrate it into the LCA. This method overcomes the methodological limitations of previous studies and uses data from the noise maps to perform the assessments. The health impacts due to noise are quantified in DALYs (disability-adjusted life years), thus allowing the comparison and aggregation of noise with other pollutants harmful to health.

The paper includes a case study where the proposed method is used to calculate the noise impact caused by a heavy vehicle that travels one kilometre on three different roads. The noise impact is compared with the health impacts due to fuel consumption and air emissions from the heavy vehicle. Through the case study, the need for specific noise impact assessments for each particular case is justified, while the validity of the proposed method to perform such assessments in an effective way is demonstrated. The results also show that noise has significant relevance in comparison to other impact categories typically assessed in LCA, which justifies its inclusion as a usual impact category.

• Keywords: LCA, noise, road transport, health impact, DALY, strategic noise maps.

RESUMEN

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta ampliamente utilizada para evaluar los impactos ambientales de un producto o servicio durante todo su ciclo de vida. Esto incluye el transporte, que causa diversos problemas ambientales entre los que se encuentra el ruido. El ruido tiene ciertas particularidades (dependencia de factores locales, imposibilidad de agregar linealmente sus emisiones, etc.) que dificultan la evaluación de su impacto. La escasez de datos sobre ruido ha supuesto un inconveniente añadido. Sin embargo, la publicación reciente de los mapas estratégicos de ruido ofrece la oportunidad de superar estas limitaciones.

Este artículo proporciona un método para evaluar el impacto del ruido del transporte rodado e integrarlo en el ACV. Este método resuelve las limitaciones metodológicas observadas en otros trabajos previos y permite realizar las evaluaciones a partir de datos de los mapas de ruido. Los impactos del ruido sobre la salud se cuantifican en DALYs (años de vida ajustados por discapacidad), posibilitando la comparación y agregación del ruido con otros contaminantes nocivos para la salud.

El artículo incluye un caso de estudio donde el método propuesto se usa para calcular el impacto del ruido de un vehículo pesado que recorre un kilómetro por tres carreteras distintas. El impacto del ruido se compara con los impactos sobre la salud debidos al consumo de combustible y a las emisiones atmosféricas del vehículo pesado. A través del caso de estudio se justifica la necesidad de realizar evaluaciones específicas del impacto del ruido para cada caso particular y se demuestra la validez del método propuesto para realizar tales evaluaciones de manera eficaz. Los resultados también muestran que el ruido tiene una relevancia significativa en comparación con otras categorías de impacto evaluadas normalmente en el ACV, lo cual justifica su inclusión como categoría de impacto habitual.

Palabras Clave: ACV, ruido, transporte rodado, impacto sobre la salud, DALY, mapas estratégicos de ruido.

1. INTRODUCCIÓN

El transporte rodado es un elemento imprescindible para el desarrollo de la actividad industrial, pero también contribuye gravemente a la contaminación atmosférica, al cambio climático y al ruido ambiental. La evaluación de impacto de las emisiones atmosféricas de los automóviles tiene una base metodológica sólida, tanto en las evaluaciones de impacto ambiental como en el marco

del *Análisis del Ciclo de Vida* (ACV). En cambio, el ruido tiene ciertas particularidades (dependencia de factores locales, imposibilidad de agregar linealmente sus emisiones, etc.) que dificultan la evaluación de su impacto. Además, la escasez de datos sobre ruido ha supuesto un inconveniente añadido para su evaluación.

Con el fin de abordar el problema del ruido ambiental, la Directiva 2002/49/CE [1] establece una base común para evaluar y gestionar el ruido en toda la Unión Europea (UE). En este sentido, el uso de indicadores y métodos armonizados para la evaluación del ruido es clave. Según la Directiva 2002/49/CE, la exposición al ruido ambiental debe determinarse a través de mapas de ruido que incorporen los indicadores armonizados de los niveles de ruido: indicador del ruido día-tarde-noche (L_{den}) para evaluar molestias, e indicador de ruido nocturno (L_{night}) para evaluar alteraciones del sueño. Los Estados miembros de la UE han publicado mapas estratégicos de ruido para sus grandes ejes viarios. Aunque la Directiva 2002/49/CE se refiere a las molestias y a las alteraciones del sueño como indicadores de los efectos nocivos de la exposición al ruido, no proporciona métodos específicos para evaluar tales efectos.

En la última década ha habido contribuciones valiosas al

desarrollo metodológico de la evaluación de impacto del ruido del transporte rodado, sobre todo en el marco del ACV [2-7]. Müller-Wenk [2,3] fue pionero en desarrollar una metodología para estimar el impacto sobre la salud atribuible al ruido de una unidad de transporte adicional. Esta metodología fue útil para crear conciencia sobre la importancia del ruido como fuente de deterioro de la salud mundial, pero su aplicación práctica era limitada y asumía simplificaciones que conducían a sobrestimaciones de los impactos causados por el ruido del transporte [7]. Conscientes de estas limitaciones, Franco et al. [7] desarrollaron un método alternativo que incorpora un modelo avanzado de emisión de ruido del tráfico, aportando mayor precisión en el cálculo de los impactos. Este método se desarrolló de manera coherente con la Directiva 2002/49/CE [1], ya que utiliza datos de los mapas estratégicos de ruido para calcular los efectos del ruido sobre la salud en términos de personas con molestias. Sin embargo, el método de Franco et al. [7] también presenta ciertas limitaciones: no considera los efectos del ruido asociados a las alteraciones del sueño, y no convierte los efectos del ruido en sus correspondientes daños sobre la salud.

En este artículo se complementa el método de Franco et al. [7] con el cálculo de los efectos del ruido sobre la salud

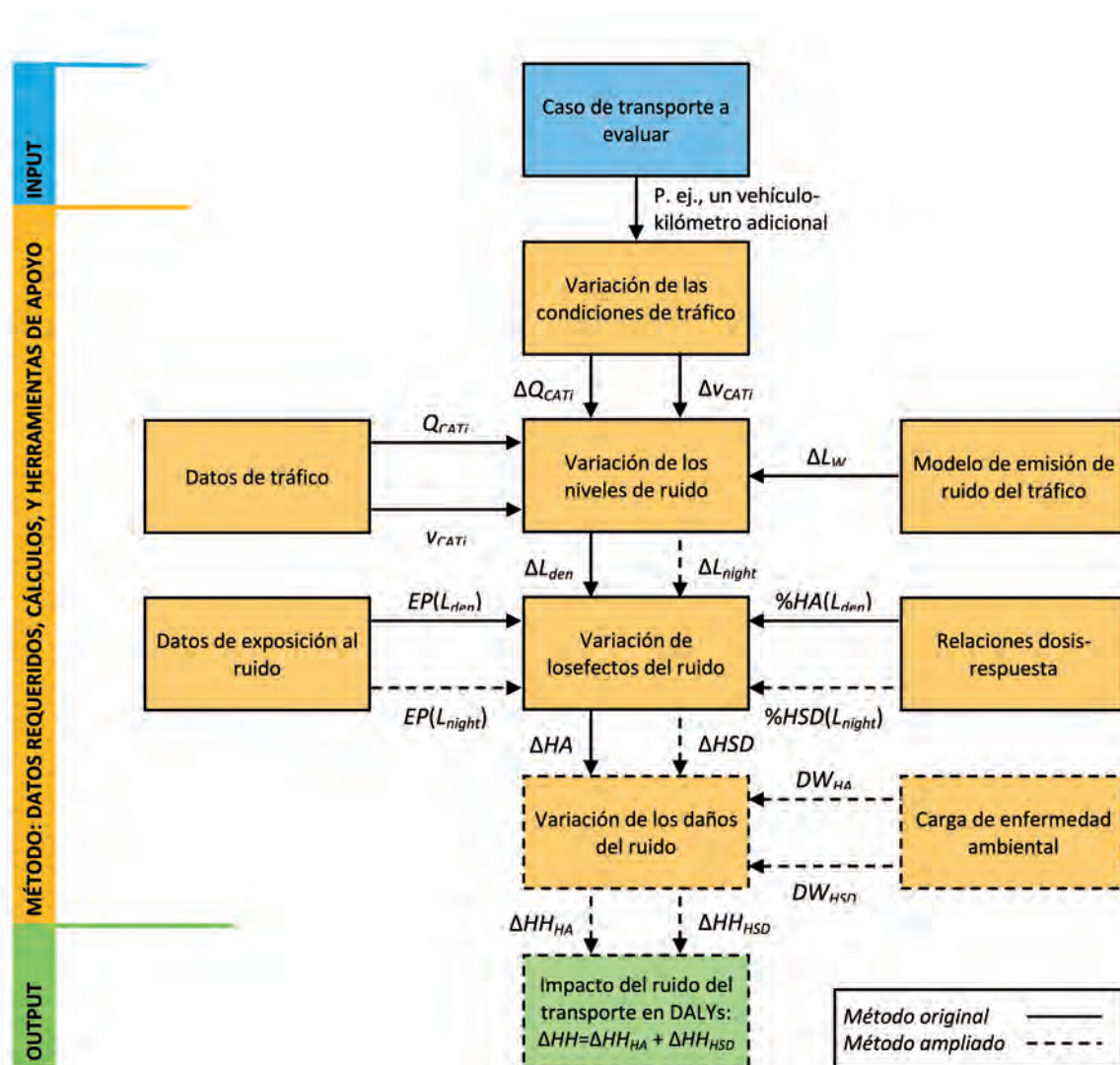


Fig. 1: Estructura del método

en términos de personas con alteraciones del sueño. Además, se amplía el método para cuantificar no sólo los efectos del ruido, sino también los daños sobre la salud correspondientes a tales efectos. Para ello, se incluye el cálculo de la carga de enfermedad ambiental asociada a las molestias y a las alteraciones del sueño, obteniéndose el impacto del ruido sobre la salud en DALYs (años de vida ajustados por discapacidad). El indicador DALY posibilita la comparación y agregación del impacto del ruido con el resto de impactos sobre la salud que se evalúan normalmente en el ACV. Para ilustrar la aplicación del método ampliado, se expone un caso de estudio que consiste en la evaluación del impacto sobre la salud causado por un vehículo pesado que recorre un kilómetro por tres carreteras distintas. En primer lugar, se usa el método propuesto para calcular el impacto sobre la salud causado por el ruido del vehículo pesado en cada una de las carreteras. En segundo lugar, se usa el método de evaluación de impacto ReCiPe [8] para calcular los impactos sobre la salud debidos al consumo de combustible y a las emisiones atmosféricas del vehículo pesado. Finalmente, se comparan los impactos del ruido con los impactos sobre la salud derivados del resto de contaminantes del vehículo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este artículo se propone un método completo para evaluar el impacto del ruido del transporte rodado sobre la salud. Este método usa datos de los mapas estratégicos de ruido para realizar los cálculos. Además, ha sido diseñado para su aplicación a diferentes escalas geográficas y para ser integrable en el ACV. La Fig. 1 muestra una representación esquemática del método completo, incluyendo los elementos del método original [7] y los elementos incorporados en este estudio.

2.1. VARIACIÓN DE LAS CONDICIONES DE TRÁFICO

Müller-Wenk [2,3] ideó un enfoque incremental para evaluar el impacto sobre la salud debido al ruido de una unidad de transporte adicional. El enfoque incremental calcula el impacto de dos escenarios: un escenario inicial, que refleja la situación actual del tráfico (flujo, composición y velocidad); y un escenario final, que se basa en el escenario inicial pero incluye un vehículo adicional que recorre una distancia determinada. La diferencia entre los impactos de ambos escenarios representa el impacto del ruido de ese número adicional de vehículo-kilómetros. Este enfoque ha sido reconocido por varios autores como la mejor opción para integrar la evaluación

de impacto del ruido del transporte en el ACV [4,6,7]. El método de Franco et al. [7] incorpora un modelo de emisión de ruido del tráfico que hace posible evaluar otras variaciones de las condiciones de tráfico aparte de los típicos incrementos del número de vehículo-kilómetros (p. ej., variaciones de flujo, composición o velocidad, o combinaciones de éstas).

2.2. VARIACIÓN DE LOS NIVELES DE RUIDO

El método propuesto utiliza los indicadores L_{den} y L_{night} para evaluar molestias y alteraciones del sueño. L_{den} es el indicador de ruido día-tarde-noche y representa el nivel sonoro medio a largo plazo ponderado A determinado a lo largo de todos los periodos día-tarde-noche (24 horas) de un año. L_{den} (en decibelios con ponderación A, dBA) se determina aplicando la siguiente ecuación [1]:

$$L_{den} = 10 \cdot \log \left(\frac{12}{24} \cdot 10^{\frac{L_{day}}{10}} + \frac{4}{24} \cdot 10^{\frac{L_{evening}+5}{10}} + \frac{8}{24} \cdot 10^{\frac{L_{night}+10}{10}} \right) \quad (1)$$

donde L_{day} , $L_{evening}$ y L_{night} son los indicadores de ruido diurno, vespertino y nocturno, y representan los niveles sonoros medios a largo plazo ponderados A determinados a lo largo de todos los periodos diurnos (12 horas), vespertinos (4 horas) y nocturnos (8 horas) de un año.

La exposición a los niveles de ruido L_{den} y L_{night} puede determinarse mediante cálculos o mediante mediciones. Los modelos de predicción de ruido son una valiosa alternativa a las mediciones *in situ*, ya que reducen tiempos y costes y permiten simular variaciones de las condiciones de tráfico [9]. Estos modelos requieren un modelado preciso de las fuentes de ruido y del entorno de propagación para calcular el nivel de potencia sonora emitido por las fuentes y el nivel de presión sonora en la posición de los receptores. El enfoque incremental permite ahorrar esfuerzos de modelado: dado que las variaciones del nivel de presión sonora se transmiten íntegramente a lo largo de todas las vías de propagación sonora [2,3], todos los receptores en el entorno de propagación experimentan un mismo aumento o disminución de los niveles de ruido una vez tiene lugar una variación de las condiciones de tráfico (Fig.2). Además, las variaciones del nivel de potencia sonora se traducen directamente en variaciones del nivel de presión sonora, por lo que no es necesario hacer distinción entre ambos niveles. Por lo tanto, las evaluaciones basadas en un enfoque incremental pueden realizarse sin necesidad de modelar la propagación sonora, requiriendo únicamente un modelo de emisión de ruido del tráfico para calcular la variación de los niveles de ruido [7].

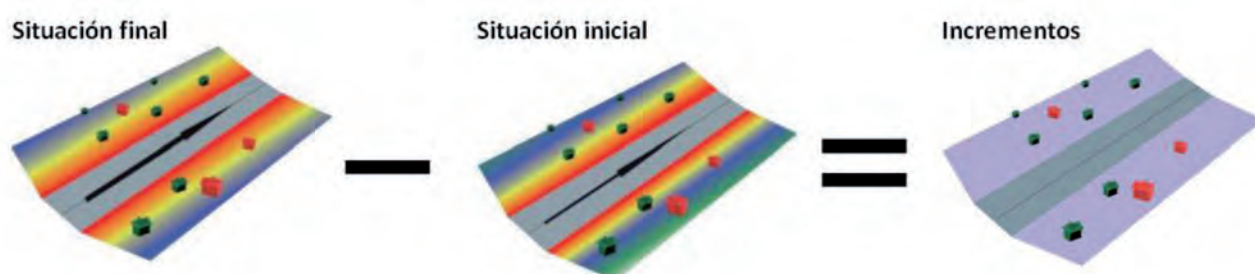


Fig. 2: Ilustración del enfoque incremental: para un determinado incremento de los niveles de emisión de ruido, los incrementos de los niveles de exposición al ruido son iguales para todos los receptores

El modelo de emisión de ruido del tráfico implementado en el método propuesto es un modelo de última generación desarrollado en el proyecto CNOSSOS-EU [10]. Este modelo proporciona el nivel de potencia sonora instantánea de un vehículo en función de su velocidad para distintas categorías de vehículos: vehículos ligeros (CAT1), vehículos medios (CAT2), vehículos pesados (CAT3), y vehículos de dos ruedas (CAT4). El nivel de emisión sonora de un flujo de vehículos circulando por un tramo de carretera se modela como una fuente lineal equivalente que emite la misma potencia sonora que todo el flujo de vehículos. El nivel de emisión sonora equivalente por unidad de longitud emitido por un flujo de vehículos de la misma categoría durante un período de tiempo T ($L_{W,T,CATi}$ en dBA/m) se calcula mediante la siguiente ecuación [10]:

$$L_{W,T,CATi} = L_{W,0,CATi} + 10 \cdot \log \left(\frac{Q_{CATi}}{1000 \cdot v_{CATi}} \right) \quad (2)$$

donde $L_{W,0,CATi}$ es el nivel de potencia sonora instantánea de un vehículo de la categoría i (en dBA), Q_{CATi} es el flujo de vehículos de la categoría i (en veh/h), y v_{CATi} es la velocidad media del flujo de vehículos de la categoría i (en km/h).

El nivel de emisión sonora total causado por una situación de tráfico determinada ($L_{W,T}$ en dBA/m) se calcula como la suma logarítmica de los niveles de emisión asociados a los flujos de las distintas categorías de vehículos [10]:

$$L_{W,T} = 10 \cdot \log \left(\sum_i 10^{\frac{L_{W,T,CATi}}{10}} \right) \quad (3)$$

Finalmente, la variación de los niveles de ruido día-tarde-noche y nocturno (ΔL_{den} and ΔL_{night}) debida a una variación de las condiciones de tráfico se calcula como la diferencia entre los niveles de emisión de ruido totales de las situaciones de tráfico inicial y final.

2.3. VARIACIÓN DE LOS EFECTOS DEL RUIDO

Para determinar los efectos del ruido sobre la salud de las personas expuestas, el método propuesto incorpora otros indicadores adicionales que se obtienen mediante relaciones dosis-respuesta. La Directiva 2002/49/CE [1] hace referencia a relaciones entre molestias y L_{den} y relaciones entre alteraciones del sueño y L_{night} , pero no especifica qué expresiones matemáticas deben usarse. No obstante, informes de la Comisión Europea [11,12] indican las expresiones matemáticas recomendadas para evaluar cada efecto del ruido. En concreto, las relaciones de Miedema y Oudshoorn [13] se aplican para estimar el porcentaje de personas altamente molestas (%HA), mientras que las relaciones de Miedema et al. [14] se aplican

para estimar el porcentaje de personas con graves alteraciones del sueño (%HSD). Ambas relaciones dosis-respuesta están definidas en función de los niveles de ruido en la fachada de las viviendas. Sus aproximaciones polinómicas se muestran en la Tabla 1.

Franco et al. [7] usan las aproximaciones polinómicas de las relaciones dosis-respuesta en combinación con datos de exposición al ruido para determinar la variación del número de personas altamente molestas (ΔHA) atribuible a una determinada variación de las condiciones de tráfico. Para calcular la variación de este efecto del ruido aplican la siguiente ecuación:

$$\Delta HA \cong \Delta L_{den} \cdot \sum_{L_{den}} \left(\frac{d\%HA(L_{den})}{dL_{den}} \cdot EP(L_{den}) \right) \quad (4)$$

donde ΔL_{den} es la variación del nivel de ruido día-tarde-noche atribuible a la variación de las condiciones de tráfico, $EP(L_{den})$ es el número de personas inicialmente expuestas a un intervalo de L_{den} de 5 dBA (55-60, 60-65, 65-70, 70-75, >75), y el término diferencial representa el incremento aproximado del porcentaje de personas altamente molestas con respecto al incremento de L_{den} en ese intervalo de 5 dBA (calculado en el punto medio del intervalo).

Análogamente, el método ampliado considera también la variación del número de personas con graves alteraciones del sueño (ΔHSD). La variación de este efecto del ruido se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta HSD \cong \Delta L_{night} \cdot \sum_{L_{night}} \left(\frac{d\%HSD(L_{night})}{dL_{night}} \cdot EP(L_{night}) \right) \quad (5)$$

donde ΔL_{night} es la variación del nivel de ruido nocturno atribuible a la variación de las condiciones de tráfico, $EP(L_{night})$ es el número de personas inicialmente expuestas a un intervalo de L_{night} de 5 dBA (50-55, 55-60, 60-65, 65-70, >70), y el término diferencial representa el incremento aproximado del porcentaje de personas con graves alteraciones del sueño con respecto al incremento de L_{night} en ese intervalo de 5 dBA (calculado en el punto medio del intervalo).

2.4. VARIACIÓN DE LOS DAÑOS DEL RUIDO

El método de Franco et al. [7] expresa el impacto del ruido como el número de personas afectadas por los efectos del ruido, pero no transforma tales efectos en sus daños sobre la salud. En este estudio se incluye el cálculo de la carga de enfermedad ambiental asociada a los efectos del ruido para evaluar el impacto del ruido en términos de daños sobre la salud. La Organización Mundial de la Salud [15] propone cuantificar la carga de enfermedad mediante el indicador DALY, que com-

Descriptor	Aproximación polinómica
Porcentaje de personas altamente molestas	$\%HA = 9,868 \cdot 10^{-4} \cdot (L_{den} - 42)^3 - 1,436 \cdot 10^{-2} \cdot (L_{den} - 42)^2 + 0,5118 \cdot (L_{den} - 42)$
Porcentaje de personas con graves alteraciones del sueño	$\%HSD = 0,01486 \cdot L_{night}^2 - 1,05 \cdot L_{night} + 20,8$

Tabla 1: Relaciones dosis-respuesta para molestias y alteraciones del sueño debidas al ruido del tráfico rodado

bina los años de vida perdidos por muerte prematura (YLL) y los años vividos con discapacidad (YLD) en una única medida:

$$DALY = YLL + YLD \quad (6)$$

En este estudio se consideran las molestias y las alteraciones del sueño como efectos nocivos del ruido, ya que entre ambos abarcan la mayor parte de la carga de enfermedad del ruido ambiental [15]. Puesto que las molestias y las alteraciones del sueño no causan mortalidad, la estimación de YLL puede omitirse. En cuanto a la discapacidad, la estimación de YLD se realiza aplicando la siguiente ecuación [15]:

$$YLD = I \cdot DW \cdot D \quad (7)$$

donde I es el número de casos incidentes, DW es un peso de discapacidad que refleja la gravedad de la enfermedad en una escala de cero (estado de salud ideal) a uno (estado de salud equivalente a la muerte), y D es la duración media de la discapacidad en años.

El método propuesto traduce cualquier variación de las condiciones de tráfico en variaciones de L_{den} y L_{night} y en variaciones del número de personas altamente molestas y del número de personas con graves alteraciones del sueño. Dado que L_{den} y L_{night} son niveles medios anuales y las molestias y las alteraciones del sueño suelen desaparecer cuando el ruido cesa, se considera que la duración de la discapacidad es de un año [15]. En base a las suposiciones anteriores, la fórmula básica para calcular los DALYs (que resulta de sustituir la Ec.7 en la Ec.6) se puede adaptar para calcular el impacto del ruido como la variación de los daños del ruido sobre la salud (ΔHH , en DALYs) según la siguiente ecuación:

$$\Delta HH = \Delta HH_{HA} + \Delta HH_{HSD} = \Delta HA \cdot DW_{HA} + \Delta HSD \cdot DW_{HSD} \quad (8)$$

donde ΔHH_{HA} y ΔHH_{HSD} son las variaciones de los daños del ruido sobre la salud asociadas a las altas molestias y a las graves alteraciones del sueño, ΔHA es la variación del número de personas altamente molestas (resultante de la Ec.4), ΔHSD es la variación del número de personas con graves alteraciones del sueño (resultante de la Ec.5), y DW_{HA} y DW_{HSD} son los pesos de discapacidad para las altas molestias y las graves alteraciones del sueño.

Los pesos de discapacidad usados en el método proceden de un estudio de la Organización Mundial de la Salud [15]. Estos pesos de discapacidad se muestran en la Tabla 2.

Estado de salud	Peso de discapacidad (DW)
Altas molestias	0,02
Graves alteraciones del sueño	0,07

Tabla 2: Pesos de discapacidad para molestias y alteraciones del sueño debidas al ruido ambiental

2.5. DATOS REQUERIDOS

Los datos requeridos por el método se clasifican en datos de tráfico y datos de exposición al ruido. Los datos de tráfico

permiten calcular la variación de los niveles de ruido e incluyen flujos, velocidades y composición del tráfico (por categorías de vehículos). Los datos de exposición al ruido permiten calcular la variación de los efectos del ruido y consisten en distribuciones de frecuencias de las personas expuestas al ruido del tráfico según intervalos de 5 dBA de L_{den} y L_{night} en la fachada más expuesta de las viviendas. Todos estos datos están disponibles al público en los mapas estratégicos de ruido que los Estados miembros de la UE han elaborado para sus grandes ejes viarios en cumplimiento de la Directiva 2002/49/CE [1]. La información de los mapas de ruido publicada hasta ahora por la Comisión Europea puede consultarse en Report-Net-EIONET¹ y en NOISE².

3. CASO DE ESTUDIO Y RESULTADOS

En este artículo se presenta un caso de estudio con el fin de mostrar la aplicación del método propuesto para realizar evaluaciones de impacto del ruido del transporte rodado a partir de datos de los mapas estratégicos de ruido. En este caso se emplean datos de los mapas de ruido de tres autopistas españolas (Fig.3). Los mapas de ruido de esas autopistas corresponden al año 2006 [16] y se obtuvieron del SICA³. Los datos de tráfico y de exposición al ruido (Tablas 3 y 4) se usan para evaluar el impacto del ruido de un vehículo pesado que recorre un kilómetro por cada una de esas autopistas. De este modo, el impacto del ruido sobre la salud debido a un vehículo-kilómetro adicional al año se calcula en DALYs.

En el caso de estudio también se compara el impacto del ruido del vehículo pesado adicional con los impactos sobre la



Fig. 3: Carreteras objeto de estudio

¹ Reportnet-EIONET (European Environment Information and Observation Network): <http://cdr.eionet.europa.eu>

² NOISE (Noise Observation and Information Service for Europe): <http://noise.eionet.europa.eu>

³ SICA (Sistema de Información sobre Contaminación Acústica): <http://sicaweb.cedex.es>

Carretera	Longitud (km)	Período	Condiciones de tráfico			
			Vehículos ligeros (CAT1)		Vehículos pesados (CAT3)	
			Flujo (veh/h)	Velocidad (km/h)	Flujo (veh/h)	Velocidad (km/h)
AP-7 Norte	221,5	Día	1.079	120	362	100
		Tarde	799	120	477	100
		Noche	179	120	156	100
AP-7 Sur	147,6	Día	1.295	120	434	100
		Tarde	959	120	572	100
		Noche	150	120	131	100
AP-4	93,4	Día	1.266	120	157	100
		Tarde	1.203	120	134	100
		Noche	159	120	68	100

Tabla 3: Datos de tráfico [16]

Carretera	Número de personas expuestas al ruido por kilómetro de carretera									
	Niveles de ruido L_{den} por intervalos de 5 dBA					Niveles de ruido L_{night} por intervalos de 5 dBA				
	55-60	60-65	65-70	70-75	>75	50-55	55-60	60-65	65-70	>70
AP-7 Norte	90,29	26,19	4,06	0,45	0,00	54,18	11,74	1,35	0,00	0,00
AP-7 Sur	226,96	54,88	10,16	1,36	0,00	88,75	18,29	2,71	0,00	0,00
AP-4	61,03	13,92	2,14	0,00	0,00	25,70	6,42	0,00	0,00	0,00

Tabla 4: Datos de exposición al ruido [16]

salud debidos a otros contaminantes del mismo vehículo. Para ello, se modela un vehículo pesado medio de acuerdo a la flota de vehículos en las autopistas españolas durante el año 2005 [17]. Además, se realiza un inventario de consumo de combustible y emisiones atmosféricas del vehículo pesado en base a la guía europea de inventarios de emisiones atmosféricas [18], y se aplica el método de evaluación de impacto ReCiPe [8] para calcular los correspondientes impactos sobre la salud en DALYs. Finalmente, se comparan y se agregan estos últimos impactos con el impacto obtenido previamente para el ruido.

3.1. EVALUACIÓN DE IMPACTO DEL RUIDO

Los datos de los mapas de ruido se han usado para evaluar el impacto del ruido debido a la adición de un vehículo pesado sobre el flujo anual de tráfico existente en cada una de las autopistas investigadas. La adición del vehículo pesado se ha distribuido entre los distintos periodos del día de forma proporcional al flujo de vehículos pesados que circulan por cada autopista en cada periodo. Las variaciones de los niveles de ruido atribuibles al vehículo pesado adicional se han calculado mediante el modelo CNOSSOS-EU [10]. En la Fig.4 se muestran las variaciones de los niveles de ruido L_{den} y L_{night} cau-

sadas por un vehículo-kilómetro adicional al año, junto con el número total de personas inicialmente expuestas a cada uno de estos niveles. En la Fig.5 se muestran las variaciones de los daños del ruido sobre la salud derivadas de las variaciones

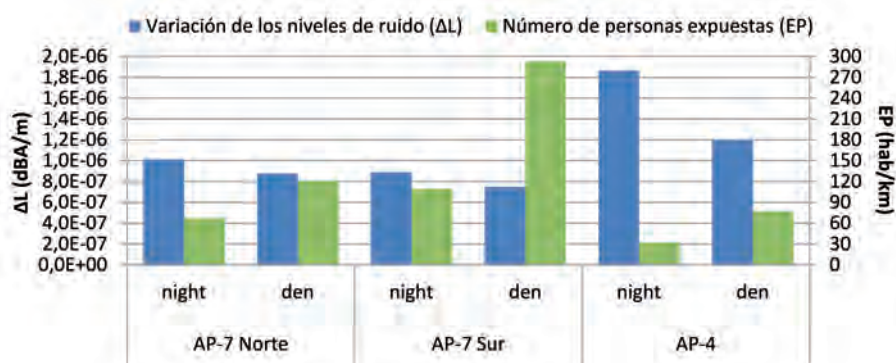


Fig. 4: Variaciones de los niveles de ruido L_{den} y L_{night} y número total de personas inicialmente expuestas a $L_{den} > 55$ dBA y $L_{night} > 50$ dBA

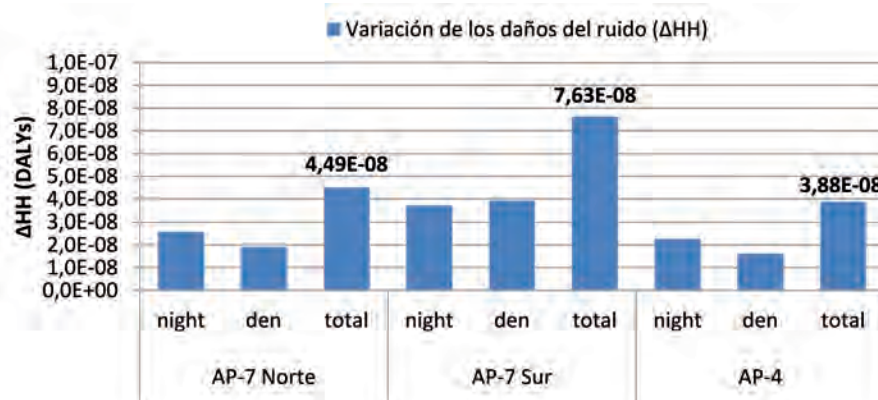


Fig. 5: Variaciones de los daños del ruido sobre la salud

de los niveles de ruido. Estos resultados distinguen entre daños asociados a las altas molestias (período día-tarde-noche), daños asociados a las graves alteraciones del sueño (período nocturno), y daños totales (como suma de los daños asociados a las altas molestias y a las graves alteraciones del sueño). Las variaciones de los daños totales del ruido corresponden al impacto total del ruido de un vehículo-kilómetro adicional.

3.2. EVALUACIÓN DE OTROS IMPACTOS SOBRE LA SALUD

En la Tabla 5 se muestra el inventario de consumo de combustible y emisiones atmosféricas para un vehículo pesado medio circulando a 100 km/h. Los datos de inventario se han usado como entrada del método ReCiPe [8] para calcular los impactos sobre la salud asociados al consumo de combustible y a las emisiones atmosféricas de un vehículo-kilómetro. Estos impactos se muestran en la Tabla 6, donde también se incluyen los impactos del ruido calculados previamente (Fig.5).

Carga ambiental	Cantidad
Consumo de diésel (g/km)	180,23
CO ₂ (kg/km)	0,60
CO (g/km)	1,17
NO _x (g/km)	5,90
PM _{2,5} (g/km)	0,18
NMVOC (g/km)	0,22
CH ₄ (mg/km)	45,16
N ₂ O (mg/km)	13,13
NH ₃ (mg/km)	3,00
Cd (mg/km)	0,01
Cu (mg/km)	1,70
Cr (mg/km)	0,05
Ni (mg/km)	0,07
Se (mg/km)	0,01
Zn (mg/km)	1,00
PAH (µg/km)	241,86
Dioxinas (pg/km)	3,00
Furanos (pg/km)	7,90

Tabla 5: Inventario de cargas ambientales para un vehículo pesado medio en autopistas españolas

3.3. INTEGRACIÓN DEL IMPACTO DEL RUIDO CON OTROS IMPACTOS SOBRE LA SALUD

Finalmente, el impacto del ruido sobre la salud debido a un vehículo pesado adicional se ha integrado con el resto de impactos sobre la salud causados por ese mismo vehículo. En la Tabla 6 se muestran los impactos sobre la salud causados por un vehículo-kilómetro adicional, distinguiendo varias categorías de impacto entre las que se incluye el ruido. Todos los impactos correspondientes a las distintas categorías de impacto están expresados en DALYs, de modo que es posible compararlos entre sí y agregarlos para obtener el impacto total sobre la salud. Los porcentajes mostrados en la Tabla 6 representan la contribución del ruido al impacto total en cada una de las carreteras evaluadas.

Categoría de impacto	Daños sobre la salud humana (DALYs)
Cambio climático	9,76E-07
Reducción de la capa de ozono	2,21E-10
Toxicidad humana	1,58E-08
Formación de oxidantes fotoquímicos	2,66E-10
Formación de materia particulada	4,54E-07
Radiación ionizante	2,08E-10
Ruido	
AP-7 Norte	4,49E-08 (3,01%)
AP-7 Sur	7,63E-08 (5,01%)
AP-4	3,88E-08 (2,61%)
Daños sobre la salud humana (impacto total)	
AP-7 Norte	1,49E-06
AP-7 Sur	1,52E-06
AP-4	1,49E-06

Tabla 6: Impactos sobre la salud de un vehículo-kilómetro adicional

4. DISCUSIÓN

El impacto del ruido del transporte rodado depende de factores locales como son las condiciones de tráfico y la densidad de población próxima a la carretera. Consecuentemente, el impacto del ruido de un vehículo pesado adicional es distinto en cada una de las carreteras evaluadas en el caso de estudio (Fig.5). El impacto total del ruido de un vehículo-kilómetro adicional varía entre 3,88E-08 y 7,63E-08 DALYs según la carretera. Estas diferencias son atribuibles a las variaciones de los niveles iniciales de ruido y al número de personas expuestas al ruido, que son específicos para cada carretera (Fig.4 y 5). Las mayores variaciones de los niveles de ruido (que suceden en la AP-4) son compensadas por niveles reducidos de población expuesta, dando lugar al impacto de ruido más bajo de entre las tres carreteras evaluadas. Por el contrario, las menores variaciones de los niveles de ruido (que suceden en la AP-7 Sur) están asociadas a niveles elevados de población expuesta, resultando en el impacto de ruido más alto. Las diferencias serían aún mayores si se compararan carreteras con condiciones de tráfico y de población expuesta muy disímiles, en las que no se produjeran efectos compensatorios (p. ej., carreteras con mucho tráfico y poca población expuesta frente a carreteras con poco tráfico y mucha población expuesta). La extrapolación de los resultados obtenidos para una carretera particular a otras carreteras puede conducir a estimaciones erróneas de los impactos del ruido. Por esta razón, se recomienda realizar evaluaciones específicas del impacto del ruido para cada caso particular. El método propuesto permite realizar tales evaluaciones de forma sencilla y eficaz a partir de datos de los mapas estratégicos de ruido.

El impacto del ruido se ha cuantificado en DALYs, posibilitando así su comparación e integración con otros impactos del transporte sobre la salud, como aquellos debidos al consumo de combustible y a las emisiones atmosféricas Tabla 6.

El impacto del ruido ha supuesto entre el 2,61 y el 5,01% del impacto total. El ruido ha resultado ser la tercera categoría de impacto más significativa en términos de daños a la salud, únicamente superado por el cambio climático y la formación de materia particulada.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado un desarrollo más completo del método de evaluación de impacto del ruido del transporte rodado propuesto por Franco et al. [7]. El método original calcula el impacto del ruido sobre la salud como el número de personas altamente molestas. El método desarrollado en este estudio también evalúa los efectos nocivos del ruido, pero considerando no sólo las personas altamente molestas sino también las personas con graves alteraciones del sueño. El nuevo método es más coherente con la Directiva 2002/49/CE [1], ya que ésta exige la evaluación tanto de las molestias como de las alteraciones del sueño. Además, el nuevo método convierte ambos efectos del ruido en sus correspondientes daños sobre la salud en DALYs.

A través de un caso de estudio se ha expuesto la dependencia del impacto del ruido de ciertos factores locales y se ha justificado la necesidad de realizar evaluaciones de impacto específicas para cada carretera. Asimismo, se ha demostrado la validez del método propuesto para realizar tales evaluaciones de manera eficaz a partir de datos de los mapas estratégicos de ruido. En el caso de estudio se ha evaluado el impacto del ruido de un vehículo-kilómetro adicional, ya que ésta es la práctica más común en el ACV para evaluar el impacto del ruido del transporte. El indicador DALY nos ha permitido comparar e integrar el impacto del ruido con otros impactos del transporte rodado sobre la salud. La relevancia del impacto del ruido en comparación con las categorías de impacto que se evalúan normalmente en el ACV justifica la inclusión del ruido como categoría de impacto habitual.

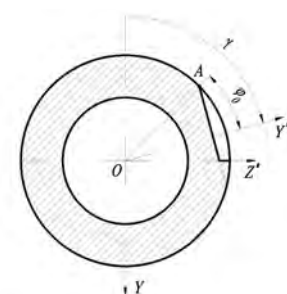
El método propuesto permite evaluar variaciones de diversos parámetros del tráfico, como son flujo, composición y velocidad, así como cualquier combinación de variaciones de varios parámetros. Esto hace posible analizar diversos escenarios que pueden ser representativos de medidas potenciales para reducir el impacto del ruido (p. ej., disminuir el flujo y/o la velocidad del tráfico en una carretera).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] European Commission. Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise. Official Journal of the European Communities, 18.7.2002, L189, p. 12-25.
- [2] Müller-Wenk R. Attribution to road traffic of the impact of noise on health. Environmental Series No. 339. Berna: Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape, 2002. 68 p.
- [3] Müller-Wenk R. "A method to include in LCA road traffic noise and its health effects". The International Journal of Life Cycle Assessment. Marzo 2004. Vol. 9-2, p. 76-85. (<http://dx.doi.org/10.1007/BF02978566>)
- [4] Doka G. Ergänzung der Gewichtungsmethode für Ökobilanzen

- Umweltbelastungspunkte'97 zu Mobilitäts-UBP'97. Zürich: Doka Ökobilanzen, 2003. 61 p.
- [5] Nielsen PH, Laursen JE. "Integration of external noise nuisance from road and rail transportation in lifecycle assessment". En: Potting J, Hauschild M (eds.). Background for spatial differentiation in LCA impact assessment: The EDIP2003 methodology. Copenhagen: Danish Environmental Protection Agency, 2005. p. 278-293.
- [6] Althaus H-J, de Haan P, Scholz RW. "Traffic noise in LCA. Part 2: Analysis of existing methods and proposition of a new framework for consistent, context-sensitive LCI modeling of road transport noise emission". The International Journal of Life Cycle Assessment. Noviembre 2009. Vol. 14-7, p. 676-686. (<http://dx.doi.org/10.1007/s11367-009-0117-1>)
- [7] Franco V, Garraín D, Vidal R. "Methodological proposals for improved assessments of the impact of traffic noise upon human health". The International Journal of Life Cycle Assessment. Septiembre 2010. Vol. 15-8, p. 869-882. (<http://dx.doi.org/10.1007/s11367-010-0213-2>)
- [8] Goedkoop M, Heijungs R, Huijbregts M, et al. ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I: Characterisation. Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 2009. 126 p. Disponible en: <http://www.lcia-recipe.net>.
- [9] Steele C. "A critical review of some traffic noise prediction models". Applied Acoustics. Marzo 2001. Vol. 62-3, p. 271-287. ([http://dx.doi.org/10.1016/S0003-682X\(00\)00030-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0003-682X(00)00030-X))
- [10] Kefalopoulos S, Paviotti M, Anfossio-Lédée F. Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU). To be used by the EU Member States for strategic noise mapping following adoption as specified in the Environmental Noise Directive 2002/49/EC. Luxemburgo: Publications Office of the European Union, 2012. 180 p. ISBN 978-92-79-25281-5.
- [11] European Commission. Position paper on dose response relationships between transportation noise and annoyance. Luxemburgo: Office for Official Publications of the European Communities, 2002. 24 p. ISBN: 92-894-3894-0.
- [12] European Commission. Position paper on dose-effect relationships for night time noise. European Commission Working Group on Health and Socio-Economic Aspects, 2004. 30 p. Disponible en: <http://ec.europa.eu/environment/noise/pdf/positionpaper.pdf>
- [13] Miedema HME, Oudshoorn CG. "Annoyance from transportation noise: relationships with exposure metrics DNL and DENL and their confidence intervals". Environmental Health Perspectives. Abril 2001. Vol. 109-4, p. 409-416. (<http://dx.doi.org/10.1289/ehp.01109409>)
- [14] Miedema HME, Passchier-Vermeer W, Vos H. Elements for a position paper on night-time transportation noise and sleep disturbance. TNO Inro report 2002-59. Delft: TNO, 2003. 62 p. ISBN: 90-6743-981-9.
- [15] World Health Organization. Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy life years lost in Europe. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2011. 106 p. ISBN: 978-92-890-0229-5.
- [16] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Mapas estratégicos de ruido: Autopistas AP-7 y AP-4. Documento resumen. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2007. 60 p. Disponible en: <http://sicaweb.cedex.es>.
- [17] Ntziachristos L, Mellios G, Kouridis C, et al. European database of vehicle stock for the calculation and forecast of pollutant and greenhouse gases emissions with TREMOVE and COPERT. Laboratory of Applied Thermodynamics, Aristotle University of Thessaloniki, 2008. 260 p. Disponible en: http://www.emisia.com/docs/08.RE.0009.V2%20-%20Fleets_Final.pdf
- [18] European Environment Agency. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2009. Technical guidance to prepare national emission inventories. Luxemburgo: Office for Official Publications of the European Communities, 2009. 21 p. ISBN 978-92-9213-034-3.

Tensiones en ejes huecos con una grieta superficial bajo flexión rotativa



STRESSES IN HOLLOW AXIS WITH A SURFACE CRACK UNDER ROTATION AND BENDING

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5822> | Recibido: 26/04/2013 • Aceptado: 07/10/2013

Jon Ariza De Miguel, Serguei S. Gutyrva, Yuri M. Jomyak

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA NACIONAL DE ODESA. Dpto. de Ciencias de Maquinaria. Avda. Shevchenko, 1 - Odesa (Ucrania). jonarizademiguel@gmail.com

ABSTRACT

- Hollow axis are widely used in all branches of industry and bear great responsibility. Their behaviour under fatigue being nonetheless well known, and the crack growth phenomenon extensively studied, the understanding of the physical phenomenon somewhat lacks theoretical backing. Moreover, it is still to be explained why hollow axis behave, under fatigue, differently to whole ones. The present paper gives a start to the theoretical study of the stresses in a hollow axis in flexural mode, considering the variations of its strength moment and its nominal tractive efforts, showing that these endure oscillations harsher than those usually attributed to these cases.
- Keywords: fatigue, hollow axis, cracks, bending and rotation, analytical study.

RESUMEN

Los ejes huecos tienen amplia aplicación en todas las ramas de la industria y son piezas de gran responsabilidad. No obstante, aun siendo extensamente conocido su comportamiento a fatiga y ampliamente estudiado el fenómeno del crecimiento de grieta en ellos, la comprensión del fenómeno empírico adolece aún de un refrendo teórico. Así mismo, queda por explicar el porqué del comportamiento diferente a fatiga de los ejes huecos frente a los llenos. El presente artículo trata de comenzar el estudio teórico del estado tensional de un eje que trabaje a flexión, considerando las variaciones del momento resistente del eje y de las tensiones axiales nominales del mismo; demostrándose que sufren oscilaciones mayores de las habitualmente atribuidas a estos casos.

Palabras clave: fatiga, ejes huecos, grietas, flexión rotativa, estudio analítico.

1. INTRODUCCIÓN

El cálculo de ejes y árboles tanto sólidos como huecos es una materia ampliamente estudiada tanto por la profusión de este elemento mecánico como por la facilidad que ofrece a la hora de realizar estudios analíticos y experimentales. Así, puede decirse que sea uno de los elementos mecánicos que en la práctica menos se presten a requerir ensayos a fatiga, salvo en casos excepcionales de solicitaciones o configuraciones inhabituales.

En el caso del cálculo a fatiga de un eje que trabaje netamente a flexión, y más precisamente en el estudio del crecimiento de grietas durante su vida útil, existe cierta cantidad de métodos analíticos que, a la hora de calcular las tensiones en el eje, hacen uso de los habituales valores tabulados del momentos de inercia y por ende del momento resistente de la sección originaria. Estos métodos prácticos incluyen normas industriales de uso muy extendido pese a su carácter netamente conservador [1].

Los ejes llenos cuentan así pues con abundante bibliografía, así como los huecos, pero aún no se ha hallado explicación plausible que aclare por qué ambos se comportan de diferente manera, fenómeno que se observa sin embargo experimentalmente. Es fácil observar que la presencia de una grieta en la superficie de un eje reduce el área real del mismo y por tanto aumenta las tensiones medias en él, pero lo hace en valores despreciables mientras que la grieta sea pequeña, y considerables a medida que ésta crezca. Este efecto será así mismo mayor en el caso de ejes huecos, por ser menor el área transversal originaria del eje.

El efecto producido por despreciar este hecho una vez que la grieta aumenta es objeto de estudio en este artículo, así como las posibles consecuencias que pueda tener en ulteriores cálculos.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Considérese un eje hueco de diámetro exterior D y diámetro interior d , con un ratio entre ambos k_h .

$$k_h = d/D$$

El momento de inercia [mm^4] respecto a los ejes OY' y OZ' de la sección es, como es bien sabido:

$$I_{Y0} = I_{Z0} = \frac{\pi}{64} \cdot D^4 \cdot (1 - k_h^4)$$

y el momento resistente a la flexión [mm^3]:

$$W_{Z0} = \frac{I_{Z0}}{y_{\max}} = \frac{\pi}{32} \cdot D^3 \cdot (1 - k_h^4)$$

Los subíndices *cero* indican en adelante los valores correspondientes a la sección original, sin grieta alguna.

No obstante, como se ha dicho, consideramos la presencia de una grieta recta como la de la Fig.1, donde definimos el semiángulo de la misma φ_0 y el ángulo γ de giro del eje respecto a su posición arbitraria inicial, que será aquella en que el eje medio de la grieta se halle en su posición superior. La asunción de la grieta plana como válida para cálculos aproximados viene dada por su presencia en la literatura [2], y por tanto se ha de considerar que los valores aquí obtenidos serán sensiblemente menores a los que se presentarían en el caso de tener la grieta forma lenticular.

La presencia de la grieta y la consideración de su superficie como área que se subtrae al área efectiva de la sección en los momentos en que ésta ha de transmitir esfuerzos de tracción, conlleva lógicamente un área real menor que la inicial, lo cual también repercute en el valor del momento de inercia. El valor del momento resistente también se verá modificado, tan-

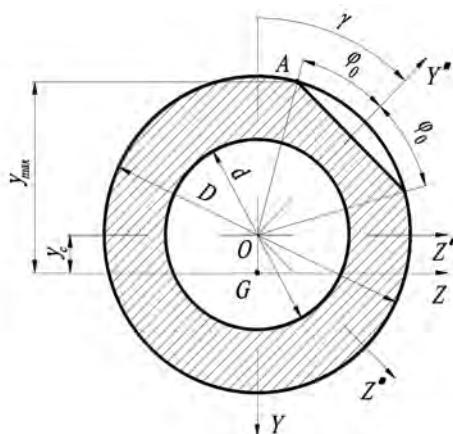


Fig. 1: Grieta abierta, identificación de las variables

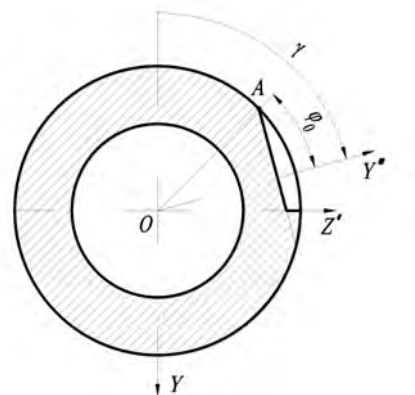


Fig. 2: Grieta parcialmente cerrada

to por variar el momento de inercia citado, como por hacerlo también la posición del centro de gravedad de la sección, que se ve desplazado hacia el lado opuesto al que se halle la grieta.

La grieta se cerrará cuando se halle en la zona en que los esfuerzos transmitidos sean de compresión, por lo que durante la rotación de la pieza se pueden considerar tres casos:

1. La grieta se halla enteramente en la zona de tracción y por tanto toda su área deja de transmitir esfuerzos. A esta situación se le dará el subíndice 1 (Fig.1).
2. Parte de la grieta se halla en la zona de compresión, y por tanto tan sólo el área aún en la zona de tracción deja de transmitir esfuerzos. A esta situación se le dará el subíndice 2 (Fig.2).
3. La grieta se halla enteramente en la zona de compresión, y por tanto no influye sobre los valores de los momentos de inercia, y por ende de las tensiones. A esta situación se le dará el subíndice 3.

Se asume la simplificación de que una parte de la grieta pasa de estar “abierta” a estar “cerrada” en el momento en que rebasa el eje OZ , mecanismo aceptado en la literatura en general [3, 4], a sabiendas de que frecuentemente lo haga ligeramente antes [5, 6], dejando para ulteriores refinamientos esta consideración.

Estos casos están delimitados por los valores que tomen el semiángulo de grieta φ_0 y el ángulo de giro γ :

$$\begin{cases} \text{Caso 1} \equiv \gamma \in [0, \pi/2 - \varphi_0] \\ \text{Caso 2} \equiv \gamma \in [\pi/2 - \varphi_0, \pi/2 + \varphi_0] \\ \text{Caso 3} \equiv \gamma \in [\pi/2 + \varphi_0, \pi] \end{cases}$$

Para valores entre π y 2π se considerarán los valores simétricos a los obtenidos. El cálculo del momento de inercia de las secciones expresadas en las fases ahora definidas requiere cálculos analíticos independientes, dado que la literatura no aporta los valores para los momentos de inercia de este tipo de secciones.

2.2. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LA SECCIÓN

2.2.1. Caso 1: Grieta totalmente abierta

La Fig.1 muestra una grieta con ejes relativos OY'' y OZ'' , girados un ángulo γ respecto a los principales. Se puede de-

mostrar que los valores de los momentos de inercia de la sección son, respecto a estos ejes, restada la grieta:

$$\begin{cases} I_{Y''|1} = D^4/64 [\pi(1 - k_h^4) - \varphi_0 + 1/2 \sin 2\varphi_0 - 1/12 \sin 4\varphi_0] \\ I_{Z''|1} = D^4/64 [\pi(1 - k_h^4) - \varphi_0 + 1/4 \sin 4\varphi_0] \end{cases}$$

Y los valores adimensionales respecto a la sección original en ausencia de grieta:

$$\begin{cases} \bar{I}_{Y''|1} = \frac{I_{Y''|1}}{I_{Y0}} = \frac{\pi(1 - k_h^4) - \varphi_0 + 1/2 \sin 2\varphi_0 - 1/12 \sin 4\varphi_0}{\pi(1 - k_h^4)} \\ \bar{I}_{Z''|1} = \frac{I_{Z''|1}}{I_{Z0}} = \frac{\pi(1 - k_h^4) - \varphi_0 + 1/4 \sin 4\varphi_0}{\pi(1 - k_h^4)} \end{cases}$$

De donde se puede obtener que:

$$\bar{I}_{Z'|1} = \sqrt{(\bar{I}_{Z''|1} \cos \gamma)^2 + (\bar{I}_{Y''|1} \sin \gamma)^2}$$

Para el valor real del momento de inercia se ha de desplazar el centro de gravedad de la sección de acuerdo con el teorema de Steiner, y para ello ha de saberse la posición del centro de gravedad, que se puede obtener calculando el valor de su momento estático [mm³]:

$$S_{Z'|1} = -\frac{D^3}{12} (\sin \varphi_0)^3 \cos \gamma$$

La razón del área respecto al área original –área adimensional- del eje es:

$$\bar{A}|_1 = \frac{A|_1}{A_0} = \frac{\pi(1 - k_h^2) - \varphi_0 + 1/2 \sin 2\varphi_0}{\pi(1 - k_h^2)}$$

2.2.2. Caso 2: Grieta parcialmente cerrada

El momento adimensional de inercia del área en la Fig.2, que representa la grieta parcialmente cerrada en los valores positivos del eje OZ es igual a:

$$\begin{aligned} \bar{I}_{Z'|2} = \frac{I_{Z'|2}}{I_{Z0}} = & \frac{1}{(1 - k_h^4)} \left\{ \frac{3}{4} - k_h^4 + \frac{1}{2\pi} \left[\gamma - \varphi_0 + \frac{1}{2} \sin 2(\gamma - \varphi_0) \right] \right. \\ & \left. + \frac{1}{3\pi} \frac{\cos \varphi_0}{\sin \gamma} (\cos(\gamma - \varphi_0))^3 \right\} \end{aligned}$$

Su momento estático:

$$S_{Z'|2} = \frac{D^3}{24} \left[1 + \sin(\varphi_0 - \gamma) - \cos \varphi_0 \frac{(\cos(\varphi_0 - \gamma))^2}{2 \sin \gamma} \right]$$

Y el área:

$$\bar{A}|_2 = \frac{A|_2}{A_0} = \frac{3\pi/2 + \gamma - \varphi_0 - (\cos \varphi_0)^2 (\tan \varphi_0 + \cot \gamma)}{2\pi(1 - k_h^2)}$$

2.2.3. Caso 3: Grieta cerrada

El tercer caso es aquel en que toda la región afectada por la grieta se halla en la zona de la sección en que los esfuerzos nominales son de compresión, por lo que, hallándose la grieta “cerrada”, los valores de sección, momento estático y momento de inercia son los correspondientes a la sección original.

2.3. CÁLCULO DE LAS TENSIONES NOMINALES

Contando ya con los valores del momento de inercia y área, puede deducirse para cada caso el valor de la posición real del centro de gravedad de la sección, así como el momento de inercia respecto a este nuevo punto de acuerdo con Steiner:

$$I_{Z|i} = I_{Z'|i} - A|i \cdot (y_{c|i})^2 = I_{Z'|i} - (S_{Z'|i})^2/A|i$$

Ya que

$$S_{Z'|i} = A|i \cdot y_{c|i} \text{ para cada } i = 1, 2, 3$$

Y por tanto, el momento resistente adimensional respecto al nuevo punto será:

$$\bar{W} = W|i/W_{Z0}$$

donde

$$W|i = I_{Z|i}/y_{max|i}$$

y donde el valor de y_{max} será diferente en cada uno de los casos, así, de las Fig. 1 y 2 se deduce:

$$y_{max|i} = \begin{cases} \left\{ \begin{aligned} D/2 \cdot \cos(\varphi_0 - \gamma) + y_{c|i} & \gamma < \varphi_0 \\ D/2 + y_{c|i} & \gamma > \varphi_0 \end{aligned} \right. & : i = 1, 2 \text{ (casos 1 y 2)} \\ D/2 & : i = 3 \text{ (caso 3)} \end{cases}$$

Por ser un punto de interés en el estudio del crecimiento de la grieta, se ha calculado también la tensión nominal adimensional para el punto A, que indica cuánto mayor es la tensión en este punto de acuerdo con el modelo aquí presentado, respecto a ese mismo punto en el caso de que no hubiera grieta alguna. La expresión alcanza esta forma:

$$\bar{\sigma}(\gamma, \varphi_0)|_A = \frac{\sigma_x|_A}{\sigma_x|_{A0}} = \frac{I_{Z0}}{I_{Z|i}} \cdot \left(1 + \frac{2y_{c|i}}{D \cdot \cos(\gamma - \varphi_0)} \right)$$

3. RESULTADOS

Partiendo de las ecuaciones obtenidas, puede representarse gráficamente la evolución de los diversos parámetros analizados. Se ha tomado un valor de $kh=0,75$ habitual en la práctica [7, 8]. Para el ángulo φ_0 se han considerado los valores 20° y 30°. La Fig.3 muestra los valores del momento de inercia adimensional antes ($I_{Z'|i}$) y después ($I_{Z|i}$) de considerar el desplazamiento del centro de gravedad de la sección. La Fig.4

muestra por una parte el valor de $\sigma(\varphi_0)$ antes descrito para el punto A , alcanzándose un valor del 6% con $\varphi_0 = 30^\circ$; y por otra parte la razón entre el momento resistente de la sección que hemos calculado y el momento de la sección original, para el eje en su totalidad.

4. CONCLUSIONES

1. Observando las gráficas obtenidas de las ecuaciones analíticas presentadas se puede confirmar que no es desdeñable la influencia del área “perdida” de la grieta a la hora de calcular el estado tensional de puntos ya próximos a ella, ya de la superficie del eje en general. Sí es cierto que el efecto que el desplazamiento del centro de gravedad de la sección por la presencia de una grieta es tal vez menor del esperado (1%, Fig.3, a y b ; c y d), y por ende probablemente despreciable; pero conjuntamente con la variación del valor del momento de inercia, que alcanza un 15%, sí puede ser de interés en estudios posteriores.

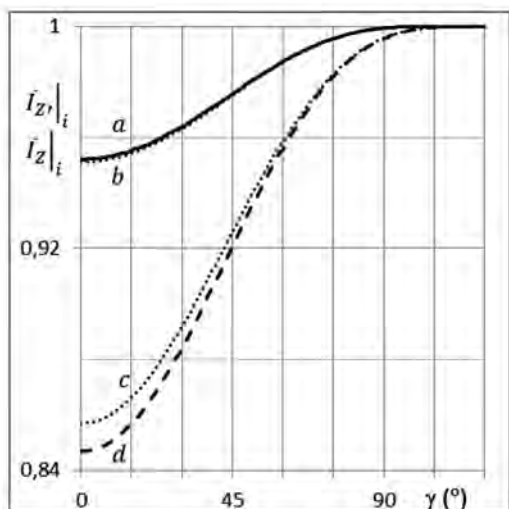


Fig. 3: $a) \bar{I}_{Z'}|_i(\varphi_0 = 20^\circ)$ $b) \bar{I}_{Z'}|_i(\varphi_0 = 20^\circ)$ $c) \bar{I}_{Z'}|_i(\varphi_0 = 30^\circ)$ $d) \bar{I}_{Z'}|_i(\varphi_0 = 30^\circ)$

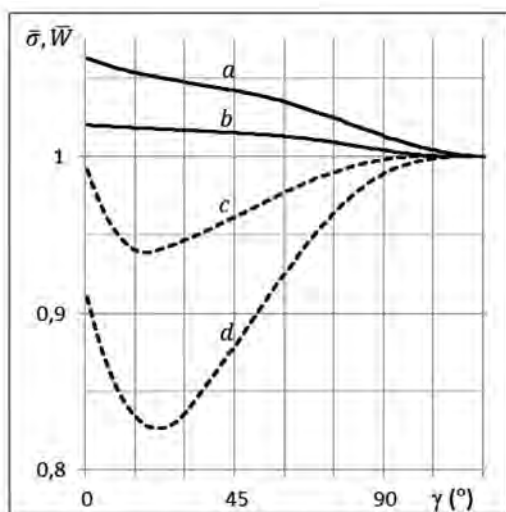


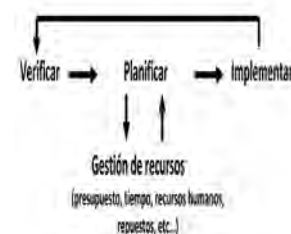
Fig. 4: $a) \bar{\sigma}(\varphi_0 = 30^\circ)$ $b) \bar{\sigma}(\varphi_0 = 20^\circ)$ $c) \bar{W}(\varphi_0 = 20^\circ)$ $d) \bar{W}(\varphi_0 = 30^\circ)$

2. El hecho de que el momento resistente de la sección oscile durante la rotación del eje, disminuyendo hasta un 17,5% en su máximo en nuestro ejemplo (Fig.4, d), conlleva que todos los puntos de la sección se hallen trabajando también sometidos a estas oscilaciones, y por ende sus tensiones no sólo no seguirán un patrón sinusoidal como sucedería en una pieza cilíndrica, sino que además, en función de su posición perimetral respecto a la grieta, tendrán un valor medio no nulo a considerar en el cálculo a fatiga de la pieza, dado que el eje pasará a presentar un cuadro de solicitaciones que no responde a la flexión pura, sino a la flexión con tracción.
3. En lo que se refiere al punto A estas oscilaciones alcanzan el 5% (Fig.4) en su máximo, y por ser una zona crítica en el estudio del crecimiento de la grieta, es un efecto a considerar en los cálculos analíticos del fenómeno de fatiga dado que esa mayoración será notada en las tensiones reales de esos puntos del frente de grieta.
4. Como se ha dicho antes, en el caso de que la grieta fuera lenticular o elíptica tal y como sugiere la bibliografía [2] su área casi se duplicaría, y aumentarían por tanto los valores de los demás parámetros, cálculo que se prevé realizar en el futuro.
5. Como parte de un mayor y necesario estudio analítico de las grietas en la superficie de ejes huecos, con miras a una optimización del diseño en lo que a dimensionamiento y cálculo de vida se refiere, el presente artículo proporciona por una parte la base del estudio tensional teórico de las mismas, y también ecuaciones no integradas en la bibliografía general de resistencia de materiales, o de fatiga.
6. Se abren así nuevas vías de investigación, y por ende de obtención de métodos prácticos de cálculo de ejes huecos, incluso en el ámbito del cálculo de crecimiento de grietas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] DIN. Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen. 743-1. Berlín: Beuth Verlag GmbH, 2000.
- [2] Madia M, Beretta S, Schödel M, et al. "Stress Intensity Factor Solutions for Cracks in Railway Axles". Engineering Fracture Mechanics. 2011. Vol. 78-5 p.782 (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2010.03.019>)
- [3] Финкель ВМ. Физические основы торможения разрушения. Moscú: Металлургия, 1977.
- [4] Zerbst U, Beretta S, Köhler G, et al. "Safe life and damage tolerance aspects of railway axles- A review". Engineering Fracture Mechanics. En prensa. p. 46-50 (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2012.09.029>)
- [5] Avilés R. *Análisis de fatiga en máquinas*. Madrid: Paraninfo, 2005. 464p. ISBN: 8497323440
- [6] Stephens RI, Fatemi A, Stephens RR, et al. *Metal Fatigue in Engineering*. Nueva York: John Wiley & Sons, Inc., 2001. p.162-165 ISBN: 0-471-51059-9
- [7] Школьник ЛМ, Коваленко ЮЕ, Мартынов НИ, et al. Полые оси и валы. Moscú: Машиностроение, 1968. p. 114 y ss.
- [8] Гутыржа СС, Хомяк ЮМ, АН Колеущенко. "Оболочечная модель трубчатого вала для исследования напряжений в соединениях с натягом". Вісник Східноукр. Нац. Унів. ім. Володимира Даля. Lugansk. 2003, №11(69) p.199.

Metodología para auditar la asignación de recursos a las actividades críticas de mantenimiento



METHODOLOGY FOR AUDITING THE RESOURCES ALLOCATION OF CRITICAL MAINTENANCE ACTIVITIES

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5819> | Recibido: 24/04/2013 • Aceptado: 07/10/2013

■ ■ ■ ■ ■
Mónica López-Campos *, Pablo Viveros-Gunckel *,**
Adolfo Crespo-Márquez *, Fredy Kristjanpoller-Rodríguez*,**
Raúl Stegmaier-Bravo **

* UNIVERSIDAD DE SEVILLA. Escuela Superior Industrial.
Dpto. Organización Industrial. Camino de los Descubrimientos,
s/n - 41092 Sevilla. Tfno: +34 954 487204.
mlopezcampos@us.es

** UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA.
Dpto. de Industrias. Avenida España 1680, Valparaíso, Chile.
pablo.viveros@usm.cl

ABSTRACT

- This paper proposes an audit methodology designed to provide savings in the allocation of resources for maintenance, in the form of activities, time, labor, spare parts and direct costs of corrective and preventive actions. Using graphs, this audit methodology analyzes the resources allocated to maintenance actions, and their consistency in terms of downtime and risk for critical failure modes. The description of the method is performed by a BPMN diagram including a format that summarizes the required input data. This audit methodology can be applied independently to assist in the fulfillment of organizational goals, or as part of an asset management system, as would be the PAS 55 standard.
- Keywords: auditing, allocation, resources, maintenance, BPMN, criticality, prioritization, spare parts.

RESUMEN

Este artículo propone una metodología de auditoría diseñada para proporcionar ahorros en la asignación de recursos para el mantenimiento, en forma de actividades, tiempo, mano de obra, repuestos y costos directos de las acciones correctivas y preventivas.

Por medio de gráficos, esta metodología de auditoría analiza los recursos asignados a las acciones de mantenimiento, y su consistencia en términos de indisponibilidad y de riesgo para los modos de fallo críticos. La descripción de la metodología se realiza mediante un diagrama BPMN, incluyendo un formulario que resume los datos de entrada requeridos. Esta metodología de auditoría puede ser aplicada de forma independiente, para colaborar en el cumplimiento de los objetivos de organizacionales, o como parte de un sistema de gestión de activos, como sería el estándar PAS 55.

Palabras clave: auditoría, asignación, recursos, mantenimiento, BPMN, criticidad, priorización, repuestos.

1. INTRODUCCIÓN

En el escenario global de negocios, en virtud de la actual desaceleración económica, se requiere una mayor atención a las operaciones de la planta con el fin de optimizar los recursos de todo tipo. En este sentido, el mantenimiento juega un papel crucial para la consecución de importantes ahorros de costes, a la vez que cumple su función de preservación de los activos. Un objetivo común de los métodos y tecnologías desarrolladas históricamente para la gestión del mantenimiento, se centra en la optimización de la toma de decisiones [1]. Este proceso de decisión tiene que ver con la identificación de los diferentes requerimientos de los activos físicos y con la creación de las mejores políticas de mantenimiento para cada elemento, asegurando que todos los activos se mantendrán en perfecto estado para ser utilizados, lo que significa asegurar un nivel de fiabilidad aceptable.

El logro de un buen nivel de fiabilidad, sobre todo en los activos críticos, requiere una apropiada priorización en la asignación de recursos (dinero, tiempo, recursos humanos y materiales) y una adecuada asignación de las políticas de mantenimiento de acuerdo con la criticidad de cada elemento mantenible [2]. Por lo tanto, una metodología de jerarquización conveniente y práctica se convierte en una herramienta importante para el éxito de la función de mantenimiento.

Con el fin de ejecutar las acciones de mantenimiento en el menor tiempo posible, es necesario asegurar la existencia de repues-

tos y materiales requeridos. La gestión de los inventarios de repuestos y materiales para el mantenimiento y las operaciones es una cuestión vital y compleja, no solo relacionada con la logística y las funciones financieras, sino también con los datos técnicos de mantenimiento [3]. En este sentido, una vez más la jerarquización es una herramienta adecuada para gestionar las políticas de inventarios de repuestos y materiales.

La metodología propuesta en este trabajo, la cual es modelada utilizando el estándar internacional BPMN (*Business Process Modeling Notation*), está enfocada en auditar el uso de los recursos de mantenimiento, de acuerdo con un análisis de priorización de los modos de fallo, a fin de contribuir en el logro de los objetivos generales de la organización, o incluso para ser parte de un sistema de gestión de activos, tal como se propone en la norma PAS 55, por lo que la utilización de esta metodología coadyuva en la obtención de ahorros y en la mejora de productividad empresarial.

BPMN siendo el lenguaje en el que se modela la metodología de auditoría propuesta en este artículo, es una notación gráfica estandarizada para el modelado de procesos de negocio, sirviendo como lenguaje común entre el personal que diseña y define los procesos de negocio (gestores y analistas) y los desarrolladores técnicos (quienes implementan los procesos diseñados). Dadas sus características, el uso de BPMN agrega valor a la metodología propuesta ya que abre la puerta a su implementación y automatización. BPMN actualmente es mantenida por el *Object Management Group*, una organización sin ánimos de lucro dedicado al establecimiento de estándares de tecnologías orientadas a objetos [4].

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El establecimiento de prioridades y la toma de decisiones para el mantenimiento y las operaciones no son temas nuevos, de hecho su importancia es bien conocida desde los años 60 [5]. Desde entonces, se ha impulsado el uso de una variedad de métodos cuantitativos y gráficos. Lamentablemente, tanto a partir de investigaciones publicadas [6], como de la experiencia directa de los autores de este artículo con las empresas, se revela que el enfoque metodológico para la priorización en el mantenimiento y las operaciones es muy escaso en la realidad industrial.

En muchos casos, incluso si una empresa tiene el serio propósito de aplicar alguna metodología, la toma de decisiones y la evaluación de los resultados de haber elegido determinada política de mantenimiento o de inventarios es lenta y costosa.

Es por esto que los autores presentan en este artículo, una metodología que intenta facilitar este proceso de auditoría de la utilización de los recursos destinados a las actividades de mantenimiento, de acuerdo con un análisis de priorización de los modos de fallo. Esta metodología utiliza gráficos para clarificar el análisis de resultados, y puede ser útil en varios aspectos: 1) para auditar las actividades del plan de mantenimiento, para determinar si el plan existente se centra en los modos de fallo críticos, en términos de utilización de los recursos, 2) para trazar las mejoras de rendimiento de un determinado ítem mantenible y su efecto sistémico 3) para ofrecer una visualización rápida y sencilla cuando se comparan dos

alternativas de equipos o de políticas de mantenimiento, y 4) para ayudar a determinar los inventarios y los requerimientos de repuestos. El estándar internacional BPMN es utilizado para modelar los procesos relacionados a la metodología propuesta, lo cual es un valor agregado orientado a una posible automatización del método.

Para completar el panorama general de la priorización para el mantenimiento, la Sección 3 de este artículo presenta un breve reconocimiento de las técnicas más importantes de análisis de criticidad, jerarquización y gestión de repuestos. La Sección 4 describe la metodología de auditoría propuesta y, por último, la sección 5 ofrece las conclusiones y futuras líneas de investigación.

3. ESTADO DEL ARTE

El mantenimiento ha cambiado enormemente en las últimas décadas debido al aumento en la variedad de los activos físicos, al aumento de la complejidad del diseño, la creación de nuevas técnicas de mantenimiento y nuevas perspectivas en la organización del mantenimiento [5]. Por lo tanto, el mantenimiento de hoy no solo consiste en la reparación de los fallos tan pronto como sea posible, sino también en mantener el equipo operando con niveles específicos de eficiencia y eficacia. Para llevar a cabo una gestión eficiente del mantenimiento es necesario realizar una selección de ítems basados en diferentes criterios, tales como su costo o su recurrencia de fallos [7]. La idea es identificar los equipos críticos para dar prioridad a su mantenimiento, para que los recursos se inviertan de forma eficaz y eficiente. A continuación, un breve análisis de algunas de las técnicas más representativas para la definición de la criticidad de los elementos mantenibles y sus repuestos correspondientes.

3.1. ANÁLISIS DE CRITICIDAD Y PRIORIZACIÓN EN LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO

Para establecer un plan de mantenimiento eficaz y eficiente: “una serie de tareas de mantenimiento que incluyen actividades, procedimientos, recursos y tiempos necesarios para realizar el mantenimiento” [8] es necesario dar prioridad a los activos de acuerdo a las estrategias de mantenimiento. Esta priorización se puede hacer mediante una combinación de métodos, como los siguientes:

- La adopción de las recomendaciones del fabricante, como las contenidas en manuales de operaciones y mantenimiento, o en documentos similares, basándose en la experiencia del personal con el activo o con activos similares,
- Revisión y análisis de documentación técnica para cada activo, tales como diagramas, procedimientos técnicos, etc. El objetivo es adaptar las recomendaciones del fabricante a las condiciones reales de trabajo o a las necesidades especiales de mantenimiento,
- Uso de técnicas de mantenimiento como RCM u otros métodos con el mismo propósito, teniendo en cuenta los requisitos reglamentarios u obligatorios, recomendaciones de seguridad de funcionamiento, regulaciones ambientales, etc.

- Otros.

La mayoría de estas técnicas utilizan representaciones gráficas que muestran el comportamiento de los fallos y sus consecuencias. Estos gráficos se construyen a partir de datos obtenidos a partir de registros históricos. Algunas de las técnicas de priorización más difundidas en la actualidad son las siguientes:

- Análisis de Pareto [9]
- Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) [10] and Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA) [11]
- Reliability-Centered Maintenance [5]
- Análisis de dispersión de Jack-Knife [12]
- Técnica de evaluación del riesgo [13,14]
- Fuzzy multi-criteria decision making [15, 16]
- Cost scatter diagram CSD [17]
- Analytic Hierarchy Process AHP [18, 19]
- Decision making grid DMG [20]
- System Efficiency Influence Diagram SEID [21]
- Graphical analysis for maintenance management GMM [22].

Entre estas técnicas resaltan especialmente las tres primeras por su amplio reconocimiento y uso en la industria, tanto en empresas manufactureras, como en empresas de servicios. El análisis FMEA/FMECA se lleva a cabo además desde la fase de diseño para prevenir fallos futuros, por ejemplo en la industria automotriz. En tanto que el análisis RCM ha demostrado ser una herramienta valiosa para definir un programa de mantenimiento basado en la confiabilidad de los equipos, extendiéndose su uso en industrias altamente reguladas, como la nuclear [23].

Tomando como referencia las técnicas antes mencionadas, la metodología que se propone en este artículo pretende ser una propuesta integral que incluye las ventajas de los indicadores de confiabilidad (indisponibilidad y riesgo) junto con elementos de gestión del mantenimiento y análisis de causa-raíz (tiempo, mano de obra, costos, etc.), resultando una herramienta práctica de análisis gráfico.

3.2. GESTIÓN DE REPUESTOS PARA EL MANTENIMIENTO

El tiempo de reparación (TTR) depende, entre otros factores, de la disponibilidad de las piezas de repuesto necesarias para recuperar la funcionalidad del elemento. Si las piezas de repuesto no están disponibles, el TTR podría ser prorrogado, a veces indefinidamente. Por el contrario, un stock excesivo de piezas de repuesto implica los ya conocidos costos de inventario. La gestión de repuestos es por lo tanto, un tema importante para asegurar el óptimo desempeño de la función de mantenimiento.

La gestión de repuestos tiene diferentes características que lo diferencian de las políticas comunes aplicables al WIP u otros inventarios [24]. Por ejemplo, las piezas de repuesto se distinguen porque su nivel de consumo es esporádico, dependiendo del número de equipos que la usen y del nivel intrínseco de fiabilidad [3].

Aunque la gestión de repuestos es un problema “viejo”

ampliamente discutido en la literatura [24]; los autores de este artículo han encontrado que la mayoría de las empresas no utilizan una metodología coherente. Cavalieri y cols. [3] abundan este tema, afirmando que si bien se ha escrito mucho sobre la gestión de repuestos, hay una falta de un enfoque claro y completo que permita la fácil adopción de una metodología en la industria.

De acuerdo con trabajos previos [25, 3], una clasificación de la criticidad de los elementos puede ser útil para determinar las piezas de repuesto que tienen que ser prioridad en cuanto a su existencia en inventarios. Una técnica de jerarquización utilizada tradicionalmente es la clasificación ABC, basada en el principio de Pareto [26, 27]. Otra técnica más reciente es el modelo AHP, que establece tres niveles jerárquicos: vital, esencial y deseable [28, 29].

La metodología propuesta en este trabajo, como parte de su enfoque en la priorización, proporciona una herramienta gráfica que facilita el proceso de toma de decisiones para determinar la política de gestión de repuestos más óptima.

4. METODOLOGÍA PROPUESTA

4.1. FUNCIONAMIENTO DE UNA AUDITORÍA DE GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO

Es a partir de los años 2000 cuando la auditoría de indicadores de mantenimiento se ha convertido en un tema más recurrente. Varios autores han desarrollado una variedad de sistemas de auditoría: Al-Muhaisen y Santarisi [30] (a través de un diagrama de red), Carnero y Delgado [31] (que propone un sistema experto), Macián et al. [32] (Desarrollando un análisis DAFO), Bana e Costa et al. [33] (Proponiendo un modelo de auditoría orientada al mantenimiento predictivo, utilizando la técnica multicriterio MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*)).

El objetivo principal de la metodología propuesta en este trabajo es lograr una estructura de referencia para auditar la coherencia de las políticas de mantenimiento existentes (en relación con asignación de recursos) con respecto al comportamiento real y la criticidad de los elementos a mantener (en base a sus modos de fallo). Mediante dicha auditoría se identificarán oportunidades de mejora para producir una mayor disponibilidad de equipos e instalaciones, al menor costo. Respecto a las técnicas previamente desarrolladas, el carácter distintivo de la metodología de auditoría propuesta en este documento, es que se centra directamente en la criticidad de los modos de fallo, su frecuencia y duración, para determinar gráficamente la conveniencia de la asignación de varios tipos de recursos (presupuesto, número de actividades, tiempos asignados, recursos humanos y piezas de repuesto).

La metodología propuesta puede utilizarse como parte de las acciones a tomar, para acreditar el cumplimiento de la reconocida norma de gestión de activos PAS 55. PAS 55 es un estándar británico, referente internacional, que define los requerimientos para establecer y auditar un sistema de gestión integrado y optimizado a lo largo de todo el ciclo de vida, para todo activo físico [34]. Esto por supuesto incluye sustancialmente la función de mantenimiento.

Llevar a cabo una auditoría para la asignación de recursos de mantenimiento, como la que facilita la metodología propuesta, puede ser evidencia importante para acreditar el requerimiento de “Auditoría”, señalado por el estándar PAS 55 en su apartado 4.6.4, dentro de la sección que la norma dedica a la evaluación del desempeño y la mejora continua del sistema de gestión de activos [35]. Utilizando la herramienta gráfica que aquí se propone, es posible visualizar oportunidades de mejora en la asignación de recursos para el mantenimiento, así como dar evidencia de mejoras en la confiabilidad de los equipos.

Dado que la presente propuesta se trata de una metodología de auditoría, su ciclo de funcionamiento inicia con la verificación de la pertinencia de las políticas de mantenimiento y gestión de repuestos actuales, con respecto a la criticidad de los modos de fallo, (tomando como referencia el ciclo de Deming, se iniciaría con la etapa “Verificar”, seguida por la planificación que incluye la gestión de recursos, para finalmente “Implementar”. La Figura 1 muestra la secuencia de etapas de gestión para la metodología de auditoría propuesta.



Fig. 1: Secuencia de etapas desarrolladas por la metodología de auditoría

4.2. MODELANDO EL PROCESO DE AUDITORÍA

La operación de la metodología propuesta puede ser modelada a través de un diagrama de BPMN (Figura 2). Este diagrama está conformado por tres procesos principales (verificación, planificación y gestión de recursos, e implementación) y cada proceso puede subdividirse en varios sub-procesos (por ejemplo la verificación se divide en etapa de análisis de criticidad y en etapa de auditoría); al mismo tiempo cada sub-proceso está conformado por actividades, utilizando el número de niveles necesarios para caracterizar el funcionamiento de la metodología propuesta. La Figura 2 expone el intercambio de información entre los tres procesos principales.

El desarrollo de la metodología comienza con la información generada a raíz de la ejecución del mantenimiento y los datos almacenados en el sistema de gestión de mantenimiento asistido por ordenador (*Computer Maintenance Management System* o CMMS), el cual es un sistema de administración de base de datos con información de mantenimiento; después de identificar el equipo crítico (por medio de un análisis de RCM, la experiencia de los mantenedores, etc.), sus modos de fallo críticos son identificados y a continuación, el plan de auditoría tiene que ser definido. Durante la auditoría, se analiza la asignación de recursos en función de la criticidad de los modos de fallo identificados. La información requerida para este fin, se resume en el formato propuesto en la Figura 3.

Los resultados del informe generado por el proceso de auditoría es el elemento de entrada para optimizar el número de recursos asociados a prevenir y corregir los modos de fallo. Una vez optimizada la asignación de recursos, las mejoras tienen que ser documentadas, para luego ser implementadas, generando nuevos planes y programas de mantenimiento hasta

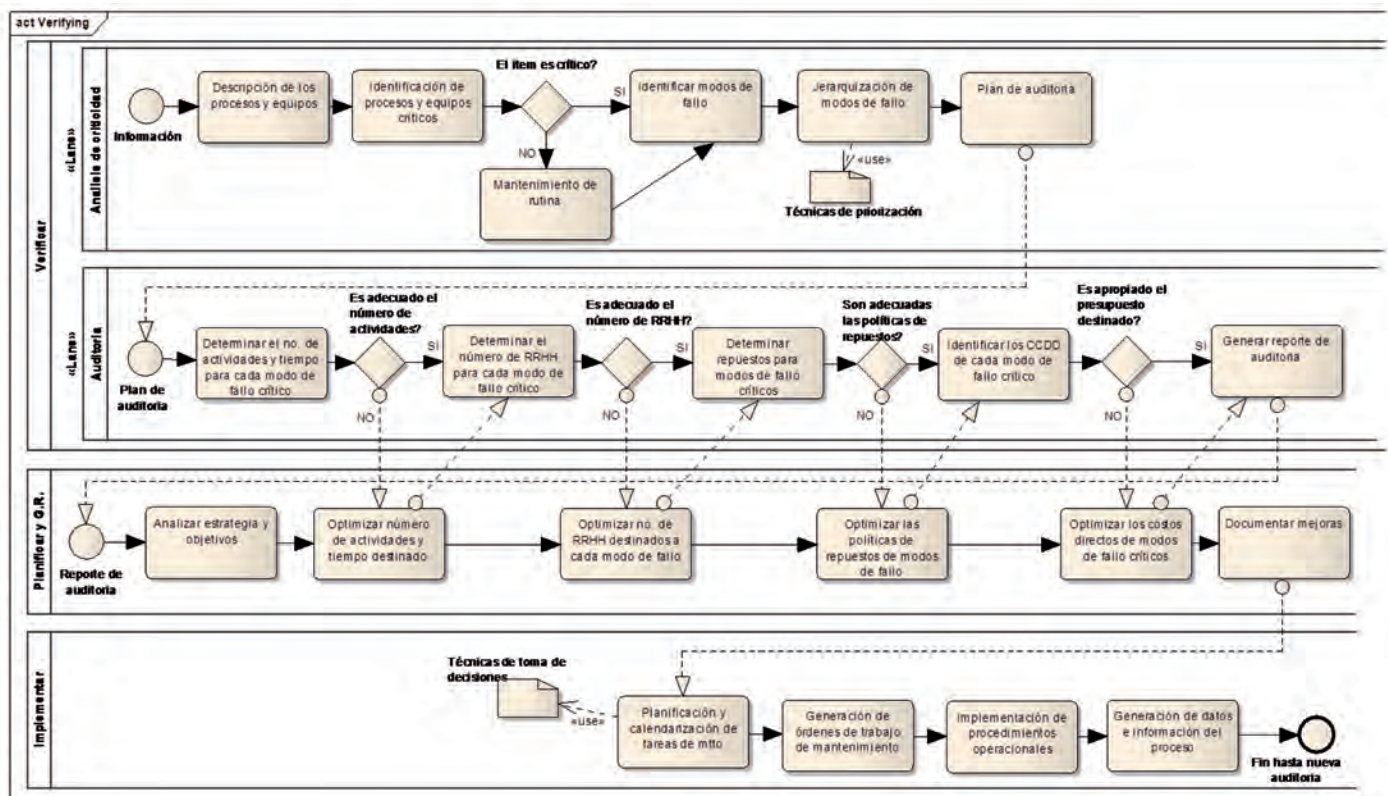


Fig. 2: Diagrama BPMN que expone el intercambio de información entre los procesos

el nuevo proceso de auditoría, como parte del ciclo de mejora continua propuesto por la norma PAS 55.

Así, esta metodología permitirá responder las siguientes cuestiones:

- 1) ¿Cuáles son los modos de fallo críticos de los equipos críticos?, ¿Cuál es la jerarquía de estos modos de fallo?
- 2) ¿Cómo se descomponen los factores de riesgo que inciden en los modos de fallo?
- 3) ¿Qué relación existe entre la indisponibilidad de cada modo de fallo y su riesgo o criticidad respectiva?, ¿Existe coherencia?
- 4) ¿Qué factores deben atenderse para aumentar la disponibilidad y disminuir el riesgo?
- 5) ¿Existe coherencia entre la criticidad del modo de fallo y las características de las actividades planificadas, como el número de actividades, el tiempo empleado en cada actividad y los recursos orientados a estas actividades?
- 6) ¿Qué relación existe entre las actividades correctivas y las actividades planificadas para cada modo de fallo?
- 7) ¿Existe coherencia entre la criticidad y la política de abastecimiento para repuestos?

Para ser capaz de responder a estas preguntas es necesario entrar en detalle sobre la jerarquización de los modos de fallo. A continuación, en la sección 4.3, se describe el algoritmo necesario.

ID del Modo de Fallo:			
Proceso correspondiente:			
Equipo correspondiente:			
Fecha:			
Datos para priorización			
Ol:		Consecuencias	Probabilidad
Flex:		(Con):	de fallo (P):
MC:			Detectabilidad
Ihse:			(D):
Criticidad (C):			
Frecuencia de fallo:			
MTTR:			
Datos para auditoría			
Número de actividades de mtto correctivo:			
Número de actividades de mtto preventivo:			
Tiempo dedicado al mantenimiento correctivo:			
Tiempo dedicado al mantenimiento preventivo:			
RRHH asignados a acciones correctivas:			
RRHH asignados a acciones preventivas:			
Repuestos requeridos para mantenimiento:			
Costos directos de mantenimiento correctivo:			
Costos directos de mantenimiento preventivo:			

Fig.3: Formato propuesto para recopilar información

4.3. PASO A PASO DE LA JERARQUIZACIÓN DE MODOS DE FALLO

Tomando como referencia el diagrama expuesto en la Fig. 2, la metodología de jerarquización es la que sigue.

4.3.1. Determinación de la criticidad de los modos de fallo

El riesgo en mantenimiento puede ser definido como el impacto potencial, ya sea positivo o negativo, sobre un activo, que puede surgir de algún evento presente o futuro. El riesgo

comúnmente se asocia con la probabilidad de que algo ocurra y generalmente de una forma negativa.

Con la finalidad de identificar los riesgos y crear planes para afrontarlos adecuadamente, se hace necesaria la gestión de riesgos. Esta gestión tiene una gran importancia para determinar hacia dónde dirigir los recursos de una manera económicamente efectiva y eficiente, ya que normalmente el número de activos potencialmente riesgosos es mayor que la cantidad de recursos disponibles para gestionarlos [13].

Para un proceso dado, una vez que su equipo crítico y modos de fallo correspondientes han sido identificados. La primera etapa comienza con el cálculo de la criticidad de cada modo de fallo. Esta criticidad se determina teniendo en cuenta el riesgo [36], generalmente traducido como la probabilidad de fallo y las posibles consecuencias; en algunos casos, se integra además la posibilidad de detectar los fallos [5]. Estos factores se calculan por los expertos de proceso. La Ecuación 1 muestra el cálculo de la criticidad:

$$C = P \times Com \times D \quad (1)$$

Donde C es la criticidad del modo de fallo, P es la probabilidad de fallo, Com es el valor total de las consecuencias en caso de que ocurra, y D es el factor de detectabilidad (dificultad de detectar la ocurrencia del modo de fallo). El valor de las consecuencias es obtenido considerando varios factores, expresados en la Ecuación 2.

$$Con = (OI \times Flex) + MC + Ihse \quad (2)$$

Donde Con es el valor total de las consecuencias, OI es el impacto operacional del fallo (sus efectos en la operación del sistema y que se expresa por ejemplo en el MTTR), $Flex$ es la flexibilidad operacional (si existe una alternativa de producción y se expresa por ejemplo en el MTBF), MC es el costo de mantenimiento y $Ihse$ es el posible impacto en la salud, seguridad y factores medioambientales. La escala utilizada para evaluar cada criterio debe ser definida por el comité de auditoría.

4.3.2. Priorización de modos de fallo críticos

La priorización se apoya en la construcción de un gráfico de Indisponibilidad vs. Criticidad (ver Figura 4) para distinguir los modos de fallo más o menos críticos de un equipo particular. Este análisis gráfico inicial permite identificar los principales modos de fallo para enfocarse en ellos a través de sucesivos análisis, que exploran criterios como el número de actividades, el tiempo y los recursos humanos asignados, así como el número de piezas de recambio y presupuesto económico disponibles para cada modo de fallo.

La métrica del indicador de disponibilidad/indisponibilidad está condicionada a cada organización, por lo cual esta propuesta metodológica requiere tener claridad en cómo se construye dicho indicador. Algunas preguntas claves en este sentido son: ¿el tiempo utilizado en mantenimiento preventivo es incluido como parte del tiempo *down time*? y ¿el tiempo utilizado en el mantenimiento preventivo es considerado para el cálculo de costo de ineficiencia o costo asociado a la no producción?

Los autores de este artículo asumen que el tiempo preventivo no es considerado para el cálculo de la indisponibilidad, y por lo tanto el eje x de las gráficas siguientes corresponde al número de eventos correctivos. Además, el tiempo dedicado al mantenimiento preventivo no representa un costo de ineficiencia para el sistema, por lo que la asociación con la consecuencia operacional está relacionada solo a los eventos no planificados.

Para los gráficos propuestos en esta metodología (Figuras 4, 5, 6 y 7), se tienen las siguientes consideraciones:

- El eje horizontal cuantifica el *número de fallos o eventos de fallo* y el eje vertical cuantifica el *tiempo medio de reparación asociado a esos fallos (Mean Time to Repair, MTTR)*, quedando así definida la indisponibilidad por ambos factores.
- El diámetro de cada círculo representa, relativamente respecto a los demás círculos (distintos modos de fallo), el grado de criticidad o la cantidad de recursos asignados para cada modo de fallo. A mayor criticidad o recursos asignados al modo de fallo, mayor será el diámetro del círculo.
- Los colores internos de cada círculo representan categorías internas dentro de cada criterio. Si se trata de un gráfico de criticidad, los colores identifican el tipo de riesgo. Si se trata de un gráfico de recursos asignados, la distinción de colores se hace para diferenciar intervenciones de tipo preventivo o correctivo.
- Figuras triangulares y círculos, rellenos o blancos, representan condiciones particulares de los gráficos referentes a la naturaleza de las piezas de recambio (Figura 6), o al estado del modo de fallo antes o después de una intervención de mejora (Figura 7).
- El gráfico que inicia el análisis y que dirige la subsiguiente exploración, es el gráfico Indisponibilidad vs. Criticidad (Figura 4). Los demás gráficos (Figuras 5, 6, 7) pueden o no utilizarse en función de los requerimientos de información y características particulares del caso de estudio, aunque se recomienda el análisis completo para obtener resultados más valiosos.

Específicamente, para el gráfico Indisponibilidad vs. Criticidad de la Figura 4, cada círculo representa una medida de la criticidad de cada modo de fallo y cada porción de color interna al círculo se refiere al tipo proporcional de las consecuencias asociadas (salud, seguridad y riesgo ambiental, el riesgo económico o riesgo de impacto operacional). Este análisis evidentemente está acotado a un equipo particular y sus respectivos modos de fallo, en un periodo de tiempo acotado y que se dispone de la suficiente información para realizar los análisis.

El análisis de este gráfico (Figura 4) proporciona respuesta a la pregunta 1 (¿Cuáles son los modos de fallo críticos de los equipos críticos?, ¿Cuál es la jerarquía de estos modos de fallo?), ya que es posible determinar el grado de criticidad de cada modo de fallo y hacer la observación de los riesgos asociados. También se responde a la pregunta 2 (¿Cómo se descomponen los factores de riesgo que afectan a los modos de fallo?) Las partes de color de los círculos muestran cómo se descomponen los factores de riesgo para cada modo de fallo. Igualmente se responde a la pregunta 3 (¿Cuál es la relación entre la indisponibilidad asociada al modo de fallo y su criticidad?, ¿Hay coherencia?), ya que es posible observar la relación entre el radio del círculo y la línea de indisponibilidad en el centro de la gráfica. Finalmente, el gráfico también responde a la pregunta 4 (¿Qué factores deben atenderse para aumentar la disponibilidad y reducir los riesgos?), ya que la criticidad de cada modo de fallo queda de manifiesto.

Una vez identificados los modos de fallo, de mayor o menor criticidad, es necesario analizar la cantidad de recursos asignados a ellos, mediante el uso de varios gráficos más. La metodología para el desarrollo de este análisis se presenta a continuación. El orden de análisis se ha establecido según la secuencia de información a consultar en cualquier base de datos.

4.3.3. Análisis del número de actividades de mantenimiento asignadas a los modos de fallo

Este análisis gráfico compara los modos de fallo críticos con el número de actividades de mantenimiento asignadas (ver Figura 5) mediante una comparación de Indisponibilidad (número de eventos de fallo y MTTR) vs. Número de actividades de mantenimiento asignadas. El radio de la circunferencia asociada a cada modo de fallo representará el número total de actividades de mantenimiento (preventivas y correctivas) desarrolladas durante el tiempo de evaluación correspondiente.

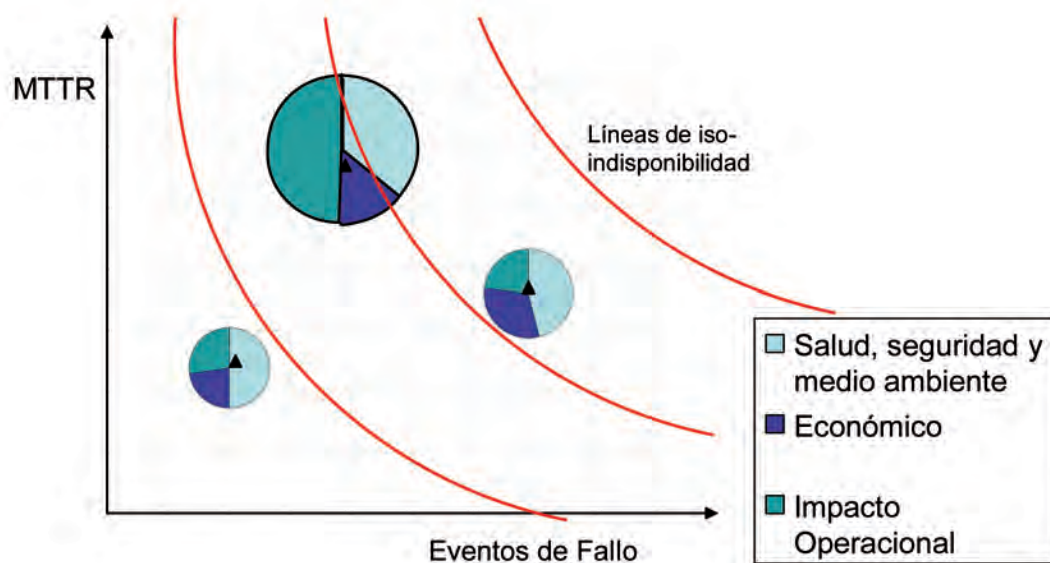


Fig. 4: Representación gráfica de Indisponibilidad vs. Criticidad

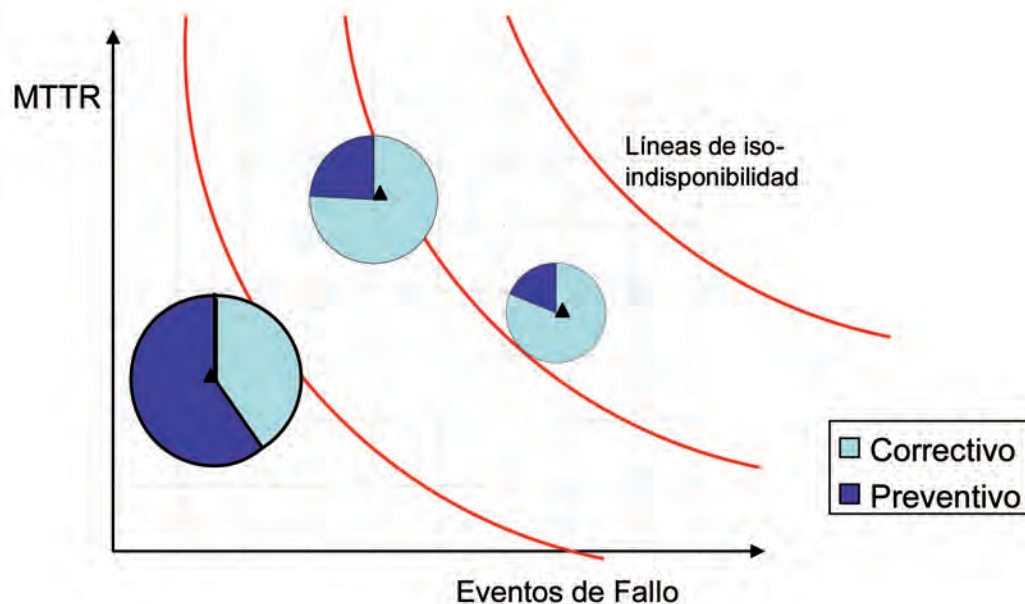


Fig. 5: Representación gráfica de Indisponibilidad vs. Recursos (actividades, tiempo, personal) asignados al modo de fallo

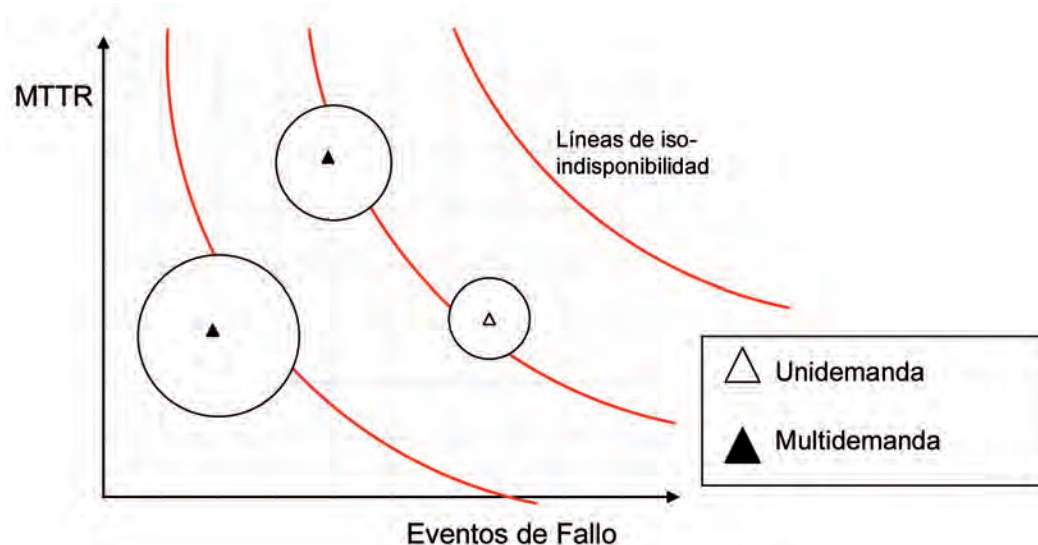


Fig. 6: Representación gráfica de Indisponibilidad vs. Piezas de recambio disponibles asignadas

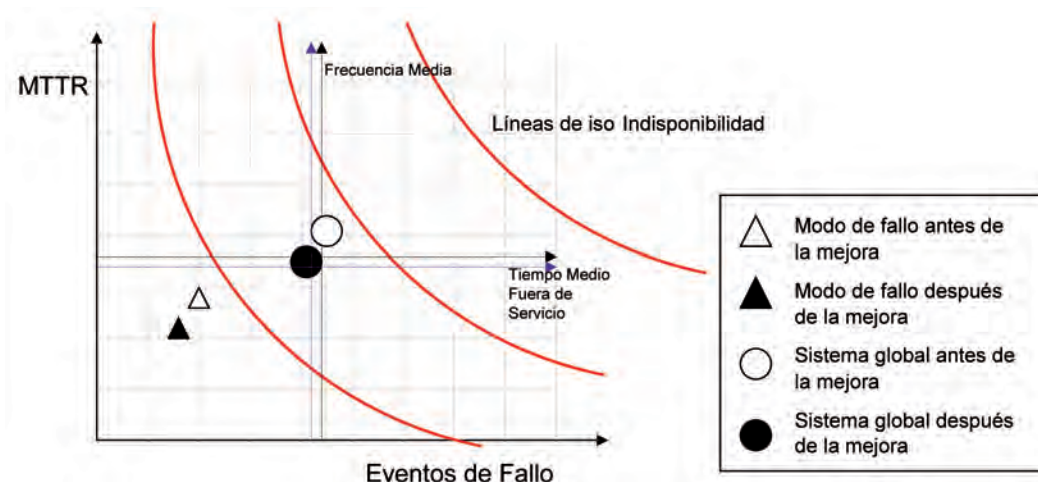


Fig. 7: Representación gráfica de seguimiento

A pesar de que el número de actividades correctivas ya está especificado inherentemente en el gráfico (eje x), cada círculo que representa un modo de fallo está dividido proporcionalmente para analizar la relación entre el número de actividades preventivas vs. correctivas. Este gráfico ayuda a responder parcialmente las preguntas número 5 y 6 (¿Existe coherencia entre la criticidad del modo de fallo y las características de las actividades planificadas?).

4.3.4. Análisis del tiempo asignado a las actividades de mantenimiento para cada modo de fallo

Otro factor importante para analizar la eficacia de las intervenciones de mantenimiento sobre el equipo seleccionado es el tiempo utilizado para prevenir o corregir los modos de fallo críticos. Un gráfico de Indisponibilidad vs. Tiempo asignado ayuda a analizar este criterio. El tamaño de las circunferencias representa el tiempo total asignado para ejecutar las actividades de mantenimiento y cada porción coloreada indica si la actividad corresponde al tiempo utilizado en las actividades de mantenimiento preventivo o correctivo (Figura 5). Este gráfico ayuda a responder parcialmente las preguntas número 5 y 6 respectivamente.

4.3.5. Análisis del número de recursos humanos asignados a cada modo de fallo

Un gráfico de Indisponibilidad vs. Número de recursos humanos asignados a cada modo de fallo

es la herramienta sugerida para analizar la eficacia de la asignación de personal a las intervenciones de mantenimiento. El tamaño de las circunferencias representa el número de personal asignado y cada porción coloreada indica proporcionalmente si la actividad corresponde a mantenimiento preventivo o correctivo (Figura 5). Este gráfico, en conjunto con los representados en la Figura 5 y 6, responde completamente las preguntas 5 y 6.

4.3.6. Análisis de piezas de recambio disponibles por cada modo de fallo

El análisis de las piezas de recambio asociadas a los modos de fallo críticos puede hacerse mediante una gráfica de Disponibilidad vs. Número de piezas de recambio disponibles (Figura 6). El tamaño de las circunferencias representa la cantidad de piezas de recambio disponibles en almacén. Además, dado que la pieza de recambio pudiese ser demandada por múltiples equipos, áreas y/o bodegas satélites al interior de la empresa, es necesario hacer la diferencia en la representación gráfica, lo cual se logra agregando un color en el centro de la circunferencia, el cual indicará si el repuesto tiene uno o más demandantes. Si el centro es oscurecido, implica que existe más de un demandante. Con esto se responde la pregunta 7 (¿Existe coherencia entre la criticidad y la política de abastecimiento para repuestos?). Evidentemente, este análisis proporciona datos de entrada iniciales para que el analista de Ingeniería de confiabilidad o mantenimiento haga una investigación en mayor detalle para la definición de planes de acción y/o identificación de oportunidades de mejora.

4.3.7. Análisis del presupuesto asignado a los costos directos

El análisis de los recursos económicos asignados a cada modo de fallo crítico puede hacerse a través de un gráfico de Disponibilidad vs. Costos directos. El tamaño de las circunferencias en este caso representa el monto de los costos directos asignados para ejecutar las actividades de mantenimiento y cada porción coloreada indica si la actividad corresponde a mantenimiento preventivo o correctivo (Figura 5). Este gráfico ayuda a responder a la pregunta número 5.

4.4. DESPUÉS DE LA JERARQUIZACIÓN

Además de los anteriores, es posible generar otros gráficos que añaden información acerca de los modos de fallo críticos. Como se ha mencionado previamente, la metodología propuesta se puede utilizar para visualizar los resultados obtenidos en la asignación de recursos para el mantenimiento y así mejorar la toma de decisiones. La metodología propuesta además hace posible:

- 1) revisar la eficacia y la eficiencia de la asignación de recursos para el mantenimiento,
- 2) dar seguimiento a la ejecución de mejoras,
- 3) comparar alternativas y
- 4) determinar las necesidades de piezas de recambio.

Por ejemplo, con el fin de analizar los resultados de un plan de mejora, un seguimiento gráfico puede ser generado (ver Figura 7). En este tipo de gráfico, un modo de fallo crítico se representa mediante una figura geométrica (un triángulo en

la Figura 7) de color diferente para representar el comportamiento antes o después de las mejoras. Otra figura geométrica (un círculo en la Figura 7) representa el comportamiento general del sistema, utilizando un color diferente para representar si el estado es observado antes o después de las mejoras. De esta manera, un auditor puede evaluar las mejoras en el plan de mantenimiento, teniendo en cuenta si han sido eficaces, o si es necesario hacer algunos ajustes en el plan nuevo. Esto es muy importante porque, a través de un seguimiento regular, es posible evaluar si los objetivos del sistema se cumplen.

5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

Una asignación adecuada de recursos (materiales y humanos) a los modos de fallo críticos es esencial para optimizar el mantenimiento y las funciones de producción, y por lo tanto el cumplimiento de las metas organizacionales. En este trabajo se han resumido las técnicas más utilizadas dentro de la función de mantenimiento y hemos propuesto una nueva metodología para auditar y mejorar la asignación de recursos, de acuerdo a la criticidad de los modos de fallo identificados. Además, esta metodología puede ser utilizada como parte del estándar PAS 55, para revisar los cambios después de aplicar un proceso de mejora, para comparar alternativas, o para determinar las necesidades de piezas de repuesto. La criticidad de los modos de fallo, en términos de frecuencia de fallos, indisponibilidad y consecuencias de los fallos, se representa gráficamente en comparación con la cantidad y tipo de los recursos asignados. Un diagrama BPMN se ha utilizado en este documento para ilustrar la metodología propuesta, que básicamente se compone de tres procesos: la verificación (que incluye jerarquización y auditoría), la planificación (que incluye la gestión de recursos) y la implementación. Una propuesta para una futura investigación relacionada, sería la aplicación práctica de la metodología en un equipo crítico de la industria. Concretamente se está trabajando sobre una auditoría a los modos de fallo críticos identificados en una minera Chilena. Además, dado que es un problema transversal en el área de mantenimiento, también se están desarrollando casos de estudio para las industrias de servicio de tratamiento de aguas servidas y celulosa. El éxito de esta propuesta está en la facilidad de aplicación, escalabilidad para diferentes procesos y por supuesto, la automatización para su rápida implementación y análisis de oportunidades de mejora.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Ingeniera Civil Industrial Nicole Jaramillo Miranda por la participación activa en el desarrollo de esta investigación.

Esta investigación está financiada por el Ministerio Español de Ciencia e Innovación a través del proyecto EMAINS (DPI2011-22806) "SISTEMAS INTELIGENTES DE MANTENIMIENTO. PROCESOS EMERGENTES DE E-MAINTENANCE PARA LA SOSTENIBILIDAD DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN". Igualmente la investigación ha

recibido fondos FEDER y financiación del Séptimo Programa Marco de la Comunidad Europea (FP7/2007-2013 en virtud de acuerdo de subvención n.º PIRSES-GA-2008-230.814).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] López Campos M, Crespo Márquez A. "Modelling a maintenance management framework based on PAS 55 standard". *Quality and Reliability Engineering International*. 2011. Vol. 27-6, p. 805-820. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/qre.1168>.
- [2] Barberà L, Crespo A, Viveros P, et al. "Advanced Model for Maintenance Management in a continuous improvement cycle: integration into the business strategy". *Int. J. Systems Assurance Engineering and Management*. 2012. Vol. 3-1, p.47-63. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s13198-012-0092>.
- [3] Cavalieri S, Garetti M, Macchi M, et al. "A decision-making framework for managing maintenance spare parts". *Production planning and control*. 2008. Vol.19-4, p. 379-396. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/09537280802034471>.
- [4] Object Management Group Website. *Business Process Model and Notation*. <http://www.bpmn.org/> [August 10th, 2013].
- [5] Moubray J. *Reliability-Centred Maintenance*. 2a edición. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997. ISBN: 0 7506 3358 1.
- [6] Goti Elordi A, Egaña Errasti MM, Iturritxa Pérez de Albéniz A. "El estado del mantenimiento industrial en España. Encuesta sobre el estado del mantenimiento industrial y la aplicación de herramientas de apoyo a la decisión en el ámbito". *DYNA*. 2009. Vol. 84, p.225-230.
- [7] Galar Pascual D, Berges Muro LF, Royo Sánchez J. "La problemática de la medición del rendimiento en la función mantenimiento". *DYNA*. 2010. Vol.85, p.429-438. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/3447>.
- [8] EN 13306:2001. *Maintenance terminology*. European Standard CEN (European Committee for Standardization). Brussels, 2001.
- [9] Adjabi S, Adel-Aissanou K, Azi M. "Optimization of the maintenance function at a company. Safety, Reliability and Risk Analysis: Theory, Methods and Applications". En *Proceedings of the Joint ESREL and SRA-Europe Conference* 2009. P. 611-617.
- [10] Stamatis DH. *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution*. Milwaukee: Asq Press, 2003.
- [11] Bowles JB, Peláez CE. "Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis". *Reliability Engineering and System Safety*. 1995. Vol. 50-2, p. 203-213.
- [12] Knights PF. "Down time priorities, Jack-knife diagrams, and the business cycle". *Maintenance Journal*. 2004. Vol. 17- 2, p.14-21.
- [13] Crespo Márquez A. *The Maintenance Management Framework: models and methods for complex systems maintenance*. Springer-Verlag: London, 2007. ISBN: 978-1-84628-820-3.
- [14] Marhavihas PK, Koulouriotis DE. "A risk-estimation methodological framework using quantitative assessment techniques and real accidents' data: Application in an aluminum extrusion industry". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2008. Vol. 21-6, p. 596-603. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2008.04.009>. ISSN: 0950-4230.
- [15] Ghosh D, Roy S. "A decision-making framework for process plant maintenance". *European Journal of Industrial Engineering*. 2009. Vol. 4-1, p. 78-98.
- [16] Qi HS, Alzaabi RN, Wood AS, Jani M. "A fuzzy criticality assessment system of process equipment for optimized maintenance management". *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/0951192X.2013.814160>.
- [17] Pascual R, Del Castillo G, Louit D, et al. "Business-oriented prioritization: A novel graphical technique". *Reliability Engineering and System Safety*. 2009. Vol. 94, p. 1308-1313. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2009.01.013>.
- [18] Dehghanian P, Fotuhi-Firuzabad M, Bagheri-Shouraki S, et al. "Critical Component Identification in Reliability Centered Asset Management of Power Distribution Systems Via Fuzzy AHP". *IEEE Systems Journal*. 2012. Vol.6-4, p. 593-602. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JSYST.2011.2177134>.
- [19] Bevilacqua M, Braglia M. "The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection". *Reliability Engineering & System Safety*. 2000. Vol. 70-1, p. 71-83.
- [20] Shahin A, Attarpour MR. "Developing decision making grid for maintenance policy making based on estimated range of overall equipment effectiveness". *Modern Applied Science*. 2011. Vol. 5-6, p. 86-97.
- [21] Pascual R, Godoy D, Louit DM. "Throughput centered prioritization of machines in transfer lines". *Reliability Engineering and System Safety*. 2011. Vol. 96, p. 1396-1401. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2011.05.006>.
- [22] Martínez LB, Márquez AC, Gunckel PV, et al. "The Graphical Analysis for Maintenance Management Method: A Quantitative Graphical Analysis to Support Maintenance Management Decision Making". *Quality and Reliability Engineering International*. 2013. Vol. 29-1, p. 77-87. DOI: 10.1002/qre.1296.
- [23] Martorell S, Muñoz A, Serradell V. "An approach to integrating surveillance and maintenance tasks to prevent the dominant failure causes of critical components". *Reliability Engineering and System Safety*. 1995. Vol.50-2, p. 179-187.
- [24] Kennedy WJ, Wayne Patterson J, Fredendall LD. "An overview of recent literature on spare parts inventories". *International Journal of Production Economics*. 2002. Vol. 76, p.201-215. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273\(01\)00174-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273(01)00174-8).
- [25] Dekker R, Kleijn M, De Rooij P. "A spare parts stocking policy based on equipment criticality". *International Journal of Production Economics*. 1998. Vol. 56/57-3, p. 69-77. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273\(97\)00113-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273(97)00113-8).
- [26] Mukhopadhyay SK, Joshi SN. "Methodology for identification of critical equipment for preventive maintenance". *Journal of the Institution of Engineers (India): Mechanical Engineering Division*. 1983. Vol. 64, p. 62-65.
- [27] Flores BE, Whybark DC. "Implementing multiple criteria ABC analysis". *Journal of Operations Management*. 1987. Vol. 7(1-2), p. 79-85.
- [28] Li SG, Kuo X. "The inventory management system for automobile spare parts in a central warehouse". *Expert Systems with Applications*. 2008. Vol. 34-2, p. 1144-1153. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2006.12.003>.
- [29] Molenaers A, Baets H, Pintelon L, et al. "Criticality classification of spare parts: A case study". *International Journal of Production Economics*. 2011. En prensa. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.08.013>.
- [30] Al-Muhaisen M, Santarisi N. "Auditing of the maintenance system of Fuhais plant/Jordan Cement Factories Co". *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2002. Vol. 8-1, p. 62-76. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/13552510210420595>.
- [31] Carnero C, Delgado S. "Maintenance audit by means of value analysis technique and decision rules: A case study in a bank". *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2008. Vol. 14-4, p. 329-342. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/13552510810909948>.
- [32] Macián V, Tormos B, Salavert JM, et al. "Methodology and theory: Methodology applied for maintenance technical audit in urban transport fleets". *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2010. Vol. 16-1, p. 34-43. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/13552511011030318>.
- [33] Bana e Costa CA, Carnero MA, Duarte OM. "A multi-criteria model for auditing a Predictive Maintenance Programme". *European Journal of Operational Research*. 2012. Vol. 217-2, p.381-393.
- [34] The Woodhouse Partnership Ltd. PAS 55 Web. <http://pas55.net/spanish/default.asp> [August 10th, 2013].
- [35] PAS 55-1:2008. *Asset Management*, BSI, U.K. 2008.
- [36] ISO 31000, 2002. *Current Draft Vocabulary for Risk Management – ISO/IEC Guide 73:2009*.

Comparativa entre sistemas constructivos de huecos para ascensores en función del análisis de ciclo de vida

COMPARATIVE ANALYSIS BASED AT THE LIFE CYCLE ASSESSMENT ON HOISTWAY OF RESIDENTIAL BUILDINGS

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5800> | Recibido: 25/03/2013 • Aceptado: 10/06/2013



Justo García Sanz-Calcedo, Sergio Pena-Corpa

UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA. Dpto. de Ingeniería Mecánica, Energética y de los Materiales. Avda. Santa Teresa de Journet, 38 - 06800 Mérida (Badajoz). Tfno: +34 924 387068. jgsanz@unex.es

ABSTRACT

- This paper compares environmental impact of traditional construction systems of hoistways made for elevators in residential building sites, using techniques based on Life Cycle Analysis (LCA), calculation of carbon footprint, quantifying total energy consumption and emissions in the material used as well as building and recycling of all materials in use. Furthermore, other environmental variables directly related with environment sustainability will be studied. We have simulated the analysis with a time frame of 50 years, 100 km track average for the transporting of materials and 15 km residues distance average from rubbish dump. The ceramic brick wall has proved to have the best behavior from building and maintenance cost, risk in health and safety and intensive use of workers point of view, variables all related with economical building aspects. On the other hand, from sustainability point of view it is proved that the 1/2 ceramic brick walls with rock wool insulation and one final layer with ceramic brick had the best environmental sustainability behavior. It proved that from an environmental sustainability point of view, traditional materials and masonry construction systems are less polluting than concrete construction systems, showing advantages in building design when the sustainability concepts are applied in materials selection and construction techniques.
- Keywords: eco-design, sustainable building, LCA, elevator hoistway, sustainable.

RESUMEN

En este trabajo se compara el impacto medioambiental de distintos sistemas de construcción de huecos para la instalación de aparatos elevadores en obras de construcción de edificios residenciales, utilizando técnicas basadas en el Análisis de Ciclo de Vida y el cálculo de la huella de carbono, cuantificando la energía consumida y las emisiones ambientales en el proceso de fabricación de los materiales, construcción, uso y reciclaje. Además, se estudian otros indicadores medioambientales directamente relacionados con la sostenibilidad ambiental, considerando un periodo de 50 años, un recorrido medio de 100 km para el transporte de materiales y una distancia media de 15 km para la deposición de residuos en vertedero.

Se observa que el cerramiento a base de ladrillo cerámico es el que presenta un mejor comportamiento desde el punto de vista del coste de ejecución, coste de mantenimiento, riesgos en materia de seguridad y salud e intensidad de uso de la mano de obra, variables todas ellas relacionadas con los aspectos socioeconómicos de la ejecución de la obra. Sin embargo, desde una perspectiva de sostenibilidad, se observa que los cerramientos que menor impacto medioambiental generan, son los realizados con medio pie de ladrillo, aislamiento de lana de roca y trasdosado cerámico.

Se demuestra que desde una perspectiva medioambiental, la utilización de sistemas constructivos basados en técnicas tradicionales y materiales convencionales, es menos contaminante que la utilización del hormigón armado en todas sus variantes, poniéndose de manifiesto las ventajas de utilizar en el diseño de un edificio los conceptos de sostenibilidad aplicada en la elección de materiales y técnicas constructivas.

Palabras clave: ecodiseño, construcción sostenible, ACV, hueco de ascensor, sostenibilidad.

1. INTRODUCCIÓN

La energía consumida en los procesos de fabricación y construcción es inherente a cualquier tipo de actividad, implica la modificación del entorno y conlleva una serie de impactos ambientales. El sector de la edificación representa uno de los sectores con mayor incidencia en las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera, emisión en su mayor parte debida al elevado consumo energético derivado del proceso de fabricación de los materiales utilizados en la construcción. Solamente la construcción y mantenimiento de edificios consume aproximadamente un 40% de los materiales que se emplean en la Unión Europea [1]. El sector de

los aparatos de elevación presenta una dimensión muy importante en Europa ya que los ascensores instalados alcanzan los 4.000.000, con un ritmo de crecimiento de aproximadamente 120.000 nuevos ascensores por año [2].

El hueco de ascensor es una estructura vertical cerrada por tres lados, donde se aloja uno o más ascensores, que incorpora foso y casetón para instalaciones. Desde el punto de vista de la limitación de demanda energética, se consideran recintos no habitables, por lo que deben aislarse con una doble función, térmica y acústica. Su estructura debe soportar las reacciones debidas a la maquinaria, a las guías como consecuencia de la actuación del sistema paracaídas, el descentrado de la carga en la cabina, la acción de los amortiguadores en caso de impacto y los esfuerzos originados por la actuación del sistema antirrebote [3].

Aunque existen antecedentes de estudios que comparan sistemas constructivos en cerramientos exteriores e interiores, no hay precedentes sobre estudios relacionados con la sostenibilidad

de las técnicas constructivas de los huecos de ascensores en edificios residenciales. Sin embargo hay precedentes de estudios en lo correspondiente a cerramientos exteriores, donde se analiza la sostenibilidad desde varios puntos de vista como son el ahorro energético, la energía consumida y las emisiones de CO₂ [4].

Kyoung (2011) analiza los formados por muro cortina y elementos transparentes [5] evaluando la energía total consumida en su implantación y mantenimiento, así como las emisiones de CO₂ para un periodo de 40 años y una distancia de transporte de 50 km.

Desde las características acústicas de dos tipos de materiales (ladrillo y piedra) y cinco tipologías de vivienda, Chia-Jen y Kang (2009) analizan el impacto ambiental de sus envolventes mediante el empleo de los programas ENVEST y CADNA, obteniendo diferentes valores de impacto ambiental [6].

Cuéllar-Franca y Azapagic (2012) realizan un estudio del ciclo de vida de tres tipologías de viviendas en el Reino Unido, teniendo en cuenta su uso y demolición durante un periodo de 50 años [7]. En

concerniente a huecos de ascensor, Farh (2002) investigó la forma de minimizar el coste de la ejecución de los pilares que conforman la estructura del hueco del ascensor, sin considerar el ciclo de vida, el impacto ambiental y la sostenibilidad de cada sistema estructural [8].

Brouna y Menzies (2011) analizaron los tres tipos de cerramientos más habituales en el Reino Unido (ladrillo cerámico, bloque de hormigón y entramado de madera), empleando el método ACV [9]. El material que menos impacto ambiental presentó fue el entramado de madera y el que más el ladrillo cerámico.

Chau et al (2012) analizan la emisión de CO₂ de cinco tipos de composiciones de materiales durante 60 años en un edificio de oficinas [10], concluyendo que reutilizar los residuos de construcción puede reducir la huella de CO₂ en un 5,9%, y que la reutilización de los recursos e importación de materiales de la región podría reducir la huella de carbono un 3,2% y 3,1% respectivamente.

En lo referente a la sostenibilidad aplicada a elemen-

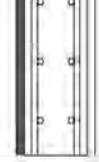
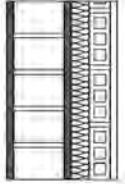
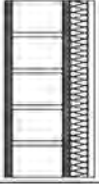
tipo	descripción	sección constructiva	peso (kg)	espesor (m)	superficie (m²)
1	Fábrica de ladrillo perforado tosco de 24x11x7 cm de 1 pie de espesor, recibido con mortero de cemento CEM II/B-P 32,5 N y arena de río tipo M-5, preparado en central y suministrado a pie de obra, revestido por la cara interior con guarnecido y enlucido de yeso de 1,5 cm de espesor y en la cara exterior con enfoscado de mortero de cemento de 1,5 cm de espesor		360,72	0,27	1,83
2	Fábrica de bloques huecos de hormigón estándar de 40x20x20 cm. recibidos con mortero de cemento CEM II/B-M 32,5 N y arena de río M-5, rellenos de hormigón de 330 kg. de cemento/m3 de dosificación y armadura B-500S, revestido por la cara interior con guarnecido y enlucido de yeso de 1,5 cm de espesor y en la cara exterior con enfoscado de mortero de cemento de 1,5 cm		347,26	0,23	1,52
3	Hormigón armado HA-25N/mm2, consistencia plástica, Tmáx. 20 mm para ambiente normal, elaborado en central, incluso armadura B-500S encofrado y desencofrado con tablero aglomerado a dos caras, vertido por medios manuales, vibrado y revestido por la cara interior con guarnecido y enlucido de yeso de 1,5 cm de espesor y en la cara exterior con enfoscado de mortero de cemento de 1,5 cm de espesor		402,74	0,15	0,94
4	Prefabricado de hormigón armado de 15 cm de ancho, fabricado con hormigón HA-40 N/mm2, Tmáx.20 mm, consistencia plástica, árido 20 mm, montaje con ayuda de grúa automovil y sellado de juntas con cordón de masilla caucho-asfáltica, revestido por la cara interior con guarnecido y enlucido de yeso de 1,5 cm de espesor y en la cara exterior con enfoscado de mortero de 1,5 cm de espesor		443,41	0,18	1,15
5	Fábrica de ladrillo perforado tosco de 24x11x7 cm, de 1/2 pie de espesor en interior, recibido con mortero de cemento CEM II/B-P 32,5 N y arena de río tipo M-5, preparado en central, enfoscado con mortero de cemento y arena de río por ambas caras con 1,5cm de espesor cada capa, aislamiento de lana de roca de 4 cm de espesor y densidad de 40kg/m3 recibido con tacos de nylon, fábrica de ladrillo hueco sencillo de 4 cm de espesor recibida con mortero de cemento M-5 y acabado interior con guarnecido y enlucido de yeso de 1,5cm de espesor		299,86	0,195	1,26
6	Fábrica de ladrillo perforado tosco de 24x11x7 cm, de 1/2 pie de espesor en interior, recibido con mortero de cemento CEM II/B-P 32,5 N y arena de río tipo M-5, preparado en central y suministrado a pie de obra, con planchas de aislamiento de lana de roca de 3 cm de espesor. Trasdosado formado por estructura de perfiles de chapa de acero galvanizada a base de perfiles tipo omega y placa de cartón-yeso de 15 mm de espesor.		229,68	0,141	0,88

Tabla 1: Tipología constructiva analizada

tos constructivos [11], hay antecedentes de trabajos [12-13] que comparan el impacto ambiental de distintas soluciones constructivas, analizándolas mediante descomposición en las emisiones medioambientales de los materiales básicos que la conforman.

El objetivo de este trabajo es comparar desde una perspectiva de sostenibilidad, el impacto ambiental de distintos sistemas de construcción de huecos de ascensores utilizando técnicas basadas en el *Análisis del Ciclo de Vida* y en el cálculo de la huella de carbono, cuantificando la energía consumida en el proceso de fabricación de los materiales, en el proceso construcción, de uso y de demolición del cerramiento, determinando indicadores relacionados con el proceso constructivo, agrupados en base a la sostenibilidad socioeconómica y medioambiental.

Para la creación de un modelo de construcción sostenible, es importante realizar este tipo de investigaciones pues se generan herramientas que permiten discriminar entre soluciones y alternativas de diseño en base a su eficiencia e impacto medioambiental, que tienen como valor añadido que contribuyen a la concienciación del sector.

2. HIPÓTESIS DE PARTIDA

Para analizar cómo influye la composición del cerramiento en las variables medioambientales, se han estudiado una serie de soluciones constructivas utilizadas habitualmente en la construcción de huecos para aparatos elevadores en edificios de tipo residencial. La descripción de cada uno de los cerramientos se detalla en la Tabla 1.

Una vez identificados los esfuerzos y las solicitudes a las que está sometido cada cerramiento, se procede a su dimensionado, para posteriormente realizar un recuento de los materiales, la mano de obra y los medios auxiliares utilizados en la construcción del hueco del ascensor, comprobando que se cumplen los requisitos mínimos establecidos en la normativa legal vigente, en lo que se refiere a aislamiento térmico y acústico. Posteriormente se realiza un inventario de cada uno de los materiales, utilizando las técnicas basadas en el análisis de ciclo de vida [14].

Para el desarrollo del estudio, se ha considerado un ascensor adaptado a discapacitados de 450 kg de carga, 6 plazas de capacidad y de 1,6 m/s de velocidad, de dimensiones de cabina de 1,00 x 1,25 m con puertas automáticas de apertura telescópica de 0,80 m de paso por 2,00 m de altura, instalado en un edificio de 3 alturas de uso residencial. Se ha considera-

do que todo el cerramiento del ascensor está en el interior del edificio, como se detalla en la Figura 2. El hueco tiene unas dimensiones de 1,55 x 1,70 m en planta, y está formado por cuatro paredes, en una de las cuales se abre el hueco de puerta y se ha considerado una altura libre entre plantas de 3 m.



Fig. 2: Plano de implantación y dimensiones del hueco de ascensor

En lo concerniente a la ubicación, se ha considerado un edificio residencial situado en el centro urbano de la ciudad de Mérida (España), al que se le asigna una zona climática de tipo C-4 en base al Código Técnico de la Edificación (CTE) de España [15]. Uno de los principales condicionantes del diseño es el aislamiento térmico y acústico del hueco, el primero por motivo de eficiencia energética y el segundo derivado de la transmisión de ruido y vibraciones al interior de las dependencias habitadas.

Se define recinto de instalaciones como aquél que contiene equipos e instalaciones tanto individuales como colectivas del edificio [16]; es decir, que las cajas de ascensores se pueden considerar recintos de instalaciones. El recinto del ascensor, cuándo la maquinaria del ascensor esté en un cuarto de máquinas independiente, debe tener un valor del índice de reducción acústica ponderado en A (R_a) superior a 50 dBA, que se calcula utilizando la Expresión 1.

$$R_a = 36,5 \times \log(m_1 + m_2 + \dots m_n) - 41,5 \quad (1)$$

Siendo R_a índice de reducción acústica ponderado en A, expresado en decibelios A y m_i la masa de cada uno de los hojas que componen el cerramiento, expresada en kg.

El aislamiento térmico se ha calculado en base al Documento Básico DB-HE [15], considerando una demanda energética media anual en las dependencias ocupadas de 25 kWh/m². Para ello, se calcula la resistencia térmica de cada uno de los cerramientos, considerando que la resistencia térmica total R_t de un componente constituido por capas térmicamente homogéneas se calcula mediante la Expresión 2.

$$R_t = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad (2)$$

Siendo $R_1, \dots, R_n$ las resistencias térmicas de cada capa definidas según la expresión (3) expresadas en m² K/W, R_{si} y R_{se} las resistencias térmicas superficiales correspondientes al aire interior y exterior expresadas en m² K/W.

La resistencia térmica de una capa térmicamente homogénea viene definida por la expresión 3:

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (3)$$



Fig. 1: Soluciones arquitectónicas utilizadas habitualmente en huecos de ascensor

Siendo e el espesor de la capa expresado en metros y λ la conductividad térmica de diseño del material que compone la capa, calculada a partir de valores de la norma UNE-EN-ISO 10.456 en W/mK.

El cálculo del consumo de materiales se ha realizado teniendo en cuenta una vida media útil del edificio de 50 años, valor habitualmente considerado en el cálculo de la duración de estructuras e impuesto en el CTE y en las Fichas Técnicas del ITEC [17].

En el proceso de cálculo se asumió que el transporte en la conexión de las diferentes etapas del ciclo de vida, se realiza con camiones de carga que utilizan gasóleo y que tienen una demanda energética de $0,00073 \text{ kWh km}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ [18]. Además, se consideró un recorrido medio de 100 km para el transporte de materiales hasta el emplazamiento del edificio y para el traslado de los residuos a vertedero autorizado, una distancia media de 15 km. Para las emisiones derivadas de fuentes de energía, se han utilizado las correspondientes al mix eléctrico de España [19].

Como unidad funcional de comparación, se utilizó la superficie construida del cerramiento, tomando como unidad de medida el m^2 . Las emisiones, la energía y los materiales están referidos a ésta: MJ/m^2 , $\text{kg CO}_2/\text{m}^2$, €/m^2 , etc.

En todos los casos se ha considerado que la cara interior del paramento se enfosca con mortero de cemento CEM II/B-P 32,5-N tipo M-5, confeccionado en obra con 300 kg/m^3 de cemento y una proporción en volumen 1/5 y no se ha considerado la pintura de la cara exterior de los paramentos.

3. METODOLOGÍA

El análisis de ciclo de vida es una metodología que cuantifica y caracteriza los diferentes impactos ambientales potenciales, asociados a cada una de las etapas de la vida útil de un producto [20]. En el desarrollo del estudio, se han utilizado técnicas basadas en el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), aplicando para ello las normas UNE-EN-ISO 14040:2006 y 14044:2006, dividiendo la vida de cada uno de los materiales [21-22] que componen el cerramiento en cinco etapas: la fabricación, que incluye la extracción de las materias primas y el proceso de fabricación, la expedición del material hasta el punto de consumo, el trabajo de colocar los recursos utilizados en el proceso de construcción, la vida útil de los recursos utilizados y la demolición y el reciclaje.

Para determinar la energía utilizada en la construcción y las emisiones medioambientales, se ha utilizado el banco de precios BEDEC PR/PCT (2012) del Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña [23]. En los productos que han sido realizados utilizando energía recuperada a partir de ma-

terial o de energía que hubiera sido obtenida de residuo [24], la evaluación de la energía recuperada se ha calculado según la Expresión 4.

$$Er = \frac{(R - E)}{(R - E) + P} \times 100 \quad (4)$$

Siendo Er la energía neta recuperada expresada en %, P la cantidad de energía de fuentes primarias utilizada en el proceso de construcción, R la cantidad de energía resultante del proceso de recuperación de energía y E la cantidad de energía de fuentes primarias utilizada en el proceso de recuperación, todas expresadas en MJ.

Para determinar los costes y rendimientos de materiales y de mano de obra utilizados en el proceso de ejecución, se ha utilizado como referencia, la Base de Precios CENTRO [25], debido a que esta base de precios es la más utilizada en la ubicación analizada. Para el cálculo del coste económico de la ejecución de los cerramientos, se consideró un coste medio de mano de obra de $14,50 \text{ €/h}$ para oficiales y de $13,50 \text{ €/h}$ en el caso de ayudantes y peones, mientras que en el proceso de fabricación de los materiales se estimó un coste medio de 13 €/h . En el proceso de cálculo se ha descompuesto cada unidad de obra en unidades simples en función de los oficios que intervienen en el proceso constructivo.

En la Tabla 2 se detallan los valores de energía, las emisiones de CO_2 , SO_2 , NO_2 y el peso específico utilizado para cuantificar el impacto ambiental.

Se ha considerado el mantenimiento preventivo de cada cerramiento [26] estimándose los costes durante un periodo de 10 años, en función de los materiales empleados en la construcción. Para ello, se utilizó la base CYPE [27] al ser la que mejor se adapta a las características propias de la ubicación del edificio modelizado.

Material	MJ/kg	kgCO ₂ /kg	kgSO ₂ /kg	kgNO ₂ /kg	peso específico kN/m ³
Acero	35,00	2,82	0,0670	0,0036	78,50
Acero galvanizado	41,16	3,08	0,0794	0,0043	80,00
Aditivo	93,00	13,73	0,1779	0,0096	10,40
Agua	0,20	0,00	0,0000	0,0000	10,00
Arena	0,15	0,01	0,0003	0,0000	18,60
Bloque de hormigón	2,35	0,22	0,0038	0,0002	16,00
Cal	4,82	0,84	0,0092	0,0005	11,50
Cemento	3,78	0,83	0,0083	0,0004	14,00
Cerámico	2,76	0,21	0,0053	0,0003	13,50
Desencofrante	99,95	14,76	0,1913	0,0103	9,00
Gasóleo	10,10	0,00	0,0034	0,0554	8,9
Grava	0,15	0,01	0,0003	0,0000	20,00
Lana de Roca	22,33	1,41	0,0322	0,0017	0,35
Madera	14,00	0,83	0,0073	0,0004	5,00
Masilla acrílica	20,00	2,95	0,0381	0,0020	17,00
Masilla de alquitrán	10,00	1,47	0,0191	0,0010	12,00
Nylon	100,00	14,79	0,0041	0,0002	11,40
PVC	70,00	10,33	0,1336	0,0072	13,60
Yeso	1,80	0,16	0,0034	0,0002	9,70
Yeso Laminado	6,28	0,36	0,0120	0,0006	8,00

Tabla 2: Valores energéticos y de emisiones de materiales básicos

4. RESULTADOS

Para facilitar la interpretación de los resultados, los indicadores expuestos a continuación, se han agrupado en función de su contribución a la sostenibilidad socioeconómica o medioambiental.

4.1. INDICADORES AMBIENTALES

4.1.1. Energía invertida

La energía consumida en el proceso constructivo es un indicador del esfuerzo energético necesario en la construcción y contabiliza la energía utilizada en la fabricación de cada material utilizado en el proceso constructivo [28] así como la necesaria para su colocación en obra. En la Figura 3 se representa la energía invertida en el proceso constructivo de los cerramientos analizados.

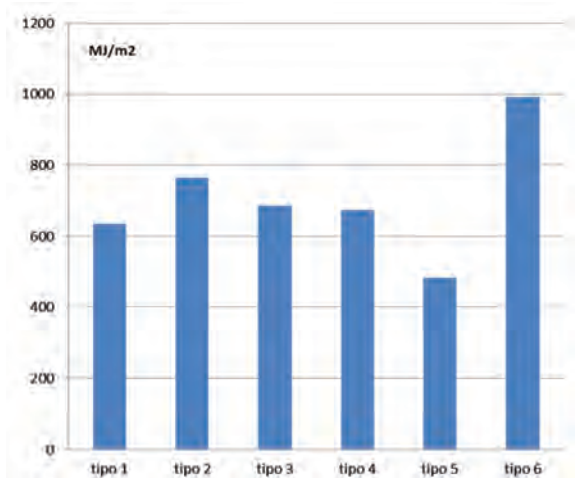


Fig. 3: Energía invertida en el proceso constructivo

Se observa que desde una perspectiva de la energía invertida en el proceso, el cerramiento que menor energía consume es el tipo 5, siendo el de tipo 6 el que necesita más energía debido a que incorpora un trasdosado formado por perfiles de acero galvanizado que requiere mayor aporte de energía en su fabricación.

4.1.2. Emisión de CO₂

La emisión de dióxido de carbono a la atmósfera en el proceso, es una variable que indica el impacto ambiental de la construcción y está directamente relacionada con el denominado efecto invernadero, relacionado con el calentamiento del Planeta [29]. La emisión de gases a la atmósfera, medidos en kilogramos de emisiones de CO₂ equivalentes, nos indica el potencial de calentamiento global (GWP) a causa de los diversos gases emitidos durante la producción y puesta en obra de los materiales de construcción generadores de Efecto Invernadero (GEI) [30].

En la Figura 4 se representa la emisión de dióxido de carbono a la atmósfera por unidad de superficie durante el proceso de fabricación, construcción, uso y demolición por tipo de cerramiento.

Se observa que desde una perspectiva emisiones de CO₂, el cerramiento que menor emisión presenta es el tipo 5, siendo

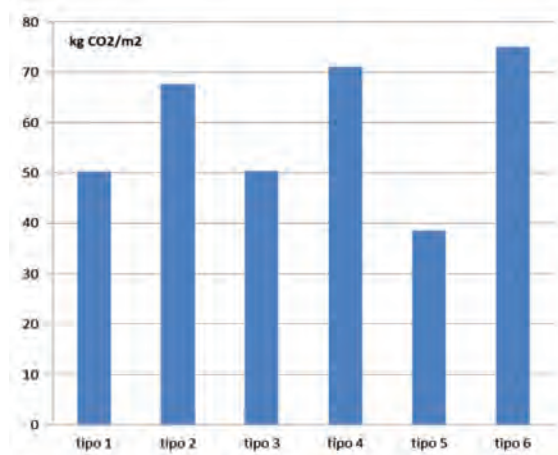


Fig. 4: Emisión de CO₂ en el proceso

el tipo 6 el que más genera. Esta situación coincide con la que se observó en el apartado 3.1, aunque hay que destacar que en este caso, los cerramientos con mayor cantidad de hormigón en su composición, tienen un comportamiento más desfavorable.

En la investigación también se han analizado las emisiones de otros gases con efecto invernadero derivados del proceso de fabricación, transporte y construcción de los cerramientos, como son el monóxido de carbono y los compuestos fluoroclorocarbonados.

4.1.3. Generación de residuos

Los residuos generados durante el proceso, se han clasificado en cuatro tipos: plásticos (150102), cartón-papel (150101), madera (150103) y residuos peligrosos, utilizando para ello el concepto de separación selectiva según los códigos LER (*Lista Europea de Residuos*) [31].

En la Figura 5 se representa la cantidad de residuos generados por unidad de superficie construida para cada tipología constructiva.

La mayor generación de residuos corresponde a cerramientos de tipo 5 y los menores a cerramientos de tipo 4.

4.1.4. Emisión de SO₂ y NO₂

La emisión de dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno a la atmósfera, son indicadores del potencial de acidificación y el potencial de eutrofización que generan los gases emitidos durante la producción, transporte y puesta en obra de los materiales de construcción.

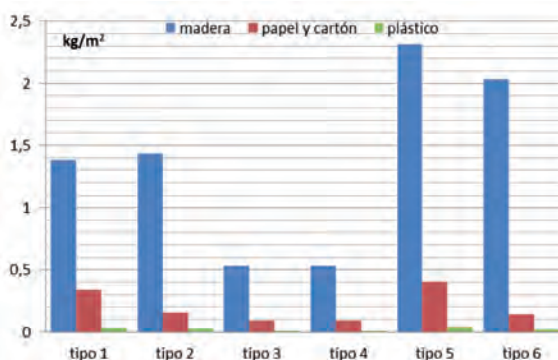


Fig. 5: Residuos generados en el proceso

En la Figura 6 se representa la emisión de dióxido de azufre y de nitrógeno por unidad de superficie.

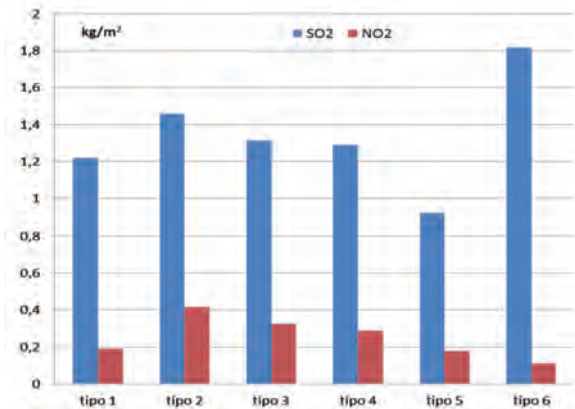


Fig. 6: Emisiones de SO₂ y NO₂

Se observa que desde una perspectiva emisiones, el cerramiento que menor emisión presenta es el tipo 5, siendo el tipo 6 el que más genera SO₂ y menos NO₂.

4.2. INDICADORES SOCIOECONÓMICOS

4.2.1. Cantidad y calidad de la mano de obra

En la Tabla 3 se observa la cantidad de mano de obra necesaria para la construcción de huecos de ascensores en función de la tipología constructiva expresada en horas de trabajo por unidad de superficie construida (h/m²).

El cerramiento tipo 5 necesita más horas de trabajo por unidad de superficie construida, en comparación con el resto de cerramientos. Esta circunstancia, que a priori podría considerarse negativa, puede sin embargo pasar a ser determinante en función de su influencia en el coste final del cerramiento.

Para comparar la proporción de mano de obra, respecto a los materiales que conforman el cerramiento, se ha definido la variable intensidad de mano de obra como la relación entre el importe de la mano de obra empleado en la construcción del cerramiento por unidad de superficie y el coste total de su ejecución. La intensidad de la mano de obra por tipología constructiva, se representa en la Figura 7.

Se observa que la intensidad de mano de obra es mayor en los cerramientos que utilizan materiales de construcción de tipo cerámico y que lo contrario sucede en cerramientos que utilizan el hormigón como principal material de construcción. Quiere esto decir que por cada euro de coste de cerramiento, en los primeros la mayor parte se invierte en mano de obra, sobre todo en fase de montaje.

tipo	oficial (h/m²)	ayudante (h/m²)	total (h/m²)
1	1,32	1,48	2,80
2	1,43	1,70	3,13
3	1,48	1,67	3,16
4	1,83	1,87	3,70
5	1,87	2,06	3,93
6	1,39	1,48	2,87

Tabla 3: Mano de obra necesaria por unidad de superficie construida

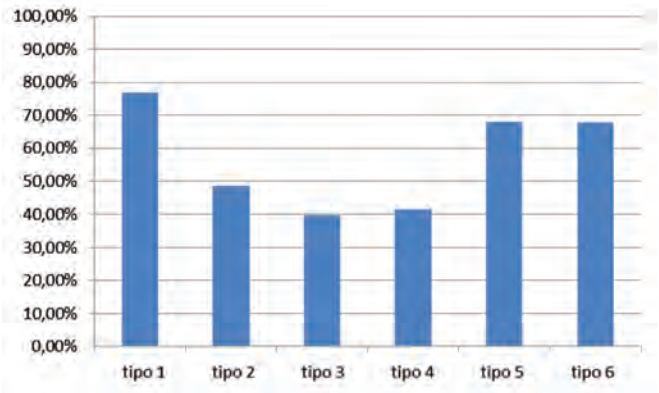


Fig. 7: Intensidad de mano obra

4.2.2. Coste de ejecución

El coste de ejecución es el indicador que se ha utilizado para analizar la viabilidad económica de la utilización de cada uno de los cerramientos [32]. En la Figura 8 se representa el coste del proceso de construcción por unidad de superficie construida, incluyendo la mano de obra, el coste de los materiales y el de los medios auxiliares necesarios para su construcción, sin tener en cuenta costes indirectos, gastos generales y beneficio industrial.

Se observa que el menor coste de ejecución por unidad de superficie corresponde al cerramiento de tipo 1 y que el mayor coste corresponde al tipo 2.

4.2.3. Coste de mantenimiento

El coste de mantenimiento decenal es una valoración del montante económico que supondría mantener el cerramiento en los primeros diez años después de su construcción, atendiendo a las operaciones contenidas en el calendario previsto en el correspondiente Plan de Mantenimiento del Edificio [27]. En la Figura 9 se representa este indicador.

Se observa como el menor coste de mantenimiento corresponde a los cerramientos realizados a base de fábrica de ladrillo perforado de 1 pie o con bloque de hormigón hueco armado, siendo el que supondrá un mayor coste el cerramiento tipo 6.

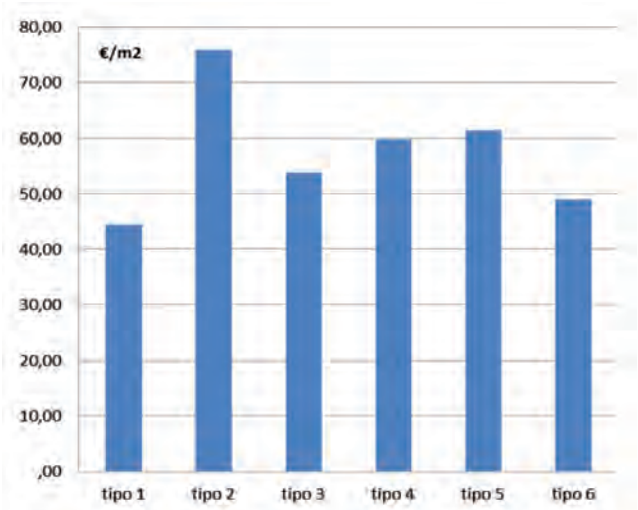


Fig. 8: Coste de ejecución material por tipo de cerramiento

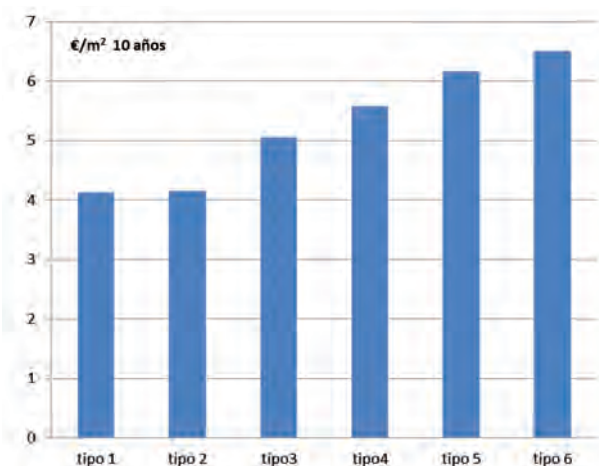


Fig. 9: Coste de mantenimiento decenal

4.2.4. Riesgo intrínseco de la ejecución

Para analizar el riesgo intrínseco a la ejecución de la obra, se ha tenido en cuenta las condiciones de seguridad y salud necesarias para garantizar la seguridad durante el proceso de ejecución, así como los medios auxiliares. Para ello, se analiza

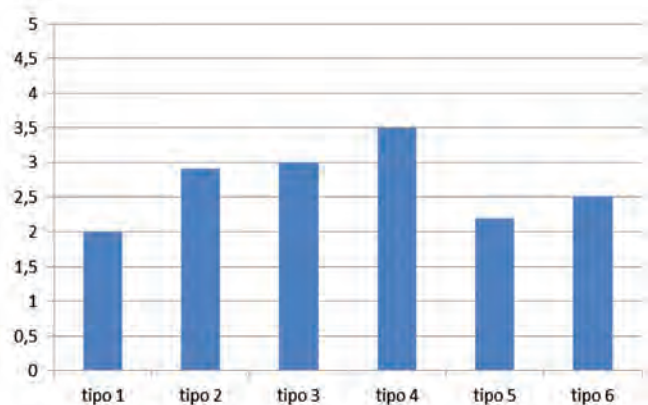


Fig. 10: Riesgo intrínseco en la ejecución

el proceso de acopio de materiales en obra, el montaje, la colocación y la utilización de medios auxiliares. En la figura 10 se observa el riesgo intrínseco de la ejecución, clasificado de 0 a 5 en base a un menor o mayor riesgo de accidente laboral en construcción.

Se observa cómo los cerramientos compuestos por hormigón armado (tipos 2, 3 y 4), presentan un mayor riesgo en su ejecución y por lo tanto, requieren mayores medidas preventivas.

5. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

Aunque todas las soluciones constructivas analizadas son equivalentes en lo referente a su capacidad portante, en términos cuantitativos no son homogéneas en su balance medioambiental. Para evidenciar los resultados de la investigación, se ha representado en la Figura 11 todos los indicadores analizados, agrupados según sus características en indicadores medioambientales y socioeconómicos, referenciados proporcionalmente al cerramiento de fábrica de ladrillo tosco perforado de 1 pie de espesor, es decir, el cerramiento de tipo 1. Es decir, un valor 125% indica que el valor absoluto de ese indicador supera en 25% al que tiene el del cerramiento de tipo 1.

Se ha evitado considerar elementos de ponderación entre los indicadores para no inducir parámetros de subjetividad en el proceso de diseño, dejando esa decisión a criterio del proyectista.

Se manifiesta que el cerramiento tipo 1, es el que presenta un mejor comportamiento desde el punto de vista del coste de ejecución, coste de mantenimiento, riesgos en materia de seguridad y salud e intensidad de uso de la mano de obra, variables todas ellas relacionadas con los aspectos socioeconómicos.

Sin embargo, desde una perspectiva de sostenibilidad, los cerramientos que mejor comportamiento presentan respecto a su impacto medioambiental, son los realizados con medio pie de ladrillo, aislamiento de lana de roca y trasdosado cerámico, que corresponde al tipo 5, siendo éste el que menor emisión de

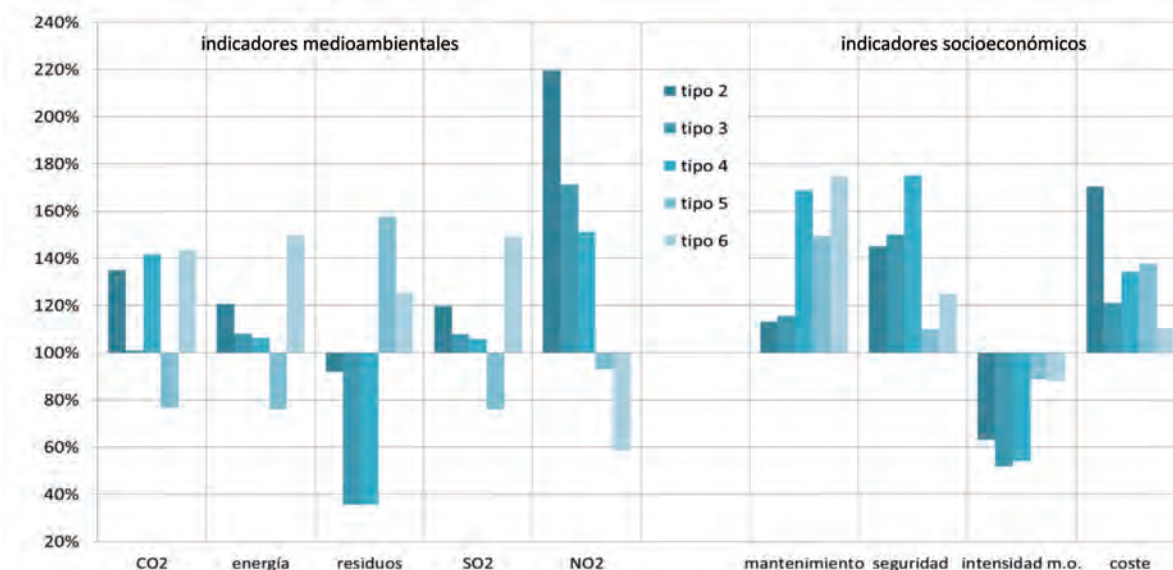


Fig. 11: Relación porcentual de indicadores ambientales

CO₂ genera y menos energía necesita tanto en la fabricación de los materiales como en la ejecución de la obra, presentando una gran capacidad de reutilización y reciclaje.

Se demuestra que la utilización de sistemas constructivos basados en técnicas tradicionales y materiales convencionales, es menos contaminante que el hormigón armado y que aunque necesitan una mayor mano de obra, esto puede ser una ventaja en escenarios de tasa de paro elevada y en periodos de recesión económica. Además se evidencia que los sistemas basados en trasdosado con paneles de cartón-yeso son menos eficientes desde una perspectiva de sostenibilidad que los sistemas que utilizan materiales cerámicos.

Las principales oportunidades de mejora en el sector residencial se encuentran en la reducción de impactos en la etapa de diseño, utilizando para ello la metodología basada en el ACV, pues las decisiones tomadas en esta etapa determinan los impactos de un edificio para el resto de su ciclo de vida. Este estudio refuerza la importancia de tener en cuenta en la fase de diseño, el impacto ambiental de cada uno de los materiales que se van a emplear en la edificación, incluyendo la utilización eficiente de la energía, para conseguir un parque de viviendas más sostenibles.

No se ha tenido en cuenta en el análisis, la fase de utilización de la edificación, ya que se ha centrado la investigación en el impacto en el proceso constructivo, quedando el mismo para próximos desarrollos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Universidad de Extremadura (España), por los medios aportados para la elaboración de este estudio, desarrollado en el marco del Proyecto de Investigación GR-10099 del IV Plan Regional de I+D de la Junta de Extremadura 2011-2014.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Baño-Nieva A, Vigil A. Guía de construcción sostenible. Ministerio de Medio Ambiente. 2005
- [2] Observatorio Industrial del Sector de Bienes de Equipo. Estudio sobre el sector de ascensores. UGT-MCA. 2007.
- [3] Ministerio de Industria y Energía. Reglamento de aparatos de elevación y manutención. Real Decreto 2291/1985, de 8 de noviembre. 1985.
- [4] Zabalza I et al. "Life cycle assessment of building materials: comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential". *Building and Environment* 2011. Vol.46 p.1133-1140. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002>
- [5] Kyoung-Hee Kim A. "Comparative life cycle assessment of a transparent composite façade system and a glass curtain wall system". *Energy and Buildings* 2011. Vol.43 p.3436-3445. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.006>
- [6] Chia-Jen Y, Kang J. "Environmental impact of acoustic materials in residential buildings". *Building and Environment* 2009. Vol.44 p.2.166-2.175. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.006>
- [7] Cuellar-Franca R, Azapagic A. "Environmental impacts of the UK residential sector: Life cycle assessment of houses". *Building and Environment* 2012. Vol. 54 p.86-99. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.005>
- [8] Farah A. "Cost minimization of columns and elevator shafts in tall buildings". *High Performance Structures and Materials*. 2002. Vol.4 p.471-478.
- [9] Brouna R, Menzies G. "Life cycle energy and environmental analysis of partition wall systems in the UK". *Procedia Engineering* 2011. Vol.21 p.864-873. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2088>
- [10] Chau CK, Hui WK, Powell G. "Assessment of CO₂ emissions reduction in high-rise concrete office buildings using different material use options". *Resources, Conservation and Recycling* 2012. Vol.61 p.22-34. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.01.001>
- [11] Cuadrado-Rojo J, Losada-Rodríguez R. "Propuesta metodológica de evaluación de la sostenibilidad en la edificación industrial". *DYNA*. 2007. Vol.82-3 p.53-58.
- [12] García Sanz-Calcedo J, Fortea M, Reyes, M. "Comparative analysis on environmental sustainability between masonry vaults and concrete structures". *Ingeniería de Construcción*. 2012. Vol.27-1, p.5-22. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732012000100001>
- [13] López F, Cuadros F, García Sanz-Calcedo J et al. "El edificio PETER. Un ejemplo de integración de las energías renovables en la edificación". *DYNA*. 2011. Vol.86-2, p.212-221. <http://dx.doi.org/10.6036/3911>
- [14] Ottelée M, Perinib K, Fraaij A et al. "Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems". *Energy and Buildings* 2011. Vol.43, p. 3.419-3.429. doi: [10.1016/j.enbuild.2011.09.010](http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.010)
- [15] Ministerio de Vivienda. Código Técnico de la Edificación de España. 2006.
- [16] Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Guía de Aplicación del DB-HR. 2009.
- [17] Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña. 2010.
- [18] World Energy Council. *Sustaining World Development into the Next Millennium*. Houston, 1998.
- [19] Red Eléctrica de España. *El sistema eléctrico español* 2011. Madrid, 2012.
- [20] Thormark C. "A low energy building in a life cycle its embodied energy, energy need for operation and recycling potential". References and further reading may be available for this article. To view references and further reading you must purchase this article. *Building and Environment*. 2002. Vol.37-4, p.429-435. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00033-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00033-6)
- [21] Sartori I, Hestnes AG. "Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article". References and further reading may be available for this article. To view references and further reading you must purchase this article. *Energy and Buildings*. 2007. Vol.39-3, p.249-257. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.07.001>
- [22] Cardim A. "Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento". Universidad Politécnica de Cataluña 2001.
- [23] Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña. Banco BEDEC. Barcelona 2011.
- [24] AENOR. Manual de Gestión Ambiental. Asociación Española de Normalización y Certificación. 2006.
- [25] CENTRO. Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Guadalajara. 2012.
- [26] Peris E. "Life cycle, sustainability and the transcendent quality of building materials". *Building and Environment* 2007. Vol.42, p.1.329-1.334. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.11.004>
- [27] CYPE. Generador de precios de la construcción. CYPE ingenieros. 2012.
- [28] Argüello T, Cuchi A. "Análisis del impacto ambiental asociado a los materiales de construcción empleados en las viviendas de bajo coste del programa 10x10 con Techo-Chiapas del CYTED". *Informes de la Construcción* 2008. Vol.60, 509, p.25-34.
- [29] García-Casals X. "Análisis energético y de ciclo de vida de una vivienda bioclimática en Sitges". IIT-04-0651. 2004.
- [30] Intergovernmental Panel on Climate Change. "The Fourth Assessment Report". 2007.
- [31] Ministerio de Medio Ambiente. MAM/304/2002, operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos. 2002.
- [32] Alfonso C. "La vivienda del siglo XXI: edificación sostenible". *Ambienta*. 2003. Vol.23, p.22-28.
- [33] CEDEX. "Residuos de construcción y demolición". Centro de Estudios y Experimentación de Obra Pública. Ficha Técnica 4.1. 2010.

Estimación de la absorción acústica de paneles fabricados con neumáticos reciclados



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

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5796> | Recibido: 21/03/2013 • Aceptado: 06/05/2013

■■■
Jorge Segura-Alcaraz, José Enrique Crespo-Amorós,
Ernesto Juliá-Sanchis, Antonio Nadal-Gisbert,
José María Gadea-Borrell

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA. Campus d'Alcoi. Plza.
Ferrándiz i Carbonell, s/n - 03801 - Alcoi (Alicante).
Tfno. +34 966 528428. jsegura@mcm.upv.es

ABSTRACT

- The present study is conducted to characterize multilayer acoustic panels made from recycled tire rubbers (GTR's) in order to determine the sound absorption characteristics of these new materials for different applications, trying to give an answer to the environmental problem generated by this waste. This waste is currently used as modifier of asphalt, sport surfaces, molded and calendered products. The article is a first step to evaluate the sound absorption of these new multilayer panels for application in fields such as noise barriers, noise of machinery and equipment, conditioning acoustic enclosures, etc.. Basically two types of products can be obtained from the waste of the tyres: fibers and rubbers. Two types of multilayer panels of thickness 10 mm and 20 mm have been made for a three layer disposition: rubber-fibre-rubber. Then, the standing wave tube method has been used to determine the sound absorption in these materials. For rubber there are 0,7 mm and 2,2-4 mm granulometry. The results show that multilayer panels made of 2,2-4 granulometry present a higher acoustic absorption in the studied frequency range (400-3500 Hz). By increasing the thickness of the panel, the sound absorption coefficient is higher and the multilayer panel increases its sound absorption by adding more percentage of rubber.
- Keywords: Sound absorption, ground tire rubbers, impedance tube, multilayer materials.

RESUMEN

En este trabajo se realiza un estudio de la absorción acústica de paneles multicapa conformados por materiales provenientes de neumáticos reciclados (GTR's), tratando de dar una repuesta al problema medioambiental generado por estos residuos. Estos materiales encuentran aplicación en aditivos para asfaltos, superficies deportivas o de parques infantiles, productos moldeados y calandrados. Del residuo de neumático se obtienen básicamente dos tipos de producto: fibras y caucho.

El artículo se enmarca como un primer paso para la evaluación de la absorción acústica de estos nuevos paneles multicapa para su aplicación en ámbitos como barreras acústicas, insonorización de maquinaria y equipos industriales, acondicionamiento acústico de recintos, etc.

Se han preparado dos tipos básicos de paneles multicapa con 10 y 20 mm de espesor. Cada panel multicapa está constituido por tres capas de diferentes espesores siempre con la disposición caucho-fibra-caucho. Para determinar el coeficiente de absorción se ha utilizado el método del tubo de impedancia acústica.

Para el caucho se ha trabajado con granulometrías de entre 0,7 y 2,2-4 mm. Los resultados demuestran que los paneles multicapa con caucho de granulometría 2,2-4 mm presentan una mayor absorción acústica dentro del rango de frecuencia estudiado (400-3500 Hz). Con el incremento de espesor y mayor porcentaje de caucho de grano grueso el panel multicapa mejora su coeficiente de absorción.

Palabras clave: Absorción del sonido, residuos de neumático reciclado, tubo de impedancia acústica, materiales multicapa.

1. INTRODUCCIÓN

El problema de los residuos generados por los neumáticos usados se ha ido incrementando junto con el aumento de la población, esto ha provocado que los gobiernos de diferentes países implementen políticas para el tratamiento de estos residuos. En el caso de España se han gestionado más de 625000 toneladas durante el periodo 2006-2009 según informe SIGNUS [1], destinándose el 63% a la recuperación de materiales, el 28% a la recuperación de energía y el 9% a la reutilización.

El residuo de los neumáticos se emplea comúnmente en aditivos para asfaltos y hormigones [2, 3], suelos de superficies deportivas o de parques infantiles, productos moldeados y calandrados. Básicamente se pueden obtener dos tipos de producto del residuo de neumático: fibras y caucho.

Sukontasukkul utiliza el triturado del caucho para mejorar las propiedades acústicas de los paneles de hormigón [4] determinando el coeficiente de absorción acústica con el método del tubo de impedancia. Los resultados de este autor indican que el hormigón con caucho presenta mejores propiedades acústicas que el hormigón tradicional.

Asdrubali [5] utiliza el método del tubo de impedancia acústica para evaluar el coeficiente de absorción acústica del caucho granular. Buscando un material óptimo desde el punto de vista de la absorción acústica, estudia la influencia del tamaño de grano, concentración del aglutinante de la mezcla, espesor de las muestras (entre 20 y 65 mm) y relación de compactación.

Horoshenkov y Swift [6] determinan las propiedades acústicas de muestras de granulados de caucho compactadas con aglutinantes relacionando su comportamiento acústico con la distribución y tamaño de los poros, la tortuosidad, y la resistividad al flujo. Realizan un estudio comparativo de diferentes modelos analíticos, concluyendo que algunos modelos necesitan ajustes en los parámetros de entrada para predecir con mayor exactitud la respuesta de estos materiales.

Rodríguez Montejano [7] presenta en su tesis un estudio teórico y empírico de las características del caucho granular procedente de los neumáticos fuera de uso como material absorbente acústico. Determina las propiedades físicas propias de la estructura interna del material como la tortuosidad, porosidad y resistividad al flujo. En uno de los capítulos de este trabajo se estudia la influencia del tamaño de la partícula y del espesor de las muestras (entre 20 y 800 mm) en el coeficiente de absorción acústica.

Jiménez-Espadafor et al. [8] utilizan las fibras textiles o "fluff" provenientes del reciclado de neumáticos fuera de uso junto con aglutinantes. Se construyen tejas a partir de materiales bicapa buscando buenas características mecánicas y acústicas.

En el presente trabajo se conforman unos paneles multicapa auto-portantes combinando la fibra y el caucho provenientes del reciclado de neumáticos fuera de uso, tratando de dar una repuesta al problema medioambiental generado por estos residuos. A diferencia de los trabajos anteriores en los que los materiales se han conformado utilizando aglutinantes, la preparación de las muestras se ha realizado mediante un proceso de sinterización. Los espesores de los paneles analizados son de 10 y 20 mm puesto que uno de los objetivos es conseguir buenas propiedades acústicas y mecánicas con pequeño espesor. Esta combinación de fibras y caucho en la fabricación de paneles multicapa mediante sinterizado constituye un aspecto innovador en este campo. El trabajo se enmarca como un primer estudio sobre la absorción acústica de estos nuevos paneles multicapa para su aplicación en ámbitos como barreras acústicas, insonorización de maquinaria y equipos industriales, acondicionamiento acústico de recintos, etc.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En primer lugar se ha realizado un estudio granulométrico para obtener dos tamaños de partículas de caucho, uno hasta 0,7 mm y otro entre 2,2 y 4 mm. La configuración de los

paneles multicapa estudiados es tipo sándwich con dos capas exteriores de caucho y una interior de fibra. Los espesores a estudiar de los paneles se han fijado en 10 mm y 20 mm. La fabricación de los paneles multicapa se ha realizado de dos maneras diferentes, la primera sinterizando las tres capas al mismo tiempo en una sola fase y la segunda sinterizando por separado cada una de las capas en diferentes fases en una máquina de moldeo por compresión [9-12]. Las muestras se han ensayado en un tubo de impedancia acústica en el rango de frecuencias de 400 a 3500 Hz. El tubo de impedancia acústica es un tubo rígido de sección circular con una fuente de sonido en un extremo, un portamuestras en el extremo opuesto y dos micrófonos. El procedimiento para medir la absorción acústica mediante el tubo de impedancia acústica se basa en la norma ISO 10534-2 (Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia) [13], comúnmente utilizada para el estudio de la absorción acústica en materiales porosos y fibrosos como los estudiados en el presente trabajo.

Los residuos del triturado de neumático generalmente se proporcionan con diferentes tamaños de partícula dependiendo del tamiz utilizado. Para evaluar las diferencias entre granulometrías finas y gruesas se han preparado las muestras con dos rangos de tamaños distintos: uno con partículas hasta 0,7 mm y otro mayor con partículas de entre 2,2 y 4 mm. El material ha sido suministrado por la empresa INSA TURBO S.A. (Aspe, España) que dispone de estos tamaños comerciales.

Es necesario un estudio granulométrico y morfológico de las partículas de caucho triturado para determinar su composición y porcentaje en volumen.

El otro producto obtenido del residuo de neumático es la fibra o "fluff" que se suministra por volumen.

2.1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Se realiza un análisis granulométrico del caucho obtenido del residuo de neumático, con el objetivo de determinar los tamaños de las partículas y su proporción. Para este estudio se realiza una clasificación en dos grupos según el tamaño de la partícula de caucho: hasta 0,7 mm y de 2,2-4 mm. El estudio granulométrico de las partículas provenientes del residuo de neumático se realiza con una máquina vibratoria para muestras de 300 gramos modelo CISA ® SIEVE SHAKER model RP09.

La Tabla 1 muestra la serie de tamices utilizados para las muestras con partículas de 0,7 mm y de entre 2,2-4 mm.

Muestras	Tamices (μm)							
< 0,7mm	63	125	180	250	425	500	600	850
2,2-4mm	63	850	1000	1250	2000	2360	4000	8000

Tabla 1: Tamices

La Figura 1 muestra la distribución de las partículas de caucho de tamaño hasta 0,7 mm. Se observa que las partículas entre 250 y 600 μm son las más representativas.

La Figura 2 muestra la distribución de las partículas de caucho de tamaño entre 2,2 y 4 mm. Se observa que las partículas de 2360 μm prevalecen puesto que representan más del 70% en peso.

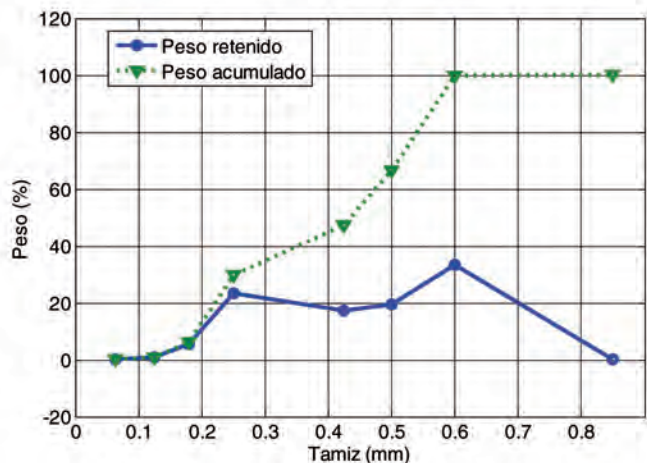


Fig. 1: Estudio de la granulometría de caucho 0,7 mm

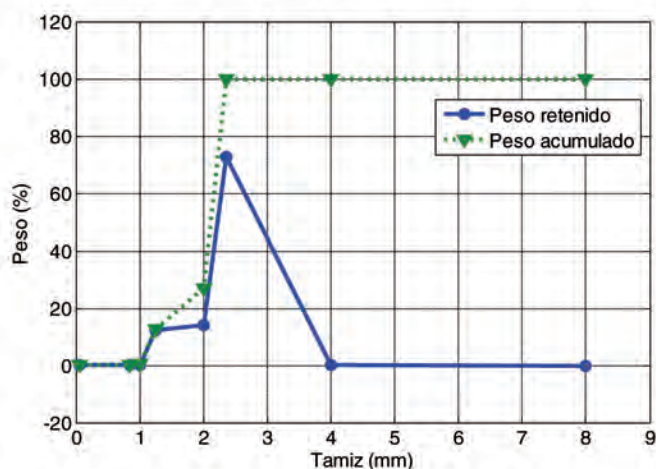


Fig. 2: Estudio de la granulometría de caucho de 2,2-4 mm

2.2. PROCESO DE SINTERIZADO

El sinterizado es un tratamiento térmico en el que se aplica presión y temperatura a un polvo o compactado metálico produciéndose difusión atómica entre las superficies de contacto de las partículas, lo que provoca su unión. El equipo de sinterizado es una prensa Robima S.A. (Valencia, España) con un plato caliente Dupra S.L. (Castalla, España). En este

caso se trata de conformar varias capas de material reciclado de neumáticos. Las condiciones de sinterizado son 50 bar para la compactación en el caso del residuo de tamaño de partícula de 0,7 mm, y 80 bar por el tamaño de partícula de entre 2,2 y 4 mm, en ambos casos la temperatura es de 200° C. Estas condiciones de presión y temperatura vienen definidas a partir de distintos estudios previos [14, 15]. Con estos parámetros de fabricación se consiguen las mejores características mecánicas de forma que el panel multicapa obtenido presenta una rigidez y resistencia suficiente como para ser autoportante.

La Figura 3 muestra la morfología de estos paneles: a) caucho con granulometría de 0,7 mm, b) caucho con granulometría entre 2,2 y 4 mm, c) fibra y d) panel compactado de caucho y fibra.

A partir de estos paneles y mediante un troquel circular de 40 mm de diámetro se obtienen las muestras que se ensayan en el tubo de impedancia acústica. La Tabla 2 muestra las combinaciones de espesores en los materiales multicapa.

10 mm CAUCHO – FIBRA – CAUCHO	20 mm CAUCHO – FIBRA – CAUCHO
4 mm – 2 mm – 4 mm	8 mm – 4 mm – 8 mm
3 mm – 4 mm – 3 mm	6 mm – 8 mm – 6 mm
2 mm – 6 mm – 2 mm	4 mm – 12 mm – 4 mm

Tabla 2: Muestras multicapa

2.3. CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA

Básicamente hay dos métodos en laboratorio para medir el coeficiente de absorción acústica de los materiales: el método descrito en la Norma ISO 354:2003 [16], que precisa de una cámara reverberante y el descrito en la Norma ISO 10534-2, que es en el que se utiliza un tubo de impedancia acústica. Para los ensayos del coeficiente de absorción acústica se han seguido las recomendaciones de la ISO 10534-2. Hay dos parámetros en la normativa que condicionan el rango de frecuencias de medida: el diámetro del tubo y la distancia entre micrófonos. En este caso el diámetro del tubo es de 40 mm y la separación entre micrófonos es de 50 mm, lo que permite un rango aproximado de medida de entre 400 y 3100 Hz.

El método basado en el tubo de ondas estacionarias, o tubo de impedancia acústica, para medir el coeficiente de absorción

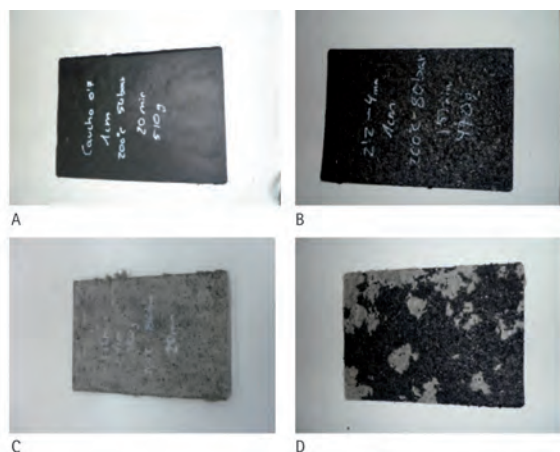


Fig. 3: Morfología de algunos paneles

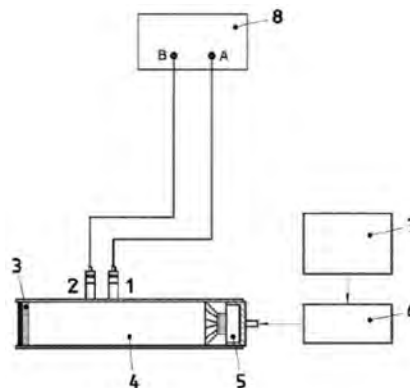


Fig. 4: Esquema del montaje del tubo de impedancia acústica: ISO 10534-2

en materiales, es una de las técnicas más utilizadas en la caracterización acústica de materiales porosos y fibrosos [17-21]. En general los materiales porosos y fibrosos presentan un mecanismo de absorción acústica basado en la transformación por fricción de la energía de la onda acústica incidente en calor.

Según la ISO 10534-2, el esquema del equipo para medir el coeficiente de absorción acústica se muestra en la Figura 4.

Donde: 1 y 2) Micrófonos *Bruel&Kjaer* model 4947, 3) Muestra de material de 40 mm de diámetro, 4) Tubo de ondas estacionarias, 5) Fuente de sonido, 6) Amplificador de señal, 7) Generador de señal, 8) Tarjeta de adquisición de datos NI USB 9233 y funciones de Matlab para el procesado de la señal.

La Figura 5 muestra una fotografía del tubo de impedancia acústica utilizado para los ensayos.

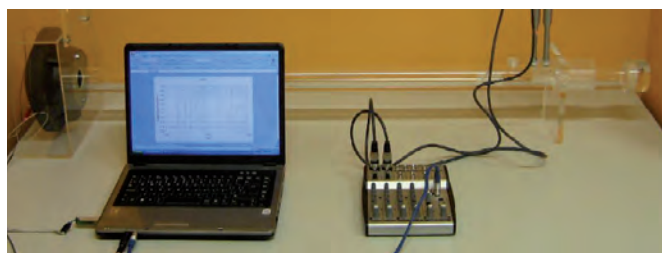


Fig. 5: Fotografía del tubo de impedancia acústica

Para comparar las propiedades absorbentes del sonido de estos nuevos materiales multicapa se obtiene la curva de absorción acústica en función de la frecuencia. El coeficiente de absorción acústica se determina con la siguiente Ecuación:

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (1)$$

r es el coeficiente de reflexión que se determina mediante la siguiente Ecuación 2:

$$r = \frac{H_{12} - H_i}{H_R - H_{12}} \cdot e^{2 \cdot j \cdot k_0 \cdot x_i} \quad (2)$$

Donde: H_{12} es la función de transferencia compleja, H_i es la función de transferencia de la onda incidente, H_R es la función de transferencia de la onda reflejada, k_0 es el número de onda complejo, x_i es la distancia desde la muestra hasta el micrófono más alejado.

El coeficiente de reflexión varía entre 0 y 1 en función de si el material se comporta como absorbente o reflectante acústico, respectivamente.

El coeficiente de reflexión se relaciona con la impedancia acústica específica, que es la resistencia que opone el material al paso de las ondas acústicas, mediante la ecuación 3:

$$\frac{Z}{\rho \cdot c_0} = \frac{R}{\rho \cdot c_0} + j \cdot \frac{X}{\rho \cdot c_0} = \frac{(1+r)}{(1-r)} \quad (3)$$

En un material perfectamente absorbente acústico el coeficiente de reflexión es igual a cero por lo que la impedancia acústica específica es igual a uno ($Z_0=1$). Por otro lado cuando un material es perfectamente reflectante la impedancia acústica específica sería infinita ($Z_0=\infty$).

3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Las siguientes gráficas muestran los coeficientes de absorción acústica obtenidos en el tubo de impedancia para cada

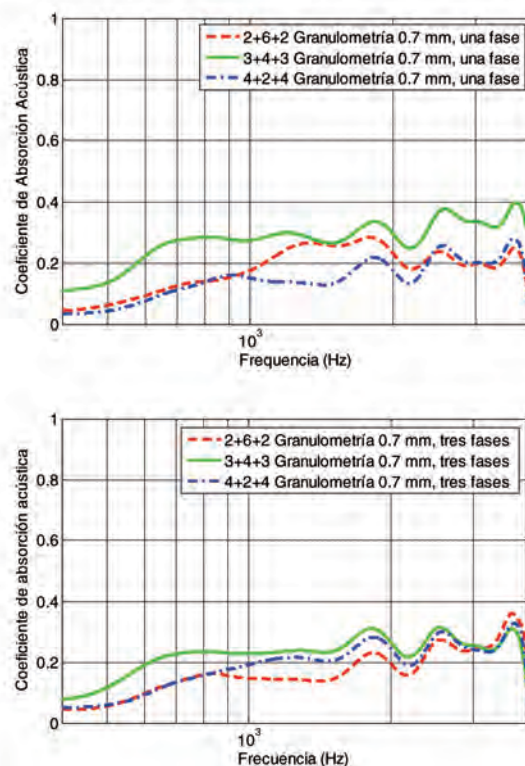


Fig. 6: Absorción acústica para multicapas 2-6-2, 3-4-3 y 4-2-4 con granulometría 0,7 mm

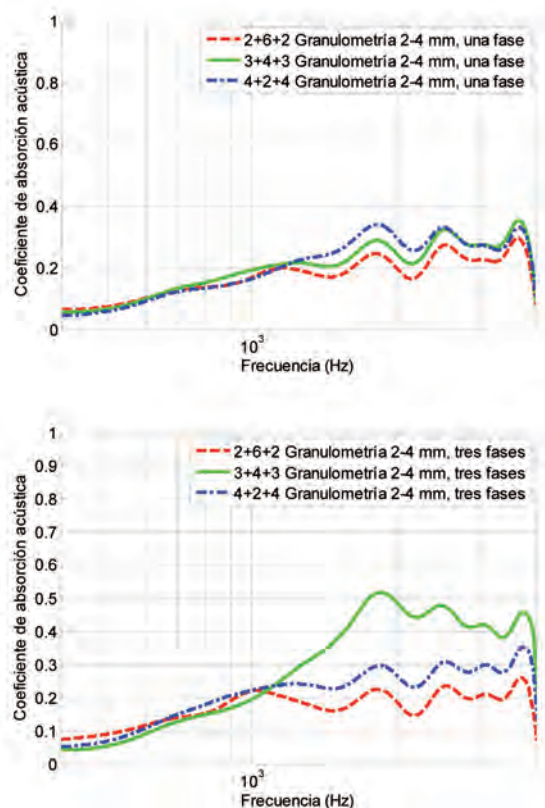


Fig. 7: Absorción acústica para multicapas 2-6-2, 3-4-3 y 4-2-4 con granulometría 2,2-4 mm

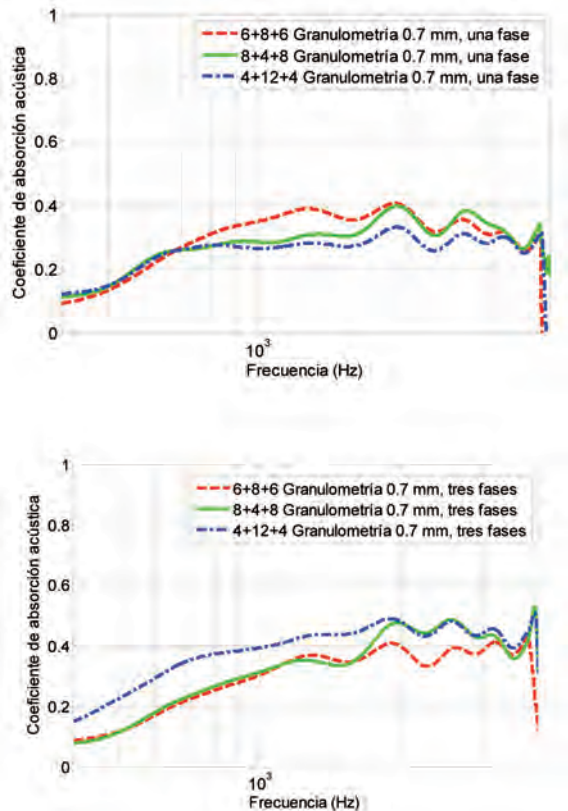


Fig. 8: Absorción acústica para multicapas 6-8-6, 8-4-8 y 4-12-4 con granulometría 0,7 mm

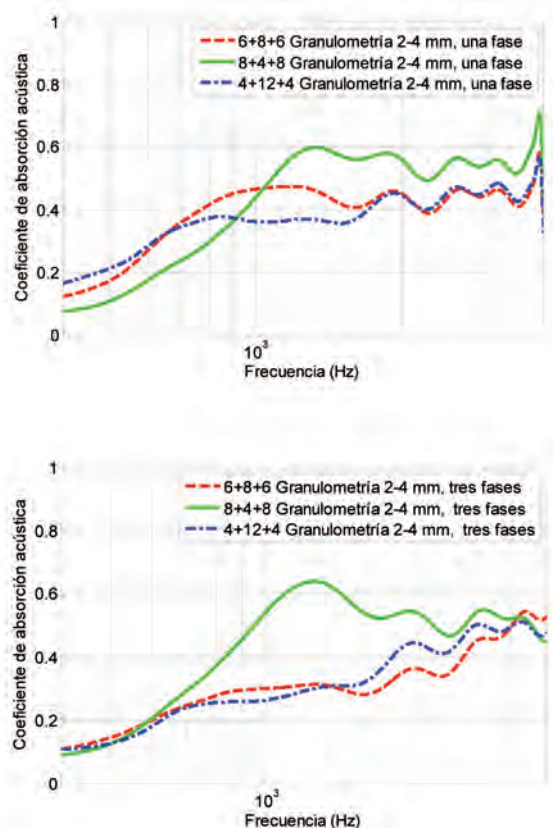


Fig. 9: Absorción acústica para multicapas 6-8-6, 8-4-8 y 4-12-4 con granulometría 2,2-4 mm

panel multicapa ensayado. El rango de frecuencias estudiado entre 400 y 3500 Hz es función del diámetro del tubo y de la distancia entre micrófonos. En algunas gráficas puede observarse una drástica caída del coeficiente de absorción cuando se supera la frecuencia límite superior de medida.

La Figura 6 muestra el coeficiente de absorción acústica para multicapas 4-2-4, 3-4-3, 2-6-2 con granulometría de 0,7 mm: a) comprimiendo las capas en una fase, b) comprimiendo las capas en tres fases.

La Figura 7 muestra el coeficiente de absorción acústica para multicapas 4-2-4, 3-4-3, 2-6-2 con granulometría de 2,2-4 mm: a) comprimiendo las capas en una fase, b) comprimiendo las capas en tres fases.

La Figura 8 muestra el coeficiente de absorción acústica para multicapas 8-4-8, 6-8-6, 4-12-4 con granulometría de 0,7 mm: a) comprimiendo las capas en una fase, b) comprimiendo las capas en tres fases.

La Figura 9 muestra el coeficiente de absorción acústica para multicapas 8-4-8, 6-8-6, 4-12-4 con granulometría de 2,2-4 mm: a) comprimiendo las capas en una fase, b) comprimiendo las capas en tres fases.

4. DISCUSIÓN

Las gráficas de absorción acústica de las combinaciones de multicapa analizadas, muestran que la absorción es menor de 0,7 para todo el rango de frecuencias estudiado. Tal como se podía predecir, los valores del coeficiente de absorción acústica son mayores en las muestras de más espesor siendo similares a los obtenidos por otros autores [5-7], a pesar de las diferencias en el proceso de conformación. Por otro lado, los multicapa con granulometría entre 2,2 y 4 mm de las partículas de caucho, presentan una mayor absorción acústica que los de granulometría de 0,7 mm.

Esto se puede explicar en base a la impedancia acústica específica de cada uno de estos materiales por separado. La figura 10 muestra las gráficas de la impedancia acústica específica del caucho y las fibras sinterizadas.

Los resultados confirman que cuanto mayor es la impedancia acústica específica menor es el coeficiente absorción del material. El caucho de granulometría hasta 0,7 mm presenta mayor impedancia que el de granulometría entre 2,2 y 4 mm, debido a la morfología superficial de las capas de caucho sinterizadas. La Figura 11 muestra unas fotografías de microscopía de las superficies del caucho con granulometría 2,2-4 mm y 0,7 mm, donde se aprecia que la capa de caucho de granulometría fina presenta una superficie más uniforme lo que favorece la reflexión de la onda acústica incidente.

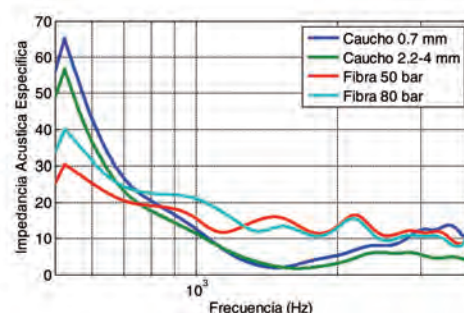


Fig. 10: Impedancia acústica específica

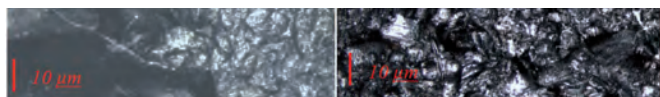


Fig. 11: Imágenes microscópicas del caucho con granulometría 2,2-4 mm (izquierda) y 0,7 mm (derecha)

El proceso de conformado por sinterizado tiene una influencia directa en el acabado superficial de las muestras. El prensado a alta presión y temperatura crea unas superficies con menor porosidad y cantidad de oquedades.

En el caso de las fibras se observa que partir de 700 Hz la impedancia acústica específica es ligeramente superior a la de los cauchos. Uno de los factores que influye en estos resultados es el alto grado de compactación al que se ha sometido a estas fibras en el proceso de sinterizado.

Una de las conclusiones que cabe destacar es que no hay ninguna combinación de espesores caucho-fibra-caucho que demuestre ser óptima en todo el rango de frecuencias estudiado. Esto puede explicarse en parte, a que se ha trabajado con muestras de pequeño espesor donde las diferencias en el comportamiento absorbente no son significativas, lo que en algunos casos hace que los resultados no siempre sigan un orden intuitivo.

A la vista de los resultados el trabajo se convierte en un punto de partida de futuras líneas de estudio:

- En lo que respecta al proceso de conformación sería conveniente estudiar la influencia del proceso de sinterizado en factores como la tortuosidad y la porosidad tan importantes para el comportamiento acústico del material, buscando un modelo paramétrico que optimice la relación entre las características mecánicas y el coeficiente de absorción.
- En relación con los materiales la tendencia actual es el uso de productos reciclados y fibras naturales [22-24]. En la línea de trabajar con paneles multicapa se podrían incorporar fibras textiles recicladas, fibras de coco, fibras de kenaf, fibras de cáñamo, etc.
- La estimación de otros parámetros vibroacústicos, como el factor de transmisión y el amortiguamiento, pueden contribuir a buscar nuevas aplicaciones para este tipo de materiales, como recubrimientos de pared para la insonorización de equipos industriales o rellenos de huecos en particiones ligeras. En este sentido cabe mencionar los trabajos de algunos autores como Hongisto [25], Diaz-Cereceda [26] y Uris [27].

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del Proyecto de Investigación PAID-06-11, dentro del plan de I+D+i financiado por la Universitat Politècnica de València.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] SIGNUS. End of life tyre prevention plan; 2010-2013. <http://www.signus.es/Portals/0/Plan_Empresarial_extracto_Ingl.pdf (30/04/2012)>.
- [2] Aiello MA, Leuzzi F, Centonze G, Maffezzoli A, "Use of steel fibers recovered from waste tires as reinforcement in concrete: pull-out behaviour, compressive and flexural strength". Waste Manage 2009, 29, p. 1960-70. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2008.12.002>)

- [3] Khaloo AR, Dehestani M, Rahmatabadi P, "Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles". Waste Manage 2008, 28, p. 2472-82. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2008.01.015>)
- [4] Sukontasukkul P. "Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel". Construct Build Mater 2009, 23, p. 1084-92. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.05.021>)
- [5] Asdrubali F, D'Alessandro F, Schiavoni S. "Sound absorbing properties of materials made of rubber crumbs". Acoustics Conference Paris 2008, p. 35-40.
- [6] Horoshenkov KV, Swift MJ. "The effect of consolidation on the acoustic properties of loose rubber granulates". Applied Acoustics 2001, 62, p. 665-690. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0003-682X\(00\)00069-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0003-682X(00)00069-4))
- [7] Rodríguez Montejano RM, "Propiedades acústicas del caucho granular". Tesis Doctoral, 2003.
- [8] Jiménez-Espadafor FJ, Becerra JA, Torres M, et al. "Optimal design of acoustic material from tire fluff". Materials and Design. 2011, 32, p. 3608-3616. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.02.024>)
- [9] Miravete A, et al. "Materiales compuestos I y II". INO Reproducciones, Zaragoza, 2000.
- [10] Tsai W, Miravete A. "Diseño y Análisis de Materiales Compuestos". Editorial Reverté, Barcelona, 1988.
- [11] Hull D. "Materiales Compuestos". Editorial Reverté, Barcelona, 2003.
- [12] Giles Carter F. and Donald E. "Materials Science & Engineering". CRC Press, First Edition, 1991.
- [13] Standard ISO 10534-2: Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 2: Transfer-function method.1998.
- [14] Crespo JE, Parres F, Nadal A. "Mechanical behaviour analysis of sintered products of natural rubber crumb rubber (NRCR) using adhesives". Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 2009, 40 No. 3, p. 1-7. (doi: <http://dx.doi.org/10.1002/mawe.200900429>)
- [15] Nadal A. "Investigación del reciclado de neumáticos a requisitos elastoméricos por técnicas de termocompresión". Tesis doctoral 2004.
- [16] Standard ISO 354:2003. Acoustics. Measurement of sound absorption in s reverberation room.
- [17] Attenborough K. "On the Acoustic slow wave in air filled granular media". J. Acoust. Soc. Am. 1987, 81, p. 93-102. (doi: <http://dx.doi.org/10.1121/1.394938>)
- [18] Beranek L. "Noise and vibration control engineering". John Wiley & Sons; 1992.
- [19] Dunn IP, Davern WA. Calculation of Acoustic Impedance of Multilayer Absorbers". Applied Acoustics 1986, 19, p. 321-334. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0003-682X\(86\)90044-7](http://dx.doi.org/10.1016/0003-682X(86)90044-7))
- [20] Song BH, Bolton JS. "A transfer-matrix approach for estimating the characteristic impedance and wave numbers of limp and rigid porous materials". J. Acoust. Soc. Am. 2000, 107 (3), p. 1131-1152. (doi: <http://dx.doi.org/10.1121/1.428404>)
- [21] Horoshenkov KV et al. "Reproducibility experiments on measuring acoustical properties of rigid-frame porous media (round-robin tests)". J. Acoust. Soc. Am. 2007, 122, p. 345-353. (doi: <http://dx.doi.org/10.1121/1.2739806>)
- [22] Asdrubali, F., "Survey on the Acoustical Properties of New Sustainable Materials for Noise Control," Proceedings of EuroNoise, 2006, Tampere Finland.
- [23] Kazragis A, Gailius A, Juknevičiute A., "Thermal and Acoustical Insulating Materials Containing Mineral and Polymeric Binders with Celluloses Fillers". Material Sciences 2002, 8 No. 2, p. 193-195.
- [24] Ramis J et al., "New absorbent material acoustic based on Kenaf fibre". Materiales de Construcción 2010, 60, p. 133-143. (doi: <http://dx.doi.org/10.3989/mc.201050809>)
- [25] Hongisto V, "Sound insulation of double panels-comparison of existing prediction models". Acta Acustica united with Acustica 2006, 92, p. 61-78.
- [26] Diaz-Cereceda C, Poblet-Puig J, Rodríguez-Ferran A. "The finite layer method for modelling the sound transmission through double walls". Journal of sound and Vibration 2012, 331, p. 4884-4900. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2012.06.001>)
- [27] Uris A et al. "Sound insulation of double frame partitions with an internal gypsum board layer". Applied Acoustics 2006, 67, p. 918-925. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2005.11.006>)

Desarrollo de un sistema experto para ayudar a la verificación del sistema "TACAN"

EXPERT SYSTEM DEVELOPMENT TO ASSIST ON THE VERIFICATION OF "TACAN" SYSTEM PERFORMANCE



DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5756> | Recibido: 18/02/2013 • Aceptado: 15/09/2013



Xosé Manuel Vilar-Martínez, Juan Aurelio Montero-Sousa, José Luis Calvo-Rolle, José Luis Casteleiro-Roca

UNIVERSIDAD DE LA CORUÑA. Dpto. de Ingeniería Industrial.
Avda. 19 de febrero, s/n - 15495 Ferrol (A Coruña).
Tfno: +34 981 337400. x.vilar@udc.es

ABSTRACT

- The air navigation systems implemented to date, both in military and civilian, are based on the TACAN system or some variant. Since the first release, it has been deeply developed and improved. However, despite it is easy to use, it has been and remains difficult to understand, both in performance and in verification terms. The aim of this research is to expose the developed Expert System to test the performance of TACAN system and for training on the verification of it.
- The model has been developed to achieve improvements on: fault detection, maintenance time reduction, and remove or minimize the mistakes on verification tasks.
- The efficiency of the model has been verified on several verification tasks. The achieved results have been very satisfactory in time reduction, efficiency and the acceptance by junior operators undergoing training.
- Keywords: TACAN, navigation systems, transponder, expert systems, knowledge model, fault detection, maintenance of electronic equipment.

RESUMEN

Los sistemas de navegación aérea implantados hasta la actualidad, tanto en el ámbito militar como en el civil, están basados en el sistema TACAN o alguna de sus variantes. Desde sus primeras versiones, ha sido desarrollado y mejorado en profundidad. Sin embargo, pese a su sencillez de manejo, ha sido y sigue siendo un sistema extremadamente difícil de entender, tanto en su funcionamiento como en su verificación.

El presente trabajo muestra un sistema experto basado en reglas, desarrollado con el objetivo de llevar a cabo operaciones de verificación de funcionamiento y formación en el sistema TACAN.

El modelo se desarrolla con el fin de alcanzar importantes avances en el diagnóstico de fallos, reducción de tiempos en tareas de mantenimiento, y tratar de eliminar, o, en su defecto, minimizar, errores.

Se ha verificado la eficacia del modelo en varias tareas para las cuales ha sido desarrollado. Los resultados han sido altamente satisfactorios en términos de reducción de tiempos, eficacia y acogida por operadores júnior en fase de formación.

Palabras clave: TACAN, sistemas de navegación aérea, transpondedor, sistema experto, modelo de conocimiento, verificación de funcionamiento, mantenimiento de equipos electrónicos.

1. INTRODUCCIÓN

Desde su primera puesta en funcionamiento en 1949 [1], y luego durante el desarrollo de posteriores versiones o variantes, el sistema TACAN (*TACTical Air Navigation*) ha sido la tecnología más empleada para la navegación aérea hasta nuestros días [2].

Son múltiples las investigaciones llevadas a cabo sobre el tema, como por ejemplo [3-11]. La tecnología del sistema no ha sufrido grandes evoluciones desde sus inicios y, a día de hoy, sigue siendo difícilmente sustituible. Destacar, además, que no se trata de un sistema trivial y de fácil asimilación para operadores que han de realizar verificación de funcionamiento sobre él [1, 2]. Por ejemplo, para realizar la comprobación de la transmisión de una señal concreta, no es suficiente con comprobar si es correcta, su ubicación temporal depende de otras señales que tienen que transmitirse previa y posteriormente, con lo que este tipo de trabajos se convierten en tediosos y complejos. En este sentido, además, es necesario disponer de personal técnico experimentado y con amplios conocimientos para poder realizar tareas de revisión, previas a las certificaciones periódicas del sistema.

Debido a la dificultad en esta comprobación del funcionamiento del sistema TACAN, sería de gran utilidad obtener un modelo que cumpla con los requerimientos de los usuarios dedicados a esta labor. Esta es la razón por la que en este trabajo se presenta un novedoso método basado en reglas para este fin. Se ha creado un sistema experto con la finalidad de poder asistir al personal técnico del sistema TACAN. El modelo también puede ser usado con fines de formación y adiestramiento.

Los sistemas expertos, pertenecientes al ámbito de la ingeniería del conocimiento, son modelos basados en el conocimiento de personas con amplia experiencia en un área concreta [12, 13]. Se extraen las reglas para realizar una tarea, y se organizan según su eficiencia [12]. Con esta metodología, la implementación del sistema emula el comportamiento de un experto en un determinado campo de aplicación [12, 14], siendo uno de los métodos más empleados tanto en investigación como en operación [14].

En el ámbito industrial moderno, cada vez se encuentran más sistemas en zonas de difícil acceso donde se requieren realizar inspecciones y mantenimientos. Además, debido a la complejidad de algunas labores de rescate y supervisión, los investigadores apuntan a que una posible solución para estos problemas son los vehículos aéreos [15], ya sean tripulados o no. Ejemplos de lo expuesto pueden ser: mantenimientos en líneas de transporte de energía eléctrica (Figura 1), detección de focos de incendio en grandes extensiones, labores de rescate y aprovisionamiento en catástrofes, etc.

Debido a este aumento en el uso de vehículos aéreos, se hace necesario disponer de sistemas de posicionamiento y guiado cada vez más fiables y precisos. En el ámbito de la aviación, sin tener en cuenta los sistemas de posicionamiento por satélite, el sistema TACAN es uno de los pocos que proporciona información a los vehículos aéreos sobre su posición relativa con respecto a un punto geográfico concreto.

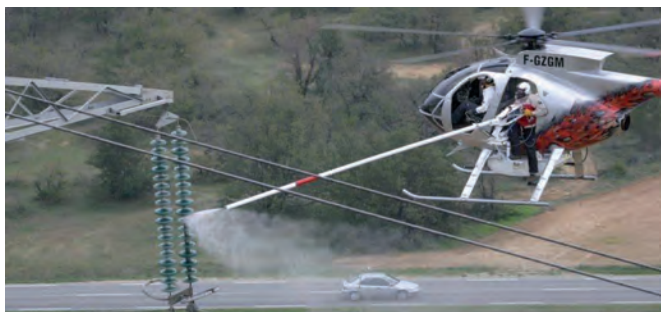


Fig. 1: Mantenimiento de aisladores de líneas eléctricas en carga

Este documento se encuentra estructurado de la siguiente manera: tras la presente introducción, se expondrá una reseña histórica donde se analizará brevemente la evolución del sistema desde sus inicios y el motivo de su desarrollo; seguidamente, se mostrará el funcionamiento básico del sistema TACAN, describiendo las dos principales informaciones de interés que proporciona; a saber: la distancia y el rumbo a seguir por un receptor para llegar al emisor. Una vez explicado el funcionamiento, se pasarán a exponer los Sistemas Expertos, sus ventajas de funcionamiento y el procedimiento genérico para su obtención. Posteriormente, se deducirán las señales

más importantes que servirán para crear el modelo de verificación del sistema, así como su operación para su correcto funcionamiento. A continuación, se expondrá brevemente el funcionamiento del modelo obtenido, pasando a mostrar después una demostración de la eficacia del modelo. El trabajo finaliza con la presentación de las conclusiones y el enunciado de posibles trabajos futuros a desarrollar.

2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

En 1903 los hermanos Wright realizaron el que se considera primer vuelo de un aparato con motor. Se trató de vuelo muy corto, en el que se utilizó una catapulta para impulsar el avión [16]. Después de este primer vuelo, el desarrollo de la aviación fue lento. En la primera década del siglo XX, los aviones eran más bien escasos y los desplazamientos eran cortos, intentando no perder el contacto visual con el punto de despegue. Cuando los pilotos se aventuraban a alejarse de los campos de aterrizaje se orientaban siguiendo las carreteras o las líneas férreas; solían utilizarse mapas y brújulas, aunque pronto se descubrió que serían necesarios mapas especiales que contuvieran información adicional (campos de aterrizaje, cotas de altura del terreno, etc.) para que pudieran ser utilizados por los pilotos [17]. La Primera Guerra Mundial amplió el campo de aplicación de la aviación, extendiéndola a un uso militar.

El uso comercial de los aviones comenzó con su utilización por los servicios postales, sobre todo en países con una enorme extensión de territorio como es el caso de Estados Unidos. Los aeropuertos eran escasos y estaban a gran distancia. La ayuda que se podía prestar desde tierra era prácticamente nula y muchas veces las condiciones meteorológicas impedían la navegación o causaban accidentes. En principio se estableció una primera línea aérea para el transporte de correo entre Washington y Nueva York, pero se advirtió que era deficitaria y que la verdadera ventaja comparativa del correo aéreo, en relación con otros medios de transporte como el ferrocarril, estaba en el correo de larga distancia.

La U.S. Post Office decidió probar un servicio transcontinental de correo aéreo utilizando la ruta Nueva York-San Francisco; en 1920, para este servicio, se utilizaron 15 campos de aterrizajes. Los vuelos se realizaban durante el día; por la noche las sacas de correo se trasladaban en tren. Ser piloto del correo aéreo era una profesión de riesgo; en nueve años de servicio se produjeron 6500 aterrizajes forzosos. Se volaba en biplanos que no tenían cabina para proteger al piloto y las inclemencias meteorológicas, sobre todo el frío, hacían mella en la salud [18].

A partir de 1926 el gobierno estadounidense tomó cartas en el asunto. Se instaló un sistema de faros con luces intermitentes para que los pilotos tuvieran una orientación luminosa a lo largo de las rutas aéreas. En unas torres se instalaron bombillas cuyo haz de luz se reflejaba en un espejo parabólico, que giraba a una velocidad de 6 revoluciones por minuto. Este sistema permitía volar durante las noches guiados por los destellos de luz. Pero seguía persistiendo el problema de guiarse cuando había escasa visibilidad [18].

El Departamento de Correos realizó experimentos para

instalar equipo en sus aviones. El *Federal Telecommunication Laboratories* también realizó trabajos para desarrollar sistemas de radio-navegación [19]. Se desarrollaron balizas de radio que emitían en la banda de 190 a 535 kHz (LF, baja frecuencia). Estas balizas, situadas aproximadamente cada 200 millas, emitían dos señales en código Morse, A (•-) y N (-•), que se fusionaban cuando el avión seguía el rumbo correcto, pero cuando se producía una desviación, se podría oír la señal A o N, según el rumbo hacia donde se hubiese desviado [18].

En 1927 ya funcionaban faros luminosos situados en diferentes puntos de Estados Unidos y un total de 17 radiofaros de baja y media frecuencia (LF & MF). En 1929 existían 89 radiobalizas instaladas en las rutas aéreas. Las comunicaciones de radio entre tierra-aire eran generalmente sólo en un sentido y en código hasta 1930, época en que los pilotos pudieron enviar mensajes radiotelefónicos entre la cabina del avión y las estaciones terrestres que permitieran orientar a los pilotos [20].

Otro avance en los sistemas de navegación aérea se produjo con la utilización del radiogoniómetro, que se basa en la utilización de una antena móvil que se orienta buscando en el horizonte una señal. Este sistema requiere la emisión de una fuente de ondas electromagnética (EEM) con un transmisor, denominado NDB (*Non Directional Beacon*) y un receptor en la cabina del avión, denominado ADF (*Automatic Directional Finder*) que de forma automática es capaz de estimar el ángulo de procedencia de las ondas electromagnéticas [21]. En definitiva, las antenas pueden emitir y recibir señales con cualquier orientación, pero emiten o reciben las señales con mayor intensidad cuando se orienta de una forma determinada [22].

En la década de los 50 se desarrolla el VOR (*VHF Omnidirectional Radio Range*). La señal emitida por la antena VOR contiene tres datos diferentes. Uno es el identificador de la estación emisora en código Morse; otro es el radial, o rumbo entre el receptor y el emisor, que se calcula a través de una señal giratoria [23]; y el tercero indica la distancia a la estación. TACAN es la denominación de la versión militar [24].

La *U.S. Navy* tenía problemas específicos relativos a la orientación de dos objetos que están en movimiento, un avión y un barco. Las primeras experiencias con los antecedentes del TACAN se realizaron en el buque Mississippi y posteriormente en Krause [24]. La versión civil y la versión militar comparten elementos comunes, pero, como es lógico, manteniendo en secreto los desarrollos de la parte militar [25].

3. FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA TACAN

Para ampliar información sobre el funcionamiento del sistema TACAN pueden acceder al vínculo:

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/5756_1.pdf



4. SISTEMAS EXPERTOS – MODELOS BASADOS EN REGLAS

En general, se puede decir que la ingeniería del conocimiento es la disciplina que permite construir sistemas inteligentes mediante la deducción de conocimientos [26]. Tiene como procesos centrales la adquisición, representación, manipulación y validación de este conocimiento [27]. Los sistemas basados en conocimiento, se pueden definir como sistemas *software*, que contienen una gran cantidad de conocimiento e incluyen métodos adecuados para explotarlo. Desde este punto de vista, aparecen los sistemas expertos [28].

Un sistema experto se suele reservar para aquellos sistemas basados en conocimiento que se relacionen más directamente con el conocimiento utilizado por expertos humanos [29], en contraposición con aquellos en los que el conocimiento se extrae de los libros o de personas no expertas (reglas comunes). Una de las ventajas que tienen estos sistemas es que son capaces de “capturar” experiencias y comportamientos escasos o específicos, pudiendo usar este conocimiento en diversas situaciones y lugares, sin necesidad de que el experto humano se encuentre físicamente allí [30].

4.1. VENTAJAS DE LOS SISTEMAS EXPERTOS

El desarrollo de sistemas expertos es aconsejable para ciertos dominios, e (incluso) imprescindible en otros. Algunas de las ventajas más importantes que ofrecen los sistemas expertos son las que se enumeran a continuación (relacionadas directamente con los sistemas *software* basados en conocimiento) [31]:

- **Permanencia.** A diferencia de un humano, un sistema experto no envejece. Por tanto, carece de pérdida de facultades y de desaparición del propio sistema con el paso de los años.
- **Duplicación.** Una vez programado el sistema, es posible duplicarlo las veces que sea necesario. Este hecho repercute directamente en una reducción de costes.
- **Rapidez.** Un sistema experto podría obtener información de una base de datos, realizar cálculos numéricos y presentar un resultado adecuado más rápidamente que el propio experto humano del que se ha adquirido el conocimiento.
- **Bajo costo.** El coste inicial del sistema puede ser elevado, pero, como se mencionó, gracias a la capacidad de duplicación, el coste final debería ser bajo.
- **Entornos peligrosos.** Un sistema experto podría trabajar en entornos peligrosos o dañinos para el ser humano. Los ejemplos más notorios los podríamos encontrar en manipulación de explosivos, trabajos en entornos radioactivos, etc.
- **Fiabilidad.** Estos sistemas no se ven afectados por condiciones externas. Un experto humano podría tomar decisiones motivadas por el estrés o por el estado de ánimo, cosa que no sucedería con un sistema experto.
- **Explicación del razonamiento.** A la hora de “introducir” el conocimiento en un sistema experto, se requiere de un estudio exhaustivo del problema concreto. Esto permite tener justificadas perfectamente las respuestas del sistema en cada momento, ya que no se deberían de dar “por

casualidad". Esta cualidad, también puede ser empleada para formar a personal no experto en el ámbito de aplicación, ya que todo el conocimiento del sistema estaría recogido en el sistema experto.

4.2. CONTEXTUALIZACIÓN DEL CONOCIMIENTO

El conocimiento es una mezcla de experiencia, valores, información y "saber hacer", que sirve como marco para la incorporación de nuevas experiencias e información [32], se origina y aplica en la mente de los expertos.

En las organizaciones, el conocimiento no sólo se encuentra dentro de documentos o almacenes de datos, sino que también está en rutinas organizativas, procesos, prácticas y normas. El conocimiento es intuitivo y difícil de captar en palabras o de entender plenamente de forma lógica, y existe dentro de las personas como parte de la complejidad humana. El conocimiento es específico de la materia y del dominio [33]. El conocimiento es un tipo especial de información que se puede

definir como "información de la información". Como ejemplo de esto se puede tomar un caso clínico en el que un individuo late 160 pulsaciones por minuto; a priori, parecería una información preocupante, pero no lo sería si estuviésemos hablando de un feto, en cuyo caso estaría dentro de la normalidad.

Resulta difícil definir el concepto de conocimiento, pero es más aún el representarlo. Se hace necesario que el conocimiento adquirido de una materia deba ser organizado, y preparado, para su utilización computacional en un sistema. En el desarrollo de un sistema experto, primero se intenta ver el problema desde el punto de vista del usuario, y después se cambiaría la perspectiva para verlo desde el punto de vista del sistema [34]. Se pretende, por tanto, pasar del dominio de la aplicación al de la implementación.

Para realizar esta transformación se debe llevar a cabo una actividad de modelado del sistema que se divide genéricamente en dos partes [35]:

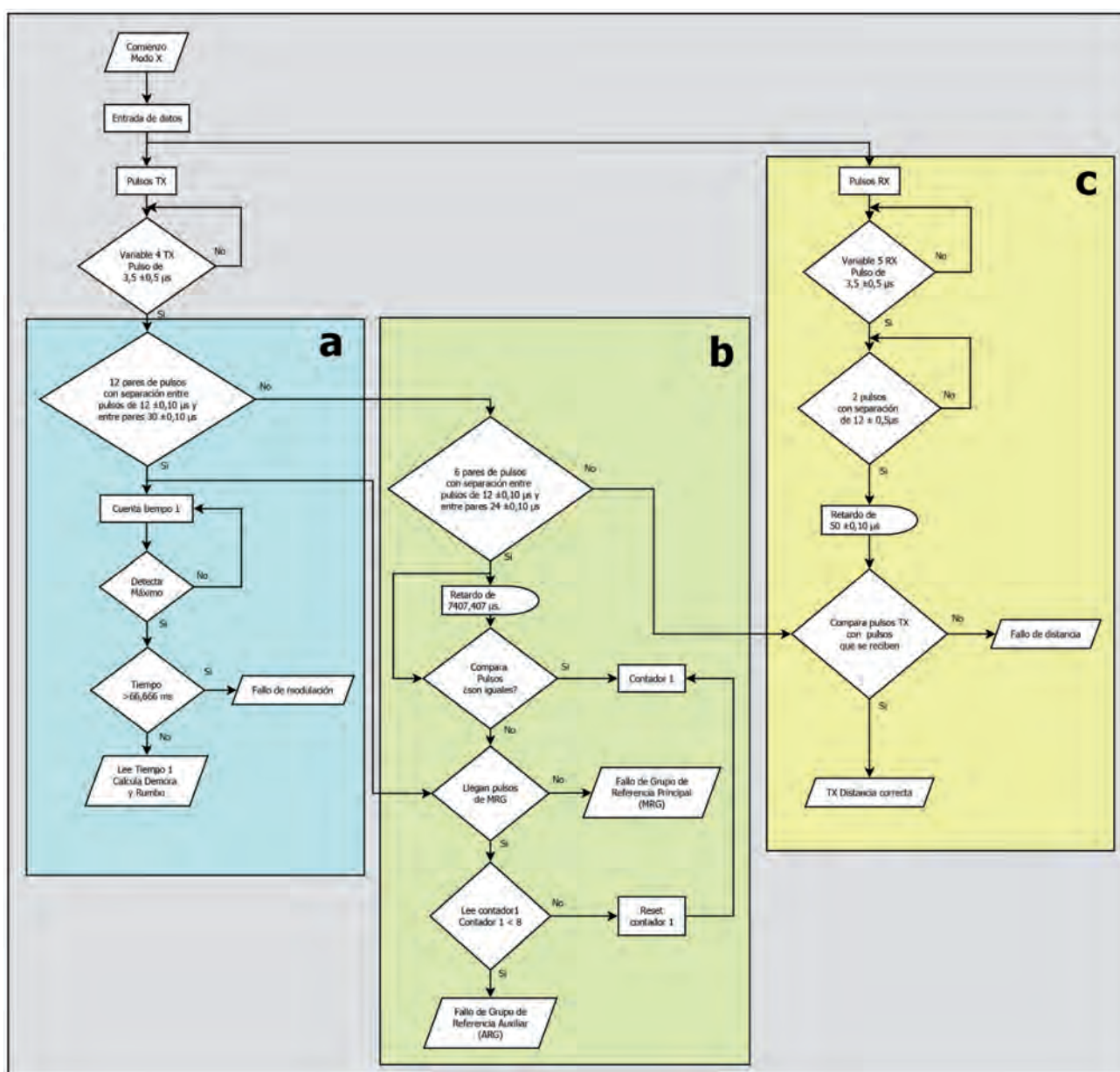


Fig. 12: Flujograma de funcionamiento del sistema TACAN en Modo X

- La primera sería una especificación de lo que debiera hacer el sistema. Se determinaría si el sistema resulta válido, y se adecúa a las necesidades del usuario. Esta primera parte se conoce como modelado conceptual. En ella se representa la estructura de los conceptos identificados en la fase de adquisición del conocimiento y los métodos de resolución empleados por expertos humanos y otras fuentes.
- La segunda parte de modelado determinaría que el producto *software* fuese correcto y permitiera representar todo el conocimiento. También comprobaría si el sistema tiene la capacidad necesaria para realizar los procesos de inferencia para dar soluciones. Esta parte es la denominada modelado formal.

5. MODELO BASADO EN REGLAS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA TACAN

Se describe en este apartado el funcionamiento del modelo implementado para la verificación del sistema TACAN. Se tendría como entrada al mismo, los datos de salida de un emisor TACAN (la radiobaliza), y se analizarían, según correspondiera, para extraer de ellos los datos que darían lugar tanto a la demora como a la distancia. Una vez comprobado que las salidas del modelo corresponden a los datos teóricos, se debería enviar el sistema a verificar, y se daría por concluida la tarea.

Para analizar los datos se debe comprender la relación que hay entre las diferentes señales del sistema. El flujograma que se muestra en la Figura 12 es el usado para el funcionamiento del sistema en Modo X. Para el Modo Y sería similar, con las variaciones que la diferencia de modo implicaran, básicamente, el número y las temporizaciones entre pulsos. De esta manera se entenderá como se secuencian los datos y se “descodifica” la información contenida en los mismos (demora, distancia).

Para llevar a cabo la verificación se capturarían los datos que se transmiten por la antena. En el caso que nos ocupa, esta captura se realiza mediante un osciloscopio DSO 6104A de Agilent, utilizando una frecuencia de muestreo de 500 kHz. Se han adquirido los datos en modo “csv”, para, posteriormente, ser tratados mediante *MatLab*®, por medio de *scripts* (programas de *MatLab*®).

Las comprobaciones anteriores al uso del sistema experto desarrollado se realizaban con un osciloscopio Tektronix TDS 3034B. Este equipo no dispone de capacidad de captura de datos, con lo que en la actualidad es usado sólo para medidas puntuales, pero no para el uso en el modelo desarrollado.

Los datos que se adquieren pueden observarse en la figura 13. Son los correspondientes a los pulsos de envío del MRG (primera traza, amarilla), ARG (segunda traza, verde), y todos los pulsos transmitidos, que serán los analizados realmente por el sistema experto (tercera traza, magenta). Las dos primeras trazas corresponden a señales internas del sistema, que indican los instantes de transmisión del MRG y del ARG en cada caso; pero no son señales transmitidas propiamente dichas.

En el flujograma se distinguen dos partes bien diferencia-

das para la verificación. La primera, que es la determinación de la demora, se muestra en la parte izquierda de la Figura 12, y corresponde a los recuadros “a” (la parte del MRG) y “b” (la parte del ARG); la segunda, que representa la medición de la distancia, se puede apreciar en la parte derecha (recuadro “c”). En la parte del flujograma que queda fuera de los recuadros mencionados, se comprueba que los pulsos capturados son correctos. A continuación se expondrán cada uno de las partes generales del flujograma:

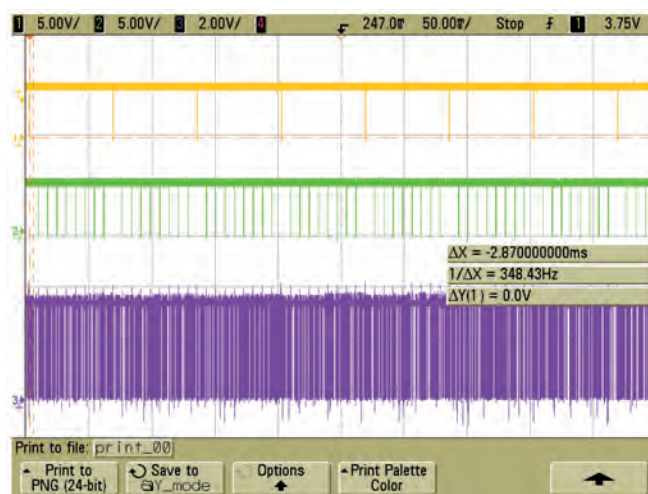


Fig. 13: Datos capturados por el osciloscopio para la verificación del Modo Y

La verificación comenzaría con la introducción de los datos capturados del sistema del cual se quiere comprobar el funcionamiento. Posteriormente, se acometerían acciones de mantenimiento correctivo, si son necesarias.

La primera comprobación se centra en la medición del ancho de cada pulso transmitido. El valor medido deberá ser de $3.5 \mu s \pm 0.5 \mu s$. Si el pulso analizado se encuentra dentro de la tolerancia, se comenzará la búsqueda de la trama (grupo de pulsos) correspondiente al MRG (recuadro “a” de la figura 12).

El siguiente paso en el flujograma es la localización del MRG. Habrá que localizar un grupo de 12 pares de pulsos, con una separación entre pulsos de $12 \mu s \pm 0.5 \mu s$ (Figura 14), y una separación entre pares de $30 \mu s \pm 0.1 \mu s$. En la Figura 15 puede verse una trama capturada del MRG.

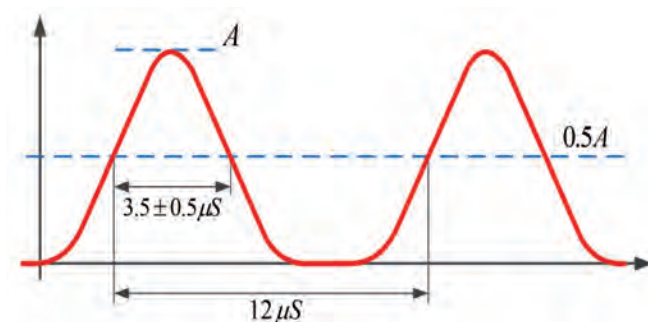


Fig. 14: Ancho teórico y separación de los pulsos del MRG

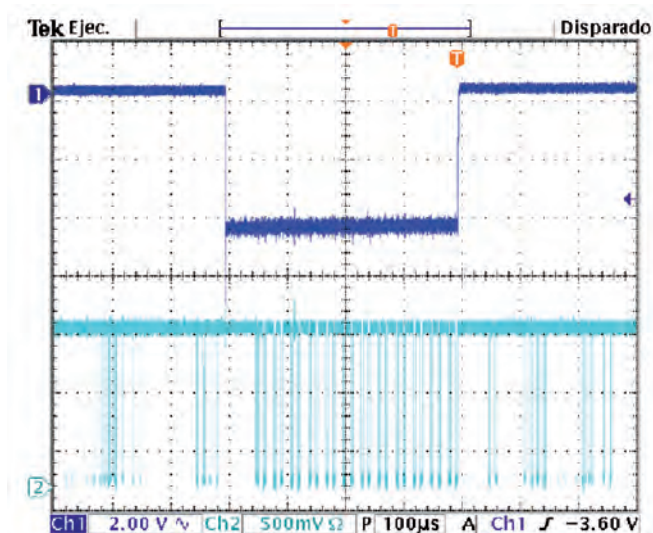


Fig. 15: Localización del Grupo de Referencia Principal

Si en la secuencia de pulsos se encuentra el MRG, se activa el contador 1, que se usará para contar el tiempo que transcurra desde la localización del MRG hasta la detección del máximo de la señal modulada. Si este tiempo sobrepasa los 66.666 ms (periodo de repetición de la secuencia de transmisión, 15 Hz), puede ocurrir que la modulación no se transmita de forma correcta, o que el sistema tenga una avería en la detección del máximo. Si se determina el tiempo entre el MRG y el máximo de modulación (ejemplos en las Figuras 6.a, 6.b y 7.a), se podrá calcular el radial en la que se encuentra el TACAN con respecto a la aeronave receptora.

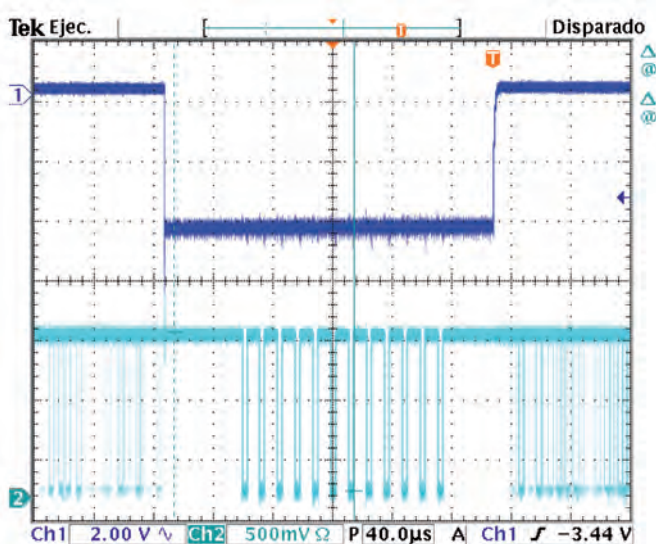


Fig. 16: Localización del Grupo de Referencia Auxiliar

Si los pulsos analizados no forman parte del MRG, se desvía el flujo de datos en el programa para localizar el ARG (recuadro "b" de la Figura 12). Se transmiten 8 ARGs y un MRG

en cada ciclo. Este ARG es un grupo de 6 pares de pulsos, cuya separación entre pulsos es de $12 \mu s \pm 0,5 \mu s$ y la separación entre pares es de $24 \mu s \pm 0,1 \mu s$ (Figura 16). Una vez detectado el primer grupo de pulsos correspondiente al ARG, el programa esperará $7407,407 \mu s$ (separación entre ARGs, 135 Hz) y comprobará si el siguiente grupo de pulsos es igual que el anterior.

Si los grupos de pulsos son iguales, un contador incrementará su valor para llevar la cuenta de los ARGs recibidos; en caso contrario, se comprobará que llega el MRG. Si a su vez esta comparación es negativa, se activará el fallo de MRG. Si por el contrario, la comparación es buena, la generación del MRG, con respecto a los ARGs, se realiza correctamente.

Además de ser buena la comparación, se leerá el número de incrementos en el contador de ARGs recibidos. Si el valor del contador es 7, el ARG está funcionando correctamente y se reseteará el contador para iniciar otro nuevo ciclo. Si el contador indicase un número diferente, se estaría generando mal el ARG.

Si los pulsos son correctamente detectados (ancho de pulso correcto), pero no forman parte del MRG, ni del ARG, el flujograma los "desviará" hacia la comparación de pulsos con la de determinación de la distancia DME (recuadro "c").

En la determinación de la distancia, hay que tener en cuenta que el sistema recibe la interrogación de la aeronave, y, posteriormente, envía la respuesta para que ésta pueda determinar la distancia DME. Los pulsos DME que recibe la baliza, se tienen que retrasar $50 \mu s$ (en el modo X), antes de volver a transmitirlos con la misma secuencia.

Los pulsos DME son pares de pulsos separados $12 \mu s \pm 0,5 \mu s$ (Figura 17), que a su vez se separan de otros de forma aleatoria (Figura 5). En el sistema experto, lo que se comprueba es que los pulsos transmitidos para este propósito son los mismos que se recibieron después de introducir el retardo correspondiente.

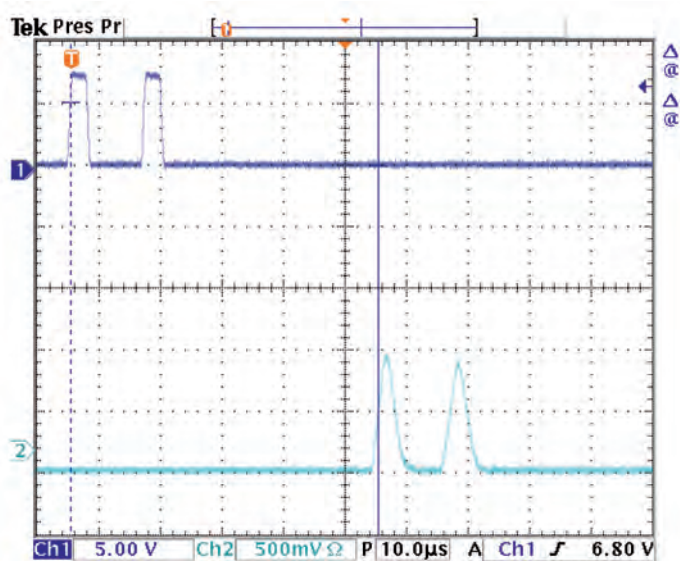


Fig. 17: Retardo introducido en los pulsos DME con respecto a su recepción

Todos los demás pulsos detectados, que no correspondan ni al MRG, ni al ARG, ni a los pulsos de determinación de la distancia, son pulsos de relleno (*squitter*). Estos pulsos se usan para mantener estable el control automático de ganancia.

El control automático de ganancia, aumenta la misma para recibir siempre la información con el mismo nivel de señal. Si no se recibiese nada, el sistema aumentaría la ganancia en automático, y, al recibir información de nuevo, el receptor se saturaría momentáneamente hasta ajustar de nuevo el nivel de ganancia adecuado. El envío de pulsos de relleno evita esta situación, así como la posible pérdida de información por saturación en el receptor.

El grupo de identificación de la señal TACAN es una transmisión en código Morse que identifica la radiobaliza que envía la señal. En el flujograma de la Figura 12, no aparece el tratamiento de esta señal, ya que al ser una señal con una frecuencia de transmisión muy lenta (cada 150 s), la comprobación de su correcta transmisión se realiza con un modelo diferente al contemplado en este artículo.

La información completa que transmite el sistema TACAN por orden de precedencia es:

- Grupo de Referencia Principal (MRG). Se emite cada 66.6 ms.
- Grupo de Referencia Auxiliar (ARG). Se emite cada 7.4 ms, excepto cuando se emite el MRG.



Fig. 18: Sistema TACAN y adquisición de la señal transmitida

```
% Determina el ancho de pulso de los pulsos capturados.
% Fecha: 25/05/2012.
% Definición de variables:
% Datos: matriz de datos.
% B: matriz con el tamaño de la matriz Datos.
% numero_filas: número de filas de la matriz de datos.
% n: contador de filas.
% a0: valor de tensión en el tiempo t0.
% a1: valor de tensión en el tiempo t1.
% V: Vector con la temporización de los pulsos detectados.
%-----
%
clear;
m=0; % Inicializo la variable.
Datos=csvread('/home/usuario/Prueba_datos/X-mode_20120402.csv'); % Se lee
                                % el fichero de datos y se almacena en la variable Datos.
B=size(Datos); % Matriz con el tamaño de la variable Datos.
numero_filas=B(1,1)-1; % Número de filas de datos.
for n=2:numero_filas;
    a0=Datos(n,4); % Nivel del pulso a0.
    n=n+1;
    a1=Datos(n,4); % Nivel del pulso a1.
    if (a0<2 && a1>3) t0=Datos(n,1); % Detecta el flanco de subida.
    else
        if (a0>2 && a1<3) t1=Datos(n,1); % Detecta el flanco de bajada.
        ta=t1-t0; % Tiempo entre flanco de subida y flanco de bajada.
        m=m+1;
        V(m,:)=ta; % Escribe el vector con el tiempo de los anchos de
                                % pulso.
    end
end
end
save('-text','Vector_Columna.txt','V'); % Graba el vector columna V en el
                                % fichero de texto Vector_Columna.txt.
```

Fig. 19: Script para la determinación del ancho de los pulsos capturados

- Respuesta de interrogaciones (DME).
- Squitter (pulsos de relleno).
- Grupo de identificación se emite cada 150 s.

EXPLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PARA UTILIZAR EL MODELO

Se capturarían las señales del sistema según se ha descrito (Figura 18). Se realizaría el tratamiento de los ficheros de datos para extraer información. Dependiendo del sistema usado para la captura, este tratamiento puede ser más o menos complicado para adaptar el formato a los programas implementados. Una vez comprendida la secuencia de la información, se hace uso de los scripts para comprobar el funcionamiento de las diversas partes del sistema.

Los *scripts* programados realizan al menos las siguientes funciones:

- Se mide el ancho de pulso de todos los pulsos capturados, detectando posibles fallos en la unidad de generación de pulsos.
- Se localiza el MRG y se calcula el porcentaje de modulación de los datos capturados, detectando de esta manera posibles fallos en la generación del MRG, en el sistema de modulación, en la orientación de la antena...
- Se localiza el ARG, detectando fallos en la transmisión del ARG (tanto en forma, número de grupos ARG).
- Se comprueba que la retransmisión de los pulsos DME recibidos es correcta, verificando el sistema de retardo

en el DME y que las temporizaciones aleatorias se respetan.

Teniendo en cuenta los fallos funcionales enumerados, se debería reflejar, para cada sistema TACAN, los posibles componentes de fallo en el propio sistema experto. Particularizando para el caso del TACAN AN/URN-25 (mostrado en la Figura 18), las unidades concretas según los fallos que se encuentre serían:

- Cuando el sistema localiza los fallos en el ancho de pulso, la avería se suele localizar en el “*Low Level Modulator*”, 1A2A12.
- Si el fallo se centra en la generación de MRG o ARG, la avería se suele localizar en el “*Coder-Keyer*”, 1A1A18.
- Si el fallo se localiza en la determinación de la distancia, en el retardo de 50 μ s, la avería se suele localizar en “*Time Delay Generator*”, 1A1A12.
- Puede darse el caso de que la frecuencia del canal de transmisión se encuentre desviada, o que no se genere la frecuencia base. Si esto ocurre la avería se suele centrar en el sintetizador de frecuencia “*Frequency Synthesizer*”, 1A1A16.
- Si se detecta un fallo de modulación, con lo que la demora no podría determinarse, el fallo se suele centrar en la antena “*Antenna AS-3240/URN*”.

Se muestra en la Figura 19 uno de los scripts implementados, concretamente el que corresponde a la medición del ancho de pulso.

Tarea	Acciones de verificación	Operador Sénior	Operador Junior	Junior asistido
Comprobación de transmisión del código de identificación	Comprobar que se transmite correctamente de forma cíclica cada 150 s.	17 min.	30 min.	20 min.
Comprobación de la separación de los pulsos DME, y el tiempo de retardo de la respuesta (figura 20.a)	El pulso debe medirse al 50 % del nivel de máxima amplitud. Su forma debe ser gaussiana sin zonas de compresión.	10 min.	20 min.	12 min.
Localización del MRG (figura 20.b)	Comprobar que los pulsos coinciden con el modo configurado.	15 min.	30 min.	18 min.
Localización del ARG	Comprobar que los pulsos coinciden con el modo configurado.	15 min.	30 min.	18 min.
Localización del máximo de la señal	Se localiza el máximo y el mínimo, a partir de los cuales se determinará el porcentaje de modulación.	7 min.	20 min.	10 min.
Comprobación de la distancia DME	Verificación de que la separación aleatoria entre pares de pulsos se mantiene en la retransmisión de la respuesta.	10 min.	20 min.	12 min.
Pulsos de relleno – Squitter	Medida de los pulsos (aprox. 6800 pulsos por segundo).	15 min.	30 min.	20 min.

Tabla 1: Comparativa de tiempos en trabajos de mantenimiento del TACAN

6. VERIFICACIÓN EMPÍRICA DE LA PROPUESTA

Para la verificación del funcionamiento del sistema experto propuesto, se ha realizado una medición de tiempos en tareas de verificación de sistemas TACAN instalados en buques.

Las pruebas se han realizado un total de 5 veces cada una para los distintos supuestos:

- Tiempo de verificación por personal sénior.
- Tiempo de verificación por personal junior adiestrados

pero sin experiencia.

- Tiempo de verificación por personal junior adiestrados, sin experiencia, pero asistidos por el sistema experto.

En la Tabla 1 se muestran los resultados. La primera columna muestra la definición de la tarea, la segunda las acciones de verificación y en las tres siguientes se indican los tiempos medios empleados por los tres tipos de usuarios mencionados.

Tal y como se puede observar al comparar los tiempos medios de los operadores junior, éstos mejoran de forma muy significativa con la asistencia del sistema experto. En ningún caso los tiempos son mejores a los conseguidos por operadores sénior, pero se acercan a ellos de forma considerable. Se ha comprobado que con este método se reduce la incertidumbre al realizar la verificación. Destacar, además, que en la fase de formación sobre el sistema, la curva de aprendizaje del personal a adiestrar es más rápida con la asistencia del esquema del sistema experto propuesto.

7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Con los programas descritos en este artículo, se ha podido comprobar experimentalmente el funcionamiento de diversos sistemas TACAN. La herramienta desarrollada es totalmente funcional y efectiva a la hora de verificar el sistema, y es el método usado por algunos técnicos especialistas.

A la hora de realizar las verificaciones, los técnicos solían encontrarse con el problema de que no se disponía de receptores válidos para la verificación de la transmisión. Con el método descrito en este artículo, no es necesario el disponer de receptores funcionales, siendo únicamente necesaria la señal de salida, junto con el sistema experto desarrollado. Esto permite que la verificación se pueda hacer en cualquier momento, y sin interrupción del servicio, capturando la señal en cualquier momento, y procesándola.

Este método es una excelente manera de aprender cómo opera el sistema TACAN, ya que se analiza el funcionamiento de cada una de sus partes de manera independiente. De esta forma, se obtiene una nueva herramienta, tanto para tareas de mantenimiento, como de formación en este sistema. Tal y como se ha comprobado en la verificación empírica del método, en las tareas de mantenimiento es de gran ayuda al personal que carece de experiencia, reduciendo, además, de forma significativa, el tiempo empleado para la adquisición de los conocimientos necesarios con el fin de obtener el grado sénior para este tipo de tareas. El modelo indica de manera aproximada la causa más probable de fallo cuando la verificación no es satisfactoria.

Como trabajos futuros cabría destacar el desarrollo de otro sistema experto de asistencia para el personal técnico de reparación del sistema TACAN.

El sistema TACAN es muy sencillo en lo que a su uso se refiere, pero sin embargo, como ocurre con muchos sistemas industriales, dicha sencillez va en contraposición de la complejidad interna de las señales. Debido a esta complejidad, y que la tecnología del sistema es antigua (no los equipos), el personal de asistencia del mismo requiere de mucha experiencia para que las reparaciones sean eficientes.

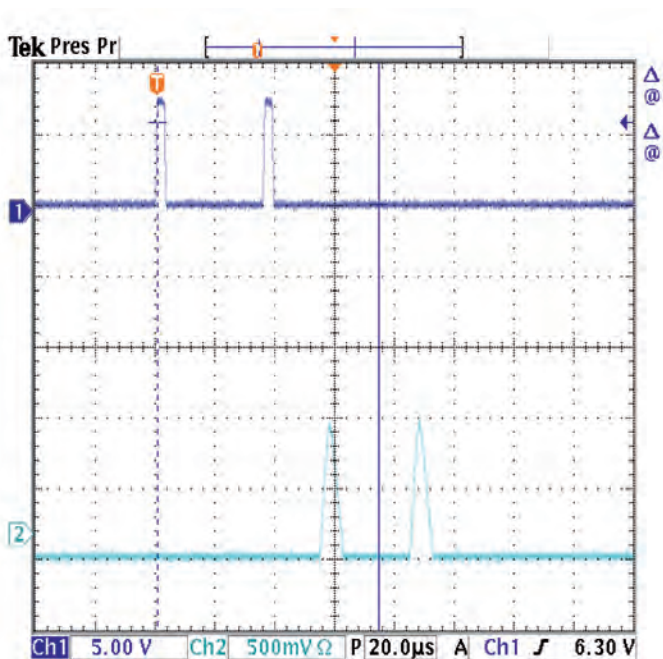


Fig. 20.a: Comprobación del tiempo de retardo en la respuesta del DME

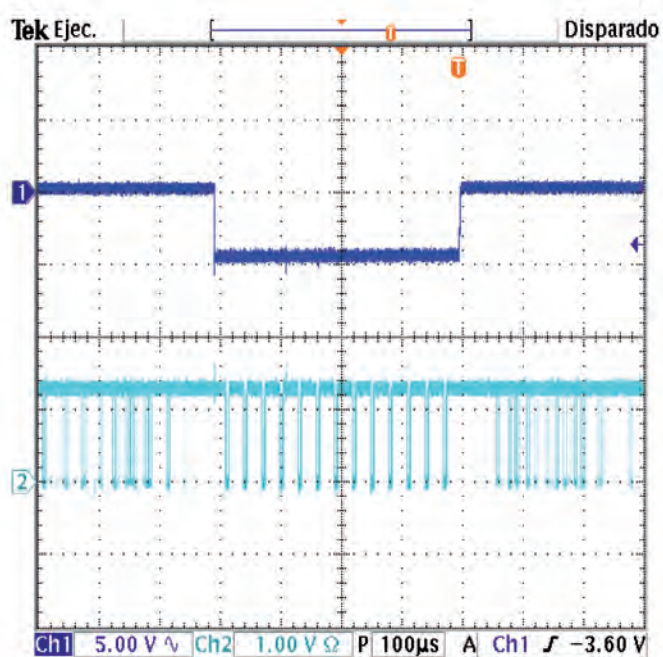


Fig. 20.b: Comprobación del espectro de radiofrecuencia del MRG

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Wikipedia. "Sistema VOR" [en línea]. Disponible en web: <http://es.wikipedia.org/wiki/Usuario:Italcala/sistema_vor> [Consulta: 27 de febrero de 2011]
- [2] Kayton M, Fried WR. *Avionics Navigation Systems*. Editorial: John Wiley & Sons, 2007. ISBN: 978-04-715-4795-2
- [3] Bin Z, We-Kang W. "Research on Accurate Measurement Method of TACAN Azimuth Base don Curve Fitting". En: *WiCom'09. 5th International Conference on Wireless communications, Networking and Mobile computing*, Sep. 2009. p. 1-4 (doi: <http://dx.doi.org/10.1109/WICOM.2009.5302518>)
- [4] Cheng WH, Mar A, Bowers JE et al. "High speed 1.3 μm InGaAsP Fabry-Perot lasers for digital and analog applications". *IEEE Journal of Quantum Electronics*. Jun. 1993. Vol. 29-6 p. 1660-1667. (doi: <http://dx.doi.org/10.1109/3.234418>)
- [5] deFaymoreau E. "Experimental Determination of TACAN Bearing and Distance Accuracy". *IRE Transactions on Aeronautical and Navigational Electronics*. Mar. 1956. Vol. ANE-3-1 p. 33-36. (doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TANE3.1956.4201438>)
- [6] Gao J, Fu C, Liu Y et al. "Behavioral modeling and EMC analysis for TACAN system". En: *IEEE 4th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies for Wireless Communications (MAPE)*. Nov. 2011. p. 576-579 (doi: <http://dx.doi.org/10.1109/MAPE.2011.6156169>)
- [7] Hadeii M, Ghorbani A, Khorramabad SMN. "Design and simulation of beam forming network for TACAN radar". En: *IEEE International RF and Microwave conference (RFM)*. Dec. 2011. p. 49-53 (doi: <http://dx.doi.org/10.1109/RFM.2011.6168693>)
- [8] Shi Y, Olson DJ, Bechtel JH et al. "Photoinduced molecular alignment relaxation in poled electro-optic polymer thin films". *Applied Physics Letters*. Feb. 1996. Vol. 68-8 p. 1040-1042 (doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.116241>)
- [9] Shi Y, Wang W, Bechtel JH et al. "Fabrication and characterization of high-speed polyurethane-disperse red 19 integrated electrooptic modulators for analog system applications". *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. Jun. 1996. Vol. 2-2 p. 289-299 (doi: <http://dx.doi.org/10.1109/2944.577380>)
- [10] Shi Y, Wang W, Lin W et al. "Double-end crosslinked electro-optic polymer modulators with high optical power handling capability". *Applied Physics Letters*. Mar. 1996. Vol. 70-11 p. 1342-1344 (doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.118574>)
- [11] Cheng WH. "Effect of carrier lifetime on mode partition noise in multimode semiconductor lasers". *IEEE Photonics Technology Letters*. Mar. 1994. Vol. 6-3 p. 355-358 (doi: <http://dx.doi.org/10.1109/68.275487>)
- [12] Cimino MGCA, Lazzerini B, Marcelloni F et al. "An adaptive rule-based approach for managing situation-awareness". *Expert Systems with Applications*. 2012. Vol. 39-12 p. 10796-10811 (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2012.03.014>)
- [13] Hayes-Roth F, Waterman DA, Lenat DB. *Building expert systems*. Editorial: Addison-Wesley, 1983. ISBN: 978-02-011-0686-2
- [14] Hayes-Roth F. "Rule-based systems". *ACM Commun*. Sep. 1985. Vol. 28-9 p. 921-932 (doi: <http://dx.doi.org/10.1145/4284.4286>)
- [15] *Helicopter-Based Live-Line Work: Volume 1: Helicopter Platform Work Between Phases, Final Report*, [Massachusetts], High Voltage Transmission Research Center, 1993. 132 p. Disponible en web: <<http://www.epri.com/search/Pages/results.aspx?k=Helicopter-Based%20Live-Line%20Work%20Volume%201:%20Helicopter%20Platform%20Work%20Between%20Phases,%20Final%20Report>>
- [16] "Historia de la aviación" [en línea]. Disponible en web: <<http://laaviacion.webatu.com/aviacion/historia-de-la-aviacion.htm>> [Consulta: 11 de noviembre de 2012]
- [17] Sviták P. "View back to the history of air navigation services" [en línea]. Disponible en web: <http://www.rlp.cz/generate_page.php?page_id=1182>
- [18] Wood C. "Flight simulator navigation" [en línea]. Disponible en web: <<http://www.navfltsm.addr.com/index.htm>>
- [19] Sandretto PC. "Development of TACAN at Federal Telecommunication Laboratories". En: *Electrical Communication*. Mar. 1956. p. 4-10
- [20] López C. "Historia del tráfico aéreo" [en línea]. Disponible en web: <<http://www.aviacioncivil.com.ve/historia-del-traffic-aereo>> [Consulta: 9 de noviembre de 2012]
- [21] León FG. *Radiogoniometría*. Editorial: Instituto Politécnico Nacional (Dirección de publicaciones), 2007. ISBN: 978-97-036-0435-7
- [22] "Radiogoniómetro" [en línea]. Disponible en web: <<http://www.exordio.com/1939-1945/civilis/telecom/hf-df.html>>
- [23] Wikipedia. "Radiofaro omnidireccional VHF" [en línea]. Disponible en web: <http://es.wikipedia.org/wiki/Radiofaro_omnidireccional_VHF>
- [24] Wikipedia. "Sistema TACAN" [en línea]. Disponible en web: <http://es.wikipedia.org/wiki/Usuario:Italcala/sistema_tacan> [Consulta: 10 de noviembre de 2012]
- [25] Wikipedia. "Tactical air navigation system" [en línea]. Disponible en web: <http://en.wikipedia.org/wiki/Tactical_air_navigation_system> [Consulta: 10 de noviembre de 2012]
- [26] Wikipedia. "Knowledge engineering" [en línea]. Disponible en web: <http://en.wikipedia.org/wiki/Knowledge_engineering> [Consulta: 28 de enero de 2013]
- [27] Prat N, Akoka J, Comyn-Wattiau I. "An MDA approach to knowledge engineering". *Expert Systems with Applications*. 2012. Vol. 39-12 p. 10420-10437 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2012.02.010>)
- [28] Martínez-Muneta M, Juanes-Márquez J, Rodríguez-Villagrà M, et al. "Simulando la inyección de plásticos. Nuevas formas de aprender los procesos". *DYNA Ingeniería e Industria*. 2012. Vol. 87-6 p. 671-678 (doi: <http://dx.doi.org/10.6036/4709>)
- [29] Wikipedia. "Expert system" [en línea]. Disponible en web: <http://en.wikipedia.org/wiki/Expert_system> [Consulta: 28 de enero de 2013]
- [30] Giarratano J, Riley G. *Expert Systems: Principles and Programming*. Editorial: Addison-Wesley, 2004. ISBN: 978-02-011-0686-2
- [31] Calvo-Rolle J, Ferreiro-García R, Alonso-Álvarez A. "Sistema basado en conocimiento para análisis de vibraciones en mantenimiento predictivo". *DYNA*. 2008. Vol. 83-8 p. 484-492
- [32] Chen Y, Hsu CY, Liu L, Yang S. "Constructing a nutrition diagnosis expert system". *Expert Systems with Applications*. 2012. Vol. 39-2 p. 2132-2156 (doi: [10.1016/j.eswa.2011.07.069](http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2011.07.069))
- [33] Wilk T, Wozniak M. "Soft computing methods applied to combination of one-class classifiers". *Neurocomputing*. 2012. Vol. 75-1 p. 185-193 (doi: [10.1016/j.neucom.2011.02.023](http://dx.doi.org/10.1016/j.neucom.2011.02.023))
- [34] Praczyk T, Szymak P. "Decision system for a team of autonomous underwater vehicles - Preliminary report". *Neurocomputing*. 2011. Vol. 74-17 p. 3323-3334 (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neucom.2011.05.013>)
- [35] López-Fornies I, Bergues-Muro L. «Diseño conceptual de productos. Un enfoque biomimético para la mejora de funciones». *DYNA*. 2012. Vol. 87-1 p. 35-44 (doi: <http://dx.doi.org/10.6036/4313>)

INFORME ANUAL ESTADÍSTICO DEL PROCESO EDITORIAL DE DYNA 2013

Nº DE ARTÍCULOS RECIBIDOS	245	100%
Nº DE ARTÍCULOS TRAMITADOS	166	68%
Nº DE ARTÍCULOS TRAMITADOS ACEPTADOS	45	18%
Nº DE ARTÍCULOS TRAMITADOS RECHAZADOS	121	49%
Nº DE ARTÍCULOS NO TRAMITADOS (EN PROCESO)	79	32%
FACTOR DE RECHAZO		73%

Cantidad	%
245	100%
166	68%
45	18%
121	49%
79	32%
	73%

Nº DE ARTÍCULOS RECIBIDOS POR DISCIPLINA	Cantidad	%
TERMODINÁMICA	2	0,8%
TEORÍA Y MÉTODOS EDUCATIVOS	3	1,2%
TECNOLOGÍA NUCLEAR	4	1,6%
TECNOLOGÍA NAVAL	1	0,4%
TECNOLOGÍA METALÚRGICA	6	2,4%
TECNOLOGÍA INDUSTRIAL	28	11,4%
TECNOLOGÍA ENERGÉTICA	17	6,9%
TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICAS	8	3,3%
TECNOLOGÍA DE VEHÍCULOS DE MOTOR	4	1,6%
TECNOLOGÍA DE MATERIALES	9	3,7%
TECNOLOGÍA DE LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE	12	4,9%
TECNOLOGÍA DE LOS ORDENADORES	4	1,6%
TECNOLOGÍA DE LOS ALIMENTOS	2	0,8%
TECNOLOGÍA DE LAS TELECOMUNICACIONES	4	1,6%
TECNOLOGÍA DE LA INSTRUMENTACIÓN	8	3,3%
TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN	11	4,5%
PSICOLOGÍA INDUSTRIAL	1	0,4%
PLANIFICACIÓN URBANA	4	1,6%
ORGANIZACIÓN Y PLANIFICACIÓN DE LA EDUCACIÓN	3	1,2%
ORGANIZACIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS	35	14,3%
ORGANIZACIÓN INDUSTRIAL Y POLÍTICAS GUBERNAMENTALES	2	0,8%
ÓPTICA	3	1,2%
MECÁNICA	5	2,0%
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS QUÍMICAS	8	3,3%
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA ELÉCTRICAS	21	8,6%
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA DEL MEDIO AMBIENTE	11	4,5%
INGENIERÍA AGRÍCOLA	1	0,4%
HISTORIAS POR ESPECIALIDADES	6	2,4%
FÍSICA ATÓMICA Y NUCLEAR	1	0,4%

ECONOMÍA SECTORIAL	6	2,4%
ECONOMÍA DEL CAMBIO TECNOLÓGICO	11	4,5%
CIENCIA DE LOS ORDENADORES	1	0,4%
CAMBIO Y DESARROLLO SOCIAL	2	0,8%
ACÚSTICA	1	0,4%
TOTAL	245	100,0%

Nº DE ARTÍCULOS APROBADOS POR DISCIPLINA	Cantidad	%
TERMODINÁMICA	1	2,2%
TEORÍA Y MÉTODOS EDUCATIVOS	1	2,2%
TECNOLOGÍA NUCLEAR	1	2,2%
TECNOLOGÍA METALÚRGICA	1	2,2%
TECNOLOGÍA INDUSTRIAL	4	8,9%
TECNOLOGÍA ENERGÉTICA	5	11,1%
TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICAS	1	2,2%
TECNOLOGÍA DE VEHÍCULOS DE MOTOR	1	2,2%
TECNOLOGÍA DE MATERIALES	1	2,2%
TECNOLOGÍA DE LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE	2	4,4%
TECNOLOGÍA DE LOS ORDENADORES	1	2,2%
TECNOLOGÍA DE LOS ALIMENTOS	2	4,4%
TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN	4	8,9%
ORGANIZACIÓN Y PLANIFICACIÓN DE LA EDUCACIÓN	3	6,7%
ORGANIZACIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS	5	11,1%
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS QUÍMICAS	1	2,2%
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA ELÉCTRICAS	2	4,4%
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA DEL MEDIO AMBIENTE	4	8,9%
ECONOMÍA DEL CAMBIO TECNOLÓGICO	1	2,2%
CIENCIA DE LOS ORDENADORES	1	2,2%
CAMBIO Y DESARROLLO SOCIAL	2	4,4%
ACÚSTICA	1	2,2%
TOTAL	45	100,0%

Nº DE ARTÍCULOS RECHAZADOS SIN USAR REVISIÓN ENTRE PARES	3	6%
Nº DE ARTÍCULOS ACEPTADOS SIN MODIFICACIONES	0	0%
Nº DE ARTÍCULOS PUBLICADOS	50	27%
Nº TOTAL DE PÁGINAS PUBLICADAS	720	100%
Nº DE PÁGINAS PUBLICADAS DE ARTÍCULOS	437	61%
PLAZO MEDIO DE PUBLICACIÓN (desde recepción hasta publicación)	205 días naturales	
Desviación estándar de plazo publicación (desde recepción hasta publicación)	46	
PLAZO MEDIO DE EVALUACIÓN (desde recepción hasta aceptación o rechazo)	20 días naturales	
Desviación estándar del plazo de evaluación (desde recepción hasta aceptación o rechazo)	18	

Nº DE EVALUADORES POR ARTÍCULO

1 revisión	12%
2 revisiones	15%
3 revisiones	37%
4 revisiones	19%
5 revisiones	11%
6 revisiones	7%
3,26	

Nº MEDIO DE EVALUACIONES POR ARTÍCULO

- 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).

En la Memoria

El pasado mes de agosto del año 2013, nos dejó nuestro compañero **Leandro Ardanza Goytia**, miembro del Consejo de Redacción de DYNA desde hace más de diez años. Su carrera profesional la desarrolló fundamentalmente en Iberduero y posteriormente Iberdrola, como directivo relacionado con la Generación en Centrales Térmicas y en el Medio Ambiente. Adelantado a su tiempo, atisbó la importancia de la Sostenibilidad y trabajó para contemplarla en todos y cada uno de los Servicios operativos.

Su dedicación -tanto al Colegio de Bizkaia como a la revista DYNA- marcó un modo pragmático y cercano de gestionar los temas tecnológicos, convirtiéndose en mentor de los que, entonces, éramos sus 'hermanos pequeños' en estas lides corporativas.

Vivió con entereza y afecto hacia sus colaboradores los difíciles momentos por los que atravesaron todos nuestros compañeros de Iberduero en los años '80, con motivo de los asesinatos de José María Ryan Estrada y Ángel Pascual Múgica (ambos en la cúspide tecnológica de la central nuclear de Lemóniz) a los que orientó profesionalmente en su formación específica; acontecimientos estos que ni él ni nosotros quisimos -ni queremos- olvidar por ser inherentes a nuestra vocación como intermediarios entre la Ciencia y la Sociedad civil.

También colaborador activo de la Revista con artículos relacionados con la gestión del medio ambiente en los años '90, dinamizó la transformación de la misma facilitando las bases para convertirla en lo que es hoy: el referente mundial más importante de Ingeniería General, escrito en Castellano.

Descanse en paz quien compartió con nosotros un inolvidable trecho de nuestras vidas profesionales.

DYNA

SUSCRIPCIÓN A LA REVISTA DE INGENIERÍA DYNA: 28% 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.
- 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 **35,70€**

Ahorro del 28% sobre precio tarifa 45,90€.

¿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 en la ingeniería desde
hace mas de 85 años**