

90 Aniversario

DYNA

ingeniería e industria #5

www.revistadyna.com

Año 91 | Nº5 | Septiembre - Octubre 2016

De la línea eléctrica HVAC a la HDVC

El control de flujo en aerogeneradores
Conseguir transformadores eficientes
Simulación de hidrociclones de doble vórtex
En el año de Leonardo Torres Quevedo



Revista de Ingeniería Multidisciplinar con factor de impacto en JCR

ISSN 0012-7361 | DOI: 10.6036/DYNAII | SICR: 0012-7361(20161901)91:5<>1.0.TX;2-I | CODEN: DYNAAU



Precio por ejemplar. 35,00 €

MANTÉNTE INFORMADO

con **DYNA**

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

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

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

Publicamos la actualidad en Ingeniería desde 1926.

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

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 (FAIIE - 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), Manuel Villalante LLauradó (Asociación de Catalunya - Barcelona), Germán Ayora López (Asociación de Andalucía Occidental - Sevilla), Miguel Ángel Martínez Lucio (Asociación de Madrid - Madrid), Manuel Lara Coira (Asociación de Galicia - Santiago), Martín Vega Uribarri (Asociación de Cantabria - Santander).

OTROS SOCIOS

Ramón Larrinoa Barreda (Colegio de Alava), Gabriel Egaña Uranga (Colegio de Gipuzkoa), Carlos Izkue Montejo (Colegio de Navarra), Francisco J. Marrodán Esparza (Asociación de La Rioja), Jesús María Mirat Celdrán (Asociación de Extremadura), Ginés Moratalla Valero (Asociación de Albacete), Begoña Martín Pérez (Asociación de Canarias Occidental), Gregorio Martínez Royano (Asociación de Canarias Oriental), Alfredo Arias Berenguer (Asociación de Baleares), Manuel María Uruña Cuadrado (Asociación 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), Angel Arcos Vargas (Universidad de Sevilla - Sevilla), Antonio Adsuar Benavides (Conselleria de Indústria Comercio e Innovación - Valencia) - Eduardo Valle Peña (Asociación de Cantabria - Santander), Blas Hermoso Alameda (Universidad Pública de Navarra - Pamplona), Franck Girot (Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers - Paris, Francia), Fernando Guijarro Merelles (Universidad de Extremadura - Cáceres), Fernando López Rodríguez (Agencia Extremeña de la Energía - Cáceres), Angel Mena Nieto (Universidad de Huelva - Palos de la Frontera), Ferrán Puerta Sales (Universidad Politécnica de Cataluña - Barcelona), Ignacio Fernández de Aguirre Guantes (Instituto de Fundición Tabira - Durango), José Manuel Palomar Carnicero (EPS Jaén - Jaén), José María Bueno Lidón (Green Power Tech - Sevilla), José Rafael Castrejón Pita (Queen Mary University of London - London, UK), 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), Roberto Uribeetxeberria (Universidad de Mondragón - Mondragón), Eva Martínez Caro (Universidad Politécnica de Cartagena - Cartagena), Javier Santos García (Universidad de Navarra - San Sebastian), Jorge Arturo Del Angel Ramos (Universidad Veracruzana - Veracruz, México), Ricardo Rodríguez Jorge (Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez - Juárez, México), Erik Ocaranza Sánchez (Instituto Politécnico Nacional - Tlascala, México), Joshué Manuel Pérez Rastelli (Tecnalia - Bilbao, España) - Lina Montuori (Universidad de Nueva York - Buffalo, USA), Jacques Mercadier (UISBA - Pau, Francia), Noelia Fernández Díaz (NaCOM Energy - Agotnes, Noruega), Luis Alfonso Fernandez Serantes (Universidad FH JOANNEUM - Graz, Austria), Jose L. Fernández Solís (Texas A&M University - College Station, Texas, USA), María Cristina Rodríguez Rivero (University of Cambridge - Cambridge, UK), Nadia Rego Monteil (Queen's University - Ottawa, Canada).

© 2016. Publicaciones DYNA S.L.

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

IMAGEN DE PORTADA:

By Wtshymanski (talk) - I (Wtshymanski (talk)) created this work entirely by myself., CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10660533>

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(20161901)91:5<>1.0.TX;2-I
 CODEN: DYNAAU
 DOI: 10.6036/DYNAII

Tirada de este número: 3.870 (papel) y 38.907 (digital)

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

UNIVERSIDADES COLABORADORAS

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

ORGANIZACIONES COLABORADORAS

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

ORGANIZACIONES AMIGAS DE DYNA

Bodegas Muriel, Amic y Structuralia

DIRECCIÓN

José María Hernández Álava

Miembro de:

- Council of Science Editors
- Asociación Española de Comunicación Científica

contenido

Septiembre - Octubre 2016

529



SIMULATION STUDY ON THE CLASSIFICATION EFFICIENCY OF HYDROCYCLONE WITH DOUBLE VORTEX FINDERS

ESTUDIO DE SIMULACIÓN SOBRE LA EFICIENCIA EN LA CLASIFICACIÓN POR HIDROCICLONES CON BOQUILLAS DE DOBLE VORTEX

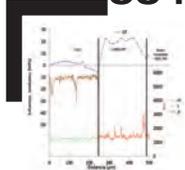
541



CONTROL AUTOMÁTICO GLOBAL SOBRE TRANSPORTE NEUMÁTICO DE PRODUCTOS EN UNA PLANTA DE PASTELERÍA INDUSTRIAL

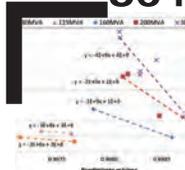
GLOBAL AUTOMATIC CONTROL OVER PNEUMATIC CONVEYING FOR FOOD PRODUCTS IN AN INDUSTRIAL BAKERY

554



ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES DEBIDO AL ATAQUE DE DEPÓSITOS VÍTREOS (CMAS) EN RECUBRIMIENTOS DE BARRERA TÉRMICA
STUDY OF THE EVOLUTION OF RESIDUAL STRESSES DUE TO GLASSY DEPOSITS (CMAS) ATTACK IN THERMAL BARRIER COATINGS

564



EFFECTO DE LA ADQUISICIÓN, CONSIDERANDO LA CAPITALIZACIÓN DE PÉRDIDAS, EN LA EFICIENCIA DE FLOTAS DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA
EFFECT OF THE ACQUISITION, CONSIDERING THE CAPITALIZATION OF LOSSES, IN FLEET EFFICIENCY OF POWER TRANSFORMERS

536



ANÁLISIS DE LAS CARENCIAS EN NORMALIZACIÓN PARA LA TRAZABILIDAD METROLÓGICA DE EQUIPOS MÉDICOS: CASO DE TERMÓMETROS CLÍNICOS, ULTRASONIDOS Y ONDA CORTA

ANALYSIS OF GAPS IN STANDARDIZATION IN METROLOGICAL TRACEABILITY FOR MEDICAL DEVICES: CASE OF CLINICAL THERMOMETERS, ULTRASOUNDS AND SHORTWAVE

548



SIMULATION VERIFICATION ANALYSIS OF ANCHORING CHARACTERISTICS OF TRANSVERSE RIB STEEL BAR DURING PULL-OUT TEST

ANÁLISIS DE LA VERIFICACIÓN POR SIMULACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE ANCLADO DE BARRAS DE ACERO CON ENTALLA TRANSVERSAL DURANTE EL ENSAYO DE EXTRACCIÓN

560



PROPULSIÓN ACUÁTICA BIO-INSPIRADA BASADA EN ALETEO: REVISIÓN Y ÚLTIMOS AVANCES

BIO-INSPIRED AQUATIC FLAPPING PROPULSION: REVIEW AND RECENT DEVELOPMENTS

571



MONITORIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE FACHADAS MEDIANTE UAV: APLICACIONES EN LA REHABILITACIÓN DE EDIFICIOS

THERMAL MONITORING OF FACADES BY UAV: APPLICATIONS FOR BUILDING REHABILITATION

476

Hitos de la ingeniería industrial

478

AULA DYNA. Building Information Modeling: barreras y oportunidades para mejorar la eficiencia en la industria de la construcción

482

Instalación tecnológica para fibra de carbono

484

Caucho a altas temperaturas

486

Análisis del consumo de agua de dos centrales nucleares españolas

487

Fomentar la gestión del conocimiento a través de las redes sociales y la gestión tecnológica

488

Vulnerabilidades de seguridad en sistemas embebidos

489

Optimización de recursos humanos enfocada a la mejora del servicio al cliente

490

Desarrollo metodológico de un entorno de búsqueda semántico para el sector del mueble. El proyecto SEMCONCEPT

491

Sobre el uso de sistemas inteligentes para seguridad vial

493

LEONARDO TORRES QUEVEDO: "El más prodigioso inventor de su tiempo"

495

Dilema moral para el desarrollo de competencias éticas en los estudios de ingeniería industrial. Aplicación a la ingeniería mecánica

498

Evaluación de factores influyentes en un puerto inteligente con un proceso analítico jerárquico

502

Modelo de análisis y validación de propuestas de diseño mediante prototipos flexibles

507

Mejora de un sistema de climatización con células Peltier a partir de la colmena de abejas: una aproximación teórica

512

Estado del arte sobre dispositivos activos y pasivos de control de flujo para turbinas eólicas

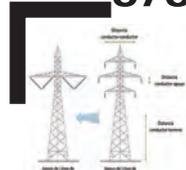
517

Revisión tecnológica, normativa y aplicaciones de los vehículos aéreos no tripulados en la ingeniería (1ª parte)

522

Estrategia para la consecución de edificios de consumo de energía casi nulo (EECN) en la Unión Europea (UE): La perspectiva Española

578



CÁLCULO DE DISTANCIAS DE SEGURIDAD EN LA REPOTENCIACIÓN DE LÍNEAS DE CORRIENTE ALTERNA CON TECNOLOGÍA HVDC

CALCULATION OF SAFETY CLEARANCES IN AC POWER LINE REPOWERING USING HVDC TECHNOLOGY

LABEIN

UN PASO DECISIVO PARA LA TECNIFICACIÓN DE LA INDUSTRIA

Pocos años antes del llamado Plan de Estabilización (1959), la reconstruida industria española, en práctica autarquía tras la Guerra Civil, había ido ganando actividad, especialmente en áreas como Madrid, Barcelona, Valencia, Asturias o Bilbao, y precisaba cada vez más recuperar unos mínimos niveles de tecnología y calidad, que las empresas no eran capaces de conseguir por sí mismas.

En Bilbao, los “Laboratorios de Ensayos e Investigaciones Industriales” nacen a iniciativa de D. Leandro José de Torrónategui, Director de la entonces Escuela Especial de Ingenieros Industriales y anexos a la misma, en 1955. La contribución de la Escuela fue decisiva para su consolidación y desarrollo.

Estos Laboratorios, adscritos a la Escuela, tenían como finalidad primordial “...cooperar con la industria llevando a cabo, en coordinación con la misma, cuantos ensayos e investigaciones industriales aquella plantee en relación con sus problemas técnicos específicos”. Se adoptó la forma jurídica de Fundación y pocos meses después, el 15 de diciembre se nombra el Patronato, entrando a formar parte del mismo destacadas personalidades de la política, la economía y la docencia de Bizkaia.

Dadas la doble característica de cercanía a la industria y adscripción a la Escuela, no cabe duda de que el nacimiento de estos Laboratorios (que todavía no son LABEIN) constituye un hito fundamental en la historia de la ingeniería bilbaína. Contaban con secciones dedicadas a la Construcción, Metalurgia, Química, Electricidad, Hidráulica, etc., con sus correspondientes medios de análisis y control.

En los primeros años ochenta del siglo XX se produce el traspaso a la Comunidad Autónoma del País Vasco de los “Laboratorios de Ensayos e Investigaciones Industriales” (16/12/1980), con los consiguientes cambios en los reglamentos y en las personas integrantes del patronato y la dirección. Por otro lado, la Ley de Reforma Universitaria de 1983 tuvo consecuencias importantes al pasar los profesores a tener una dedicación a tiempo completo a la Escuela, sin poder compaginarlo con los Laboratorios, lo que llevó, no sin problemas, a la separación de ambos centros.

Es entonces cuando los Laboratorios adoptan la forma jurídica de Fundación de acuerdo con la ley vasca, y ahora sí, se convierten en LABEIN, acrónimo del nombre anterior. Debido a este detalle y, muy a pesar de la dirección del Centro, que quiere dotar al nuevo LABEIN de un rango muy superior al de Laboratorios, se le sigue conociendo con el familiar: “Laboratorios”.

LABEIN entró en un período de crecimiento y consolidación muy favorable, pasando la facturación de 1.073 millones en 1990 a 20,36 millones de euros (3.378 millones de pesetas) en 2004. La plantilla pasó de las 59 personas de 1982 (antes de convertirse en Fundación) a 285 en 2004. Desde 2007 las memorias se consolidan como TECNALIA hasta la fusión que comentaremos más adelante; las últimas cifras sólo de LABEIN en 2006, nos dan una facturación de 24,4 M€ con una plantilla de 313 personas (el 36% mujeres), 70% de titulados superiores, la mitad en ingeniería, y un 12% de Doctores.

Volviendo al principio, dentro de sus actividades el centro ofrecía soluciones a problemas específicos de los clientes en cuanto a evaluación, diagnóstico, mantenimiento, etc., pero también analizan las oportunidades que se presentan para ellos en cuanto a productos y procesos. Por otro lado, impulsa la creación de spin-offs para desplegar el potencial de sus activos tecnológicos.

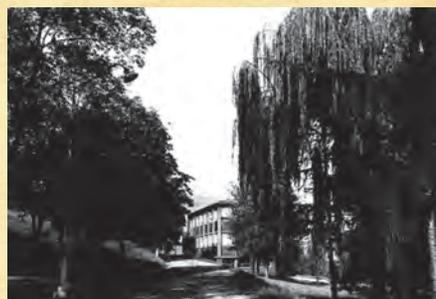
El Centro fue equipándose con los medios necesarios, en parte inicialmente con ayuda estadounidense, y se organizó siguiendo las recomendaciones de un grupo de profesores que visitaron diversas instalaciones europeas que pudieran servir de referencia. Es destacable que en febrero de 1957 se aprobó la puesta en marcha de una nueva actividad: la tecnología nuclear, disponiéndose poco después de un reactor conocido como “Arbi”. Hubo que esperar hasta 1962 para contar con un ordenador IBM 1620. Estos años la actividad de los laboratorios fue notable, pues entre el 1 de julio de 1955 y el 31 de diciembre de 1956 se llevaron a cabo 500 experimentos y ensayos.

Entre los miembros fundadores del centro u organismos que han prestado su apoyo para la consolidación de éste han participado distintas administraciones e instituciones públicas (la Universidad del País Vasco/EHU, y la Escuela Superior de Ingenieros entre ellas), entidades financieras, las empresas más importantes de nuestro entorno industrial y otras entidades, incluyendo el C.O.I.I.B., vinculadas con actividades industriales.

En el año 2002 se une a los Centros de Investigación INASMET y ROBOTIKER formando la Corporación Tecnológica TECNALIA, para desaparecer definitivamente el 31/12/2010, al producirse la fusión de estos y otros centros (hasta un total de 8) dando paso a TECNALIA R&I y desapareciendo como tal el resto de entidades independientes.



Sala de control del reactor nuclear Arbi



¿SUPONDRÁ LA ECONOMÍA CIRCULAR LA QUINTA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL?

Estamos de lleno en la cuarta revolución industrial, la que atiende a la denominación de Industria 4.0 y que supone un paso más en la utilización de las nuevas tecnologías de la información. Especialmente en el internet de las cosas (IoT), en la aplicación de todo el potencial de la digitalización para el tratamiento de datos o la simulación de procesos, y el empleo productivo de la robótica colaborativa, de la impresión 3D, de la sensórica o de la realidad aumentada: todo con el objetivo de mejorar la productividad y acceder o mantenerse en un mercado global.

Pero incluso antes de que termine de instaurarse mundialmente este nuevo movimiento industrial, está surgiendo uno nuevo, que puede suponer una quinta revolución industrial: la **Economía Circular**. Se trata de un modelo económico cuyo objetivo es mantener el valor de los productos y servicios el mayor tiempo posible, minimizando el consumo y desperdicio de materias primas, recursos y energía. En realidad no solo es una revolución industrial: es una revolución global, ya que no solo las fábricas deberán adaptarse. También deberán hacerlo los prestadores de servicios y sobre todo la sociedad.

En un planeta cada vez más poblado, donde cada vez es más costosa la extracción de materias primas y los combustibles fósiles son discutidos por sus problemas de afecciones medioambientales y volatilidad económica, encontramos progresivamente menos espacio para depositar nuestros residuos no reciclables y estamos afectando cada vez más a los ecosistemas que nos permiten seguir creciendo, especialmente debido al cambio climático provocado por nuestras actividades. Ser capaces de aprovechar al máximo los recursos de que disponemos será clave para ser competitivos y distanciarnos de nuestros competidores. Puro sentido común que se va a convertir en poco tiempo en necesidad, porque la nuestra es la última generación capaz de revertir el colapso ambiental que de no evitarse, derivará en un colapso económico y social.

Quizás los primeros pasos para avanzar hacia la Economía Circular deban darse desde las Administraciones, con una apuesta firme por el apoyo a las iniciativas alineadas con las bases de este modelo económico, pero la Sociedad debe estar preparada para ello y también deben estarlo los sectores económicos y los profesionales al servicio de los mismos.

En lo que respecta a nuestra profesión, será de vital importancia la adaptación de la ingeniería de producto, proceso y diseño industrial para poder "cerrar el círculo de vida" de los productos, los servicios, los materiales, las materias primas y la energía. Relacionados con la ingeniería de producto, destacar principios como la responsabilidad extendida del productor o el Eco-diseño, herramientas que permitirán desde la fase de diseño, que los productos o servicios sean más duraderos, reparables, reutilizables, re-manufacturables, reciclables o al menos valorizables.

Los ingenieros de proceso deberán seguir innovando para que en los propios procesos de fabricación se consuman menos recursos y energía y se generen menos residuos e impactos al medio ambiente. Si bien la eficiencia energética está ampliamente extendida, debido especialmente al elevado coste de energía, aún queda mucho por hacer con respecto a la reducción del consumo de materias primas y otros recursos, como el agua, y sobre todo de la recirculación de las mismas dentro de las propias fábricas.

Por último, además de adaptar los productos y procesos productivos a la Economía Circular, serán necesarias nuevas infraestructuras y tecnologías que permitan transformar este modelo económico incipiente en una realidad. Se necesitarán plantas de des-ensamblaje, de re-manufactura, de reciclaje. Las tecnologías de la información tendrán un gran protagonismo debido a la necesidad de mejorar la información al usuario y la trazabilidad de los productos. También será necesario mejorar los sistemas e instalaciones de recogida y almacenamiento de residuos, para que éstos no pierdan valor durante estos procesos. Deberán rediseñarse los sistemas logísticos para permitir procesos de logística inversa, más respetuosos con la integridad de los residuos.

En definitiva, la Ingeniería Industrial tendrá un gran protagonismo en la Industria 5.0 mediante la investigación aplicada en todo lo referente a nuestra profesión.

editorial

Building Information Modeling: barreras y oportunidades para mejorar la eficiencia en la industria de la construcción

Norena Martín-Dorta
Universidad de La Laguna (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7828>

1. INTRODUCCIÓN

El informe del *National Institute of Standards and Technology* sobre costes de interoperabilidad en el sector de la construcción de Estados Unidos estima que las pérdidas por ineficiencias, errores y atrasos en esta industria representa un cuantía anual de 15.800 millones de dólares. Esto corresponde a la suma de los costes anuales para cuatro grupos de actores clave: arquitectos e ingenieros (1.200 millones de dólares); contratistas (1.800 millones dólares); fabricantes y proveedores (2.200 millones); y los propietarios y operadores (10.600 millones). Desde una perspectiva empresarial, esto supone aproximadamente el uno por ciento de los ingresos anuales para cada uno de los tres primeros grupos de interés y casi un tres por ciento para los propietarios y operadores [1].

El Reino Unido, en su plan de gobierno del año 2011, ya pone de manifiesto la importancia del sector de la construcción en su economía y la necesidad de una renovación estructural. En Mayo de 2011 publica la *UK Government Construction Strategy*, impulsada desde el más alto nivel gubernamental, y cuya motivación es la necesidad de reducir en un 20% los costes de los proyectos públicos. A nivel de la Unión Europea, la aprobación de la Directiva sobre Contratación Pública en febrero del año 2014 pretende fomentar el uso del BIM entre los estados miembros en los proyectos de construcción y edificación financiados con fondos públicos a partir del 2016.

La industria de la construcción en España ha sufrido especialmente la crisis económica desde el año 2008. Según el Informe Económico de Seopan del año 2014, el volumen en millones de euros en licitaciones públicas de edificación e infraestructuras es un 63% menor en el año 2014 que en el año 2007. En los últimos cinco años, la construcción ha perdido más de 1,17 millones de empleos (el 51% de los que había en 2008). Durante las últimas décadas, se han producido desarrollos tecnológicos importantes que han modificado sustancialmente la forma en que vivimos. Sin embargo, la construcción, a pesar de ser una de las industrias más antiguas del mundo, siempre ha sido muy lenta en adaptarse y cambiar en consonancia con los avances de la tecnología [2]. El presente trabajo pretende facilitar una visión general sobre qué supone *Building Information Modeling para la industria*: la evolución y los conceptos principales y las barreras y oportunidades en la implementación. Se proporciona información útil para los profesionales que consideran implementar BIM en sus proyectos, sobre todo después de que el Ministerio de Fomento de España haya decidido asumir el liderazgo del proceso de adopción de la metodología BIM desde inicios del año 2015.

2. BUILDING INFORMATION MODELING: EVOLUCIÓN Y CONCEPTOS

Históricamente los arquitectos, ingenieros y diseñadores utilizaban tableros de dibujo y técnicas de dibujo manual para transmitir sus propuestas de diseño a los clientes. Entre los años 1970 y 1980, la industria AEC (Arquitectura, Ingeniería y Construcción) progresó al uso de los sistemas CAD (*Computer Aided Design*), de tal forma que los ordenadores asistían en la elaboración, diseño y redacción de obras de ingeniería. Comparado con el dibujo manual, el *Diseño Asistido por Ordenador* produjo mejoras en la productividad y en la reducción de los costes al permitir desarrollar mayor cantidad de trabajo en menor tiempo y con un menor esfuerzo. Sin embargo, el reto era asegurar la coherencia entre todos los documentos de un proyecto. *Building Information Modeling* no es en realidad una idea nueva. Estudios que explicaban cómo estructurar la información de la construcción se publicaron ya hace más de veinte años. BIM tienen su origen en los modelos de productos, ampliamente utilizados en la industria de automoción, aviación, petroquímica o naval. El desarrollo del modelado 3D se inició en la década de los 70, basado en los inicios en el *Diseño Asistido por Ordenador*. Mientras que en la industria se desarrollaron herramientas de modelado paramétrico y análisis integrado basado en objetos, el sector de la construcción se centró en el diseño tradicional 2D [1,3].

Ya en 1962 Douglas Engelbart propone "*objetos basados en diseño*", en la manipulación paramétrica y en una base de datos relacional; sueños que se convertirían en realidad varios años más tarde. En 1975, un artículo de Chuck Eastman describe un prototipo funcional que denominaba "*Building Description System (BDS)*" y que incluía conceptos de diseño paramétrico y su idea de una *base de datos única e integrada para un análisis visual y cuantitativo*. Entre los años 1970 y 1980 esta tecnología continua desarrollándose en todo el mundo. El enfoque BDS tendía a ser descrito en los EE.UU como *Building Product Models* y era conocido en Europa como *Product Information Models*. Estas expresiones se fusionaron para convertirse en lo que hoy conocemos como *Building Information Model*, término documentado por primera vez en 1992 en un artículo de Van Nederveen y Tolman, del Departamento de Ingeniería Civil de la *Delft University of Technology* (Países Bajos). En 1987, la empresa *Graphisoft* fue la primera en utilizar el concepto BIM, llamándolo *Virtual Building (Edificio Virtual)*. Gábor Bojar desarrolló *Radarcad* en 1984, rebautizado luego como *ArchiCAD*, y considerado como el primer software de BIM en el mundo para un ordenador personal. Leonid Raiz e Irwin Jung Reis querían desarrollar un software más potente que *ArchiCAD* que pudiera abordar diseños arquitectónicos más complejos. Nació así en el año 2000 *Revit*, comprada por Autodesk en 2002, lo que supuso su rápida expansión. Esto demuestra que BIM existía desde mediados de los 80, aunque ha tardado quince años en consolidarse [1].

La colaboración entre diversas empresas de software y distintos institutos de investigación fue el origen de la creación en 1995 de la *Industry Alliance for Interoperability* (IAI). Durante los siguientes años, la IAI trabajó para establecer un estándar para la descripción de los edificios, lo que permitiría el intercambio sin la pérdida de su información semántica. Este estándar se llamó *Industry Foundation Classes* (IFC) y fue publicado en su primera versión en 1997. Hasta la fecha no existe consenso sobre la definición del término Building Information Modeling. La *US Associated General Contractors Guide* define BIM como “el desarrollo y el uso de un modelo digital para simular la construcción y operación de una infraestructura en la que el modelo resultante es una representación digital inteligente, paramétrica, orientada a objetos y rica en datos de la instalación, de la que se pueden extraer y analizar los datos apropiados para las necesidades de los distintos usuarios para generar información que pueda ser utilizada en la toma de decisiones y en la mejora del proceso de entrega de la instalación”. El *American Institute of Architects* (AIA) define BIM como “una tecnología basada en un modelo vinculado con una base de datos de información del proyecto”. El *National BIM Standard – United States* (NBIMS-US) define BIM como una “representación digital de las características físicas y funcionales de una construcción. Como tal, sirve como recurso de conocimiento compartido para obtener información sobre una edificación, que constituye una base fiable para la toma de decisiones durante su ciclo de vida desde la fase inicial de diseño”. En España, la Guía de Usuarios BIM lo define como “una forma de trabajo en la que mediante herramientas informáticas se elabora un modelo de un edificio al que se incorpora información relevante para el diseño, construcción o mantenimiento del mismo” [4-7].

El *Bew-Richards BIM Maturity Model* [8] describe la evolución de BIM en la industria, desde el dibujo manual al BIM, pasando por el CAD y las posibles tendencias futuras en diferentes niveles. Este nuevo contexto de gestión de proyectos centrado en un modelo único ha dado lugar a lo que se denominan las dimensiones BIM. La dimensión 2D (*Drawing*) se refiere a los planos CAD tradicionales (líneas, imágenes). La 3D (*Model*) supone disponer de un modelo 3D que nos permita navegar por él, detectar colisiones, realizar simulaciones a nivel inicial de las fases de obra o permitir construir una maqueta virtual. La dimensión 4D (*Time*) añade la programación detallada de obra, con información de las actividades previstas. La dimensión 5D (*Cost*) supone la inclusión de información de la medición y el coste en el modelo BIM. Las dimensiones 6D y 7D están asociadas con los análisis de sostenibilidad y la gestión y operación de las infraestructuras. Otro de los conceptos que forman parte de los procesos BIM son el Nivel de Detalle y el Nivel de Desarrollo. El *Nivel de Detalle* (*Level Of Detail*) se corresponde con la cantidad de información de un elemento/objeto BIM. Inicialmente definida por la empresa Vicosoftware, convive con dificultad y dando lugar a errores de interpretación con el acrónimo LOD del *Nivel de Desarrollo* (*Level of Development*). El LOD como *Level of Development*, introducido por la AIA (*American Institute of Architects*), pretende valorar para qué sirve la información representada en lugar de la cantidad de información. Se define la cantidad y la calidad de información y no se refiere a la totalidad del proyecto y tampoco tiene vinculación con la fase de desarrollo o construcción.

El atractivo de *Building Information Modeling* como herramienta de transformación de la industria de la construcción es su capacidad para propiciar la colaboración, la coordinación y

la comunicación entre todos los actores involucrados en el ciclo de vida de un proyecto. Los formatos neutros de representación de datos son los que nos permitirán el intercambio continuo de información entre sistemas. Los formatos de representación y de intercambio de datos desarrollados por la *buildingSMART Internacional* (bSI) (antes *Industry Alliance for Interoperability*) y el formato Cobie (*Construction Operations Building Information Exchange*) han recibido una amplia aceptación por parte de la industria. El uso de la tecnología BIM requiere de la necesidad de tener un “lenguaje” común que defina los objetos que componen un proyecto. Para proporcionar una plataforma robusta, científica y estandarizada, bSI proporciona cuatro instrumentos: *Industry Foundation Classes* (IFC) – *data model*; *BuildingSMART Data Dictionary* (bSDD) – *data dictionary*; *Information Delivery Manual* (IDM) – *data processes*; y *Model View Definition* (MVD). Otro estándar para la transferencia de datos de información abierta, COBie, ha sido desarrollado junto a IFC y también para suplementarlo. Su objetivo principal es facilitar y estandarizar la transferencia de la información del proyecto de construcción desde el diseño, construcción y puesta en marcha hasta el mantenimiento [9].

3. BARRERAS Y OPORTUNIDADES

En esta sección se aborda cómo los procesos BIM están siendo implementados según la literatura científica: los beneficios y potencialidades, las barreras y los posibles riesgos.

3.1 BARRERAS EN LA IMPLEMENTACIÓN

La implementación de BIM en la industria de la construcción está afectada por distintas barreras, que se pueden clasificar según los estudios científicos en cinco grupos principales: la falta de una norma o estándar nacional; el alto coste de las aplicaciones; la falta de personal cualificado; las cuestiones de la organización/empresa; y las cuestiones legales. Cada barrera se puede dividir en dos o tres sub-grupos (items), como se refleja en la Tabla 1.

El desarrollo de una estrategia nacional para la implementación del BIM fijaría las prioridades nacionales y proporcionaría un mecanismo de referencia para toda la industria. Es necesario la determinación de estándares que faciliten la coordinación de la información entre los distintos agentes que participan en los procesos BIM y publicar directrices para su aplicación [11]. La inconsistencia de los datos se identifica como uno de los problemas de mayor importancia, y la interoperabilidad para el intercambio de información es el segundo más común [13]. La voluntad de compartir información entre los agentes interesados en el proyecto se considera un factor crítico y al que se debe prestar especial atención, estableciendo los mecanismos que favorezcan la capacidad de transmitir y reutilizar la información [10,12].

BIM precisa una inversión que tiene un coste considerable en software, hardware, formación y en el almacenamiento y la gestión de datos. Para las pequeñas organizaciones en particular, estos costes pueden suponer una importante barrera para la implementación en su organización. Esto hace necesario valorar con prudencia los procesos de implementación [14].

Los costes en formación y entrenamiento tienen dos grandes elementos: garantizar que una empresa tiene el personal necesario, ya sea mediante la contratación de nuevo personal o la reconversión del personal existente, para establecer e integrar la tecnología BIM en sus operaciones; y el reciclaje de la mayoría del

personal existente para apoyar los cambios de comportamiento y organizativos necesarios para adoptar la tecnología BIM dentro de un modelo de negocio. Los estudios han demostrado que la formación en BIM puede mejorar significativamente la competitividad de los estudiantes en el mercado laboral actual [17]. La falta de profesionales con formación adecuada ha obstaculizado un avance más rápido del uso del BIM en la industria AEC [16]. Esta brecha en las habilidades es un obstáculo para la implantación. Esta situación puede empeorar debido a una escasez de profesionales capacitados en BIM en los próximos 20 años [15].

Las cuestiones relacionadas con los modelos organizativos de las empresas y que afectan a la implementación del BIM incluyen áreas como la ética profesional, los problemas en la gestión de los procesos y la confianza [20]. El trabajo colaborativo gestionado mediante procesos BIM pone su acento en los problemas de interoperabilidad [18]. Los altos directivos pueden ser reticentes a introducir nuevas tecnologías y procesos en la organización. El enfoque de abajo hacia arriba (bottom-up) se considera más eficaz en el tratamiento de la resistencia al cambio [19]. La falta de conocimiento acerca de lo que hay que hacer para evolucionar desde el sistema de trabajo tradicional está claramente identificado como una barrera para la implementación de BIM [12].

Es necesario por último abordar los aspectos jurídicos asociados al BIM. El primer riesgo legal está relacionado con la propiedad de los datos. Pueden surgir problemas de propiedad cuando otros actores, distintos de los propietarios y los arquitectos e ingenieros, aportan datos que se integran en los modelos [11]. Otra cuestión será cómo determinar quién controla el acceso a los datos, y quién será responsable de los errores. Este aspecto podría provocar una gran cantidad de riesgos. Las partes interesadas requieren seguridad en la gestión de los datos del modelo BIM. Distintos conflictos jurídicos y de seguridad se han identificado en relación con la administración de proyectos de construcción dentro de un entorno electrónico por lo que la normativa tendrá que ser capaz de abordarlos [21].

3.2. LOS BENEFICIOS Y OPORTUNIDADES

Los beneficios más destacables logrados con la implantación de metodologías BIM mencionados por diversas fuentes de la literatura se identifican y resumen en las siguientes líneas [22].

- La mejora en el control y la colaboración en los proyectos entre las partes interesadas.
- Mejora de la productividad (menos modificaciones, conflictos y cambios).
- Mejora en la calidad y el rendimiento del proyecto.
- Reducción en los plazos de ejecución de los proyectos.
- Reducción de las bajas/mermas.
- Reducción de los costes de construcción.
- Nuevos ingresos y oportunidades de negocio.

Se estima que BIM puede eliminar las modificaciones no presupuestadas en un 40%, y reducir el tiempo necesario para completar un proyecto en un 7%, y el tiempo para generar una estimación de los costes hasta en un 80% [11]. El *Center for Integrated Facility Engineering* de la Universidad de Stanford publicó un informe en el año 2007 sobre su trabajo con 32 proyectos de EE.UU., Europa y Asia. El estudio demuestra que cuando se usan metodologías BIM en un proyecto se pueden eliminar hasta en 40% los cambios no presupuestados, aumentar la precisión en la estimación de los costes en al menos un 3% y reducir en un 80% el tiempo necesario para generar una estimación de los gastos [1]. El Gobierno del Reino Unido ha publicado los datos de costes desde el año 2012 en relación con la consecución de su objetivo general de una reducción sostenible de entre un 15% y un 20% en el coste de la construcción para el año 2016. El informe de julio de 2014, "*UK Departmental Cost Benchmarks Cost Reduction Trajectories and Cost Reductions*" demuestra una continua disminución de los costes [23].

El compromiso de la *US General Services Administration* (GSA) durante más de una década con el Programa Nacional 3D-4D-BIM está logrando ahorros de sostenibilidad consistentes y medibles a través de una cartera de construcción pública de más de 9.000 activos. Sus 10 proyectos piloto iniciales han logrado ahorros que cubrieron el coste del programa piloto del primer año. En la actualidad se alcanza un ahorro regular debido a la detección anticipada de errores y omisiones, a la reducción de los tiempos de construcción, a la mejora en la precisión y rapidez de las mediciones con menos del 5% de error y con una mayor transparencia y fiabilidad en las simulaciones de eficiencia energética.

| Categoría | Ítem | Referencias |
|--|---|-------------|
| Ausencia de un estándar o norma nacional | Un estándar nacional incompleto Dificultades en el intercambio de información en BIM | [10-13] |
| Alto coste de las aplicaciones | Alto coste inicial del software Alto coste del proceso de implementación | [11,14] |
| Falta de personal cualificado | La falta de profesionales Alto coste de la formación | [15-17] |
| Cuestiones de la organización/empresa | Problemas en los procesos Curva de aprendizaje La falta de apoyo desde la dirección | [12, 18-20] |
| Cuestiones legales | De propiedad La responsabilidad por imprecisiones Problemas de licencias | [11, 21] |

Tabla 1: Resumen de las barreras en la implementación de BIM

El Centro de Ciencias de la Salud de la Universidad de Colorado, es uno de los pocos proyectos capaces de medir el éxito de la implementación de BIM comparando dos proyectos de similares características mediante procesos convencionales y metodologías BIM. El primer proyecto (216 millones de Dólares) se completó con éxito, en tiempo y dentro del presupuesto con un enfoque tradicional de entrega. El segundo proyecto (201 millones de Dólares) fue construido unos años más tarde mediante un proceso de diseño y construcción virtual integrada (VDC) y dio lugar a resultados "excepcionales" con la mejora de la productividad, el aumento de la prefabricación, menos trabajo, RFIs (requerimientos de información) y cambios reducidos y se terminó 2 meses antes de lo previsto y bajo presupuesto [24].

BIM es una nueva metodología de gestión de la información del ciclo de vida de los edificios. El llamado modelado de información para la edificación es el proceso de generación y gestión de datos del edificio durante el ciclo de vida utilizando software dinámico en tres dimensiones y en tiempo real, que permite disminuir pérdidas y recursos en el diseño y construcción, y también, en la explotación, mantenimiento, remodelación, e incluso, derribo o deconstrucción del edificio. Estas nuevas metodologías se manifiestan como catalizadores del cambio, y abren nuevas oportunidades de trabajo dentro del sector, afectando a todos los agentes que lo integra y que tienen que competir en este nuevo contexto.

PARA SABER MÁS

- [1] Eastman C, Teicholz P, Sacks R, Liston K. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modelling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors. Canadá: John Wiley & Sons. Inc. 2011. ISBN: 978-0-470-54137-1.
- [2] CAATEEB (Col·legi d'Aparelladors, Arquitectes Tècnics i Enginyers d'Edificació de Barcelona). Informe de oportunidades en el sector de la construcción. El BIM y las nuevas Startups. 2015.
- [3] Del Caño-Gochi A, De La Cruz-Lopez M, Solano-Diaz Del Rio L. "Potencialidades de la realidad virtual con VRML / X3D en proyectos de construcción". DYNA. 2007, Vol.82-3, p. 15-25.
- [4] Cerovsek T. "A review and outlook for a Building Information Model (BIM): A multi-standpoint framework for technological development", Advanced Engineering Informatics. 2011. Vol.25-2, p. 224-244. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aei.2010.06.003>.
- [5] Kristen Barlish, Kenneth Sullivan. "How to measure the benefits of BIM – A case study approach". Automation in Construction. 2012, Vol.24, p. 149-159. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2012.02.008>.
- [6] Eadie et al. "BIM implementation throughout the UK construction project lifecycle: An analysis". Automation in Construction. 2013. Vol.36. p.145-151. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2013.09.001>.
- [7] Building Smart Spanish Chapter. Guía de Usuarios BIM. 2014.
- [8] Bew M, Richards M. "Bew-Richards BIM maturity model", BuildingSMART Construct IT Autumn Members Meeting, Brighton. 2008.
- [9] Building Smart International. The Basic Standards. 2014.
- [10] Björk BC, Laakso M. "CAD standardisation in the construction industry—A process view". Automation in Construction. 2010. Vol.19-4 p. 398-406. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2009.11.010>.
- [11] Azhar S. "Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry". Leadership and Management in Engineering. 2011. Vol.11-3. p.241-252. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000127](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127).
- [12] Aibinu A, Venkatesh S. "Status of BIM Adoption and the BIM Experience of Cost Consultants in Australia". Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice. 2014. Vol.140-3. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)EI.1943-5541.0000193](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)EI.1943-5541.0000193).
- [13] Alreshidi E, Mourshed M, Rezgui Y. "Exploring the Need for a BIM Governance Model: UK Construction Practitioners' Perceptions.

- Computing in Civil and Building Engineering, ASCE, p. 151-158. DOI <http://dx.doi.org/10.1061/9780784413616.020>.
- [14] Ganah AA, John GA. "Achieving Level 2 BIM by 2016 in the UK". Computing in Civil and Building Engineering. 2014, pp. 14-150. DOI: <http://dx.doi.org/10.1061/9780784413616.019>.
 - [15] Smith DK., Tardif M. "Building information modeling: a strategic implementation guide for architects, engineers, constructors, and real estate asset managers". John Wiley & Sons, 2009. DOI <http://dx.doi.org/10.1002/9780470432846>.
 - [16] Becerik-Gerber B, Gerber DJ, Ku K. "The pace of technological innovation in architecture, engineering, and construction education: integrating recent trends into the curricula". Journal of Information Technology in Construction. 2011. Vol.16 p.411-432.
 - [17] Wu W, Issa RRA. "BIM Education and Recruiting: Survey-Based Comparative Analysis of Issues, Perceptions, and Collaboration Opportunities". Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice. 2014. Vol.140-2. DOI [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)EI.1943-5541.0000186](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)EI.1943-5541.0000186)
 - [18] Demian P, Walters D. "The advantages of information management through building information modelling". Construction Management and Economic. 2014. Vol.32-12. P.1153-1165. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/01446193.2013.777754>.
 - [19] Arayici Y, Coates P, Koskela LJ et al. "Technology adoption in the BIM implementation for lean architectural practice". Automation in Construction. 2011. Vol.20-2, p.189- 195.
 - [20] Won J, Lee G, Dossick C, Messner J. "Where to focus for successful adoption of building information modeling within organizations". Journal of Construction Engineering and Management, Vol.139-11. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000731](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000731).
 - [21] Chynoweth P, Christensen S, McNamara J et al. "Legal and contracting issues in electronic project administration in the construction industry". Structural Survey. 2007. Vol.25-3/4 p.191-203. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/02630800710772791>
 - [22] Qian A. "Benefits and ROI of BIM for Multi-Disciplinary Project Management". National University of Singapore. 2012. [ref. 29/02/16]. Disponible en Web: <http://goo.gl/q3C7L9>
 - [23] Cabinet Office (UK): Government Construction – Construction Cost Reductions, Cost Benchmarks, & Cost Reduction Trajectories. 2014. [ref. febrero 2016]. Disponible en Web: <https://goo.gl/64Jqw>
 - [24] McGraw-Hill. "McGraw-Hill Construction SmartMarket Report: The Business Value of BIM." McGraw-Hill Construction. 2009.

AGRADECIMIENTOS

El presente estudio ha sido desarrollado al amparo del Proyecto de Investigación "BIMNOTES: Anotaciones de Modelos 3D en el Ciclo de Vida en Entornos BIM", del Plan Nacional de I+D+i del Ministerio de Economía y Competitividad y del Proyecto de Investigación "BIMCanarias: La Tecnología BIM en el impulso de la industria Canaria de la Arquitectura, Ingeniería, Construcción y Mantenimiento (AEC/O)", financiado por la Fundación CajaCanarias.

Instalación tecnológica para fibra de carbono

OAK Ridge National Laboratory (USA)
Traducido por Ignacio Fernández de Aguirre

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8046>

INNOVACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE FIBRA DE CARBONO

La fibra de carbono es un material ligero, fuerte y rígido, que permite mejorar la funcionalidad de muchas aplicaciones. Sin embargo, su uso en ciertos sectores industriales como el del automóvil, la energía eólica, el petróleo y el gas, o las infraestructuras, es limitado debido a su precio, relativamente elevado. Los métodos actuales para la fabricación de fibra de carbono y estructuras compuestas reforzadas con fibra de carbono tienden a ser lentos y con un gran consumo de energía. Nuevos procesos de fabricación para el desarrollo de precursores de fabricación más baratos y de tecnologías de conversión, tienen la clave en la reducción del coste de la fibra de carbono en aplicaciones energéticas. De manera similar, materiales y procesos innovadores orientados a su aplicación pueden lograr significativas mejoras de rendimiento en las aplicaciones de seguridad nacional.

PAPEL DE LAS INSTALACIONES DE LA TECNOLOGÍA DE FIBRA DE CARBONO

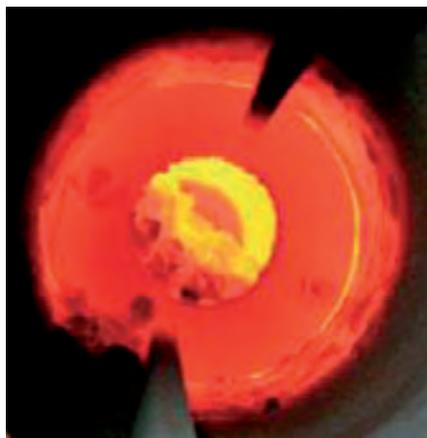
- Demostrar la adaptabilidad de tecnologías de fibra de carbono de bajo costo hasta la etapa previa a la fabricación comercial a gran escala
- Producir las cantidades de fibra de carbono de bajo costo necesarias para la evaluación y el prototipado a gran escala de materiales y procesos
- Implantar un sistema de capacitación, incluidas las prácticas educativas y la formación industrial acreditada, para preparar la futura fuerza laboral especializada en fibra de carbono.

PLANTA PILOTO DE PRODUCCIÓN DE FIBRA DE CARBONO DE ESCALA SEMI-INDUSTRIAL

Como líder nacional en investigación y desarrollo de fibra de carbono de bajo

costo, las instalaciones de tecnología de fibra de carbono (CFTF) del *Laboratorio Nacional de Oak Ridge* (ORNL), disponen de 3.900 m² de instalaciones de tecnología innovadora que ofrecen una línea de fibra de carbono muy flexible y totalmente equipada para demostrar la adaptabilidad de tecnologías avanzadas y la posibilidad de producir cantidades de fibra de carbono suficientes para el desarrollo del mercado, sirviendo de esta forma como último paso antes de la fabricación a escala comercial. El centro, con una línea de proceso de casi 120 m de largo, permite configurar una línea de proceso a medida, con una capacidad de hasta 25 Tm por año, lo que ofrece a la industria la posibilidad de validar la conversión de sus precursores alternativos de fibra de carbono casi a escala de producción.

El establecimiento alberga una línea de conversión térmica (convencional) y una línea de producción de precursor de fibra por hilado, e incluye espacio para una futura línea de conversión avanzada.



LÍNEA DE CONVERSIÓN TÉRMICA (CONVENCIONAL)

La línea de conversión térmica está preparada para 25 Tm/año de fibra basada en poliácridonitrilo (PAN) y puede convertir precursores hilados por fusión e hilados por dilución. Está prevista para módulo PAN estándar, pero diseñada con la flexibilidad de acomodarse a precursores de lignina, poliolefina y alquitrán, y se puede adaptar fácilmente para transformar rayón y precursores PAN de módulo alto. Está diseñada para procesar materiales en forma de hilo o de lienzo.

LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE PRECURSOR DE FIBRA POR HILADO POR FUSIÓN

La línea de hilado por fusión está preparada para 65 Tm/año de fibra de polietileno y diseñada para hilar también precursores basados en lignina y alquitrán, sea hilo o lienzo. Podrá adaptarse para hilar por fusión PAN cuando la tecnología esté lo suficientemente desarrollada.



LÍNEA DE CONVERSIÓN DE TECNOLOGÍA AVANZADA

ORNL está desarrollando actualmente una tecnología de conversión avanzada basada en tecnología de procesamiento por microondas y plasma. Se ha previsto la futura construcción de una línea de tecnología avanzada, de magnitud similar a la línea de conversión convencional, cuando las tecnologías estén lo suficientemente maduras para su demostración casi a escala de fabricación.





CARACTERÍSTICAS DE LA INSTALACIÓN

Producción de precursor de fibra por hilado por fusión

- Capacidad Nominal 65 Tm/año en base a poliolefinas
- Hila la mayoría de polímeros de fusión estable, incluyendo concretamente poliolefinas y lignina; actualizable para PAN hilada por fusión
- Producción de hilo con hasta 2.000 m/min de velocidad de bobinado
- Producción de lienzo por fusión y soplado de hasta 300 mm de ancho, empaquetado o enviado directamente a la línea de fibra de carbono; actualizable para incluir tejidos
- Producción de filamento homo- y bicomponente; actualizable a tricompone
- Temperatura ajustada a 450°C
- Superficies mojadas resistentes a la corrosión
- Tornillo de extrusión L/D 30:1; ampliable a 40:1.

Producción de fibra de carbono

- Capacidad Nominal 25 Tm/año en base a hilos PAN 24k
- Diseñado para precursores de PAN, poliolefinas, lignina y alquitrán; adaptable a rayón y fibras de carbono de módulo elevado
- Diseñada para hilos 3k a 80k se remolca y lienzo de hasta 300 mm de ancho x 12,7 mm de espesor
- Temperatura de oxidación de hasta 400°C con flujo de aire configurables en flujo paralelo, cruzado, o en contracorriente
- Carbonización a baja temperatura de hasta 1000°C con capacidad para producir fibras estructurales o micro/nanoporosas
- Carbonización a alta temperatura a 2000 °C
- Sistema de postratamiento diseñado para hacer compatibles las fibras con resinas de calidad o corrientes.

AVENTICS^A

PNEUMATICS IT'S THAT EASY

Lo más eficaz para su empresa.

"Aventics" para resultados rápidos, fáciles y fiables.

Gracias a nuestra experiencia y servicio, podemos proporcionarle soluciones de forma continua y productos a medida en aplicaciones neumáticas. Beneficiarse de nuestro *know-how* y experiencia en tecnología neumática.

"Aventics", su *partner* profesional.



AVENTICS Spain
Av. de la Vía Augusta, 15-25
St. Cugat del Vallés
08174 Barcelona
Tel. (+34) 935 001 250
www.aventics.com
info.es@aventics.com

Rexroth
Pneumatics

Caucho a altas temperaturas:

Premio a la mejor revisión del envejecimiento del caucho

Mollie Rappe
TWI (Reino Unido)
Traducido por Manuel Lara-Coira

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8028>

El transbordador espacial Challenger explotó en 1986 porque una junta tórica de caucho se congeló en el cohete propulsor de combustible sólido. Quizá se desdijó como una goma elástica vieja, o se endureció lo suficiente para no asegurar la hermeticidad de la junta, lo que provocó una fuga en el propulsor de gas a presión inflamado.

La selección del caucho adecuado para cada tarea y la determinación de su duración son las especialidades de Mat Celina y Robert Bernstein, expertos en materiales de Sandia. Su extensa revisión – con la

colaboración de Ken Gillen, ahora jubilado– obtuvo el pasado otoño el premio de la Sociedad Americana de Química (División del Caucho) a la mejor ponencia.

La comprensión del comportamiento básico de los materiales de caucho es crítica en la selección del adecuado para cada trabajo, dice Mat. Las aplicaciones van desde la gama de neumáticos y correas de distribución para automóviles, a los sellantes para impermeabilizar techos planos en Nuevo México, las juntas perimetrales antihumedad de los paneles solares, el aislamiento de los cables en las centrales nucleares, o las juntas tóricas en los transbordadores espaciales y armas nucleares.

El caucho envejece por la reacción entre el oxígeno atmosférico y el polímero elástico. El oxígeno primero se difunde por el material, en un proceso físico. A

continuación, el oxígeno reacciona químicamente con el polímero. Ken y su compañero retirado, Roger Clough, iniciaron a finales de la década de 1970 en Sandia, el desarrollo de mejores modelos y técnicas para predecir la vida útil de diferentes cauchos y polímeros elásticos, creando en Sandia las bases del conocimiento del envejecimiento de los materiales poliméricos.

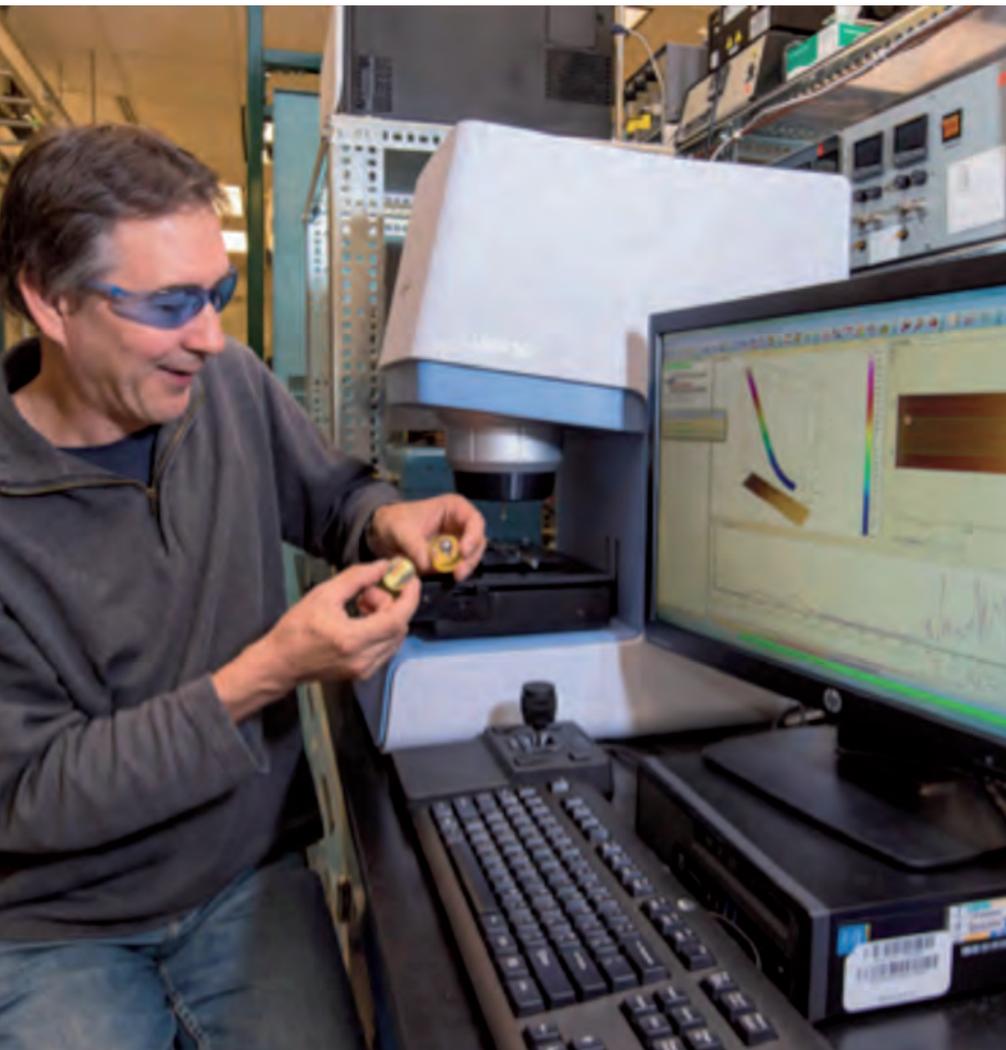
PREMIO A LA MEJOR PONENCIA

Después de 30 años, Ken se jubiló en Sandia en 2004, pero siguió colaborando. Como consultor a tiempo parcial, hasta 2015 ayudó a sus colegas de Sandia con estrategias de investigación, charlas, ponencias e informes. También continuó hasta 2006 como editor de la revista científica internacional "Estabilidad y degradación de polímeros". Mat fue seleccionado para reemplazarlo y trabajó como editor desde 2006 a 2011.

En 2014, Ken, Mat, y Robert presentaron una ponencia invitada en la 186ª Reunión Técnica de la Sociedad Americana de Química (División del Caucho). Fue elegida como la mejor "por presentar el mejor análisis crítico y ampliar la comprensión básica de los conceptos de la ciencia y la tecnología del caucho". Ken recibió el premio en Cleveland en octubre pasado.

El premio a la mejor ponencia es un reconocimiento de las contribuciones de Sandia al estudio del envejecimiento de los polímeros, comentó Mat "Representa una validación independiente de la calidad del trabajo que estamos haciendo". La ponencia se reeditó en 2015 como revisión, con el título "Desafíos de las técnicas de envejecimiento acelerado en las predicciones de vida útil de los elastómeros". Presenta un examen exhaustivo de 30 años de investigación sobre el envejecimiento de polímeros y se traducirá y reeditará en una revista técnica alemana para una difusión más amplia.

"Ken Gillen ha dedicado 30 años a la investigación relacionada con el envejecimiento de los materiales, de manera que cuando le pidieron que hiciera una revisión, lo que hizo fue volver la vista atrás y analizar lo logrado durante décadas en las actividades de investigación en esta área en particular. Presentó una revisión muy bonita", explica Mat.



Mat Celina, experto en materiales en Sandia, ante un espectrómetro de imagen infrarroja utilizado para observar la degradación química de los objetos de caucho

TÉCNICAS SUPERIORES

Un reto en la determinación precisa de la duración del caucho, es la correcta extrapolación de los experimentos de envejecimiento acelerado. Sandia ha desarrollado técnicas especializadas que ayudan a predecir la duración de un material durante su uso normal, observando los cambios físicos y químicos durante el envejecimiento a alta temperatura.

Ken, Roger y Carlos Quintana, también jubilado, concibieron y construyeron un instrumento único llamado un módulo de análisis para comprobar los cambios mecánicos durante el envejecimiento del caucho. Para algunas aplicaciones, como neumáticos, el endurecimiento del borde exterior puede ser adecuado; en otros casos, como en las juntas en el cohete propulsor, desastroso. La máquina presiona un trozo de una pieza de caucho envejecido para probar su elasticidad. La punta de la máquina es tan fina que puede analizar muestras de tan sólo una tercera parte del diámetro de un cabello humano.

Mat también utiliza una técnica llamada espectroscopia infrarroja de re-

flectancia total atenuada, para observar los cambios químicos en el interior de un objeto de caucho tras su envejecimiento acelerado. Las evidencias que diferencian las estructuras químicas pueden disminuir o desaparecer durante el envejecimiento, indicando la forma en la que el polímero se degrada por el oxígeno. La rapidez con la que ocurre a diferentes temperaturas puede emplearse para predecir la duración normal de un objeto.

CREACIÓN DE MODELOS PREDICTIVOS DE ENVEJECIMIENTO

Robert está especializado en pruebas de compresión y relajación, una técnica para el análisis del cambio en las propiedades mecánicas del caucho bajo una presión continua. La comparación de los resultados de esta prueba con los cambios químicos, permite a los investigadores relacionar los daños debidos a la oxidación con los cambios en las propiedades mecánicas, una necesidad esencial en la creación de modelos de predicción del envejecimiento.

La experiencia de Sandia con polímeros complementa sus décadas de éxito en

modelización aplicada. A lo largo de los años, Ken, Mat, y Roger han combinado los datos experimentales con un modelo de difusión y oxidación limitada para mejorar las predicciones de duración del caucho. Este modelo es especialmente útil si las secuencias de la reacción química cambian a temperaturas más elevadas, a la vez que evidencian diferencias notables entre el envejecimiento superficial y el profundo.

"La inversión en investigación básica en la ciencia de los materiales, que incluye la asociación de los enfoques experimentales y computacionales para abordar problemas complejos de la misma, es esencial para mantener el liderazgo científico de Sandia. Recibir para nuestra labor un premio externo en concurso, supone indirectamente la acreditación de que los impuestos han sido bien invertidos. También recibimos este premio por nuestra apasionada dedicación a la investigación y el desarrollo en las últimas décadas", concluye Mat.

DYNA

Ingeniería e Industria

Suscríbete a Revista Dyna

Revista técnico científica de ingeniería multidisciplinar desde 1926

Los mejores artículos en español para investigadores y profesionales de la ingeniería.
Mantente actualizado y conoce el estado del arte en ingeniería.

PROMOCIÓN PARA ESTUDIANTES:

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

- DYNA Energía y Sostenibilidad (DYNAES)
- DYNA Management (DYNAMN)
- DYNA Nuevas Tecnologías (DYNANT)

Suscripción Impresa + 4 revistas digitales 37,00 €/año

Para acogerse a esta promoción escribanos a dyna@revistadyna.com



Análisis del consumo de agua de dos centrales nucleares españolas

Gregorio Escalera-Izquierdo¹, Luis Vizcaino-Pérez¹, Francisco Fernández-Díaz²
¹ UNED y ² UPM (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8003>

En este trabajo se estudia el consumo de agua de dos centrales nucleares de agua a presión: una con sistema de refrigeración por bombeo de agua de retorno a un embalse, y la otra por torre de refrigeración.

El consumo de agua de ambas centrales nucleares se realiza mediante una recta de regresión lineal múltiple con tres variables explicativas: producción eléctrica, temperatura ambiente y humedad relativa:

$$A = A_F + m_E \cdot E + m_T \cdot T + m_H \cdot H$$

E es la producción eléctrica mensual, T es la temperatura media mensual, H es la humedad relativa media mensual, A_F es consumo fijo, y m_E , m_T y m_H son sus coeficientes correspondientes.

Los datos de consumo de agua y producción eléctrica mensuales fueron facilitados por el sector eléctrico. La temperatura y la humedad relativa media se obtuvieron de la Agencia Estatal de Meteorología. La muestra abarcaba los años del 2010 al 2012.

La tabla 1 muestra los valores de los coeficientes de las rectas de regresión lineal obtenidas para los años del 2010 al 2012.

La tabla 2 muestra los parámetros estadísticos correspondientes. El coeficiente de correlación múltiple es superior a 0,9 en ambos casos. Esto demuestra que hay una alta correlación entre la variable analizada y las variables explicativas.

La tabla 3 muestra los coeficientes de determinación de las rectas de regresión lineal ajustadas por producción eléctrica mensual, temperatura media mensual y humedad relativa media mensual.

En el caso de la central refrigerada por embalse, la temperatura atmosférica y la humedad relativa influyen muy significativamente en el consumo de agua. La influencia de las tres variables es similar dado que los coeficientes de correlación son parecidos.

En cuanto a la refrigerada mediante torre de refrigeración, la influencia de la producción eléctrica en el consumo de agua es muy superior a la de las otras variables.

Se comprueba ahora el efecto de añadir también los datos correspondientes al año 2013, obteniéndose de nuevo los correspondientes coeficientes de rectas de regresión lineal (tabla 4), estadísticas de regresión para la central (tabla 5) y los correspondientes coeficientes de determinación de esas rectas, ajustadas para las variables explicativas (tabla 6).

Los coeficientes de correlación y determinación de las regresiones lineales múltiples mejoran entre un 0,5% y un 2,6%. Los coeficientes de correlación de las rectas ajustadas mejoran entre un 3,7% y un 17,4%, en el caso de la central refrigerada por embalse.

En la otra central, el coeficiente de la primera recta mejora un 4,4%, pero los otros dos disminuyen apreciablemente, lo que refuerza la idea de que la temperatura y la humedad relativa influyen mucho menos que la producción eléctrica para este caso.

La utilidad más evidente de este modelo de consumo es el análisis

| Coefficiente | Central refrigerada por embalse | Central refrigerada por torre |
|--------------|---------------------------------|-------------------------------|
| A_F | 797.840,37 | 263.361,79 |
| m_E | 2,063 | 2,64 |
| m_T | 40.914,10 | 9.672,94 |
| m_H | -16.766,19 | -11.595,47 |

Tabla 1: Coeficientes de las rectas de regresión lineal (datos 2010 al 2012)

| Coefficiente | Central refrigerada por embalse | Central refrigerada por torre |
|-------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| De correlación múltiple | 0,95044493 | 0,928842443 |
| De determinación R^2 | 0,903345566 | 0,862748284 |
| R^2 ajustado | 0,894284213 | 0,849880936 |
| Error típico | 284.747,7042 | 189.741,0042 |
| Observaciones | 36 | 36 |

Tabla 2: Estadísticas de regresión para la central (datos 2010 al 2012)

| Recta | Central refrigerada por embalse | Central refrigerada por torre |
|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| Ajustada por producción eléctrica | 0,5092 | 0,6496 |
| Ajustada por temperatura | 0,4912 | 0,1232 |
| Ajustada por humedad | 0,5648 | 0,1641 |

Tabla 3: Coeficientes de determinación de las rectas ajustadas por cada una de las variables explicativas (datos 2010 al 2012)

| Coefficiente | Central refrigerada por embalse | Central refrigerada por torre |
|--------------|---------------------------------|-------------------------------|
| A_F | 696.708,46 | 308.036,45 |
| m_E | 2,12 | 2,64 |
| m_T | 37.586,17 | 7.476,98 |
| m_H | -15.531,05 | -11.501,57 |

Tabla 4: Coeficientes de las rectas de regresión lineal (datos 2010 al 2013)

| Coefficiente | Central refrigerada por embalse | Central refrigerada por torre |
|-------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| De correlación múltiple | 0,955239078 | 0,938403493 |
| De determinación R^2 | 0,912481695 | 0,880601116 |
| R^2 ajustado | 0,906514538 | 0,872460283 |
| Error típico | 276.984,00 | 170.282,01 |
| Observaciones | 48 | 48 |

Tabla 5: Estadísticas de regresión para la central (datos 2010 al 2013)

| Recta | Central refrigerada por embalse | Central refrigerada por torre |
|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| Ajustada por producción eléctrica | 0,5979 | 0,6785 |
| Ajustada por temperatura | 0,5527 | 0,082 |
| Ajustada por humedad | 0,5857 | 0,094 |

Tabla 6: Coeficientes de determinación de las rectas ajustadas por cada una de las variables explicativas (datos 2010 al 2013)

sis de históricos de consumo de agua para detectar anomalías de funcionamiento.

Este modelo abre la posibilidad de comparar los consumos de agua de distintos tipos de centrales nucleares, e incluso para comparar los consumos correspondientes a distintas tecnologías de

generación eléctrica. Tomando muestras representativas de distintos tipos de tipos de centrales, se podrían obtener rectas típicas de consumo de agua. Estas rectas serían útiles para estudios de impacto ambiental puesto que permiten predecir el consumo de agua en diversas condiciones.

Fomentar la gestión del conocimiento a través de las redes sociales y la gestión tecnológica

Encarnación García-Sánchez, Rodrigo Martín-Rojas y Virginia Fernández-Pérez
Universidad de Granada

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8016>

Las capacidades dinámicas se están convirtiendo hoy día en una flagrante extensión de la teoría de recursos y capacidades que permite una adaptación mejor de las empresas en el actual entorno competitivo. Las variables tecnológicas juegan un papel crucial en la gestión de conocimiento, debido a su capacidad estratégica para apoyar la comunicación, la búsqueda del conocimiento y la estimulación del aprendizaje colaborativo. Tal creación y adquisición de conocimientos pueden venir de la exploración del entorno, a través de medios tecnológicos, o la interacción con agentes, a través de los sistemas de tecnología o redes. A través de interacciones con los demás, las empresas pueden acceder al conocimiento externo y pueden combinarla con el conocimiento existente. Estas relaciones entre organizaciones incluyen aquellos contactos que una empresa puede tener con organizaciones externas, incluyendo clientes, proveedores, inversores, gobierno, instituciones, etc. De esta forma, las organizaciones que cuentan con grandes redes sociales tienen mayor acceso a información diversa y relevante y son capaces de captar e interpretar los acontecimientos del entorno que los rodea, notando tendencias emergentes y problemas, y consiguiendo mejorar el desempeño de la organización (Fernández Pérez et al., 2012). En este sentido, el proceso de gestión de conocimiento requiere de acciones de cola-

boración entre los miembros de las redes para llevar a cabo una tarea determinada durante un período determinado. Es más, junto a ello, las variables tecnológicas proporcionan apoyo clave para el intercambio y la explotación del conocimiento. Intranet, extranet, redes privadas virtuales (VPN) y Ethernet, por ejemplo, combinan tecnologías y servicios, permitir la construcción de un entorno digital en el que se crea constantemente nuevos conocimientos, se permite la difusión de este conocimiento rápidamente, y explotarlo en toda la organización. Las organizaciones que invierten en activos tecnológicos para apoyar el intercambio de conocimientos entre los miembros de los grupos virtuales o equipos, contribuyen no sólo a la obtención de un mayor rendimiento del mismo, sino también para el desarrollo de la capacidad de gestión de conocimiento de la organización (Martín Rojas et al., 2013).

Para Boyatzis (1982), la efectividad y el éxito de la gestión de conocimiento y del directivo encargado del mismo, requiere un buen ajuste entre la persona (es decir, su capacidad, valores, intereses, etc.), las demandas de una actividad y el entorno organizativo (cultura, estructura, estrategia, políticas, etc.), para conseguir un buen rendimiento. Aunque el conocimiento técnico y el ámbito cognitivo continúan siendo muy importantes para el éxito, determinadas cualidades personales, como la inteligencia emocional (la conciencia de uno mismo, la auto-motivación, la flexibilidad o las habilidades sociales, entre otras), constituyen ingredientes fundamentales en el desenvolvimiento del directivo y el éxito de la organización. Es decir, la presencia de habilidades tecnológicas y capacidades distintivas tecno-

REFERENCIA

VIZCAINO-PEREZ, Luis, ESCALERA-IZQUIERDO, Gregorio, FERNANDEZ-DIAZ, Francisco et al. MODELLING OF WATER CONSUMPTION IN NUCLEAR POWER PLANTS. DYNA Energía y Sostenibilidad, Enero-Diciembre 2015, vol. 4, no. 1, p.1-13. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/ES7797>

lógicas -competencias emocionales- distinguen a un directivo ejemplar de otro que no lo es, y con ello, la gestión del conocimiento en la organización. Por tanto, la excelencia del liderazgo depende más de las competencias -esencialmente emocionales- que de las capacidades cognitivas, y este liderazgo es fundamental para conseguir un adecuado soporte dentro de su organización, articulando de la mejor manera posible los recursos y conocimientos externos e internos a la misma.

Existe, por tanto, una relación positiva entre las variables tecnológicas, las redes sociales y la gestión de conocimiento, porque para aprender de las relaciones externas, para reconocer la nueva utilidad de la información y el conocimiento, las empresas deben asimilar este conocimiento para aplicarlo a fines comerciales.

REFERENCIAS:

- Boyatzis, R.E. (1982). *The competent manager: a model for effective performance*. Nueva York: Wiley.
- Fernández Pérez, V., García Morales, V.J. y Bustinza Sánchez, O.F. (2012). The effects of CEOs' social networks on organizational performance through knowledge and strategic flexibility. *Personnel Review*, 41 (6), 777-812.
- Martín Rojas R., García Morales, V.J. y Bolívar Ramos, M.T. (2013). Influence of technological support, skills and competencies, and learning on corporate entrepreneurship in European technology firms. *Technovation*, 33, 417-430.
- GARCIA-SANCHEZ E, MARTIN-ROJAS R, FERNANDEZ-PEREZ V. et al. INFLUENCE OF TOP MANAGEMENT SUPPORT AND TECHNOLOGICAL ASSETS IN KNOWLEDGE MANAGEMENT. *DYNA Management*, Enero-Diciembre 2016, vol. 4, no. 1, p.0. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/MN7783>.



Vulnerabilidades de seguridad en sistemas embebidos

Patricia Martín, Sergio Martín, Gabriel Díaz y Manuel Castro-Gil
 Universidad Nacional de Educación a Distancia (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8026>

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad es difícil imaginar la vida cotidiana sin utilizar dispositivos embebidos o empotrados puesto que están integrados perfectamente en el día a día [1]. La seguridad es un aspecto que cada vez está cobrando más importancia en el diseño de los sistemas embebidos (SSEE) tanto en la industria como en el ámbito académico [2]. Las características de los dispositivos hacen que sean inherentemente vulnerables a muchos problemas operacionales y ataques intencionados debido a su naturaleza "integrada" o "incrustada" [3]. El propósito de este estudio es poder ofrecer una visión global de las posibles vulnerabilidades a las que están expuestos estos dispositivos junto con algunas herramientas útiles que nos pueden ayudar a detectarlas para posteriormente poder actuar y protegernos.

MÉTODOS

Considerando las características de los sistemas operativos para SSEE existentes se procede a realizar el análisis con el sistema operativo Haiku. En la máquina atacante o analizadora, se instala la versión Kali Linux y en la máquina atacada o analizada se instala la versión del SO Haiku. Las fases a seguir para la realización del experimento son:

1. Instalación SO Haiku en máquina virtual objetivo

2. Instalación SO Kali Linux en máquina analizadora
3. Instalación y configuración de Metasploit y Nessus.
4. Búsqueda de vulnerabilidades. El orden de uso de las herramientas para la realización del análisis de vulnerabilidades es el siguiente: Metasploit, NMAP y Nessus
5. Obtención de conclusiones y buenas prácticas de diseño.

RESULTADOS

Una vez instalados los sistemas operativos y las herramientas, la primera actividad realizada es un escaneo de los puertos abiertos en la máquina virtual Haiku a través de la herramienta metasploit. De este análisis se observa que se encuentran abiertos los puertos:

- **Puerto 21:** Puerto del protocolo de transferencia de archivos (FTP).
- **Puerto 22:** Servicio de *shell* seguro (SSH).
- **Puerto 23:** Servicio telnet.
- **Puerto 80:** Protocolo de transferencia de hipertexto (HTTP) para los servicios WWW.
- **Puerto 53:** Servicios de nombre de dominios DNS.
- **Puerto 445:** Bloque de mensajes de servidor (Server Message Block ,SMB) sobre TCP/IP.
- **Puerto 139:** Servicios de sesión NETBIOS utilizados en Red Hat Enterprise Linux por Samba.

Para complementar el análisis de metasploit se realiza un escaneo con la herramienta **nmap** para comprobar si nos devuelve la

misma información que el escaneo anterior. Metasploit Framework ofrece una información más completa que nmap. En este caso descubre un puerto abierto más.

Además de los puertos abiertos detectados con Metasploit Framework, con Nessus se detecta el **puerto TCP 1780** necesario para garantizar la entrega de paquetes de datos en el mismo orden que fueron enviados.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Como conclusión final del estudio se muestra en la Tabla 1 un resumen de los servicios detectados por cada herramienta utilizada poniendo de manifiesto la importancia de cada una de ellas. Claramente se deduce que la herramienta más completa es Nessus, utilizándola de forma complementaria con Metasploit Framework.

A la hora de abordar la protección de los sistemas de control es fundamental empezar conociendo cuál es el estado o nivel de seguridad del mismo [4]. Se puede partir de la información que pueda haber sobre las amenazas potenciales, vulnerabilidades típicas y los factores de riesgo. Sin embargo, es necesario ir más allá y conocer la situación de los sistemas en relación al negocio. Esto se consigue realizando auditorías (como por ejemplo, análisis de vulnerabilidades y test de intrusión) que nos permiten conocer de primera mano el estado de seguridad de que se dispone.

REFERENCIAS

- [1] Berreteaga O. "Tendencias en productos con sistemas embebidos". ULMA Embedded Solutions. Abril 2011.
- [2] Ravi S, Raghunathan A, Kocher P, et al. "Security in embedded systems: design challenges". ACM Transactions on Embedded Computing Systems 3(3):461-491, 2004.
- [3] Wolf T. "Embedded Systems Security – an overview", Design Automation for Embedded Systems, Springer, September 2008, Volume 12, Issue 3, pp 173-183.
- [4] Martín-Gutiérrez, S., Martín, P., Díaz-Orueta, G., Castro-Gil, M.. (2016). VULNERABILITY ANALYSIS IN ELECTRONIC DEVELOPMENTS BASED ON EMBEDDED SYSTEMS. DYNA New Technologies, 3(1). O. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT7950>

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte prestado por la Escuela de Ingenieros Industriales de la UNED en el proyecto 2016- IEE10 (AVANCES EN EL INTERNET DE LAS COSAS), así como los proyectos eMadrid (S2013/ICE-2715), IN-CLOUD (2015-1-IT01-KA202-00473) y Go-Lab (FP7-ICT-2011-8/317601).

| Problema potencial de seguridad detectado / servicios disponibles | Nessus | Metasploit Framework | Nmap |
|---|--------|----------------------|------|
| Puerto 21 | ✓ | ✓ | ✓ |
| Puerto 22 | ✓ | ✓ | ✓ |
| Puerto 23 | ✓ | ✓ | ✓ |
| Puerto 53 | ✓ | ✓ | ✓ |
| Puerto 80 | ✓ | ✓ | ✓ |
| Puerto 139 | ✓ | ✓ | ✓ |
| Puerto 445 | ✓ | ✓ | ✓ |
| Puerto 1780 | ✓ | | |
| Información ampliada sobre servidor SSH | ✓ | | |
| Información ampliada sobre DNS | ✓ | | |
| Información ampliada sobre servicio telnet | ✓ | | |

Tabla 1 Resumen servicios detectados por herramientas

Optimización de recursos humanos enfocada a la mejora del servicio al cliente

Sagrario Lantarón-Sánchez¹, M^a Dolores López-González¹, Javier Rodrigo-Hitos²

¹ Universidad Politécnica de Madrid (España)

² Universidad Pontificia Comillas (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7973>

1. INTRODUCCIÓN

La masificación de los servicios de urgencias hospitalarios (SUH) es una realidad creciente, que refleja los problemas de adecuación en la utilización de dichos servicios y las deficiencias en la coordinación entre éstos y los servicios de atención primaria de salud [1, 2, 3]. Dicha masificación provoca problemas económicos y de calidad asistencial.

Una solución a estos problemas es el estudio del servicio de urgencias médicas de manera integral, teniendo como principal objetivo que un porcentaje de los pacientes que ahora mismo acuden al SUH como primera opción, acudan al servicio de urgencias de atención primaria (SUAP).

Sin embargo, para que la población revierta la conducta de acudir en primera opción a los centros hospitalarios se les debe ofrecer un servicio de calidad en los centros de salud, para lo que es necesario un tiempo de espera reducido. Para ello se deben gestionar adecuadamente las urgencias de los centros de atención primaria para que se comprometan a no sobrepasar tiempos de espera razonables.

En [4] se ha desarrollado una novedosa metodología de planificación y organización de recursos en el contexto de las urgencias de un centro de salud, de la que se realiza un informe en el presente artículo. El modelo que se presentó se centró en la organización del SUAP, pudiendo adaptarse

al periodo deseado. Su objetivo principal consiste en atender a todos los pacientes que acudan al servicio de urgencias sin que ninguno de ellos sobrepase el tiempo de espera máximo propuesto en la planificación, todo ello utilizando el menor número posible de recursos.

RESULTADOS

La aportación más relevante incluida en [4] ha sido el desarrollo e implementación de un programa que calcula el número de facultativos necesarios en el servicio, una vez que se ha fijado el tiempo máximo de espera deseable en dicho servicio. De esta forma, las variables de entrada y salida para dicho programa son:

Input:

- Tiempo máximo de espera deseable en el servicio.
- Tiempo medio de atención a los pacientes por el facultativo.
- Datos de afluencia de pacientes: número de pacientes que entran en el servicio de urgencia en cada instante en el que se actualiza la lista de entrada.

Output:

- Mínimo número de médicos simultáneos en el servicio para que pueda garantizarse el tiempo de espera máximo deseado

GENERACIÓN DE LOS DATOS DE AFLUENCIA DE PACIENTES:

Para la generación de la distribución de afluencia de pacientes, se consideraron franjas de 10 minutos, para un periodo de 24 horas de servicio de urgencias de atención primaria.

Para generar dicha afluencia de pacientes se supuso que ésta seguía una distribución de *Poisson*. Para la simulación de datos se aplicó el método de simulación de *Montecarlo*.

Desarrollo computacional: paso 1

Para la implementación del programa desarrollado, se consideró un tiempo medio de atención de 10 minutos. El tiempo de espera máximo que se propuso como objetivo fue de 40 minutos.

El programa dio como respuesta que el logro del objetivo se consigue con 7 médicos simultáneos siendo la media de médi-

cos utilizados en cada instante a lo largo de las 24 horas de 3.47.

Desarrollo computacional: paso 2

Teniendo como datos de partida los resultados del primer desarrollo computacional, se desarrolló un segundo algoritmo en el que se trató de llegar a una distribución de facultativos más estable a lo largo del tiempo, aunque en algún caso se excediera el tiempo de espera deseable.

La puesta en práctica del algoritmo arrojó los siguientes resultados: media de médicos utilizados 3.84, tiempo de espera máximo 40 minutos (salvo para 5 pacientes a lo largo del día en los que se llega a 50 minutos). La distribución final de médicos es la dada en la Fig.1.

CONCLUSIONES

El trabajo presentado en [4] constituye un instrumento de gestión y planificación del número de médicos y su actividad en un SUAP, dependiendo de los tiempos de espera deseados, que se adapta a las características dinámicas y cambiantes que dichos servicios presentan por su naturaleza, ya que las variables que se definieron en él tienen un rango que puede ser elegido en cada momento por el usuario, lo que permite que se adecúe a diferentes situaciones. Supone así una alternativa a otros métodos de estudio de este tipo de problemas como son las líneas de espera (teoría de colas) y simulación de eventos discretos [5].

Destacar además que el estudio presentado puede extrapolarse, aplicándose a la optimización de otros tipos de recursos humanos en diferentes contextos.

REFERENCIAS

- [1] Gómez-Jiménez J, Becerra O, Boneu F, et al. "Análisis de la casuística de los pacientes derivables desde urgencias a atención primaria". *Gaceta Sanitaria*.2006. Vol 20-1.p.40-46.DOI: <http://dx.doi.org/10.1157/13084126>.
- [2] Jiménez L, Hermoso F, Tomás S, et al. "Urgencias sanitarias en España: situación actual y propuestas de mejora". Sociedad Española de Medicina de Urgencias y Emergencias. Granada: Escuela Andaluza de Salud Pública. 2003.
- [3] Peiró S, Sempere T, Oterino D. "Efectividad de las intervenciones para reducir la utilización inapropiada de los servicios hospitalarios de urgencias. Revisando la literatura 10 años después del informe del defensor del pueblo". *Economía y Salud*. 1999. Vol.33. p.3-12.
- [4] Lantarón-Sánchez, S., López-González, M., Rodrigo-Hitos, J. (2015). "Algorithms of staff management focused to the improvement of the customer service. Application to primary attention emergency services". *DYNA Management*, 3(1). 1-11. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/MN7637>.
- [5] Almehdawe E, Jewkes B, He QM. A Markovian queueing model for ambulance offload delays. *European Journal of Operational Research*. 2013. Vol.226. p.602-614. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2012.11.030>.

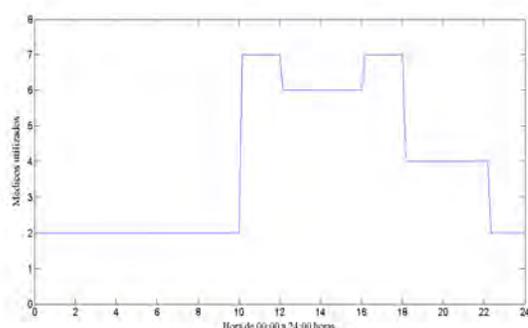


Fig.1. Distribución final de médicos

Desarrollo metodológico de un entorno de búsqueda semántico para el sector del mueble. El proyecto SEMCONCEPT

Begoña Jorda-Albiñana¹, Teresa Magal-Royo¹, Rodrigo Lozano-Suaza², Miguel Angel Abián-Pérez³

¹ Universidad Politécnica de Valencia (España)

² Universidad Nacional de Colombia (Colombia)

³ Instituto Tecnológico del Mueble y Afines (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8033>

Con la evolución de los entornos y aplicaciones online en la web se ha descubierto la necesidad real de crear ontologías semánticas especializadas orientadas a la búsqueda de productos industriales en un sector concreto que permita agilizar y orientar la exploración en la red por parte de los profesionales y usuarios. La implementación efectiva de un motor de búsqueda normalizado y orientado a las necesidades del profesional y usuario del sector del mueble y afines parte de la gran cantidad de referentes online de producto y que en la actualidad es conocido como el sector del hábitat en su conjunto.

El desarrollo de aplicaciones web que dispongan de un buscador de este tipo no solamente servirá para la búsqueda semántica avanzada sino que también permitirá integrar la catalogación digital normalizada de productos industriales en

el sector del mueble. Este tipo de buscadores especializados no solamente será efectivo para el usuario final sino también para las empresas que quieran ofrecer a sus clientes una orientación en la búsqueda de productos y servicios on-line a nivel global. La implementación de un buscador semántico será útil para las fases de conceptualización de un producto por parte de profesionales del diseño y la ingeniería del producto mediante la búsqueda de referentes formales, estéticos, componentes y materiales en la red, como base metodológica fundamental para la mejora de los tiempos de la conceptualización, la búsqueda de proveedores, las búsqueda de tecnologías y materiales, etc...

El presente artículo muestra el desarrollo metodológico en la creación de una ontología de procesos específicamente para la industria del mueble con el propósito de que pueda implementarse de manera generalizada en las webs del sector y en las posibles aplicaciones de catálogos on-line de empresa. De manera que el usuario especializado como diseñadores e ingenieros y el público en general disponga de una herramienta de la búsqueda online de productos bajo un criterio semántico que ayude a las empresas del sector a mejorar su competitividad en la red.

La metodología aplicada para la generación de la ontología para el Mueble partió de los objetivos convencionales de generación de una ontología de métodos y/o procesos, en la cual se analizaron términos específicos de formalización y componentes de un mueble acabado. También se utilizaron términos empleados por los diseñadores a la hora de crear un nuevo producto industrial, que en el caso del mueble fueron entre otros los elementos que la componen, los criterios de formales, los procesos productivos y los materiales en los cuales está fabricado. Se seleccionó

a modo de ejemplo el producto silla y el producto mesa, analizando todas sus posibles categorizaciones y clases.

Posteriormente, se generó la ontología mediante el programa Protégé[®] en formato OWL, y se implementó como servicio dentro de la plataforma experimental SEMCONCEPT[®]. Paralelamente se trabajó en un interface orientado al usuario en la web que permitiera la búsqueda de contenidos dentro de la plataforma siguiendo el vocabulario y las reglas formalizadas para la clasificación de un mobiliario convencional (sillas y mesas). Como fase final se realizó una verificación de la ontología en diferentes perfiles de usuario especializados.

La ontología desarrollada ha sido trabajada dentro del proyecto «Desarrollo Experimental para la creación de nuevos servicios on-line orientado al diseño conceptual de productos industriales mediante la aplicación de tecnologías de la Web 2.0 con características semánticas para el sector madera, mueble. SEMCONCEPT» TSI-020500-2011-189, financiado por el PLAN AVANZA I + D Subprograma: Avanza Competitividad (I+D+I), Convocatoria de ayudas: Acción Estratégica de Telecomunicaciones y Sociedad de la Información, durante los años 2011-2012. Las investigaciones realizadas desde el equipo multidisciplinar de ingenieros y diseñadores de la Universitat Politècnica de Valencia y AIDIMA, Instituto Tecnológico del Mueble, Madera y afines, han permitido establecer sinergias entre la norma ISO 10303-236, la catalogación electrónica de productos y la clasificación de productos por su forma, estilo, proceso de fabricación o material que permita el acceso integrado a la información facilitada por los fabricantes de productos del mueble y afines que permitirá el intercambio entre los distintos agentes de la cadena de valor (proveedores, fabricante, comercios) y servirá de referencia de búsqueda entre los profesionales del sector como diseñadores, ingenieros de producto y arquitectos (Figura 1).

REFERENCIA

JORDA-ALBIÑANA, Maria Begoña, MAGAL-ROYO, Teresa, LOZANO-SUAZA, Rodrigo et al. SEMANTIC TECHNOLOGY APPLICATIONS ON THE WEB FOR THE CATALOGUING OF PRODUCTS IN THE FURNITURE SECTOR. SEMCONCEPT. DYNA New Technologies, Enero-Diciembre 2015, vol. 2, no. 1, p.1-10. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT753>

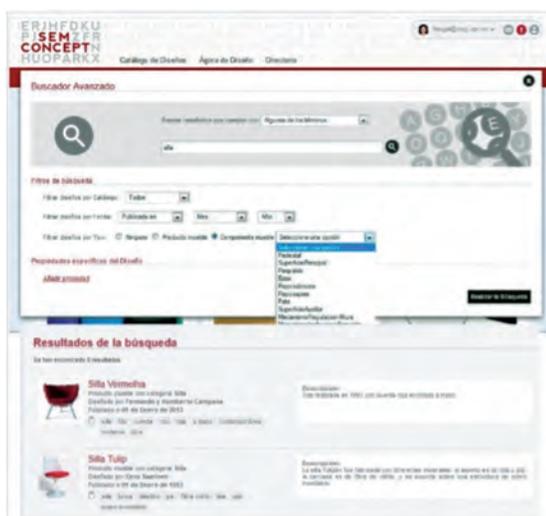


Figura 1: Resultados de la búsqueda semántica en la plataforma SEMCONCEPT[®]

Sobre el uso de sistemas inteligentes para seguridad vial

■■■■
Alicia Larena-Pellejero y Josep Merlo-Mas
Universidad Politécnica de Madrid (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7842>

1. INTRODUCCIÓN

La reducción del número de accidentes de circulación en carreteras interurbanas durante los últimos 10 años ha sido un objetivo clave para las organizaciones según la Dirección General de Tráfico. Para ello, a parte de las campañas para aumentar la concienciación y responsabilidad de los usuarios y el cambio en la reglamentación de las sanciones, se ha incrementado la inversión en materia de infraestructuras destinadas a favorecer el descenso del riesgo de accidentes [1].

Por otro lado, resulta cada vez más frecuente que la industria y los procesos de fabricación se decanten por el uso de tecnologías con el menor impacto posible sobre el medioambiente y que las fuentes de energía utilizadas sean renovables.

La búsqueda de sistemas sostenibles innovadores que incrementen la seguridad en el transporte ha motivado al *Laboratorio Químico de Ensayos y Control de Calidad* (LQECC) a exponer el inicio de sus investigaciones en esa dirección. En este informe se detalla el análisis de las diferentes tecnologías con aplicación para la

detección del vehículo y la posterior iluminación de paneles indicadores o señalización mediante LEDs.

2. TECNOLOGÍAS PARA LA DETECCIÓN DE VEHÍCULOS

2.1. SENSORES DE MOVIMIENTO PIR

Los detectores PIR (*Passive Infrared*) o Pasivo Infrarrojo, reaccionan sólo ante determinadas fuentes de energía tales como el calor del cuerpo humano o animales. Básicamente reciben la variación de las radiaciones infrarrojas del medio ambiente que cubre. Es llamado pasivo debido a que no emite radiaciones, sino que las recibe. Estos captan la presencia detectando la diferencia entre el calor emitido por el cuerpo humano y el espacio alrededor.

Su componente principal es el sensor piroeléctrico. Se trata de un componente electrónico diseñado para detectar cambios en la radiación infrarroja recibida. Generalmente dentro de su encapsulado incorporan un transistor de efecto de campo que amplifica la señal eléctrica generada cuando se produce dicha variación de radiación recibida.

La información infrarroja llega al sensor a través de una lente de *Fresnell* que divide el área protegida en sectores. La señal eléctrica que genera el sensor pi-

roeléctrico cuando detecta un cambio es procesada por un circuito electrónico de control que activará un relé en el caso que la señal tenga ciertas características (amplitud, frecuencia, duración, etc.).

Con objeto de lograr total confiabilidad, esta tecnología integra además, un filtro especial de luz que elimina toda posibilidad de falsas detecciones causadas por la luz visible (rayos solares), así como circuitos especiales que dan mayor inmunidad a ondas de radio frecuencia [2] [3].

2.2. DETECTORES DE ALTA FRECUENCIA POR MICROONDAS

A diferencia de la tecnología de infrarrojos pasivos (PIR), los detectores de alta frecuencia por microondas solamente necesitan movimiento para la detección. Esta tecnología es activa y más sensible que la que utiliza infrarrojos, permitiendo establecer con más precisión el alcance de detección. Este detector no es sensible a los contaminantes, a diferencia de las lentes PIR, que ven reducida su sensibilidad al ensuciarse [3][4].

2.3. SENSORES DE MOVIMIENTO ULTRASÓNICOS

Los sensores de movimiento ultrasónicos se pueden encontrar generalmente en alarmas de seguridad para detectar movimiento en un lugar. Emiten ondas de sonido que rebotan en los objetos del lugar donde se haya instalado una alarma antirrobo, por poner un ejemplo.

Estos sensores utilizan el efecto *Doppler*, muy importante en el funcionamiento de este mecanismo ya que consiste en una frecuencia acústica que sufre una variación proporcional a su velocidad de desplazamiento [3] [5].

2.4. DETECTORES TIPO RADAR

Todos los tipos de radar funcionan según el mismo principio básico: emiten una onda electromagnética hacia el objeto a detectar, la onda re-



bota y vuelve a la antena. Analizando la señal devuelta, se pueden saber muchas características del objeto en cuestión.

Cuando la onda rebota en el coche, debido a que éste se mueve a cierta velocidad, cambia su frecuencia. Midiendo la diferencia de las frecuencias, el radar puede saber la velocidad a la que se movía el vehículo [3].

2.5. USO DE MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS

Un sensor piezoeléctrico es un dispositivo que utiliza el efecto piezoeléctrico para medir presión, aceleración, tensión o fuerza; transformando las lecturas en señales eléctricas o viceversa, transformando señales eléctricas en pequeñas presiones mecánicas.

Los materiales que presentan propiedades piezoeléctricas se dividen en dos grupos: los que presentan esas propiedades de forma natural y los que necesitan ser polarizados (que son los cerámicos piezoeléctricos). Los primeros tienen un efecto piezoeléctrico muy pequeño, por ese motivo se desarrollaron los segundos, con un efecto mucho mayor, de los cuales los más usados en industria son el titanato de bario (BaTiO_2), y una combinación de zirconato de plomo (PbZrO_3) y titanato de plomo (PbTiO_3). A esta combinación, se le llama en la industria PZT (zirconato titanato de plomo) y son fabricados por compresión de polvo a alta temperatura, moldeados y cocidos en un horno.

Los PZT son las cerámicas piezoeléctricas más usadas por su temperatura crítica, por su coeficiente piezoeléctrico y por su relativamente baja temperatura de funcionamiento (200°C).

Como ventaja frente a otras, se pueden fabricar a un precio muy bajo, físicamente son fuertes, químicamente inertes y, además, se ha demostrado que tienen más sensibilidad piezoeléctrica, lo que se comprueba observando su coeficiente piezoeléctrico [6][7].

3. ANÁLISIS Y PERSPECTIVAS DE FUTURO

Algunos aspectos y elementos de riesgo que generan una disminución de la seguridad vial como son A) falta de visibilidad en tramos poco iluminados o falta de visibilidad por niebla, fuerte lluvia, B) curvas peligrosas, confluencias conflictivas de tráfico, C) situaciones de emergencia por accidentes, retenciones, obras de infraestructura, y otros son paliados con el uso de un sistema de detección inteligente, como un sistema piezoeléctrico, y aviso

mediante leds. De esta manera se permite mejorar la detección de estos elementos de riesgo y su posible control por parte del conductor. En tanto que la mejora de detección del riesgo va directamente ligada a una mayor seguridad por la relación intrínseca entre detección y control.

Los sensores más comunes en aplicaciones no referidas a la seguridad vial son, en términos de utilidad, ahorro de energía y costes, los de tipo PIR. Una de las ventajas principales en cuanto al consumo es que no emiten energía si no detectan movimiento (detector pasivo), lo cual resulta muy útil cuando lo que se busca es el ahorro de energía.

A diferencia de los sensores PIR, los detectores ultrasónicos tienen un campo de detección continuo (activo). A parte de ser un sistema propenso a presentar falsas activaciones, pierde su propósito cuando se quiere utilizar para fines de conservación de energía eléctrica, como es el caso del control automático de la luz en señalización viaria.

Los sensores por microondas y los sensores de radar son bastante similares a los ultrasónicos ya que también pertenecen al grupo de sensores permanentemente activos. La principal diferencia entre los sensores por microondas y los sensores ultrasónicos es que los primeros emiten ondas electromagnéticas en vez de sonoras. Estando a la par con los sensores ultrasónicos en cuanto prestaciones, los sensores por microondas son generalmente más costosos y consumen más.

En conclusión, si se tuviera que elegir un tipo de detector tradicional para la aplicación que se propone, el más conveniente resultaría el sensor PIR. No obstante, este tipo de sensor no aporta las mismas prestaciones que ofrece un sistema inteligente basado en un material piezoeléctrico como el que se quiere desarrollar en el presente estudio.

Los detectores piezoeléctricos son de fácil producción a la vez que económicos. Además, responden a la necesidad de ser un sistema de detección pasivo ya que no consume energía permanentemente. Se usan para medir presiones rápidamente cambiantes u otras fuentes de choque o vibración, lo cual entra en el propósito de aprovechar el paso de rueda de los vehículos.

La exploración de este tipo de fuentes para obtener la energía, reducir el consumo y, sobre todo, evitar el coste añadido de la instalación, está en pleno auge. De forma inesperada los sensores piezoeléctricos han comenzado a adquirir un papel importante en un entorno industrial que

desde nuestro punto de vista se puede aplicar a aumentar la seguridad vial así como a reducir sus costes.

El objetivo del sistema a implementar es pasar del modelo tradicional de funcionamiento basado en la previa detección del vehículo y posterior respuesta lumínica a un modelo donde la detección y la respuesta estén integrados, añadiendo como ventaja el autoabastecimiento de energía.

PARA SABER MÁS

- [1] Dirección General de Tráfico, "España cumple varios de los objetivos europeos para reducir los fallecidos por accidente de tráfico en 2020", Nota de prensa. Abril 2014.
- [2] Glolab Corporation, "How Infrared motion detector components work", <http://www.glolab.com/pirparts/infrared.html>, Mayo 2013.
- [3] Sirius Technology: Occupancy sensors, Motion sensors and PIR sensors "PIR sensor technology", <http://www.ecosirius.com/technology.html>, Febrero 2014.
- [4] Home Security Systems, "What is Microwave Motion Detector", <http://www.homesecuritysystems.tips/types-of-systems/what-is-microwave-motion-detector-benefits-and-brands>, Julio 2015.
- [5] Adamu Murtala Zungeru, "Design and development of an ultrasonic motion detector", School of Electrical and Electronic Engineering, University of Nottingham, 2013.
- [6] Physik Instrumente Ceramic GmbH, "Fundamentals of Piezo Technology", Thuringia (Alemania), <http://www.piceramic.com/piezo-technology/fundamentals.html>, fecha consulta: Julio 2015.
- [7] Anton, S. R. Et Sodano, H. "A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006)", *Smart Materials and Structures*. May 2007. Vol. 16 (3). (<http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/16/3/R01>)

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación de la Comunidad de Madrid a través del Programa SEGVAUTO TRIES para grupos de investigación en Tecnologías 2013.

LEONARDO TORRES QUEVEDO: "El más prodigioso inventor de su tiempo"

Francisco A. González Redondo
Universidad Complutense de Madrid

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8090>

El 8 de agosto de 1916 se inauguraba en Niágara (Ontario, Canadá) el primer teleférico para pasajeros de toda Norteamérica, el "*Niagara Spanish Aerocar*". Había sido construido por una empresa española (en concreto, vasca) registrada en Canadá, *The Niagara Spanish Aerocar Company*, con capital español (prioritariamente, vizcaíno; en menor medida, también cántabro), administradores españoles, ingeniero constructor español, material transportado desde España a Canadá durante la I Guerra Mundial (por ejemplo, la barquilla para los pasajeros), explotación comercial inicial española: en suma, I+D+i de hace cien años. Para ello se siguieron las patentes de un ingeniero español,

Leonardo Torres Quevedo (Santa Cruz de Iguña, Cantabria, 1852-Madrid, 1936), presentadas a partir de 1887 en Alemania, Suiza, Francia, Reino Unido, Canadá, Austria, España, Italia y los EE.UU., ideas originales que se materializaron en 1907 en el primer teleférico abierto al público para pasajeros de la historia, su Transbordador del Monte Ulía en San Sebastián y que siguen presentes en todos los teleféricos (no las telecabinas, que responden a un sistema diferente) que se construyen hoy en todo el mundo.

Y es que, como llevamos difundiendo desde hace más de 30 años desde la asociación *Amigos de la Cultura Científica*, Leonardo Torres Quevedo ocupa un lugar de excepcional relieve en la historia universal de la Ciencia y de la Técnica.

Así, dando por terminadas infructuosamente las gestiones para construir el primer transbordador de su sistema en Suiza, durante los años 1890s presenta-

ba en Francia sus trabajos teóricos sobre las máquinas algébricas (máquinas que resuelven ecuaciones mediante analogía física) acompañadas por modelos de demostración, alcanzando el reconocimiento nacional e internacional como figura mundial del Cálculo mecánico.

Seguidamente, entre 1901 y 1906 concibió un sistema de dirigibles autorrígidos, patentados hace ahora 110 años en España, Francia y el Reino Unido, con el que estableció los fundamentos para la aerostación dirigida hasta el presente. Comercializados desde Francia a partir de 1911 por la casa Astra, se consagraron como los más efectivos para la lucha antisubmarina y protección de convoyes durante la I Guerra Mundial, operando en las Armadas de Francia, el Reino Unido, Rusia y los Estados Unidos. Durante los años 1920 se siguieron fabricando por parte de la casa Astra (con unidades vendidas a Francia y a Japón), tarea que



Entrega de la medalla Echegaray en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

continuaría la casa Zodiac en los años 1930. Y, con nuevos materiales, se han seguido construyendo a lo largo del siglo XX (y se siguen construyendo en nuestros días) como podemos comprobar en los modelos de la casa francesa Voliris, o el trilobulado "Roziere FRF-1" de la Sociedad Aeronáutica Rusa.

Complementariamente, entre 1902 y 1903 D. Leonardo patentó en Francia, España, Reino Unido y Estados Unidos el primer aparato de mando a distancia de la historia, el Telekino. Estaba concebido para el control remoto de sus dirigibles sin arriesgar vidas humanas, y se ensayaría en 1905 en Madrid, con un triciclo, y en Bilbao, en presencia del Rey Alfonso XIII, también hace ahora 110 años (en septiembre de 1906), teledirigiendo el bote "Vizcaya". Reconocido por el *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* con un *Milestone* "por haber establecido los principios operacionales del moderno control remoto sin cables", el Telekino constituye el precedente directo de los "drones", de radical vigencia hoy en día.

Precisamente, el éxito de las pruebas del Telekino en Bilbao animaría a un grupo de industriales vascos a la constitución, hace ahora también 110 años, de la *Sociedad de Estudios y Obras de Ingeniería*, pionera concepción de una sociedad de capital riesgo creada con el objetivo de llevar a la práctica las invenciones que presentase D. Leonardo y cuya primera creación significativa sería el Transbordador del Monte Ulía.

Esas pruebas de 1906, complementariamente, motivaron que el Gobierno

español crease también, en febrero de 1907, el *Laboratorio de Mecánica Aplicada* que, cambiado su nombre por el de Laboratorio de Automática y puesto al servicio de los laboratorios y centros de investigación, públicos y privados de toda España (en especial los de la Junta para Ampliación de Estudios), proporcionó máquinas e instrumental a **Santiago Ramón y Cajal, Blas Cabrera, Juan Negrín**, etc.

Pero Torres Quevedo, además de ingeniero de caminos, aeronáutico, industrial y de telecomunicaciones, también fue ingeniero naval. En efecto, en 1913 unió Náutica y Aeronáutica en su patente del Buque-campamento, un barco porta-dirigibles cuyo diseño integraría la Armada española años después en nuestro primer porta-aeronaves (hidroaviones y dirigibles), el "Dédalo" (1922), unión de náutica y aeronáutica que pudimos ver materializado para la Marina de los EE.UU. en la "Sentry Class" en los años 90 del pasado siglo y continúa hoy en unidades como el "HSV-2 Swift". Complementariamente, en 1916, mientras la *Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* le concedía la primera Medalla Echegaray, D. Leonardo obtenía en España y Francia la patente de su Binave, pionera concepción de esos catamaranes de casco metálico que protagonizan el presente en el transporte marítimo *express* de pasajeros en todo el mundo.

Y no debemos terminar estas páginas, en este mundo en el que vivimos, gobernado por las Tecnologías de la Infor-

mación y la Comunicación, sin destacar su papel visionario como creador de una nueva ciencia, la Automática, y de las máquinas prácticas que demostraban sus concepciones teóricas. En efecto, con su obra escrita cumbre, los *Ensayos sobre Automática* (1914), sus *Ajedrecistas* de 1912 y 1922 (autómatas que "piensan", con los que un humano juega -y pierde indefectiblemente- un final de partida de torre y rey contra rey) y su *Aritmómetro electromecánico* (1920), que empieza a ser considerado como, probablemente, el primer ordenador en sentido actual de la historia, se adelantaría en varias décadas a las aportaciones de los pioneros (teóricos y prácticos) de la Informática, la Automática y la Inteligencia Artificial del siglo XX.

¿Le extrañará a estas alturas a alguien que en 1930 Maurice d'Ocagne (Presidente de la Sociedad Matemática Francesa) caracterizase a D. Leonardo en las páginas de Figaro, en un artículo titulado, precisamente, "Máquinas de Calcular. De Blaise Pascal a Torres Quevedo", como "el más prodigioso inventor de su tiempo"? A Google internacional, por ejemplo, en su afán por conmemorar los hitos singulares del legado de Europa a la Historia de la Computación, no le extrañó. Así, como podemos leer en su Official Blog, Lynette Webb (Senior Manager, External Relations de Google) celebró en 2012 que el ajedrecista debía ser considerado el "primer juego de ordenador del mundo". ¿Seguirá su ejemplo el conjunto de la sociedad española?



El "Transbordador del Niágara" el 8 de agosto de 1916 y en la actualidad.

Dilema moral para el desarrollo de competencias éticas en los estudios de ingeniería industrial. Aplicación a la ingeniería mecánica

Francisco Zamora-Polo, Jesús Sánchez-Martín y Francisco Hipólito-Ojalvo
Universidad de Extremadura (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7822>

1. INTRODUCCIÓN

La adaptación de los estudios universitarios en España al *Espacio Europeo de Educación Superior* (EEES), supone un cambio de paradigma en la forma del desarrollo de la docencia [1]. Este nuevo escenario está asociado a conceptos tales como los sistemas de garantía de calidad, la movilidad y el desarrollo de competencias en los estudiantes [2].

El término *competencia* hace referencia a la integración de conocimientos, habilidades y actitudes en una situación particular. Podemos distinguir dos tipos de competencias [1, 3], las específicas, directamente relacionadas con el ejercicio profesional y las competencias transversales, que se definirían como aquellas que pudiendo ser utilizadas en el ejercicio profesional, no son exclusivas de este, y pueden ser implementadas en el ejercicio activo y crítico de la ciudadanía. Nos estamos refiriendo a la expresión en lengua propia y lengua extranjera, la capacidad para el trabajo en equipo, etc.

Si tradicionalmente la enseñanza en términos de competencias no ha sido implementada en las instituciones de educación superior, el desarrollo de las competencias transversales ha estado relegado a un segundo o tercer plano. Sin embargo, resultan ser de las competencias más valoradas por parte de los empleadores [1].

Entre las competencias transversales que deben desarrollarse en los estudios universitarios, han de estar la capacidad para el razonamiento ético y el juicio moral. Así lo atestigua el Real Decreto que establece el marco español de cualificaciones en la Educación Superior para el caso

de los grados y másteres (RD 1027/2011). Consideramos que al margen del carácter normativo de la ley, esta función se encuentra inserta en una de las misiones de la universidad, ya que debe ser un espacio que colabore en la formación integral de personas que puedan ser agentes de cambio en la construcción de una sociedad más comprometida y justa [4].

Cada vez existe un mayor consenso en lo referente a la necesidad del desarrollo de estas competencias éticas en los estudios que preparan para el desarrollo del ejercicio profesional. Los ingenieros contribuyen con su profesión a la construcción de un mundo que puede ser más o menos habitable en función de su desempeño técnico.

Para el desarrollo de las competencias transversales y de forma concreta, para el desarrollo de las competencias de carácter ético-deontológicos existen diversas estrategias. Entre ellas encontramos el fomento de cursos específicamente dirigidos al desarrollo de una o varias competencias transversales o bien el desarrollo de estas competencias a lo largo del currículo.

A su vez existen distintas herramientas para su implementación en el aula [1] que pasan por la realización de lectura de noticias, vídeos, talleres de situación en los que los estudiantes adopten diversos roles, o bien la utilización de dilemas morales.

En este sentido, cabe señalar que un dilema moral es una narración breve en la cual se presenta un determinado conflicto moral que no tiene solución evidente. En el mismo se pide al estudiante que reflexione acerca del hecho presentado, que indique la decisión que considera más adecuada; enunciando, y esto es lo más importante las razones que le han llevado a adoptar esta decisión.

Las respuestas de los estudiantes pueden clasificarse en función de la teoría cognitiva-evolutiva propuesta por Kohl-

berg [5]. Este autor distingue tres etapas que se suceden invariablemente: el nivel pre-convencional, convencional y post-convencional. Los niveles van desde una percepción de la realidad egocéntrica a una visión de la vida mucho más amplia basada en principios que, en el mejor de los casos, pueden llegar a ser universales.

En la Tabla I se muestran los distintos niveles y estados en función de la teoría de Kohlberg,

Para la determinación del nivel de desarrollo moral, Kohlberg propone la realización de una entrevista semi-estructurada. Algunos autores han descrito ciertas limitaciones a la teoría propuesta por Kohlberg planteando instrumentos alternativos para medir el desarrollo moral [7].

En este trabajo proponemos una herramienta para el desarrollo moral que puede ser aplicada en clases relacionadas con la profesión de la ingeniería industrial. Exponemos de igual modo los primeros resultados de la actividad.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se ha elaborado el siguiente dilema moral:

"Un amigo de la infancia de Juan tiene una empresa importante de materiales de construcción. La facturación de su empresa ha sido siempre elevada, y obtenido pingües beneficios. Su empresa tiene una plantilla de 11 trabajadores. Con la actual crisis inmobiliaria, han bajado mucho las promociones de edificios, y este amigo em-

| Niveles | Estadios |
|------------------|--|
| Preconvencional | Estadio 1: Orientación hacia la obediencia o el castigo |
| | Estadio 2: Orientación instrumental relativista |
| Convencional | Estadio 3: Orientación hacia la concordancia interpersonal |
| | Estadio 4: Orientación hacia la ley y el orden |
| Postconvencional | Estadio 5: Orientación hacia el contrato social |
| | Estadio 6: Orientación hacia la ética universal |

Tabla I: Niveles y estadios morales [6]

presario no consigue dar salida a una serie de partidas importantes de ladrillos cara- vista en color rosa palo. Él tiene que hacer frente a sus múltiples pagos, sin vender el stock de su almacén. La situación se hace insostenible para su empresa, y se pone en contacto con Juan para que diseñe sus proyectos con materiales de construcción que su amigo ya tiene adquiridos en acopio. Para incentivar esa compra, el amigo de Juan propone encarecer el producto un 3% sobre el precio de mercado (que adquirirían las contratas que ejecutasen los proyectos de Juan), ofreciendo a Juan directamente ese beneficio. Recientemente, el colegio profesional ha realizado una apuesta en favor de su comité deontológico, desarrollando una campaña de comunicación, informando de las funciones de este comité y de las posibles sanciones que pudieran incurrir aquellos que no cumplan el código ético profesional. "

¿Debería Juan aceptar la propuesta de su amigo?

Los alumnos debían responder a la pregunta con dos opciones: "Sí" o "No". Por otro lado se animaba a los estudiantes a indicar el grado de acuerdo con las siguientes afirmaciones según una escala de Likert así como a indicar cuáles eran las tres opciones que consideraban más importantes para tomar su decisión (tabla II):

En los ítems anteriores se ha pretendido recoger los diversos niveles propuestos por la teoría de Kohlberg.

La actividad fue propuesta a 55 estudiantes del Grado en Ingeniería Mecánica (Rama Industrial) de la Universidad de Extremadura y fue implementada en la asignatura *Estructuras y Construcciones*, asignatura de Tecnología Específica de la titulación, que se imparte en el 6º semestre del tercer curso.

Para su desarrollo se utilizó una actividad tipo encuesta inserta en el *Campus Virtual* de la asignatura. Este curso virtual está soportado sobre plataforma *Moodle*. Se eligió la encuesta anónima para garantizar a los estudiantes que no se iba a valorar el contenido de la respuesta, sino tan sólo su realización. Se desarrolló en el seno de una práctica de ordenador a la que estaban convocados todos los estudiantes con una duración de 30 minutos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

No existe un consenso en la comunidad científica

para determinar cuál es la mejor opción para el desarrollo de las competencias éticas en los estudios universitarios [8]. Mientras algunos autores defienden la utilización de cursos específicamente dirigidos para el desarrollo de estas competencias, otros defienden la necesidad de realizar las actividades de forma transversal [9]. La inclusión de una asignatura obligatoria sobre ética, puede garantizar que todos los estudiantes que cursen una determinada titulación universitaria al-

cancen una formación básica de carácter ético o deontológico. Sin embargo, no resulta sencillo incorporar estas asignaturas, ni tan siquiera una asignatura optativa, en el seno de un currículo universitario. Deberemos, en estos casos, afrontar el reto del desarrollo de las competencias éticas desde una perspectiva transversal, en la programación docente de las diversas asignaturas del título. La actividad que aquí se analiza, precisamente pretende aprovechar un dilema moral frente al

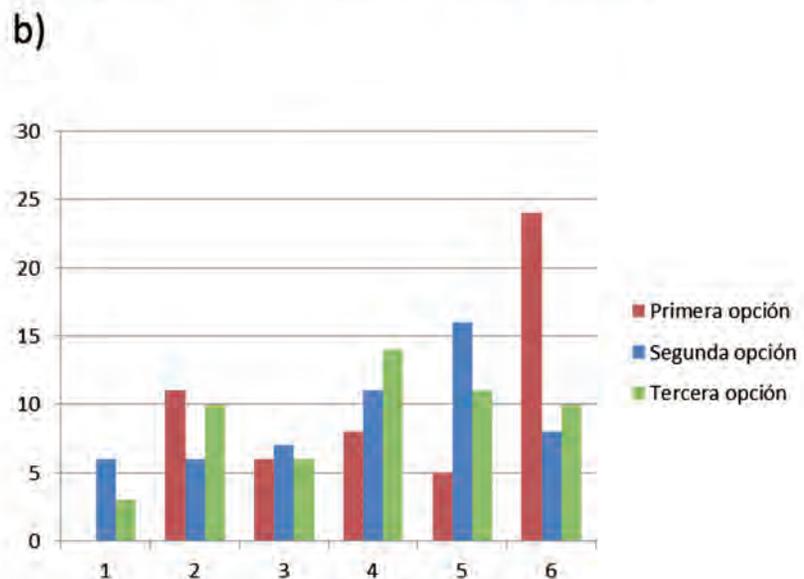
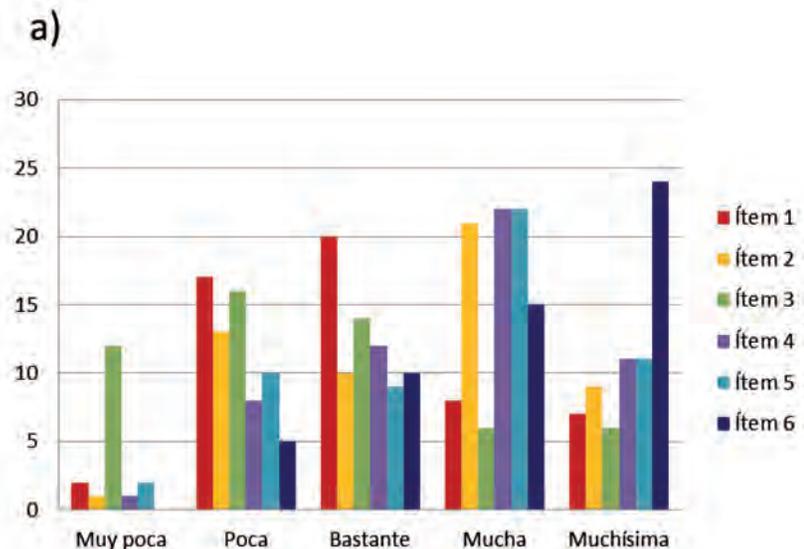


Fig. 1 (a): Histograma de las opciones en escala Likert para cada uno de los ítems de motivación de la solución del problema moral. (b): Histograma de las opciones más importantes, a juicio de los estudiantes, utilizadas para resolver el dilema moral. Fuente: Elaboración propia.

| | Muy poca | Poca | Bastante | Mucha | Muchísima |
|--|----------|------|----------|-------|-----------|
| 1. Interés del cliente que contrata la obra | | | | | |
| 2. La relación interpersonal de Juan con su amigo | | | | | |
| 3. El beneficio económico que Juan tendría en la operación. | | | | | |
| 4. Los posibles efectos de la decisión de Juan sobre los empleados de la empresa del amigo | | | | | |
| 5. Las posibles sanciones que se pudieran imponer a Juan | | | | | |
| 6. Juan debe ser un buen profesional | | | | | |

Tabla II: Importancia que se da a cada uno de los factores para la solución del problema moral

cual pueden encontrarse los estudiantes del título, relacionado con la temática de la asignatura *Estructuras y Construcciones*. Somos conscientes de los riesgos que puede presentar esta transversalidad. De entre ellos, destacamos la posible superficialidad en el análisis y el hecho de que la escasez de tiempo puede hacer que las actividades de corte ético sean las primeras en desaparecer. No se debe olvidar, que su desarrollo puede estar muy relacionado con el interés que un determinado profesor manifieste con esta temática, sin que sea abordada por otros docentes. Por otro lado, consideramos que el desarrollo de estas actividades de forma transversal también tiene una serie de ventajas como puede ser que el estudiante aprende ética en el contexto en el que probablemente tendrá que utilizarla en su futuro profesional. Incide así mismo, en el carácter transformador que este tipo de actividades tiene sobre los profesores que enseñan ética de forma transversal. Estos docentes, al enfrentarse a la tarea de enseñar ética en sus asignaturas se ven obligados a reflexionar sobre la temática, a menudo con otros compañeros. Sin ser expertos en ética, comienzan a tener unos rudimentos en la disciplina necesarios para el desarrollo de esta nueva función y que enriquecen su desarrollo profesional. Algunos autores se han referido a este concepto como "*bilingüismo asimétrico*" [10].

Si se analizan los resultados obtenidos de la experiencia en sí, un 37% de los estudiantes manifestaba que Juan debía aceptar la propuesta de su amigo, frente a un 63% de los estudiantes que expresaban que Juan no debía acceder a la propuesta de éste. Los estudiantes se decantan mayoritariamente por el "No" frente al "Sí".

Más interesante puede ser analizar los resultados de las motivaciones que les llevan a los estudiantes a elegir una determinada opción. La Figura 1(a) muestra el histograma de las respuestas en escala de Likert para cada uno de los ítems relacionados en la tabla II. Por otro lado, la Figura 1 (b), muestra el histograma en los ítems que los estudiantes consideran más importantes a la hora de determinar la solución del problema.

Cada uno de los ítems expresados en la tabla II pueden ser vinculados a un determinado nivel o estadio moral. De esta

forma, los ítems 3 y 5 pueden asociarse al nivel pre-convencional, los ítems 2-6 al nivel convencional y los ítems 1 y 4 están referidos al nivel post-convencional. La tabla III analiza de forma numérica y agrupada los resultados expresados en la Figura 3. Se puede observar que en primera opción, los estudiantes se decantan por ítems relacionados con el nivel convencional (64,8%). Le siguen los criterios post-convencionales (24,2%) y las relacionadas con el nivel pre-convencional (11,0%). Si nos fijamos en el segundo criterio para tomar la decisión, la opción pre-convencional es la más elegida (42,6%). Como tercera opción los estudiantes se decantan mayoritariamente por una opción convencional. Estos resultados son coherentes con la edad de los estudiantes (etapa universitaria) y con resultados obtenidos previamente en nuestras investigaciones. Como se puede observar, los alumnos se sitúan dentro de un continuo. La mayor parte de los mismos, se están en el nivel convencional, siendo opciones minoritarias las pre y post-convencionales. De los resultados anteriores, también se puede extraer la conclusión de que no resulta sencillo establecer un único nivel en el que situar a los estudiantes. En ocasiones la primera respuesta es una posibilidad "políticamente correcta", pasando a continuación a describir opciones que se encuentran en niveles más bajos (pre-convencionales).

Tras el desarrollo del dilema y en una actividad de grupo grande se presentaron los niveles y estadios de Kohlberg y se pidió que los estudiantes reflexionaran acerca de los actores que intervienen en el problema. Así mismo se les solicitó que reflexionaran acerca de la relación de cada uno de los ítems con los niveles propuestos por Kohlberg. Se pretendía con ello que los estudiantes tomaran conciencia de aspectos sobre los que hasta el momento no habían reflexionado ampliando así su grado de desarrollo moral.

CONCLUSIONES

El desarrollo de competencias éticas supone un reto para la educación superior y, de forma especial en el ámbito de la ingeniería. Una de las estrategias, más oportunas para el desarrollo de estas

competencias es la utilización de dilemas morales.

En el presente trabajo se ha descrito un nuevo dilema moral así como los resultados obtenidos de su aplicación en un grupo de 55 estudiantes del Grado en Ingeniería Mecánica. Los resultados obtenidos validan el problema moral propuesto y constituyen una base para futuros trabajos en el ámbito del desarrollo de competencias éticas en el contexto universitario.

PARA SABER MÁS

- [1] Zamora-Polo F, Román-Suero S, Sánchez-Martín J. "De la eficacia a la sostenibilidad". *DYNA*. 2010. Vol. 85-3, p. 575-580. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/3856>
- [2] Zamora-Polo F, Sánchez-Martín J. «Análisis de la implantación del máster en Ingeniería Industrial en España». *DYNA*. 2015. Vol. 90-3, p. 153-157. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7304>.
- [3] Román-Suero S, Sánchez-Martín J, Zamora-Polo F. "Opportunities given by final degree dissertations inside the EHEA to enhance ethical learning in technical education". *European Journal of Engineering Education*. 2013. Vol. 38-2, p. 149-158. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/03043797.2012.755498>
- [4] Boni A, Berjando EJ. "Ethical learning in higher education: The experience of the Technical University of Valencia". *European Journal of Engineering Education*. 2009. Vol. 34-2, p. 205-213. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/03043790802710177>.
- [5] Kohlberg, L. *Psicología del desarrollo moral*. Bilbao: Desclee de Brouwer, 1992. 662p. ISBN 9788433009326.
- [6] Tey Teijón, A. "Dilemas morales". En : Material del curso. La Universidad, instrumento de solidaridad. La enseñanza-aprendizaje para el desarrollo humano sostenible en las enseñanzas científico-técnicas. Ingeniería Sin Fronteras, 2006.
- [7] Rest JR, Narvaez D, Thoma SJ et al. "Neo-Kohlbergian Approach to Morality Research". *Journal of Moral Education*. 2000. Vol. 29-4, p. 381-395. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/713679390>.
- [8] Sánchez-Martín J, Zamora-Polo F, Moreno-Losada J. "Including ethical learning and moral reasoning aspects in higher education: a proposal for developing ethical competences in the university". En : *Business Intelligence, Strategies and Ethics*. New York : Nova Science Publisher, 2015. p. 105-125.
- [9] Moreno-Losada J, Sánchez-Martín J, Zamora-Polo F. *Ética en las aulas. Desarrollo de prácticas docentes éticamente responsables. Una aproximación experiencial desde la Universidad de Extremadura*. Madrid : Entimema, 2014. 125p. ISBN: 9788481988888.
- [10] Hortal, A. *Ética General de las profesionales*. Bilbao: Desclee de Brouwer, 2002. 278p. ISBN 9788433017185.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Gobierno de España (Ministerio de Economía y Competitividad) mediante el proyecto EDU2012-34140, por la convocatoria de acciones de innovación docente del Servicio de Orientación y Formación Docente de la Universidad de Extremadura (curso 15-16), así como por la Junta de Extremadura y los grupos de investigación DEPROFE y GAIRBER de la Universidad de Extremadura.

| | 1ª opción | 2ª opción | 3ª opción |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|
| Pre-convencional | 11,0 | 42,6 | 31,5 |
| Convencional | 64,8 | 25,9 | 37,0 |
| Post-convencional | 24,2 | 31,5 | 31,5 |

Tabla III. Niveles morales asociados a las tres opciones más importantes de los estudiantes (%). Fuente: elaboración propia

Evaluación de factores influyentes en un puerto inteligente con un proceso analítico jerárquico

Gracia Buiza-Camacho¹, M^a del Mar Cerbán-Jiménez² y Cristina González-Gaya³

¹ Instituto Andaluz de Tecnología (IAT)

² Universidad de Cádiz

³ Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7800>

Los puertos siempre han sido centros estratégicos de actividad económica que vinculan el transporte marítimo y terrestre, siendo considerados motores del desarrollo económico. Podría decirse que el transporte de contenedores es la primera industria del mundo verdaderamente global [1]. Actualmente en Europa dicho transporte avanza hacia un modelo que en el 2020 será más inteligente, sostenible e integrado. Debido a ello, es prioritario disponer de información para conocer en qué situación se encuentran los puertos de

contenedores del Mediterráneo y planificar acciones para su desarrollo [2].

En esta línea hay múltiples iniciativas en la literatura, entre las que destaca [3] por su enfoque holístico e integrador. Los autores analizan el concepto *smart-port* (SP) desde tres perspectivas: operacional, ambiental y energética. Sobre un análisis bibliográfico y la consulta a expertos, determinan 23 factores que caracterizan el nivel SP de un puerto de contenedores del Mediterráneo (Tabla 1).

Por otra parte, AHP es una técnica que: a) Permite evaluar alternativas o elementos cuando deben considerarse varios criterios y determinar prioridades entre estos [4]; b) Se basa en el conocimiento y experiencia de un grupo de expertos que deben realizar comparaciones entre pares de elementos.

Existen múltiples estudios donde se aplica AHP para evaluar factores relacionados con la gestión portuaria. Así, se tienen las referencias:

- [5]: Identifica la eficiencia, la frecuencia de buques y la localización como factores principales que influyen en un operador logístico al elegir un puerto.
- [6]: Analiza ocho puertos asiáticos y establece que los criterios de evaluación más utilizados incluyen entre otros, la calidad de mano de obra, productividad interna, tiempo medio de servicio al buque en el puerto, ratio de carga y descarga, capacidad de movimiento en la terminal, coste de operación de transitorios y relación entre flujos de entrada y salida.
- [7]: Explora la importancia relativa de los factores que determinan la competitividad de un puerto de contenedores desde la perspectiva del usuario. Encuentra que el factor "coste en el puerto" es el que determina la competitividad del puerto desde la perspectiva de la naviera y la "localización del puerto" lo hace desde la de los transitorios y cargadores.
- [8]: Analiza los factores que influyen en la utilización de una determinada línea de navegación en un puerto por parte de consignatarios u operadores de contenedores. Concluye que entre estos factores están el tiempo de transbordo y unas operaciones eficientes en la terminal.

En el ámbito energético y ambiental, la literatura no muestra excesivas evidencias de la aplicación de AHP en el entorno portuario. Un ejemplo podría ser la referencia [9] que formula un modelo AHP difuso como guía para una operación portuaria *green* identificando como prioritarios la gestión de residuos peligrosos, contaminación del aire y del agua, entre otros.

En línea con las últimas investigaciones y tendencias, este trabajo pretende contribuir a orientar a los puertos de contenedores del Mediterráneo hacia criterios de *smart*. Para ello, a) Adopta el concepto SP como punto de partida, analizando la perspectiva operacional, energética y ambiental; b) Aplica AHP, con la participación de expertos europeos, para determinar la importancia relativa de cada una de estas perspectivas, así como de los fac-

| Áreas | Factores |
|---------------------------------------|--|
| Operacional | Longitud de muelle |
| | Área de almacenamiento (área de patio) |
| | Capacidad para recibir grandes buques |
| | Tamaño y uso de la máxima capacidad |
| | Nivel tecnológico |
| | Nivel de automatización |
| | Nivel de intermodalidad |
| | Líneas que hacen escala en el puerto |
| Energía | Sistemas de gestión de la calidad, la seguridad y la salud |
| | Consumo total de energía (energía primaria) |
| | Consumo energético por parte de los contenedores |
| | Consumo energético de la flota interna de vehículos |
| | Consumo energético por parte de las oficinas |
| | Consumo energético por parte del sistema de iluminación |
| | Consumo energético por parte del equipo dedicado al movimiento de contenedores (grúas, etc.) |
| | Uso de energía renovable |
| Medio Ambiente | Sistema de gestión energética |
| | Sistemas de gestión ambiental |
| | Gestión de residuos |
| | Gestión del agua |
| | Emisiones al aire |
| | Contaminación acústica |
| Fugas y derrames de sustancias al mar | |

Tabla 1: Áreas y factores del modelo SP. Fuente: Autores sobre [3]

tores que las determinan; c) Enuncia sugerencias para que autoridades portuarias y gestores de terminales de contenedores formulen estrategias que incrementen su consideración de SP y mejoren su competitividad de forma integral y equilibrada.

El concepto SP utilizado se basa en factores vinculados a información no confidencial, por lo que su medición debería ser posible utilizando fuentes públicas o recurriendo a los puertos directamente. Ello hace posible que los resultados de este trabajo puedan servir para la medición de único indicador del nivel *smart* de un puerto facilitando su comparación con otros.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El presente estudio aplica AHP, técnica que utiliza el álgebra matricial sobre comparaciones entre pares de elementos realizadas por expertos.

Entre los motivos que fundamentan la elección de este método destacan:

- Es un método sencillo, lógico y estructurado, basado en la descomposición de un objetivo o problema en una estructura jerárquica de factores o subproblemas. Facilita la labor de los expertos participantes, al permitir valorar elementos más fácilmente, comparándolos entre sí.
- Permite medir la consistencia de las opiniones de los expertos. Así, si su matriz es inconsistente, el experto debe replantearse su opinión. Si no es posible reconducir el grado de inconsistencia a valores aceptables, se elimina su opinión del estudio.
- Existen distintos software para su aplicación. Un ejemplo es *Expert Choice*, utilizado en este estudio por ser su fácil uso y por existir numerosas tutoriales y versiones gratuitas.

Los pasos dados para aplicar AHP son: a) Elección de los expertos que emitirán sus opiniones: El estudio ha contado con la colaboración de 16 expertos de países mediterráneos (Grecia, España, Italia y Eslovenia): Seleccionados por su experiencia en proyectos europeos y estudios relacionados con la temática abordada; Participantes directa o indirectamente en el estudio del concepto SP en que se basa presente estudio y con amplio conocimiento sobre la situación de los puertos del Mediterráneo y sus expectativas futuras; Pertenecientes a autoridades

portuarias, gobiernos regionales, terminales de contenedores y otras organizaciones vinculadas al sector portuario.

b) A cada experto se le ha pasado un cuestionario que incluye las 4 matrices de valoración del estudio que deben rellenar. Todas ellas son matrices cuadradas con tantas filas como columnas y elementos a comparar:

- Matriz 1, donde los elementos a comparar son las tres áreas consideradas (operacional, ambiental y energía) en base a su influencia en el nivel de SP de un puerto.
- Matriz 2, donde los elementos a comparar son los factores que determinan la perspectiva operacional según [3] en base a su influencia en el Área Operacional de un SP.
- Matriz 3, donde los elementos a comparar son los factores que determinan la perspectiva energética según [3] en base a su influencia en el Área Energía de un SP.
- Matriz 4, donde los elementos a comparar son los factores que determinan la perspectiva ambiental según [3] en base a su influencia en el Área Ambiental de un SP.

Los elementos c_{ij} de cada matriz (en adelante, matriz de comparación) reflejan los juicios de valor de cada experto, expresados en la escala numérica de [4].

c) Una vez realizadas las evaluaciones individuales de los expertos, se ha analizado la consistencia de todas las matrices de comparación generadas (cuatro de cada experto).

Para ello se ha utilizado el soporte informático *Expert Choice*, con el que en primer lugar se ha modelizado la jerarquía objeto del estudio. El nodo más elevado de la jerarquía es la misión perseguida (por ejemplo, llegar a ser un SP) y los nodos siguientes las alternativas que se evalúan (por ejemplo, Operacional, Energía y Medio Ambiente). De igual manera, se ha diseñado la jerarquía para el Área Operacional, Energía y Medio Ambiente, teniendo en cuenta los factores identificados para cada una de ellas en [3].

Una vez realizada la modelización, se han introducido en *Expert Choice* las matrices de comparación de cada experto, obteniendo para cada una:

- El ratio de consistencia (CR). AHP mide la consistencia a través del CR y valida que los juicios emitidos por los expertos no contengan contradicciones. Generalmente un CR menor o igual que 0,11 es considerado aceptable, aunque algunos autores, como [4], recomiendan hasta 0,9. En la práctica, un umbral de 0,1 es considerado como bueno y es el que se adopta en el presente estudio. Cuando se ha excedido este límite, se ha solicitado una nueva evaluación al experto. A pesar de esta revisión, las respuestas en las matrices 2, 3 y 4 de dos expertos tuvieron que desestimarse por seguir siendo inconsistentes (superiores a 0,11).
- Un vector cuyas componentes reflejan el peso que tiene, desde la perspectiva de cada experto, cada elemento que se ha comparado.

d) Aplicando las pautas dadas por [10], se han determinado las prioridades de cada elemento considerando de forma agregada las opiniones de todos los expertos. Así, se han calculado:

- Cuatro matrices de decisión, cuyas columnas son las prioridades calculadas para cada elemento y experto.
- Cuatro matrices simétricas de coeficientes de correlación de los expertos y las matrices exponenciales correspondientes.
- Vectores c_d y w_d mediante Ec. (1) y Ec. (2):

$$c_d = [\sum_{l=1}^t \exp(r_{dl})] - \exp(r_{dd}) \quad (1)$$

$$w_d = \frac{c_d}{\sum_{l=1}^t c_l} \quad (2)$$

donde r_{dl} es el coeficiente de correlación entre experto d y el l , w_d es el peso de cada experto y t es el número de expertos.

- Pesos de cada elemento según la Ec. (3):

$$w_{jg} = [\sum_{d=1}^t (w_d w_{jd})] \quad (3)$$

donde w_{jd} es el peso del elemento j con respecto al experto d .

e) Finalmente se ha calculado la prioridad global de cada factor en el modelo planteado aplicando el principio de composición jerárquica, es decir, multiplicando la prioridad de

cada área (Operacional, Energía y Medio Ambiente) por la prioridad de cada factor que la determina.

Como herramienta de validación se aplica el método de comparaciones binarias de Thurstone [11]. Una vez los factores son comparados por pares, se calcula la proporción de veces que cada uno ha sido preferido respecto a otro, y se divide esta proporción por el número de jueces participantes. A cada una de estas proporciones se le asigna una puntuación típica Z con la que se obtiene la escala de intervalos correspondiente.

3. RESULTADOS

La Tabla 2 muestra las prioridades locales de cada área estudiada:

| Área | Peso local |
|----------------|------------|
| Operacional | 0,62 |
| Energía | 0,19 |
| Medio Ambiente | 0,19 |

Tabla 2: Pesos de cada área estudiada en un SP. Fuente: Autores

Se observa cómo los expertos consideran el Área Operacional como el más importante y que más influye en el nivel SP (62%). Las otras dos áreas (Energía y Medio Ambiente) tienen el mismo peso relativo entre sí. Los pesos obtenidos por factor en las Áreas Operacional, Energía y Medio Ambiente se muestran en la Tabla 3.

Se observa cómo el nivel tecnológico, de automatización y de intermodalidad son los que más influyen en el Área Operacional.

El consumo energético de la flota interna de vehículos y el de los equipos dedicados al movimiento de los contenedores se perciben como los factores más influyentes en el Área Energía. Son seguidos estrechamente por el consumo energético del sistema de iluminación.

En el Área Ambiental, las fugas y derrames de sustancias al mar y la implantación de sistemas de gestión ambiental normalizados son los dos factores identificados como más importantes. La gestión de los residuos y del agua son los que resultan de menor importancia.

La aplicación del método de Thurstone nos permite conocer las distancias entre cada uno de los factores, comprobándose que existen diferencias entre ellos, lo cual no se aprecia al aplicar AHP donde todos los factores se encuentran muy concentrados cada vez.

Finalmente, la Tabla 5 muestra los pesos globales de cada factor influyente en un SP como consecuencia del último paso de aplicar AHP. Se aprecia que el factor de

| Áreas estudiadas en un "smart port" | Peso local |
|--|------------|
| Área Operacional | |
| Longitud de muelle | 0,10 |
| Área de almacenamiento (área de patio) | 0,10 |
| Capacidad para recibir grandes buques | 0,07 |
| Tamaño y uso de la máxima capacidad | 0,06 |
| Nivel tecnológico | 0,16 |
| Nivel de automatización | 0,15 |
| Nivel de intermodalidad | 0,15 |
| Líneas que hacen escala en el puerto | 0,11 |
| Sistemas de gestión de la calidad, seguridad y salud | 0,10 |
| Área de Energía | |
| Consumo total de energía (energía primaria) | 0,20 |
| Consumo energético por parte de los contenedores | 0,08 |
| Consumo energético de la flota interna de vehículos | 0,19 |
| Consumo energético por parte de las oficinas | 0,07 |
| Consumo energético por parte del sistema de iluminación | 0,12 |
| Consumo energético por parte del equipo dedicado al movimiento de contenedores (grúas, etc.) | 0,17 |
| Uso de energía renovable | 0,08 |
| Sistema de gestión energética | 0,09 |
| Área de Medio Ambiente | |
| Sistemas de gestión ambiental. | 0,21 |
| Gestión de residuos. | 0,12 |
| Gestión del agua. | 0,11 |
| Emisiones al aire. | 0,17 |
| Contaminación acústica. | 0,15 |
| Fugas y derrames de sustancias al mar. | 0,24 |

Tabla 3: Pesos de los factores que influyen en un SP en el marco de sus áreas. Fuente: Autores

mayor importancia es el nivel tecnológico, seguido por el de automatización y de intermodalidad. El menos determinante es el consumo energético de las oficinas.

4. DISCUSIÓN

La literatura presenta distintos estudios donde se destacan prioridades del sector portuario en relación al área operacional, energética o medio ambiental, así como estudios sobre qué aspectos son más importantes por parte de los operadores económicos u otras entidades a la hora de tomar una decisión sobre un puerto. El presente estudio da un paso más allá y se centra en determinar qué factores serían los más importantes para que un puerto de contenedores se acercara al concepto SP. Para ello, considera factores en el ámbito operacional, energético y ambiental y se basa en la opinión de expertos del sector.

El nivel tecnológico es el factor que más determina la configuración de un SP, seguido del nivel de automatización. Ello está en línea con diferentes estudios que se encuentran en la literatura, en la medida en que éstos establecen como factores clave de la competitividad de un puerto el "coste", la "eficiencia operativa", la

"productividad interna" o "los tiempos de operación" que podrían estar vinculados a un alto nivel tecnológico y de automatización. Adicionalmente, todo ello está alineado con las últimas tendencias internacionales en el ámbito de la sensorización y big data.

La intermodalidad se configura igualmente como uno de los factores claves. Ello viene a subrayar que los puertos ya no deben considerarse nodos aislados en las cadenas logísticas sino parte de ellas, debiendo contribuir a su optimización. Esto sin duda puede conseguirse en gran parte en base a la tecnología y la automatización, fundamentales para lograr la sincronización necesaria entre los diferentes medios de transporte (sincromodalidad).

Los factores relativos al medio ambiente y energía quedan relegados respecto a los operacionales en el marco de un SP. Ello está en línea con la percepción del sector en general sobre este tema, reflejadas en las conclusiones de la referencia [3].

Es el factor "Fugas y derrames de sustancias al mar" el más importante en este ámbito, pero siempre detrás de los factores operacionales. Las emisiones al aire se vienen considerando en general un aspecto clave en las operaciones marítimas. Sin embargo, las encontramos expli-

| Factores | Peso global | Orden de importancia |
|--|-------------|----------------------|
| Longitud de muelle | 0,06 | 4º |
| Área de almacenamiento (área de patio) | 0,06 | 4º |
| Capacidad para recibir grandes buques | 0,05 | 5º |
| Tamaño y uso de la máxima capacidad | 0,04 | 6º |
| Nivel tecnológico | 0,10 | 1º |
| Nivel de automatización | 0,09 | 2º |
| Nivel de intermodalidad | 0,09 | 2º |
| Líneas que hacen escala en el puerto | 0,07 | 3º |
| Sistemas de gestión de la calidad, la seguridad y la salud | 0,06 | 4º |
| Consumo total de energía (energía primaria) | 0,04 | 6º |
| Consumo energético por parte de los contenedores | 0,01 | 9º |
| Consumo energético de la flota interna de vehículos | 0,04 | 6º |
| Consumo energético por parte de las oficinas | 0,01 | 9º |
| Consumo energético por parte del sistema de iluminación | 0,02 | 8º |
| Consumo energético por parte del equipo dedicado al movimiento de contenedores (grúas, etc.) | 0,03 | 7º |
| Uso de energía renovable | 0,01 | 8º |
| Sistema de gestión energética | 0,02 | 8º |
| Sistemas de gestión ambiental | 0,04 | 6º |
| Gestión de residuos | 0,03 | 7º |
| Gestión del agua | 0,02 | 8º |
| Emisiones al aire | 0,03 | 7º |
| Contaminación acústica | 0,03 | 7º |
| Fugas y derrames de sustancias al mar | 0,05 | 5º |

Tabla 5: Pesos globales de los factores que influyen en un SP. Fuente: Autores

citamente en un séptimo lugar en cuanto a su relevancia en el concepto SP. En todo caso, indudablemente es un aspecto implícito en la implantación de un sistema de gestión ambiental normalizado (factor con sexto puesto en Tabla 4). A pesar de la existencia de estudios que determinan el consumo energético de los contenedores refrigerados como relevantes, a nivel de SP este factor no ha sido especialmente destacado por los expertos. En cualquier caso, es fundamental que el presente estudio se realice periódicamente, no sólo por la evolución que pueda experimentar el concepto de SP en sí mismo, sino por las variaciones que pueden producirse en la importancia percibida por los expertos sobre los factores que lo determinan.

Mediante la validación se ha comprobado que los factores no están tan próximos como parece deducirse al aplicar AHP, sino que en realidad existen distintos conjuntos que los expertos participantes discriminan. Adicionalmente, ha permitido comprobar la validez de contenidos en base a la proximidad de los factores en la escala.

Las conclusiones generales de este estudio están alienadas con las alcanzadas en otras iniciativas como [12] donde el Área Operacional era mejor valorado frente a las de Energía y Medio Ambiente, y obtenía mayor relevancia el nivel tecnológico y los factores relacionados con la

gestión de infraestructuras.

El resultado del presente estudio es de alto interés para aquellos puertos que aspiran a ser SP, ya que proporciona información relevante para establecer el plan estratégico que les permita alcanzar este objetivo.

Como limitación principal del estudio cabe destacar que se centra en la actividad portuaria relacionada con la mercancía transportada en contenedores en el Mediterráneo. Por otra parte, AHP permite llegar a una priorización en base a un análisis minucioso del problema y al conocimiento, experiencia y opinión de expertos, con la limitación que ello supone. El uso de un análisis de regresión o de ecuaciones estructurales podría contribuir a conocer mejor las relaciones causales entre los factores del concepto SP.

Como otras líneas de trabajo futuras se propone ampliar el estudio para contemplar la actividad global de los puertos, y no sólo en relación a su actividad asociada al tráfico de contenedores. Adicionalmente, se debería reflexionar sobre la inclusión de otras áreas que intuimos como muy influyentes en el concepto SP, como el socio-económico, y utilizando los pesos obtenidos para cada factor, llegar a definir una función matemática que facilite el cálculo del índice SP para cada puerto.

PARA SABER MÁS

- [1] UNCTAD. (2014). "Review of Maritime Transport 2014". United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD). United Nations Publication. Consultado en: unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2014_en.pdf en octubre 2015.
- [2] MED Programme. 2013. "Terms of reference. Call for proposals on Integrated Maritime approach". Consultado en: <http://www.programmed.eu/en.html> en octubre 2015.
- [3] Buiza-Camacho G, Cerbán-Jiménez M, Cepolina S, Djordjevic O, Dobrijevic A, González-Gaya C. (2015). "Current situation of the Mediterranean container ports regarding the operational, energy and environment areas". 6th IESM Conference, October 2015, Seville, Spain.
- [4] Saaty TL. (1980). "The Analytic Hierarchy Process", New York: MacGraw-Hill.
- [5] Tongzon JL. (2009). "Port choice and freight forwarders". *Transportation Research Part E*, Vol. 45, p. 186-195. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2008.02.004>
- [6] Teng JY, Huang WC, Huang MJ. (2004). "Multicriteria evaluation for port competitiveness of eight East Asian container ports". *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 12 (4), p. 256-264. Consultado en <http://jms.ntou.edu.tw> en Agosto 2015.
- [7] Yuen CI A, Zhang A, Cheung W. (2012). "Port competitiveness from the users' perspective: An analysis of major container ports in China and its neighboring countries". *Research in Transportation Economics*, Vol. 35, p. 34-40. DOI: [10.1016/j.retrec.2011.11.005](http://dx.doi.org/10.1016/j.retrec.2011.11.005)
- [8] Yang CC, Tai HH, Chiu WH. (2014). "Factors influencing container carriers' use of coastal shipping". *Maritime Policy & Management*, Vol. 41 (2), p. 131-133. DOI: [10.1080/03088839.2013.819134](http://dx.doi.org/10.1080/03088839.2013.819134)
- [9] Chiu RH, Lin LH, Ting SC. (2014). "Evaluation of Green Port Factors and Performance: A Fuzzy AHP Analysis". *Hindawi Publishing Corporation. Mathematical problems in Engineering*. Vol. 2014. Article 802976. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/802976>
- [10] Aldian A, Taylor MA. (2005). "A consistent method to determine flexible criteria weights for multicriteria transport project evaluation in developing countries". *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 6, p. 3948-3963. DOI: <http://doi.org/10.11175/easts.6.3948>
- [11] Barbero, M. I. (2007). Métodos de elaboración de escalas [Scaling methods]. Madrid, España: UNED.
- [12] SMART PORT Project. Consultado en: <http://www.medmaritimeprojects.eu/section/smart-port-redirect/outputs> en octubre de 2015.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic7800-1.pdf



Modelo de análisis y validación de propuestas de diseño mediante prototipos flexibles

Lucía Rodríguez- Parada, Luis Romero y Manuel Domínguez
Ingeniería del Diseño. Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7812>

Al igual que el contexto social, las dinámicas y las necesidades de los usuarios también van cambiando; la sociedad es cada vez más exigente y con necesidades más específicas. En efecto, el mercado exige que los productos sean cada vez más competitivos y con ciclos de vida cortos, es decir, que se desarrollen en el menor tiempo posible, lo que hace necesario crear formas o métodos para llegar a conseguir estos objetivos.

En un proyecto de desarrollo de producto, el mayor índice de creatividad se produce en la primera fase, el diseño conceptual. Esta fase requiere la aportación de nuevas ideas para dar soluciones a los productos tanto funcionales como estéticos y ergonómicos. Las aportaciones de esta fase de inventiva y de análisis de soluciones serán las que marquen la calidad del producto final [1].

En el marco de las observaciones anteriores, la complejidad creciente en los procesos de diseño y los esfuerzos por desarrollar nuevos campos en el concepto de la creatividad humana dan lugar a nuevas perspectivas y a la búsqueda de nuevas metodologías que ayuden a esta labor [2]. Así mismo, existen modelos de procesos de diseño con características diferentes, sin embargo todas ellas son relevantes ya que pueden ser adaptables según las necesidades específicas [3].

Ante la situación planteada, en muchas ocasiones los diseñadores industriales reutilizan la información, no diseñan desde cero, sino que normalmente comienzan por mejorar las características de un producto ya existente o un modelo físico. A su vez y con este mismo fin, es notable la tendencia por la reutilización de la información, como modelos físicos o virtuales ya creados en otros proyectos, para generar ideas de mejora [4].

Igualmente, la posibilidad de aplicación de la impresión 3D desde las fases tempranas del desarrollo de producto permite tener como objetivo tomar decisiones fiables lo que se traduce en la creación y el desarrollo de productos más eficaces y, por tanto, más competitivos.

De los anteriores planteamientos se deduce que la evaluación de las ideas en fases tempranas del desarrollo se considera crucial para alcanzar una solución competitiva. Una vez planteada la posibilidad de usar los prototipos, como medio creativo y de análisis en el diseño de productos, en este trabajo se plantea un método de validación de ideas por medio de modelos tridimensionales. En concreto, se estudian productos con características flexibles para reproducir la realidad elástica del producto diseñado y, como resultado, poder valorar la funcionalidad y la ergonomía, aparte de la estética.

Con esto se espera crear productos más competitivos, no solo por conseguir crear conceptos en menor tiempo sino aumentar su fiabilidad gracias a la impresión de realidades elásticas. Tal como se ha visto, cuando la flexibilidad del material influye directamente en el diseño formal y estético del producto es de gran importancia analizar todos los factores que influyen en el diseño mediante un prototipo de características similares para no valorar sólo la estética.

De manera convencional se valida la propuesta final mediante un prototipo final realizado mediante moldes. Sin embargo, este trabajo se centra en la realización de prototipos mediante impresión 3D para poder evaluar ideas desde la fase conceptual de una forma fiable. Con ello se demuestra una vez más que utilizar materiales adaptados a la futura realidad del producto facilita la labor al diseñador y al proceso de desarrollo del proyecto.

1. MATERIALES FLEXIBLES EN IMPRESIÓN 3D

A lo largo de la joven historia de la manufactura por capas, las marcas comerciales han ido desarrollando tecnolo-

gías para utilizarlas con materiales diversos. Sin embargo, todos ellos con un nexo común que es poder adherirse. Los materiales considerados plásticos, por sus propiedades, son los más usados por las diferentes máquinas. Ahora bien, la creciente demanda en el uso de las impresoras 3D en el mercado ha hecho que se investigue el uso de estas tecnologías para la construcción de objetos con diferentes tipos de materiales.

En atención a esto último, la creación de materiales con características flexibles está en continuo desarrollo, por sus propiedades y múltiples aplicaciones. De hecho, ámbitos como la moda o la medicina están invirtiendo seriamente en este tipo de desarrollos. Así, debido a la rápida innovación, en el campo de la impresión 3D es difícil captar los últimos avances del material, como comentan Lipson y Kurman en su libro sobre el nuevo mundo de la impresión 3D [5].

Tanto los desarrolladores de materiales como los propios fabricantes de las impresoras 3D están desarrollando estas familias de productos flexibles. Incluso, en el mercado pueden encontrarse materiales con propiedades flexibles que están especialmente diseñados para la tecnología de deposición de material fundido (*fused deposition modeling* – FDM).

Los materiales flexibles en filamento, como Ninjaflex, Innoflex o Filaflex, se comercializan en bobina en diversos diámetros para poder adaptarse a las impresoras comerciales. Estos materiales flexibles tienen diferencias importantes que hacen que haya que realizar una serie de adaptaciones específicas en la máquina para poder utilizarlos. La dureza *shore* y la temperatura de extrusión son dos parámetros que influyen en la caracterización de la máquina, sin embargo, el material del que está compuesto también influye en la respuesta con la máquina, por este motivo es importante seleccionar bien el material y caracterizar la máquina para el objetivo concreto que se desee [6].

1.1. LOS PRIMEROS PROTOTIPOS EN EL DESARROLLO DE CONCEPTOS

En el campo de la ingeniería de producto, sobre todo en la concepción de nuevos productos, la creación y el uso de prototipos es esencial [7]. Según lo dicho, en el desarrollo de nuevos conceptos que

den como resultado productos viables, se entiende como prototipo el objeto conceptual creado de forma física en tres dimensiones. En síntesis, es un elemento que sirve de modelo y que puede ser usado para validar conceptos estéticos o de volumen. Sin embargo, también son usados para probar los mecanismos de uso, o las propias sensaciones durante su utilización [7].

No obstante, los diseñadores se encuentran con el problema de evaluar el funcionamiento de sus conceptos en función del diferente comportamiento humano. El prototipo es una parte importante en la fase de desarrollo de productos que está fuertemente influenciado por el tiempo y el presupuesto, ya que para construir modelos plenamente operativos se requieren ambas condiciones [8]. De todas formas, la fiabilidad o que el modelo se adecue lo máximo posible a la realidad se puede plantear en base a diversos criterios: grado de funcionalidad, la similitud de la interacción, la amplitud de funciones o el refinamiento estético [9, 10].

En lo que se refiere al proceso de diseño, las maquetas se suelen realizar de una manera muy rudimentaria al principio de la fase conceptual. Cuando un concepto es aprobado es cuando se crea un prototipo más elaborado para aprobar el diseño. No obstante, dependiendo del sector o el tipo de producto el modelo se realizará con mayor o menor definición. En cualquiera de los casos, este proceso tradicional es lento y costoso. De igual manera se considera muy importante la selección correcta por parte del diseñador del tipo de prototipo para que éste sea fiable [11].

Por las consideraciones anteriores este trabajo se centra en un modelo de análisis con prototipos flexibles creados mediante impresión 3D. Un modelo que permita avanzar con mayor velocidad y fiabilidad en la fase conceptual. En síntesis, el estudio tiene como propósito el análisis del concepto creado mediante las emociones reales de uso que proporciona al usuario el prototipo flexible. Se consideró necesario comprobar dicho modelo mediante la realización de casos de estudio utilizando productos con características de uso claramente flexibles, por esta razón se seleccionaron la montura de unas gafas de natación y una espátula flexible de repostería.

2. MODELO DE ANÁLISIS EN DISEÑO DE PRODUCTO MEDIANTE PROTOTIPOS FLEXIBLES

Según los criterios analizados anteriormente, para un concepto de diseño

con carácter flexible se toman cuatro visiones del producto como parámetros a evaluar teniendo en cuenta la similitud con la realidad: *Four-Factor Framework of Contextual Fidelity* [11], que puede ayudar al diseñador a identificar problemas de usabilidad. Los criterios de clasificación que se tienen en cuenta son: el grado de funcionalidad, la amplitud de las funciones en su contexto, la ergonomía y el refinamiento estético. El contexto de uso es un factor determinante para los requisitos del producto; sin embargo, el grado de funcionalidad es el que marca la mayor parte de los objetivos que se pretenden cubrir, es decir, puntos estratégicos en el diseño.

En otras palabras, se refiere a la percepción del objeto teniendo en cuenta las soluciones que se esperaban conseguir para establecer las especificaciones de producto mediante la emisión de emociones que son percibidas por el usuario. El uso de los productos y la experiencia del propio usuario tienen gran influencia sobre la aprobación de los prototipos en la fase de desarrollo de un nuevo producto. Por ello, antes de generar el modelo se considera importante el análisis del uso, para detectar los puntos que son clave para el producto con respecto a la usabilidad. Con respecto a los productos flexibles, el material influye directamente sobre el alto índice de adaptabilidad y ergonomía que contienen, aunque según el contexto específico de uso también la forma influye en la función.

En relación con esto último, las emociones y sensaciones que inspira un producto pueden ser expresadas, y por lo tanto cuantificadas, por medio de adjetivos. Ante esta situación, se creó un test que recoge las pautas a seguir por la persona que evalúa mediante la selección de una serie de adjetivos, que se utilizan para relacionar los objetivos con los cuatro parámetros mencionados, y así poder definir las características del producto en el modelo de análisis y comprobar si el producto cumple con las especificaciones marcadas.

En el análisis de productos flexibles, para realizar la evaluación de usabilidad y fiabilidad del producto se tienen que analizar los aspectos críticos del producto teniendo en cuenta la realidad de uso y los parámetros del material. Concretamente, en los materiales flexibles influyen factores como el tacto, el coeficiente de rozamiento, el grado de flexibilidad o realidad elástica. En relación a estos planteamientos, los ensayos de fiabilidad están ganando interés en los últimos años en

el diseño de producto y en la mejora del ciclo de vida, por lo que se considera de gran importancia crear propuestas lo más fiables posible con el fin de optimizar los procesos y los productos [12].

En atención a estos planteamientos se ha generado un modelo de análisis y validación que estructura los resultados de las pruebas realizadas con los prototipos. Para esquematizar estos resultados del análisis de una forma sencilla se creó una matriz gráfica que relaciona los factores que definen cualquier producto (la estética, la función, la ergonomía y el contexto de uso) con las características principales del producto, incluidas en las especificaciones de diseño. Así, el objeto de aplicación es detectar fallos concretos en las propuestas de diseño con el fin de modificarlos y finalmente validar la idea.

En síntesis, la matriz de validación desglosa los factores de análisis y los convierte en características técnicas, físicas y visuales. Con ella se observaron, a su vez, los aspectos a mejorar sobre el producto y se valoró también si el prototipo era válido en función del número de características positivas que obtuvo.

3. CASOS DE ESTUDIO. RESULTADOS

De acuerdo con los razonamientos que se han planteado se ha realizado un estudio con dos casos prácticos: una montura de gafas de natación y una espátula flexible, que se han seleccionado por su grado de flexibilidad y por el importante factor que juega la ergonomía en la usabilidad de este tipo de productos.

En el caso de la montura flexible, la complejidad de las formas y los parámetros que influyen en la funcionalidad hicieron que se detectaran limitaciones que afectaron a los resultados. Sin embargo, la espátula flexible tiene formas y función simples que han permitido centrarse en el método de análisis de una forma concisa. Esto ha permitido comparar los resultados de ambos casos ya que la mayor complejidad de la montura podría dar lugar a confusión en los resultados y de esta forma se han evidenciado con mayor fiabilidad.

Este estudio examina un aspecto clave en el proceso diseño de productos, la fidelidad del prototipo con respecto al producto real a desarrollar y la fidelidad de reproducción del escaneado e impresión tridimensionales. Con este planteamiento, se han utilizado una montura y espátula comerciales que han sido escaneadas mediante un sistema de escaneado tridimensional óptico de alta precisión.

De la misma manera, se han realizado varios prototipos en materiales con parámetros diferentes para ver el efecto que provoca la diferencia de material en la evaluación de un producto. Uno fue realizado en ABS y otro en material flexible con dureza *shore A* de varios rangos.

3.1. PARÁMETROS DE EVALUACIÓN

Los parámetros de evaluación que influyen en estos productos pueden variar pero hay que tener en cuenta siempre que la adaptabilidad en función al material y la ergonomía son claramente importantes en el diseño del producto. En ambos productos se han valorado las funciones principales consideradas según el objeto y su uso.

Para la montura flexible las especificaciones funcionales del producto son que el contorno se adapte a los ojos y no les entre agua, la distancia entre los ojos, la visibilidad que permite, la adaptabilidad del material a la cara y la comodidad en la cara al producirse el efecto de vacío. Con el fin de analizar estos parámetros se fueron relacionando una serie de adjetivos y poniendo su opuesto con el fin de que la persona o grupo de personas analicen el producto (figura 1). De igual manera, al tratarse de un producto deportivo y de competición las líneas deben ser aerodinámicas, por lo que se seleccionaron también palabras relacionadas con la función del producto.

En el caso de la espátula flexible la función principal del producto es arrastrar el alimento por una superficie, su función y contexto de uso dan lugar a varios parámetros



Fig. 1: Ejemplo de test de gafas de natación

metros a analizar como la adaptabilidad al recipiente o la ergonomía de la mano, entre otras. Teniendo en cuenta esto se han relacionado palabras teniendo en cuenta también la estética.

En referencia a las clasificaciones anteriores, se han evaluado los productos comerciales utilizados para este estudio con el producto en la mano y la tabla creada para cada caso. Este análisis fue realizado por un grupo de trabajo que tomó decisiones en consenso.

3.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE TEST DE PRODUCTO DE REFERENCIA

La matriz de validación desglosa los factores de análisis y los convierte en características técnicas, físicas y visuales.

Con esta matriz se pueden observar los aspectos a mejorar sobre el producto y valorar también si un prototipo es válido en función del número de características positivas que tiene. Ante los resultados del test sobre la situación planteada se detallaron los parámetros de evaluación con respecto a los cuatro conectores comunes.

Con los datos de las tablas de resultados (Tablas 1 y 2) se han generado las matrices de validación para ambos casos de estudio. En ellas se pueden observar que existen puntos a mejorar, sin embargo, este estudio se centró en verificar la fiabilidad del prototipo. En consecuencia, el objetivo es observar los resultados de las matrices realizadas con los productos reales para corroborar que se llega a las mismas conclusiones.

| Parametro | Resultados de tabla de evaluación realizada | | | | | |
|-----------------|---|---------|----------|---------|--------------------|--------|
| Estética | Antiguo | Alegre | Barato | Feo | Tradicional | Blando |
| Ergonomía | Fuerte | Amplio | Incómodo | Grande | Suave | Liso |
| Función | Silencioso | Difícil | Rígido | Visible | No aíslan del agua | Largo |
| Contexto de uso | Incómodo | Grande | Peor | malo | Robusto | Ancho |

Tabla 1: Resultado del test de la montura flexible

| Parámetro | Resultados de tabla de evaluación realizada | | | | | | |
|-----------------|---|-----------|--------|---------|--------------|--------|-------------|
| Estética | liso | serio | barato | feo | moderno | blando | endeble |
| Ergonomía | adaptable | débil | cómodo | pequeño | suave | Ancho | largo |
| Función | fácil | adaptable | ancho | ágil | corto | frágil | |
| Contexto de uso | cómodo | grande | mejor | bueno | aerodinámico | ancho | No arrastra |

Tabla 2: Resultado de test de evaluación de la espátula de repostería

| Características | | | | | | | | | Análisis | Prioridades de mejora | Dificultad de modific. | Relación de mejora |
|-----------------|----------|----------------------|-----------------|----------------------|-------------|---------------|--------------|------------------|----------|-----------------------|------------------------|--------------------|
| | Factores | Adaptación a la cara | Campo de visión | Confort del material | Durabilidad | Aerodinamismo | efecto vacío | Usuario objetivo | | | | |
| Estética | □ | | ▲ | ● | ● | ● | ● | □ | ● | 2º | 1 | 1,2 |
| Ergonomía | ● | ▲ | ▲ | | | | | □ | ● | 3º | 4 | 1,2 |
| Función | ● | ▲ | ● | | | | □ | ▲ | ● | 3º | 3 | 1,6 |
| Contexto de uso | ● | ▲ | ● | ● | ● | ● | ● | ▲ | ● | 1º | 2 | 2,1 |
| Validación | ● | ▲ | ● | ● | ● | ● | ● | □ | ● | | | |
| Importancia | 4 | 3 | 4 | 2 | 2 | 3 | 4 | 2 | | | | |
| Prioridad | 1º | 6º | 4º | 2º | 2º | 3º | 5º | 2º | | | | |

Fig. 2: Matriz de resultados de análisis y validación

| Características | | | | | | | | Análisis | Prioridades de mejora | Dificultad de modific. | Relación de mejora | |
|-----------------|----------|--------------------|------------------|-----------|-----------------------|------------------|-------------|----------|-----------------------|------------------------|--------------------|------------------|
| | Factores | Adaptación cabezal | formas de agarre | Velocidad | Facilidad de arrastre | Confort material | Durabilidad | | | | | Usuario objetivo |
| Estética | ● | ● | | | ▲ | ● | ● | ● | ● | 2º | 1 | 2,7 |
| Ergonomía | ▲ | ● | | ▲ | ● | | ● | | ● | 3º | 1 | 2,2 |
| Función | ▲ | ▲ | ● | ▲ | | | ▲ | | ▲ | 4º | 4 | 0,4 |
| Contexto de uso | ● | ▲ | ● | ● | ● | ● | ▲ | ● | ● | 1º | 3 | 2 |
| Validación | ▲ | ● | ● | ▲ | ● | ● | ▲ | ● | | | | |
| Importancia | 4 | 4 | 2 | 3 | 3 | 2 | 4 | 2 | | | | |
| Prioridad | 7º | 6º | 2º | 8º | 5º | 1º | 4º | 3º | | | | |

Fig. 3: Matriz de validación de la espátula

Sin embargo, de los resultados obtenidos en la matriz de análisis y validación (MAV) (Figura 2), se deduce que la montura flexible es estéticamente poco deportiva para la finalidad de este producto, por sus formas no se consigue que sea aerodinámica y cómoda para un deporte que requiere velocidad. Por todas estas consideraciones se evidencia que se considera necesario un rediseño de este producto.

En el caso de la espátula flexible la gran cantidad de círculos en la parte de la validación de la matriz MAV (Figura 3), indica que el producto tiene puntos a mejorar como es la velocidad de trabajo, el confort o la durabilidad del material.

3.3. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LOS PROTOTIPOS

Los productos de referencia han sido escaneados para crear un modelo virtual con una doble finalidad, evaluar la simi-

litud del escaneado con el producto original una vez impresa la réplica mediante impresión 3D y analizar las réplicas mediante el test de evaluación. Estas réplicas fueron conseguidas por medio de un proceso de escaneado tridimensional y posterior tratamiento de limpieza digital del modelo digital.



Fig. 4: Prototipo flexible de la montura de natación realizado en poliuretano termoplástico

Con estos prototipos se comprobó, mediante el test de evaluación creado, la fiabilidad de ambos materiales con respecto a los resultados obtenidos con el producto original. Al igual que el caso de productos reales, los prototipos fueron comprobados con el apoyo del test de evaluación para obtener los datos necesarios para la matriz MAV de análisis y validación.

3.3.1. Montura flexible

En el caso del prototipo rígido de la montura flexible se produjo un resultado negativo, de rechazo del prototipo como consecuencia de la imposibilidad de evaluación del prototipo en gran parte de los parámetros a analizar. Esto es debido a que el material del prototipo tiene baja fiabilidad porque no se corresponde en propiedades con las del material real, por lo que las condiciones de ergonomía y usabilidad no pueden ser probadas o se produce un rechazo en el usuario.

En cambio, el prototipo flexible puede ser probado y analizado también de forma funcional, por lo tanto, se pudo comprobar la similitud de los resultados con respecto al producto real. Para ello, como se ha comentado, se evalúan tanto el modelo real como el prototipo.

Seguidamente, a partir de estas matrices se confirma la clara similitud entre el prototipo flexible y el producto real utilizado. Sin embargo, se detectan variaciones en los resultados que se deben a las diferencias existentes entre las características técnicas de los materiales empleados. Una de las más destacadas es



Fig. 5: Se muestra, a la izquierda el objeto original, en el centro y derecha los prototipos flexibles, en PLA flexible y poliuretano termoplástico respectivamente

la variación de flexibilidad, que hace que el prototipo no pueda ser probado en el contexto de uso. En síntesis, el prototipo generado no produce el efecto ventosa en la cara necesaria para sumergirse en el agua. Aun así, la adaptabilidad a la cara sí puede ser evaluada.

3.3.2. Espátula de cocina

En el caso de la espátula las réplicas se centraron en la parte de la espátula que es la que se ve afectada por el material flexible. Con estos prototipos se evidencia que tienen una apariencia muy similar al modelo real, por lo que se considera fiable.

El prototipo rígido, realizado en ABS, permite analizar las formas y la estética global del producto. Pero al igual que el anterior caso de estudio, sus diversas funciones no pudieron ser evaluadas y por lo tanto no fueron validadas de una forma fiable.

De forma contraria, con el prototipo flexible esto sí es posible porque la pieza realizada, del cabezal de la espátula, es capaz de adaptarse y flexionarse para comprobar sus funciones. Así, al igual que con el producto original, se llegó a la conclusión de que el cabezal de la espátula cumple correctamente con su función para la que ha sido destinado. Sin embargo, existe un hueco de mejora en el contexto de uso porque no siempre el tamaño del recipiente donde se usa el producto es igual.

Del mismo modo, en las funciones de batido, recogida y arrastre la mano no se coloca de la misma forma; se llega a la conclusión de que el mango junto con el cabezal deben ser flexibles y tener una forma unificada para poder mover la mano con mayor naturalidad.

4. CONCLUSIONES

En productos de características flexibles, donde la flexibilidad juega un papel importante en la usabilidad del producto, antes de ser optimizados o lanzados al

mercado es importante analizar cada una de las piezas con cierto grado de fiabilidad.

Del mismo modo, en estos productos altamente ergonómicos y adaptables es importante probar los diseños de un modo real y de la forma más similar a la realidad posible. También es importante tener en cuenta el material, ya que este tipo de materiales flexibles tiene muchos parámetros que afectan a la calidad final del mismo por su composición química. Es por ello que con ensayos virtuales no es fácil comprobar su funcionalidad sin el apoyo de un modelo físico.

Por todo ello, se considera que la impresión 3D con materiales similares a los reales sirve de apoyo al resto de análisis que se van desarrollando a lo largo del proceso de diseño. En el presente estudio y ante la situación propuesta se plantea que el análisis por medio de la evaluación física es vital para verificar el correcto diseño de un producto o prototipo.

En los casos de estudio realizados se evidencia que el uso de un prototipo o modelo flexible es una forma fiable de validar un concepto. Sin embargo, la limitación del material flexible utilizado da lugar a pequeñas diferencias que llevan a la conclusión de la necesidad de una futura línea de trabajo en la que se busque poder ajustar los parámetros del material de impresión 3D a las características técnicas del material del futuro producto.

REFERENCIAS

- [1] Chulvi-Ramos V. "Medida de la creatividad en productos: métricas y objetividad". *DYNA - Ingeniería e Industria*, Vol. 87(1), 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/4138>
- [2] Wiltschnig S., Christensen B.T., Ball L.J. "Collaborative problem-solution co-evolution in creative design". *Design Studies*, vol. 34(5), 2013, p. 515-542. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.destud.2013.01.002>
- [3] Céret E., Dupuy-Chessa S., Calvary G., et al. "A taxonomy of design methods process models". *Information and Software*

- Technology*, vol. 55(5), 2013, p. 795-821. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.infsof.2012.11.002>
- [4] Tay, F. EH., Gu J., "A methodology for evolutionary product design". *Engineering with Computers*, vol. 19(2-3), 2003, p. 160-173. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00366-003-0261-3>
- [5] Lipson H., Kurman M. "Fabricated: The new world of 3D printing", *John Wiley & Sons*, ed. 1, 2013. ISBN: 978-1118350638
- [6] Gao W., Zhang Y., Ramanujan D., et al. "The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering". *Computer-Aided Design*, vol. 69(12), 2015, p. 65-89. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>
- [7] Elverum C.W., Welo T. "The Role of Early Prototypes in Concept Development: Insights from the Automotive Industry". *Procedia CIRP*, vol. 21, 2014, p. 491-496. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.127>
- [8] Sauer J., Sonderegger A. "The influence of prototype fidelity and aesthetics of design in usability tests: effects on user behaviour, subjective evaluation and emotion". *Applied Ergonomics*, vol. 40(4), 2009, p. 670-677. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apergo.2008.06.006>
- [9] Virzi R.A., Sokolov J.L., Karis D." Usability problem identification using both low-and high-fidelity prototypes". *Proceedings of the SIGCHI Conference*, 1996, p. 236-243. <http://dx.doi.org/10.1145/238386.238516>
- [10] Lopez-Fornies I., Berges-Muro L. "Conceptual product design. Biomimetic Approach for functional improvement". *DYNA*, 87(1), 2012, p. 35-44. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/4138>
- [11] Sauer J., Seibel K., Rüttinger B. "The influence of user expertise and prototype fidelity in usability tests". *Applied Ergonomics*, vol. 41(1), 2010, p. 130-140. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apergo.2009.06.003>
- [12] Ahmed H., Chateaufneuf A. "Optimal number of tests to achieve and validate product reliability". *Reliability Engineering Syst.Saf.*, vol. 131, 2014, p. 242-250. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2014.04.014>

Mejora de un sistema de climatización con células Peltier a partir de la colmena de abejas: una aproximación teórica

■■■■
 Javier Bermejo-Busto, César Martín-Gómez,
 Amaia Zuazua-Ros, María Ibáñez-Puy, Rafael
 Miranda-Ferreiro y Enrique Baquero-Martín
 Universidad de Navarra (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7865>

1. INTRODUCCIÓN

Las instalaciones en arquitectura han sido a menudo planteadas como infraestructuras centralizadas. Aunque algunos edificios de mayor envergadura son divididos en áreas menores, es bastante común encontrar edificios con una única infraestructura para la generación de calor y/o frío, electricidad, etc. Una de las principales razones para tomar esta decisión es limitar las necesidades de mantenimiento de estas instalaciones.

Buscando inspiración para acometer el diseño de las instalaciones de una forma alternativa y novedosa, la naturaleza puede ser una fuente de ideas. El biomimetismo traslada e implementa estas ideas en un variado número de campos: sensores, robótica, materiales, textil, superficies antirreflectantes, etc. [1] También pueden ser aplicadas en la arquitectura y sus instalaciones.

Algunos animales regulan su temperatura, humedad y metabolismo de una forma muy similar al ser humano: un sistema respiratorio central (pulmones y corazón), alimentación para producir energía, un sistema neuronal central, etc. Estos animales son homeotermos ya que mantienen su temperatura constante. También son endotermos pues necesitan de recursos como la comida o el oxígeno para mantener dicha temperatura.

Los edificios actuales funcionan de una manera similar cuando son diseñados con infraestructuras centrales que permiten mantener una temperatura constante. Igualmente, hacen uso de grandes recursos para mantener una temperatura y calidad de aire habitables (gasóleo, gas natural, electricidad, etc.).

Por otra parte, algunos animales sociales no trabajan como una gran máquina. Necesitan cooperar entre numerosos especímenes para sobrevivir y mantener una temperatura específica en sus nidos. En el caso de los insectos, crean grandes colonias y comparten tareas para mantener la temperatura interior dentro de límites habitables. Son comúnmente conocidos como animales de 'sangre fría'. Además, son ectotermos ya que regulan su temperatura dependiendo de las condiciones del entorno.

2. OBJETIVOS

La aproximación del proyecto inicial, y que constituye la base para este documento, es que las instalaciones también pueden trabajar como los animales sociales, esto es, como un conjunto de máquinas más pequeñas para espacios y necesidades menores. Inicialmente, puede suponer una mayor necesidad de mantenimiento y una mayor inversión cuando el edificio es construido, pero también significa una mayor optimización de los recursos y mejor eficiencia energética ya que los espacios vacíos no necesitarían ser climatizados.

Este tipo de instalaciones con menores requisitos, generalmente funcionan de manera descentralizada. Las unidades de climatización (entendido climatización como las siglas HVAC definidas por la *American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers* 'ASHRAE') que son instaladas en fachada ya han sido desarrolladas. Puesto que la normativa de edificación obliga a renovar el aire, especialmente en oficinas y edificios públicos, y los equipos necesitan su propia refrigeración, la instalación de rejillas en fachada es prácticamente inevitable. Por tanto, un sistema integrado en fachada es más apropiado ya que puede tomar el aire limpio del exterior o disipar su calor sin necesitar conductos adicionales.

Una opción de instalación autónoma, es un sistema de climatización basado en

células Peltier integrado en fachada. Puede trabajar sin conexión a la red si es conectado a paneles fotovoltaicos. Además, elimina la necesidad de múltiples unidades al producir calor y frío con una misma unidad [2].

Gracias a la experiencia adquirida por los investigadores de este documento con un primer prototipo basado en células Peltier, un segundo prototipo se encuentra en construcción. La inclusión de paneles fotovoltaicos y baterías ya ha sido planteada en este prototipo. Esto permitiría tener una instalación desconectada de la red y completamente autónoma para suministrar energía térmica.

Los investigadores están preparando un tercer prototipo que será más ligero, con mejores propiedades acústicas y parámetros de seguridad contra incendios así como una estandarización constructiva entre otros criterios. El uso de células Peltier en este prototipo ha sido innovador. Debido a esta característica, no se han encontrado experiencias similares, lo que supone un gran problema ante la imposibilidad de comparar la evolución de la solución propuesta. Por ello, para diseñar el tercer prototipo, eran necesarias soluciones alternativas. Pero ¿dónde encontrarlas?

Teniendo en cuenta estas consideraciones, surge una pregunta: ¿qué pasaría si buscamos inspiración en la naturaleza? Un proyecto de investigación financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España [3] se desarrolló con este fin. Uno de los objetivos es dar respuesta a las anteriores preguntas y unir las células Peltier con el comportamiento de las abejas. Sin embargo, esta no es una relación directa ni evidente. Ha requerido de un desarrollo intelectual durante varios meses y la colaboración de investigadores de distintas áreas como la Arquitectura y Biología.

3. ANTECEDENTES ARQUITECTÓNICOS

3.1. ENVOLVENTES ACTIVAS

Durante las últimas décadas el uso de fachadas opacas ventiladas como una solución para las envolventes de edificios residenciales ha aumentado considerablemente. Una fachada opaca ventilada es generalmente definida por una capa exte-

rior compuesta de un revestimiento ligero, y una capa opaca interior que actúa como aislamiento térmico y acústico. Entre ambas capas hay una cámara de aire, drenada y siempre ventilada (sin control). El aire no es transferido nunca de la cámara de aire al interior del edificio.

Aunque es una solución muy común, la fachada ventilada no es siempre la mejor opción, pues su rendimiento energético puede variar dependiendo de las características climáticas y su orientación. Es por ello que su aplicación debe ser estudiada previamente a su instalación. Las Figuras 1 y 2 muestran el comportamiento térmico de la fachada dependiendo de las condiciones térmicas exteriores.

Teniendo en cuenta las ventajas y desventajas de la cámara de aire ventilada, la propuesta se centra en controlar esta ventilación. Así, para evitar las pérdidas de calor en invierno se propone cerrar la cámara (sin ventilación) para facilitar el almacenamiento de calor en la cámara

y, por tanto, reducir las pérdidas de calor. Sin embargo, durante el verano, la cámara se abrirá facilitando la disipación de calor.

Esto es posible con el uso de envolventes activas. Este concepto de la bioingeniería ha sido definido por Loonen *et al.* [4] como sigue: "son envolventes casi 'autosuficientes' que muestran un comportamiento dinámico e incorporan diferentes tecnologías (unidades climatizadoras descentralizadas, intercambiadores de calor, suministro de energía, almacenamiento de energía, equipamiento de iluminación, equipos protección frente al sol cámaras ventiladas...) cuyo fin es reducir la demanda de energía de los edificios por un lado y convertir energía de fuentes renovables por otro".

Con el fin de afianzar estas propuestas, los fabricantes de módulos de fachada tecnológicos han comenzado a desarrollar sistemas modulares multifuncionales. Todos ellos incorporan diferentes estrate-

gias para intentar mejorar el rendimiento energético de la fachada: control de ganancias y pérdidas térmicas, almacenamiento térmico, integración de sistemas de climatización, integración con recursos renovables, etc.

3.2. CONTROL DE EQUIPOS DE CLIMATIZACIÓN

Los sistemas descentralizados para la producción de energía en edificios son poco comunes. La mayoría son instalados en fachadas, pero dependen de tuberías que transporten el agua caliente o fría desde otra unidad central. Por tanto, se podría decir que no son autónomos ya que dependen de otra instalación para funcionar correctamente (el lazo secundario según la definición de ASHRAE).

El sistema de climatización basado en células Peltier propuesto y previamente desarrollado por los autores de este documento, puede trabajar autónomamente si es conectado a paneles fotovoltaicos

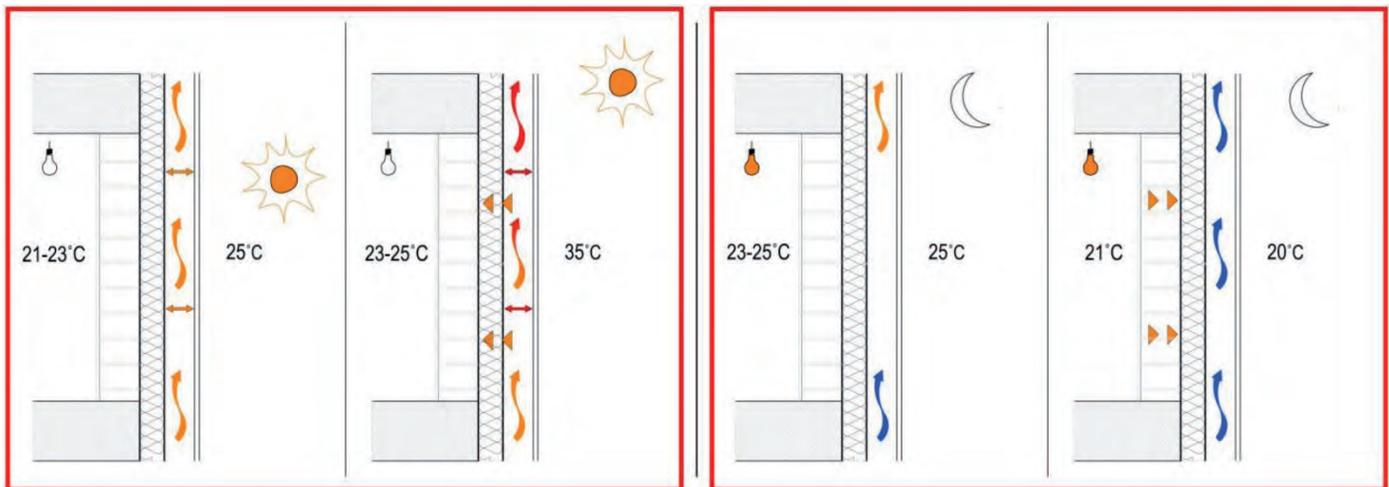


Fig. 1: Comportamiento térmico de una fachada opaca ventilada en verano con dos temperaturas exteriores diferentes. Imagen izquierda: durante el día. Imagen derecha: durante la noche. Disipación de calor. Si la temperatura interior es mayor que la exterior, tiene lugar un flujo calorífico hacia el exterior. Cuando las temperaturas son similares, las capas de la fachada, debido a sus propiedades aislantes, pueden evitar dicho flujo

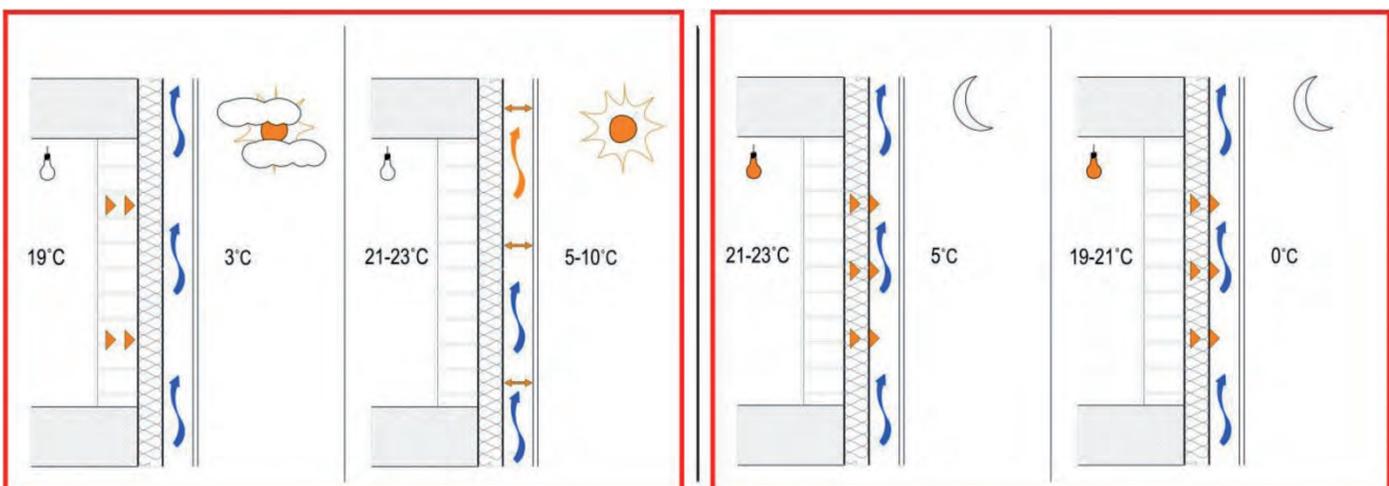


Fig. 2: Comportamiento térmico de una fachada opaca ventilada en invierno. Imagen izquierda: durante el día. Los días nublados, las pérdidas de calor aumentan. Cuanto mayor es la diferencia entre la temperatura interior y exterior, mayor es el flujo de calor entre las capas de forman la fachada. Los días soleados, se crea un colchón. / Imagen derecha: durante la noche. Las pérdidas de calor aumentan

que suministren electricidad. Estos paneles fotovoltaicos podrían ser integrados en la misma solución. Esto significa que el equipo al completo podría ser instalado como un módulo prefabricado de fachada. No necesitaría ninguna otra conexión a la red ya que el suministro eléctrico estaría asegurado con los paneles fotovoltaicos y el grupo de baterías. Este desarrollo supondría un gran paso para lograr soluciones altamente resilientes y sistemas de producción energética más eficientes.

Los edificios autónomos pueden llevar a una sociedad más eficiente. Pero uno de los factores más importantes para lograr un edificio autónomo es cómo se gestiona con un sistema de control inteligente. La eficiencia global y el ahorro energético conseguido dependerán de su correcta aplicación así como de su correcta calibración.



Fig. 3: Enfriamiento evaporativo (imagen izquierda): Las abejas genera una corriente de aire y reparten gotas de agua para reducir la temperatura interior. 'Heat shield' (imagen central): permite a las abejas 'cazar' el calor y así evitar que llegue a la zona de cría. Calefacción (imagen derecha): las abejas contraen el abdomen y los músculos torácicos para producir calor para las larvas cercanas.

Teniendo en cuenta el gran consumo de los equipos de climatización, los sistemas de control de gestión de la energía pueden ayudar a mejorar la eficiencia energética de dichos sistemas de climatización y mantener unas condiciones térmicas correctas. Los sistemas de control más comunes usados para reducir el consumo eléctrico son programados de acuerdo a numerosos modos (arranque/paro, ciclo de trabajo, reseteo de carga, limitación de la demanda eléctrica, control adaptable, optimización de enfriamiento, optimización de caldera, origen energético óptimo, etc.) procesando un gran rango de información heterogénea: sensores básicos para los parámetros de cada lugar (temperatura del aire, radiación, humedad relativa, velocidad del aire) y medidas del sistema (calor, frío), información visual o estimación para la actividad humana y el aislamiento de la ropa, información exterior, humedad relativa, actividad solar, viento (velocidad y dirección), etc. [5].

Uno de los principales problemas al diseñar un sistema de climatización es su control. El problema es aún mayor en edi-

ficios complejos donde el control depende de una unidad centralizada que recibe los datos de todas las habitaciones. Algunos de los problemas que existen son:

- Optimización de climatización: Formulación multiobjetivo (bienestar térmico, eficiencia energética, rentabilidad económica); Optimización con enteros mixtos / no lineal [5].
- Estructura tecnológica cambiante en función de los lugares o los recursos energéticos (convencional, solar, bombas térmicas, cogeneración) [5].

Algunos protocolos y tecnologías empleadas en edificios actuales necesitan de un ordenador central que recoja todos los datos de sensores y unidades y los procese (ADAM o NuDAM). La necesidad de un control centralizado hace que el sistema no sea tan autónomo.

Otros protocolos y tecnologías como KNX, X10 o LonWorks no dependen de una unidad central y reciben y envían toda la información desde los sensores y actuadores. Generalmente trabajan con un cable BUS o tecnología inalámbrica como Bluetooth, ZigBee y otros estándares 802.11 creando estructuras en árbol que no dependen de un ordenador centralizado. Aunque un ordenador, pantalla táctil o dispositivo móvil son necesarios para controlar y hacer cambios en la instalación, no es imprescindible tener una unidad central. Por tanto, nunca habrá problemas centralizados.

Así pues ¿sería posible desarrollar un sistema de climatización autónomo desconectado de la red, pero también independiente de un cerebro central?

En este contexto, el conocimiento del biomimetismo, y más específicamente de las abejas, puede ser útil para mejorar los sistemas de climatización autónomos existentes. Los insectos sociales como las hormigas, termitas y algunas especies de pájaros, distribuyen sus tareas automáticamente. Dejan señales como peque-

ñas marcas de comida o feromonas que permiten a otros especímenes actuar en consecuencia. Hacen estas tareas automáticas para conseguir una temperatura constante en el nido, mejorar ciertas características aerodinámicas o, simplemente, crear un camino de vuelta a casa. Es decir, trabajan individualmente para lograr un objetivo global.

4. ANTECEDENTES BIOLÓGICOS

4.1. COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LAS ABEJAS

Continuando con lo que ha sido previamente expuesto, las abejas, y más concretamente la *Apis mellifera*, pueden regular la temperatura y otros factores como la concentración de gases dentro de la colmena. Esto es muy importante para la supervivencia de la colonia ya que la zona de cría necesita mantener una temperatura de entre 33 y 36°C [6].

Las abejas tienen hasta tres estrategias para regular la temperatura de la colmena tal y como se ve en la Figura 3. Dos estrategias son empleadas cuando la temperatura exterior es mayor que la interior. La restante, es utilizada cuando la temperatura exterior es menor que la interior.

El material que compone la colmena está principalmente formado por cera de abejas, propóleos y secreciones salivares, que dotan de aislamiento a la colmena ayudando a regular su temperatura. Además, algunas colmenas son construidas en agujeros de árboles, lo que permite tener un aislamiento aún mayor.

En la primera estrategia, algunos especímenes reparten gotas de agua y crean una corriente de aire a la entrada de la colmena, produciendo un enfriamiento evaporativo y renovando el aire y gases del interior. La segunda estrategia conocida como 'heat shield' permite que algunas abejas se posicionen entre la zona de cría y la pared de la colmena para absorber el calor que entra en la colmena y almacenarlo en sus cuerpos. Cuando no pueden absorber más calor, vuelan fuera de la colmena y lo liberan en el aire. Esta estrategia es similar a una fachada con dos capas: la primera capa es la pared exterior de la colmena, mientras que la segunda son las abejas evitando que el calor entre en la colmena.

La tercera estrategia se refiere a la protección de las larvas. Contrayendo sus abdómenes y músculos torácicos, las abejas pueden producir calor que es transferido a las larvas más cercanas. Aunque esta estrategia sólo puede ser usada en lugares

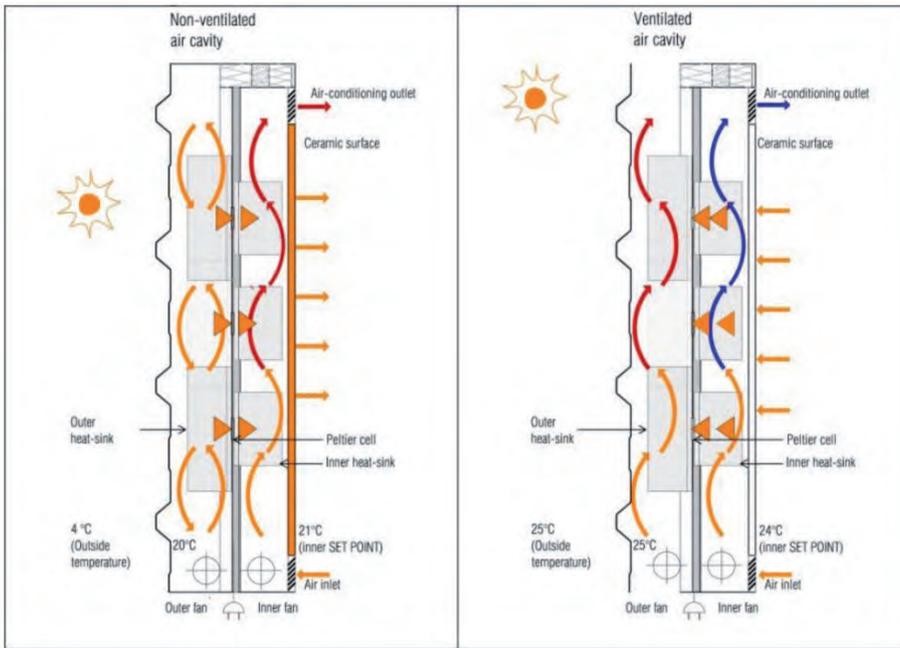


Fig. 4: Sistema termoeléctrico Peltier y comportamiento de la cámara. Imagen izquierda: configuración de invierno: Sistema de climatización Peltier en modo calefacción con la cámara de aire de la fachada cerrada para favorecer la acumulación de calor. Imagen derecha: configuración de verano: Sistema de climatización en modo refrigeración con la cámara de aire abierta, favoreciendo la disipación de calor hacia el exterior

puntuales por cada abeja, la gran cantidad de individuos que forman la colonia (hasta 5000 adultos) la hace una estrategia apropiada para contribuir a mantener la temperatura de la colmena.

4.2. ESTIGMERGIA

La palabra *estigmergia* fue definida por Pierre P. Grassé en 1959 como sigue: "La estimulación de los trabajadores por parte de las mismas actuaciones que han logrado es reseñable pues induce una respuesta adaptable y precisa, y se ha denominado *estigmergia*. La *estigmergia* explica claramente la correlación entre las áreas logradas y no requiere de mayor explicación dentro de un plan dado" [7].

Un brillante ejemplo de *estigmergia* en la naturaleza son las hormigas o termitas que cooperan para mantener la temperatura o la concentración de gases en sus nidos. Poseen una gran organización de conductos que permiten renovar el aire y tener el correcto y deseado nivel de gases.

La *estigmergia* se ha desarrollado y es aplicada en numerosos campos: arquitectura, gestión de edificios, robótica, economía o incluso atascos de tráfico. Actualmente es un concepto usado en la inteligencia artificial y es la base de algoritmos denominados '*Ant Colony Optimization*' [8]. El uso de la *estigmergia* en sistemas de control de climatización ya ha sido propuesto. Podemos encontrar ejemplos en el trabajo de Congradac *et al.* [9] o en la creación de un Sistema híbrido

inteligente propuesto para dicho control con la integración de '*Multiagent System*', '*Dynamic Ontology*' y '*Ant Colony Optimization*'. De hecho, resultados de simulaciones de sistemas de climatización simplificados demuestran cuantitativamente el efecto de hibridación.

'*Ant Colony Optimization*' es un acercamiento ingenieril para el diseño y la implementación de sistemas de software para la solución de difíciles problemas de optimización. La *estigmergia* describe la comunicación indirecta y la coordinación dentro de un campo a través del intercambio asíncrono de información entre agentes. Los principales requisitos son: compartir información de los costes y el grado de cumplimiento de objetivos para distintas alternativas; compartir información sobre la agrupación de bienes preferible para encontrar un recurso compartido.

5. MEJORAS DEL PROTOTIPO EXISTENTE

5.1. MEJORA 1: LA COLMENA DE ABEJAS O LAS ENVOLVENTES ACTIVAS

La solución de envolventes activas es muy similar a la actitud de las abejas colocándose entre los espacios intersticiales de la colmena durante la estrategia '*heat shield*'. Se podría decir que las abejas pueden 'controlar' la fachada posicionándose cerca de la pared exterior o volando de-

pendiendo de la transmisión de calor en la colmena.

Dentro de este contexto, y con el concepto del biomimetismo como fondo para los investigadores, un proyecto llamado "Desarrollo constructivo y análisis de un módulo de fachada activa con células Peltier" ha sido desarrollado. Se busca diseñar un prototipo modular a escala industrial para fachada activa con el nuevo sistema termoeléctrico Peltier.

El principio de este nuevo sistema de climatización es la transferencia de calor. Como visión global del proceso, durante períodos cálidos, el sistema termoeléctrico Peltier extrae el exceso de calor de la habitación a la cámara de aire. Por otro lado, en períodos fríos, tiene lugar el proceso inverso.

Por otro lado, se espera que el diseño pasivo de la fachada activa mejore la eficiencia del sistema termoeléctrico porque uno de los principales retos en el diseño y funcionamiento de células Peltier es el uso de corrientes de aire que colaboren en la disipación del calor extraído. Por tanto, en invierno la cámara es calentada por la radiación solar y capturada (cámara de aire cerrada), mientras que en verano puede ser efectiva extrayendo el exceso de calor (cámara de aire abierta) extraído del interior de la habitación como se representa en la Figura 4.

5.2. MEJORA 2: ESTRATEGIAS DE LA ESTIGMERGIA O UN CONTROL DE LA CLIMATIZACIÓN SIN ORDENADOR CENTRAL

Teniendo en cuenta las oportunidades de evolución propuestas por los estudios basados en la *estigmergia*, el grupo de investigadores plantea el concepto de 'interacción con el vecino'. Esto supone que el control del sistema de climatización es independiente para cada local, sin un control centralizado, aunque recibiendo las señales comunes de bienestar interior y los diferentes factores exteriores incorporando, además, las señales recibidas de los equipos instalados en habitaciones adyacentes. El funcionamiento del sistema se explica esquemáticamente en la Figura 5.

Por ejemplo, si la habitación contigua empieza a aumentar su temperatura, mandará una señal a sus vecinos para que enciendan un status de alerta. Hasta ese momento, estarían apagados, consiguiendo un importante ahorro y un rápido inicio cuando sea necesario. Si el módulo de fachada detiene la ventilación porque la concentración de CO₂ lo permite, la correspondiente señal será enviada a los vecinos. Si un módulo detecta un incendio,

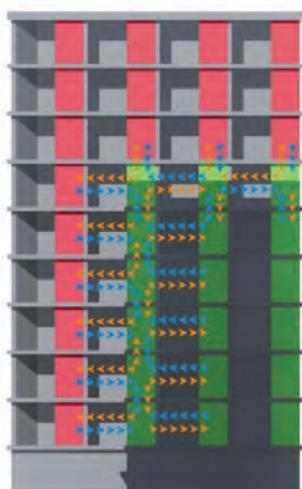


Fig. 5: La imagen representa la configuración de los módulos en primavera u otoño, cuando una calefacción continua no es necesaria. Los módulos rojos están apagados, pues la radiación solar es suficiente para calentar dichas viviendas. Los módulos verdes están encendidos ya que están en sombra (producida por un edificio cercano por ejemplo) y necesitan generar calor. Las flechas azules y naranjas representan la información intercambiada entre los módulos: temperatura y humedad interior, concentración de gases, presencia de humo, etc.

los vecinos recibirán dicha señal para, por ejemplo, cerrar los conductos comunes de ventilación que pudieran plantearse.

6. CONCLUSIÓN

Dentro del contexto planteado para mejorar el prototipo, es importante resaltar que no existe una solución ideal. Para resolver el problema, el diseño, costes de ejecución y mantenimiento llevarán a elegir qué tipo de instalación realizar.

Teniendo en cuenta que las condiciones exteriores están en continuo cambio en el tiempo y espacio, es necesaria una variación en el diseño de las envolventes. La envolvente es generalmente diseñada como un elemento estático, teniendo en cuenta sólo las peores condiciones, por lo que el rendimiento energético nunca está optimizado.

En cuanto a la evolución de los sistemas de control, hay tres paradigmas mayores: estrategia evolutiva, programación evolucionada y algoritmos genéticos [10], por lo que un amplio rango de estrategias del biomimetismo podrían ser aplicadas para mejorar el rendimiento energético de las envolventes: ganancias solares, control de pérdidas térmicas, almacenamiento de energía térmica y la integración de sistemas de climatización del edificio o con fuentes de energías renovables. Esta es la razón por la que considerar que las envolventes activas y adaptables podrían ser

la solución para cumplir los actuales retos energéticos.

Sin embargo, el acercamiento de los investigadores nace de la arquitectura y la biología, profundizando en el proceso de diseño intelectual para diseñar el funcionamiento del nuevo sistema, y dejando su desarrollo a ingenieros informáticos.

Las propuestas presentadas implican un rediseño evolutivo de los dos prototipos construidos, con la confianza de que los futuros diseños impliquen una confirmación empírica de los conceptos propuestos. Estas propuestas nunca habrían sido realizadas sin los conceptos de biomimetismo y estigmergia.

Las conclusiones tienen un doble acercamiento, referidas al acondicionamiento de edificios con células Peltier y al campo biológico. Primero, sobre el desarrollo del sistema de climatización Peltier:

- Las células Peltier suponen una alternativa para conseguir sistemas de climatización realmente autónomos.
- Se propone una estrategia de control adaptable para regular el funcionamiento del sistema de climatización durante las horas ocupadas. Dicha estrategia es fácilmente aplicable para controlar la regulación de la temperatura.
- Se propone una estrategia de encendido, complementando las acciones de control tradicional, que depende de la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior, la temperatura inicial del edificio, la temperatura del aire impulsado, la masa térmica del edificio, etc., con el conocimiento del comportamiento de las unidades de climatización vecinas.

Finalmente, sobre biología:

- El uso del conocimiento del biomimetismo para desarrollar conceptos en arquitectura e ingeniería. Este proyecto confirma el uso del biomimetismo como iniciador para encontrar acercamientos alternativos.

Aunque los biólogos tenían un gran y valioso conocimiento muy útil para muchos campos de trabajo como la arquitectura o la ingeniería, no eran conscientes de ello. Tras numerosas conversaciones, se percataron de las oportunidades que la biología podría ofrecer en cuanto al ahorro y la eficiencia energética. Estos resultados respaldan cómo los investigadores del proyecto Peltier han podido mejorar el diseño de un sistema de climatización no común con el uso de estrategias provenientes del biomimetismo en la ar-

quitectura gracias a la colaboración con biólogos.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España bajo el proyecto de investigación BIA2013-49838-EXP.

PARA SABER MÁS

- [1] J.M. Benyus, Biomimicry. Innovation inspired by nature, Harper Collins, 1997.
- [2] C. Martín-Gómez, M. Ibanez-Puy, J. Bermejo-Busto, J.A. Sacristan Fernandez, J.C. Ramos, A. Rivas, Thermoelectric cooling heating unit prototype, Build. Serv. Eng. Res. Technol. (2015) 1–19. doi: <http://dx.doi.org/10.1177/0143624415615533>.
- [3] C. Martín-Gómez, J. Bermejo-Busto, A. Zuazua-Ros, R. Miranda, E. Baquero, Redesign of the integration of building energy from metabolisms of animals: the RiMA project, in: Proc. CISBAT 2015 Int. Conf. Futur. Build. Dist. - Sustain. from Nano to Urban Scale - Vol. II, Lausanne, 2015; pp. 699–704. doi: <http://dx.doi.org/10.5075/epfl-cisbat2015-699-704>.
- [4] R.C.G.M. Loonen, M. Trčka, D. Cóstola, J.L.M. Hensen, Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges, Renew. Sustain. Energy Rev. 25 (2013) 483–493. doi: [10.1016/j.rser.2013.04.016](https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.016).
- [5] M. Hadjiski, V. Sgurev, V. Boishina, HVAC control via hybrid intelligent systems, Cybern. Inf. Technol. 7 (2007) 77–94.
- [6] A. Stabentheiner, H. Kovac, R. Brodschneider, Honeybee colony thermoregulation-regulatory mechanisms and contribution of individuals in dependence on age, location and thermal stress., PLoS One. 5 (2010) e8967. doi: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0008967>.
- [7] P.P. Grassé, La reconstruction du nid et les coordinations interindividuelles chez *Bellicositermes natalensis* et *Cubitermes* sp. la théorie de la stigmergie: Essai d'interprétation du comportement des termites constructeurs, Insectes Soc. 6 (1959) 41–80. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02223791>.
- [8] S. Shaukat, R.A. Bhatti, K.I. Qureshi, S.A. Shad, Ant Colony Optimization: A Review and Comparison, Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol. 8 (2014) 435–438.
- [9] V. Congradac, F. Kulic, HVAC system optimization with CO2 concentration control using genetic algorithms, Energy Build. 41 (2009) 571–577. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.12.004>.
- [10] K.F. Fong, V.I. Hanby, T.T. Chow, HVAC system optimization for energy management by evolutionary programming, Energy Build. 38 (2006) 220–231. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.05.008>.

Estado del arte sobre dispositivos activos y pasivos de control de flujo para turbinas eólicas

Iñigo Aramendia-Iradi, Unai Fernandez-Gamiz, Javier Sancho-Saiz y Ekaitz Zulueta-Guerrero
Universidad del País Vasco (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7807>

1. INTRODUCCIÓN

Hay muchas razones por las que cada vez se trabaja más en el desarrollo de fuentes alternativas de energía para la generación de electricidad. Algunas de ellas son la seguridad energética tras accidentes recientes como el de la planta nuclear de Fukushima en Japón, o el aumento de la demanda energética a través de economías emergentes como China, Brasil o India. Por otra parte, existe también una mayor concienciación en la sociedad sobre los efectos negativos que generan las fuentes tradicionales para el medio ambiente. En este punto, el desarrollo y la optimización de los sistemas de generación de energía renovable (eólica, termosolar, biomasa, etc.) son fundamentales para poder competir a nivel de producción y rentabilidad frente a las fuentes tradicionales.

De acuerdo con la AEE (*Asociación Empresarial Eólica*), la capacidad de energía eólica instalada en España ha crecido exponencialmente en la última década, generando en 2013 una cantidad estimada de 54.478 GWh. Suficiente para abastecer a 15,5 millones de hogares (90% del total). Sin embargo, aunque el coste de la energía eólica ha descendido en esta última década, se requiere de una alta inversión inicial tecnológica, por lo que es necesario mejorar su ciclo de vida y su eficiencia para ser económicamente competitiva en términos de rentabilidad frente a las fuentes tradicionales u otras alternativas renovables.

2. OBJETIVOS DE MEJORA EN LAS TURBINAS EÓLICAS

La mejora de los aerogeneradores presenta 3 puntos clave:

1. Establecer límites superiores y limi-

tar el par y la potencia experimentada por el tren de transmisión, principalmente el eje de baja velocidad.

2. Minimizar la fatiga del rotor y otros componentes estructurales provocados por los cambios de dirección del viento, velocidad y turbulencias, así como los ciclos de funcionamiento variables del aerogenerador.
3. Maximizar la producción de energía.

Dentro de este último punto entra el concepto del coste de la energía (COE). Hay 3 variables independientes para calcular este valor tal y como se puede ver en la Ec. (1):

$$COE = \frac{\text{Energía obtenida en su ciclo de vida}}{\text{Costes Fijos} + \text{Coste O \& M}} \quad (1)$$

El objetivo de la estrategia de control depende de la región de operación de la turbina, la cual se determina con la velocidad del viento.

La curva se divide en 4 regiones tal y como se puede apreciar en la Fig. 1. En la región 1 la velocidad del viento es demasiado baja para generar energía. La región 2, que comprende entre la velocidad de corte (v_{cut-in}) y la velocidad nominal (v_{rated}), el generador trabaja por debajo de la potencia nominal (*rated power*). En la región 3, la salida de energía está limitada por la turbina. Esto sucede cuando la inten-

sidad del viento es suficiente para la turbina para alcanzar esta salida nominal de energía. La región 4 corresponde a vientos más fuertes, donde la potencia del viento es tan grande que puede generar daños y desperfectos en la turbina.

3. CLASIFICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE CONTROL DE FLUJO

Wood [1] desarrolló un esquema de 4 etapas, que permite clasificar los diferentes conceptos que forman parte de cada uno de los numerosos dispositivos de control del flujo.

1ª Etapa

Según la técnica empleada:

1. Dispositivo geométrico (G): Modifica la geometría y la forma del perfil y con ello el paso del flujo a través de él.
2. Dispositivo fluidico (F): Modifica el paso del flujo a través del perfil introduciendo o sustrayendo aire del flujo exterior.

2ª Etapa

Según la localización del dispositivo:

- Cerca del borde de ataque (*Leading edge*)
- Cerca del borde de salida (*Trailing edge*)
- En la mitad de la cuerda (*Mid-chord*)

3ª Etapa

Según como ajusta el dispositivo la curva de sustentación. Los dispositivos

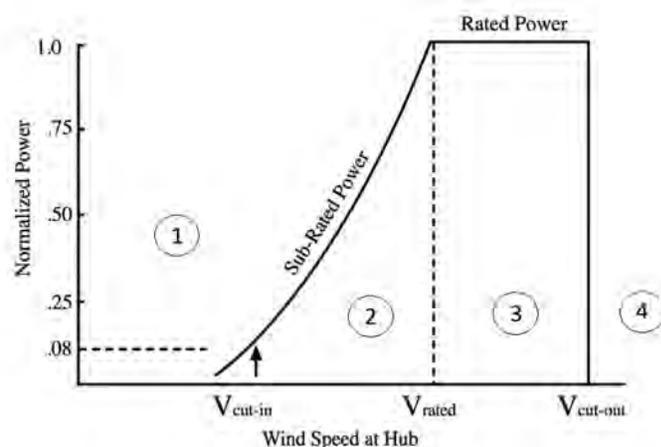


Fig. 1: Relación entre la velocidad del viento y la potencia

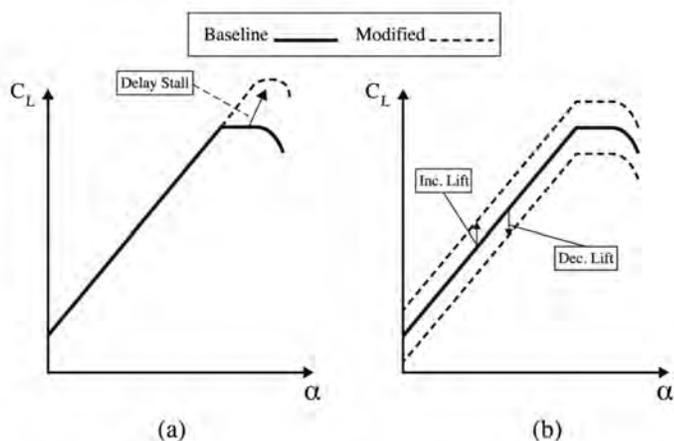


Fig. 2: Variación del coeficiente de sustentación (C_L) en función del ángulo de ataque (α)

de control de flujo modifican la curva de sustentación de un perfil de 2 formas (Ver Figura 2).

1. Desplazando la curva hacia arriba (aumentando la sustentación) o hacia abajo (reduciendo la sustentación).
2. Extendiendo la curva de sustentación hasta la entrada en pérdida (stall) a un mayor ángulo de ataque (α).

En una primera observación a la figura anterior, retrasar la entrada en pérdida (*stall*) solo incrementa la sustentación a altos ángulos de ataque. Es por ello que dispositivos basados en este concepto no son considerados una opción para la reducción de cargas y esfuerzos. Sin embargo, una idea presentada por Corten [2] supone una alternativa para emplear dispositivos basados en el retraso de la entrada en pérdida (dispositivos DS) y reducir cargas.

Sabemos que la fuerza de sustentación (F_L) sigue la Ec. (2):

$$F_L = C_{L_{\max}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \quad (2)$$

Donde (ρ) es la densidad del aire, (A) es el área del perfil y (v) la velocidad del

fluido sobre el perfil.

La idea de Corten es rediseñar el álabo de tal forma que la fuerza de sustentación sea igual con un dispositivo DS o sin dicho dispositivo DS. La densidad y la velocidad del aire sobre las palas serían iguales en las mismas condiciones. Añadiendo un dispositivo DS, como por ejemplo un *Vortex Generator* (VG), conseguimos aumentar el $C_{L_{\max}}$, por lo que en ese caso para conseguir una misma fuerza de sustentación podemos disminuir el área del álabo, o lo que es lo mismo, su cuerda.

Sin dispositivo DS

$$F_L = C_{L_{\max}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 = C_{L_{\max}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (c \cdot b) \cdot v^2 \quad (3)$$

Con dispositivo DS

$$F_L = C_{L_{\max}} \uparrow \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \downarrow \cdot v^2 = C_{L_{\max}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (c \downarrow \cdot b) \cdot v^2 \quad (4)$$

Donde (c) y (b) son la longitud y el ancho del perfil aerodinámico, respectivamente.

4ª Etapa

Según el dispositivo trabaje en condiciones estables o inestables (es decir,

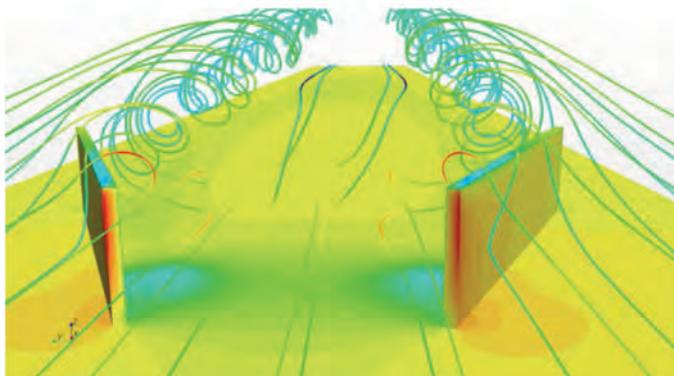


Fig. 3: Líneas de corriente sobre una placa plana con *Vortex Generators* (Fernández-Gámiz [4])

un dispositivo cuya posición varía con el tiempo según se requiera).

4. TIPOS DE DISPOSITIVOS

Según el funcionamiento del dispositivo se pueden clasificar en pasivos y activos. A lo largo de este artículo se van a describir algunos de estos sistemas dentro de cada categoría.

1. Control pasivo
 - a. *Vortex Generators*
 - b. *Microtabs*
 - c. *Serrated trailing edges*
 - d. *Fences*
 - e. *Spoilers*

2. Control activo

- a. *Trailing-edge flaps*
- b. *Synthetic jets*
- c. *Air Jet Vortex Generators*

Los controles pasivos mejoran el rendimiento de la turbina y/o reducen las cargas sin gasto de energía externa mientras que los controles activos requieren energía externa. Johnson et al. [3] realizaron un pequeño análisis y clasificación de 15 diferentes dispositivos de control de flujo para la mejora aerodinámica de los aerogeneradores y su reducción de cargas de fatiga.

4.1. SISTEMAS DE CONTROL PASIVOS

4.1.1. Vortex Generators

Un *Vortex Generator* (VG) es un sistema de control de flujo pasivo cuyo principal objetivo es retrasar el desprendimiento de la capa límite y aumentar el coeficiente de sustentación máximo $C_{L_{\max}}$. Los VGs consisten estructuralmente en unas simples plaquitas, generalmente de forma rectangular o triangular, instaladas lo más cerca posible del borde de ataque, y de una altura similar al espesor de la capa límite.

Con la implantación de VGs, se produce una transferencia de energía del fluido exterior (mayor velocidad) a la región de la capa límite, consiguiendo de esta forma su objetivo principal: retrasar el desprendimiento de la capa límite.

Los VGs son posicionados generalmente de forma oblicua y en parejas a lo ancho del perfil (*spanwise*) proporcionando de esta forma un ángulo de ataque (α) respecto al flujo de aire local. Dentro del trabajo de Fernández-Gámiz [4] se aprecia la disposición de una pareja de VGs sobre una placa plana y el comportamiento de las líneas de corriente generadas por los mismos. (Ver Figura 3).

Para estudiar el impacto de los VGs en perfiles aerodinámicos, su óptima colocación y distribución se emplean herramientas computacionales fluido-dinámicas (CFD), lo cual puede conllevar mayores tiempos de proceso y problemas computacionales. Por este motivo se han buscado modelos simplificados, como el modelo BAY, desarrollado por Bender et al. [5].

En el estudio realizado por Fernández-Gámiz et al. [6], se realizó una comparación detallada de un VG sobre una placa plana con 4 diferentes modelos. Un primer modelo basado en el método tradicional mallando el VG, un segundo modelo a partir de la teoría de Bender et al. mencionada anteriormente, un tercer modelo experimental (Velte et al. [7]) basado en datos experimentales en túnel de viento y un cuarto modelo analítico. En la misma línea, Zamorano G. et al [8] analizaron la evolución de la estela aguas abajo de un generador de vórtices rectangular a diferentes ángulos de incidencia. Fernández-Gámiz et al. [9] también compararon las simulaciones CFD con las observaciones experimentales y analizaron cómo pueden las simulaciones reproducir las características físicas del flujo.

Estos dispositivos presentan una serie de ventajas importantes, tales como su pequeño tamaño, lo cual permite colocar un gran número de ellos a lo largo del perfil, la facilidad de reemplazarlos sin gran coste y la posibilidad de añadirlos una vez construido el perfil aerodinámico. Por otra parte, el principal inconveniente es el aumento del coeficiente de arrastre (C_D) que conlleva la implantación de este dispositivo, una característica no deseada.

4.1.2. Microtabs

Las *microtabs* consisten en una pequeña lengüeta que emerge del ala aproximadamente perpendicular a su superficie en las inmediaciones de la cola del perfil. Una serie de estas *microtabs* dispuestas a lo ancho del perfil generan un cambio en



Fig. 5: Pala de una turbina eólica con el dispositivo Serrated trailing edge

la sustentación al desplazar el punto de separación del flujo. El aumento de sustentación se consigue desplegando las lengüetas en la superficie de presión (inferior) y el decrecimiento de sustentación es conseguido desplegando las lengüetas en la superficie de succión (superior). (Ver Fig. 4). Su altura suele ser del orden del espesor de la capa límite (1%-2% de la cuerda del perfil).

Van Dam [11] ha realizado numerosos estudios al respecto, incluyendo análisis computacionales fluido-dinámicos (CFD) y pruebas en túnel de viento, determinando su óptima configuración y comprobando el desempeño de este sistema.

Presentan algunas ventajas interesantes para su aplicación en turbinas eólicas:

1. Pequeño tamaño.
2. Poca energía necesaria para su activación y uso.
3. Pueden ser fabricados en gran número (bajo coste).
4. Pueden ser implementados sin grandes cambios con las técnicas actuales empleadas para la fabricación de los perfiles aerodinámicos.

4.1.3. Serrated Trailing Edge

Originalmente, en las superficies aerodinámicas de las palas de una turbina eólica convergen los flujos de la zona de presión y de la zona de succión, lo cual es una fuente de ruido aerodinámico, pérdida de

sustentación y aumento del coeficiente de arrastre; efectos negativos que reducen la eficiencia del sistema.

Como alternativa para solucionar esta problemática, Siemens [12] patentó un dispositivo consistente en una placa con forma de dientes de sierra que es colocada a lo largo de la pala, comenzando desde el borde de ataque. (Ver Fig. 5).

Al ser un añadido al perfil aerodinámico, presenta la ventaja de poder crear una geometría del dispositivo personalizada para cada perfil, según las condiciones de funcionamiento en las que se encuentre.

4.1.4. Fences

En las palas de las turbinas eólicas también se propagan flujos de aire a través de la longitud transversal de la pala. Dichos flujos disminuyen el rendimiento de la pala, particularmente porque contribuyen a la separación del flujo principal de aire de la superficie de la pala, y por tanto afectando negativamente a la sustentación.

Una "fence" consiste en una pequeña placa en el sentido de la cuerda de la pala que actúa como obstáculo para la propagación de estos flujos transversales [13]. El grado en que la fence es capaz de prevenir estos flujos es directamente proporcional a la altura de la misma. Sin embargo, a mayor altura mayor es el peso, además de afectar a otras características

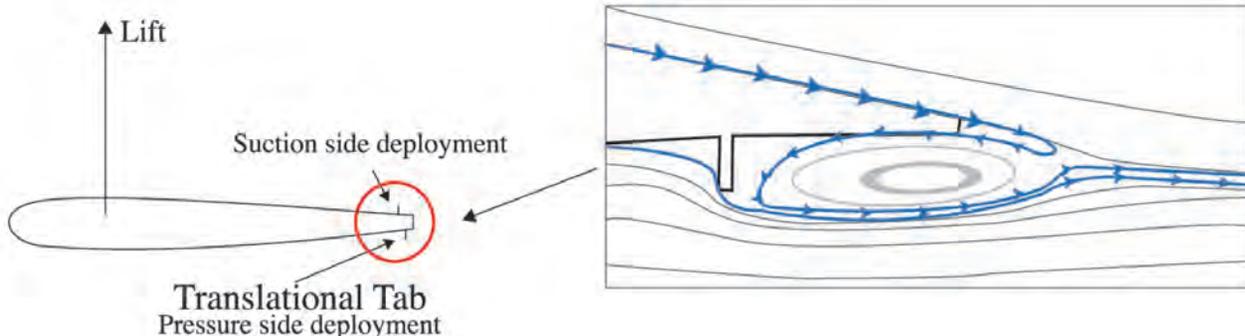


Fig. 4: Concepto de micro tab y líneas de corriente producidas en el borde de salida con el micro tab desplegado en la superficie inferior (Chow and Van Dam) [10]

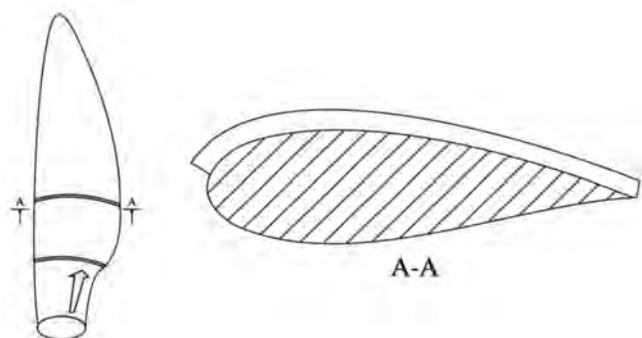


Fig. 6: Pala de una turbina eólica con una fence instalada e imagen de su sección A-A [13]

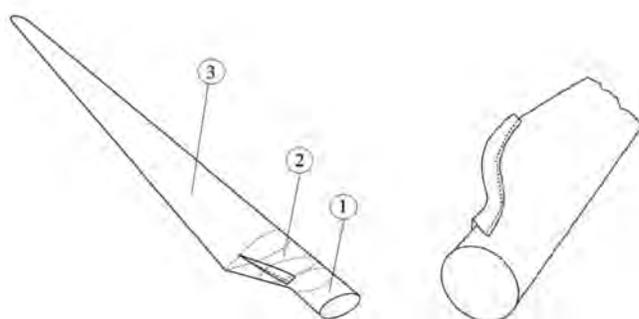


Fig. 7: Pala de una turbina eólica con un dispositivo "spoiler" [15]

aerodinámicas de la pala, como la sustentación.

Chow et al [14] realizaron un estudio de la altura de una *fence* con una pala NREL 5-MW de 63 metros de largo. En él se observó que la altura óptima en la posición de cuerda máxima, situada a 13,7m de la base de la pala, parece ser la correspondiente al 2.0% de la C_{max} , donde el incremento de potencia es 0.67% y el del empuje del 0.34%. En cuanto a la posición se concluyó que la efectividad de la *fence* claramente disminuye a medida que la alejamos de la posición de cuerda máxima.

4.1.5. Spoilers

Con el paso del tiempo, la construcción de palas ha evolucionado a una forma consistente en una región de raíz con sección circular, más cerca del eje,

una región con un perfil aerodinámico que genera la sustentación necesaria para generar energía, y la región de transición entre estas dos partes. La sección de raíz no contribuye a la producción de energía, incluso la disminuye un poco por el arrastre. Como se intuye por su nombre, la región de transición tiene una forma gradualmente cambiante desde la sección circular hasta el perfil aerodinámico, incrementando su anchura linealmente.

Estas secciones de las turbinas eólicas suelen operar en situaciones de

pérdidas, especialmente con altas velocidades de viento. Por eso son convenientes unos mecanismos, como los "spoilers" [15], para incrementar la sustentación en estas condiciones (y no para frenar) y para conseguir aumentar la potencia generada por la turbina.

Este dispositivo presenta un inconveniente principal para su aplicación en turbinas eólicas frente a la aeronáutica: el hecho de que las palas deben trabajar con unos ángulos de incidencia mucho más amplios.

4.2. SISTEMAS DE CONTROL ACTIVOS

4.2.1. Traditional Trailing-Edge Flaps

Su concepto se basa en el incremento (despliegue en la zona de presión) o decrecimiento (despliegue en la zona de

succión) de la curva del perfil aerodinámico. Los *Trailing edge flaps* generan un cambio sustancial en el coeficiente de sustentación del perfil.

Pueden ser empleados de dos maneras:

1. *Discrete flaps*: Se aplica energía externa en forma de momento para conseguir la posición requerida.
2. *Flexible flaps*: Su forma más suavizada entre el dispositivo y el perfil aerodinámico incrementa su eficacia.

Pese a ser una tecnología bastante empleada y desarrollada en el sector aeronáutico, con buenos resultados, su aplicación en turbinas eólicas presenta algunos inconvenientes, como son el tamaño y el peso que puede alcanzar el dispositivo, los actuadores mecánicos para desplegarlo y el ruido aeroacústico que conllevan.

4.2.2. Air Jet Vortex Generators

Los *Air Jet Vortex Generators* fueron inicialmente propuestos por Wallis et al. [16]. Consisten en emplear chorros circulares de aire sobre una superficie (perfil aerodinámico) para producir una velocidad persistente con el objetivo de retrasar la separación de la capa límite.

Se observó que introduciendo este chorro de aire (con una cierta inclinación y cabeceo) a la corriente de aire natural que recorre la superficie, se producían vórtices en el sentido de la corriente. Estos vórtices permanecen dentro de la capa límite del perfil atrayendo aire exterior, produciendo así una transferencia de energía que consigue retrasar el desprendimiento de la capa límite, incrementando el coeficiente de sustentación máximo $C_{L_{máx}}$ y el ángulo de ataque de entrada en pérdida (α_{stall}).

En cuanto a su aplicación en turbinas eólicas, este dispositivo presenta muchas características que lo hacen interesante. Una de las más importantes es el amplio margen de control sobre el dispositivo, lo cual permite modificar los parámetros de generación de vórtices según sean las necesidades.

Sin embargo este dispositivo también presenta inconvenientes, como el requerimiento de líneas de aire comprimido.

4.2.3. Synthetic Jets

Este tipo de dispositivo de control del flujo activo genera vórtices en el sentido de la corriente similares a los genera-

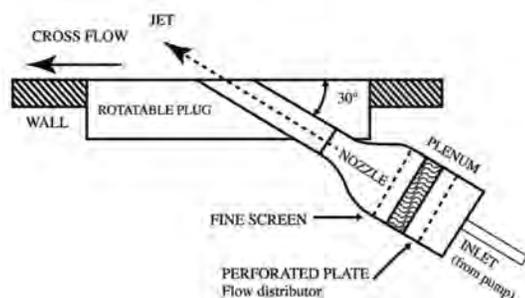


Fig. 8. Sistema de Air Jet Vortex Generators



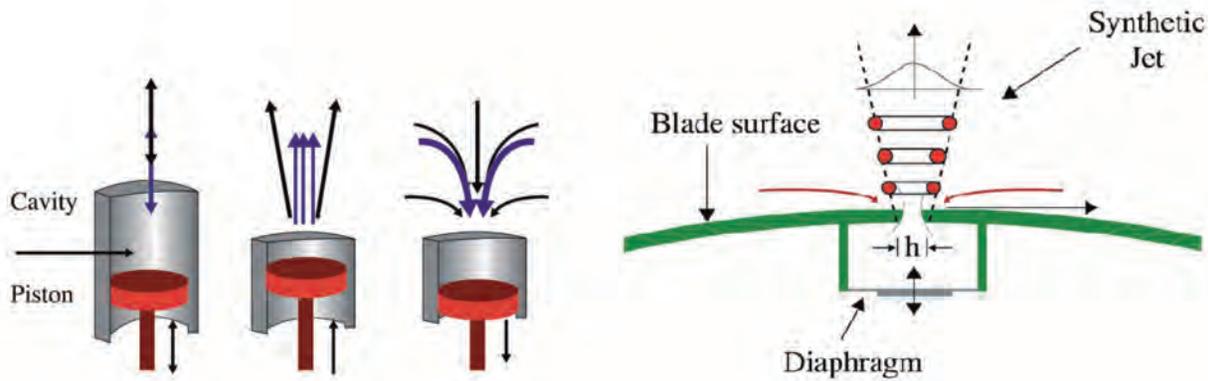


Fig. 9. Esquema de funcionamiento de los Synthetic Jets

dos por los *Pulsed Vortex Generator Jets* (PVJG). La diferencia principal es que es un dispositivo con un flujo neto de masa nulo, es decir, el vórtice es generado por la alternancia de eyección y succión de fluido a través de un orificio es creado por completo con aire que está siendo controlado, por lo que no son necesarias conducciones de aire.

Los chorros son comúnmente generados mediante el uso de un diafragma oscilante que se encuentra incrustado en una cavidad con la superficie aerodinámica. Estos dispositivos se encuentran localizados en un 10%-20% de la cuerda del perfil aerodinámico y pueden ser instalados en cualquier ángulo respecto a la superficie aerodinámica.

Su aplicación en turbinas eólicas presenta a priori ventajas como su localización (10%-20% de la cuerda del perfil) que facilitaría su instalación y la poca energía externa necesaria para su activación. Por otro lado la presencia de cavidades puede generar ruido y disminución de rendimiento cuando el dispositivo está inactivo.

5. CONCLUSIONES

El sector eólico está creciendo con gran rapidez y muestra signos de que seguirá siendo así en los siguientes años. El crecimiento de esta industria supone un incremento en el tamaño de las turbinas eólicas, lo cual conlleva un aumento en las cargas que tiene que soportar el sistema. Esto también puede provocar mayores costes de mantenimiento y operación para mantener el ciclo de vida de la estructura.

Los dispositivos activos y pasivos del control de flujo se presentan como una solución a estos problemas. Son de un tamaño discreto, de peso ligero y pueden contrarrestar las cargas por los vientos turbulentos. Las mejoras de estos dispositivos pueden mejorar el ciclo de vida

de las turbinas eólicas, la producción de energía, el rendimiento del sistema y reducir el COE (Coste de la energía).

PARA SABER MÁS

- [1] Wood R.M. "A Discussion of Aerodynamic Control Effectors (ACEs) for Unmanned Air Vehicles (UAVs)" In: *AIAA's 1st Technical Conference and Workshop on Unmanned Aerospace Vehicle Systems, Technologies and Operations*. Portsmouth Virginia 20-23, May 2002. P. 2002-3495. DOI: <http://dx.doi.org/10.2514/6.2002-3494>
- [2] Corten G.P. "Vortex Blades". In *Proceedings of WindPower Conference*. Los Angeles, United States. June 4, 2007.
- [3] Van Dam C.P, Berg D.E, Johnson S.J. "Active Load Control Techniques for Wind Turbines". August 2008. United States. DOI: <http://dx.doi.org/10.2172/943932>
- [4] Fernández-Gámiz U. "Fluid Dynamic Characterization of Vortex Generators and Two-dimensional Turbulent Wakes". Director: Egusquiza E. Universidad Politécnica de Catalunya, Departamento de Mecánica de Fluidos, 2013.
- [5] Bender E.E, Anderson B.H, Yagle P.J. "Vortex Generator Modeling for Navier-Stokes Codes," American Soc.of Mechanical Engineers Paper FEDSM99-6929, New York, July 1999.
- [6] Fernández-Gámiz U, Réthoré P.E, Sørensen N.N, et al. "Comparison of four different models of vortex generators". In: *Proceedings of EWEA 2012 - European Wind Energy Conference & Exhibition*. European Wind Energy Association (EWEA).
- [7] Velte C.M, Okulov V, Hansen M.O.L. "Alteration of helical vortex core without change in flow topology" In: *Physics of Fluids*, 2011, Vol. 23, No. 5, p. 051707. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3592800>
- [8] Zamorano-Rey G, Garro B, Fernandez-Gamiz U, et al. (2015). "A computational study of the variation of the incidence angle in a vortex generator". *DYNA New Technologies*. Vol. 2 p.1-13. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT7357>
- [9] Fernández-Gámiz U, Velte C.M, Réthoré P.E, et al. Testing of self-similarity and helical symmetry in vortex generator flow simulations. In: *Wind Energy*. John Wiley & Sons, Vol.18, United States, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/we.1882>
- [10] Chow R, Van Dam, C.P. "Unsteady Computational Investigations of Deploying Load Control Microtabs". *Journal of Aircraft*, Sept-Oct 2006, Vol. 43, No. 5, p.1458-1469. DOI: <http://dx.doi.org/10.2514/1.22562>
- [11] Yen, D.T., Van Dam C.P., Bräuchle, F, et al. "Active Load Control and Lift Enhancement Using MEM Translational Tabs," In: *Proceedings of the Fluids Conference and Exhibit*, AIAA Paper 2000-2422. June 2000. United States. DOI: 10.2514/6.2000-2242
- [12] Stiesdal H, Enevoldsen P.B. *Flexible serrated trailing edge for wind turbine rotor blade*. Siemens. European Patent Office, EP 1 314 885 B1. 2003-05-28.
- [13] Quell P, Petsche M. *Rotor blade for a wind power station*. United States Patent No. 7,585,157 B2. 2009-11-08.
- [14] Chow R, Van Dam C.P. "Inboard Stall and Separation Mitigation Techniques on Wind Turbine Rotors". In: *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. United States, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.2514/6.2011-152>
- [15] Lenz K, Fuglsang P. *Wind turbine having a spoiler with effective separation of airflow*. European Patent Office, EP 2 141 358 A1. 2008-12-12.
- [16] Wallis R. A. "A preliminary Note on a Modified Type of Air Jet for Boundary Layer Control". Aeronautical Research Council, Australia, Current Paper CP 513, 1960.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Dr. Unai Fernández Gámiz, del Departamento de Ingeniería Nuclear y Mecánica de Fluidos de la Universidad del País Vasco de Vitoria-Gasteiz, por su disponibilidad para compartir bibliografía, tiempo y conocimiento sobre todo el área que comprende esta publicación. Este trabajo ha sido respaldado por el Gobierno Vasco y la Universidad del País Vasco UPV-EHU a través de SAIOITEK (S-PE11UN112) y los programas de investigación EHU12/26, respectivamente. Se agradece también el apoyo humano y técnico recibido por IZO-SGI, SGiker (UPV-EHU, MICINN, GV/EJ, ERDF and ESF).

Revisión tecnológica, normativa y aplicaciones de los vehículos aéreos no tripulados en la ingeniería (1ª parte)

Jose Maria Cabrera Peña¹, Lidia Esther Trejo Medina², Ricardo Aguasca Colomo², Blas Galvan Gonzalez²

¹ Universidad de Las Palmas de G.C. Dpto. Ingeniería Electrónica (España)

² CEANI - IUSIANI (ULPGC) Universidad de Las Palmas de G.C. (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8741>

1. INTRODUCCIÓN

Dado el uso cada vez más extenso de los drones en el área civil, se ha considerado importante dar a conocer el potencial de estos vehículos aéreos dentro del mundo de la ingeniería. Para conocer las utilidades de los VANT (*vehículo aéreo no tripulado*), o RPAS por sus siglas en inglés para aplicaciones civiles (*Remotely Piloted Aircraft System*), o UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) en la terminología utilizada en el campo militar, es necesario remontarse a la historia y ver hoy en día cuales son las aplicaciones en el área civil. Es importante destacar el esfuerzo de numerosas universidades en investigación y desarrollo en esta área, abarcando diversas líneas de actuación, entre las que destacan:

- Diseño estructural y aerodinámico
- Sistemas de control de navegación y seguridad
- Integración y compatibilidad de equipos y sensores
- Fuentes de energía
- Protocolos de actuación en diferentes escenarios.

1.1. ANTECEDENTES EN LA HISTORIA DE LOS VANT

Los antecedentes de la historia de los actuales VANT [1] se remontan a la propia historia de la aviación y más concretamente a la del aeromodelismo, que

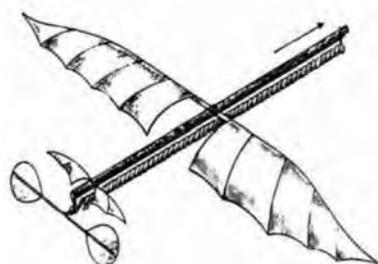


Figura 1: Diseño del "Planophore" de Alphonse Pénaud

aunque según la RAE (*Real Academia Española*) su significado es el de "*Deporte que consiste en la construcción y prueba de pequeños modelos de aviones*", tiene una parte científica en la que se encuentra el estudio de la aerodinámica junto al diseño, proyecto y construcción de aeromodelos o vehículos aéreos a escala que puedan volar con cierta autonomía, y que han servido para probar y construir las aeronaves que han existido durante toda la historia de la aviación civil y militar.

Uno de los primeros predecesores de los aeromodelos conocidos se remonta a la Italia dominada por los griegos del siglo IV a.C., donde **Arquitas de Tarento**, matemático y filósofo amigo de **Platón**, al que se le atribuyen la invención del tornillo y la polea, construye un curioso juguete de madera, hueco y con forma de paloma que pendía de una cuerda del techo y tenía un depósito de agua que era calentada por un pequeña llama que hacía hervir el agua. El vapor que se producía se escapaba por unos pequeños orificios en la parte trasera del pájaro, simulando el vuelo de la paloma.

Sin embargo, no es hasta finales del siglo XIX cuando en 1871, cuando **Alphonse Pénaud**, considerado el pionero de la aviación y "padre del aeromodelismo", logra hacer volar un aeromodelo diseñado y construido por él mismo y que llamaría "*Planophore*". Este aeromodelo tenía forma de aeroplano a escala y era propulsado por un sistema de bandas de goma retorcidas que hacían girar una hélice tractora de tiras de caucho retorcidas y equipado con dos alas y una cola estabilizadora, tal y como aparece en la Fig.1. El "*Planophore*" con una envergadura de 45 centímetros y un peso de unos 15 gramos, realizó el primer vuelo el 18 de agosto de 1871 en los jardines de Tullerías en París, Francia, logrando recorrer más de 40 metros en 12 segundos. Una versión moderna de estos prototipos de aeromodelismo "puro" continúa aún hoy en día a través del diseño de aeromodelos ultraligeros para la modalidad de "*slow fly*", cuyo objetivo es, con el mínimo peso, mantener en vuelo el mayor tiempo posible al prototipo.

A la figura de **Alphonse Pénaud** le siguieron otros investigadores que siguie-

ron experimentando con nuevos modelos, como fueron:

- **Víctor Tatín** en 1879, iniciador de los motores de aire comprimido, los cuales mediante un trabajo mecánico por expansión de aire lograban hacer girar las palas de los rotores, y que serían muy utilizados años más tarde.
- El ingeniero inglés **Lawrence Hargrave**, profesor de Ingeniería Aero-náutica de la Universidad de Sydney, Australia, quien en 1885 hizo volar unos 95 metros un modelo de "*alas batientes*", que consistía en unas alas rígidas y unas paletas batientes impulsadas por un motor de aire comprimido, iniciador de posteriores modelos de ornitópteros.

Los primeros intentos serios de crear VANT o UAV, denominación extendida en el campo militar, tal y como hoy los conocemos, comienzan durante el desarrollo de la I Guerra Mundial, entre los años 1914 y 1918, siendo los más destacados los siguientes [2]:

- **1916:** A finales de este año se construye en Reino Unido por el capitán **A.H Low** el "*Aerial Target*", un vehículo aéreo no tripulado controlado por radio desde tierra que pretendía servir como blanco aéreo de entrenamiento y como defensa contra los *Zeppelins*.
- **1917:** En este año se desarrolla el conocido como "*Torpedo Aéreo Kettering (Kettering Bug)*" por **Charles F. Kettering** de la *General Motors*, con los controles de los hermanos **Sperry**.

Finalizada la I Guerra Mundial y tras una década de recuperación llegaron nuevos avances en el campo de los UAV de la mano de Reino Unido y EEUU:

- **1933:** Es en este año cuando se logra con éxito que un vehículo aéreo no tripulado dirigido por control remoto utilizado como "*blanco aéreo*", pueda ser reutilizable y retornable. Se trata de un aeromodelo desarrollado a partir del biplano conocido como "*Fairey Queen*" y que se reci-

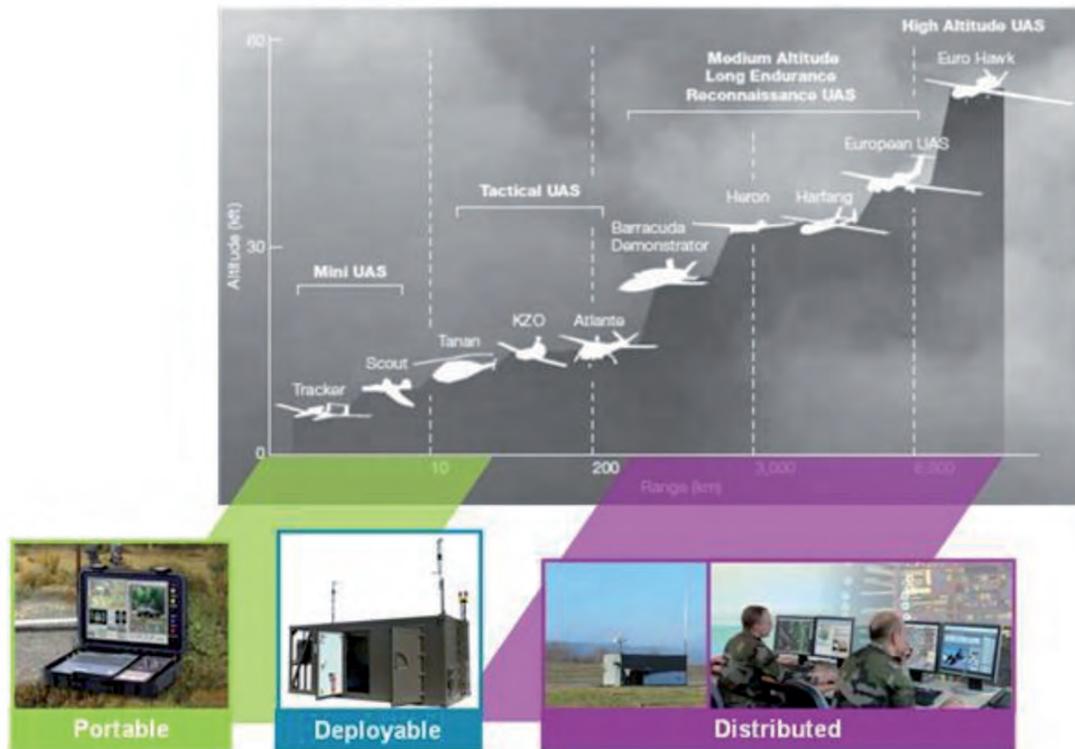


Figura 2: Tipologías en estaciones de tierra. Airbus Defence&Space. (Fuente: congreso UNVEX14)

biría el nombre de "DH82B Queen Bee". Sobre este modelo, el "Queen Bee" o "Abeja Reina", se dice que de algún modo fue el que dio lugar a la expresión "Drone" para los vehículos aéreos no tripulados.

- **1937:** En este año EEUU consigue remodelar unos biplanos Curtiss N2C-2 de tamaño real y los convierte en vehículos aéreos no tripulados de la serie "A" conocidos como "drones de ataque". Este aeroplano estaba dotado de un tren de aterrizaje tipo triciclo y se podía controlar desde tierra o desde otra aeronave.
- **Finales de la década de 1930:** A finales de esta década se logra desarrollar el primer "drone" producido en serie a gran escala en los EEUU, con el nombre de "Radioplane OQ-2" de 3,7 metros de envergadura y que sirvió como blanco volante para la formación de pilotos de combate y cuya recuperación se realizaba mediante paracaídas. Posteriormente durante el desarrollo de la II Guerra Mundial, se desarrollaron en USA los proyectos TDN-1 y TDR-1 concebidos como drones de ataque. El GM A-1 sucesor del Torpedo Ketterin Bug se produjo entre los años 41 a 43. Finalmente se utilizaron fortalezas volante radio controladas, denominadas BQ-7 (a partir del B-17) y BQ-8 (del B-24); que, básicamente, eran bombas volantes lanzadas desde tierra y radio controladas.

Después de la segunda guerra mundial:

- **1951:** Estados Unidos desarrolló en serie una producción de los llamados "AQM-34", un avión-blanco modificado para ser usado como aeromodelo de reconocimiento que se lanzaba desde un avión nodriza para realizar vuelos por unas rutas preprogramadas. Tras cumplir su misión y finalizada la ruta descendía en paracaídas siendo recuperado para su reutilización.
- **En los Años 80** el desarrollo de los UAV, en especial, los empleados en labores de vigilancia y reconocimiento se estancan a favor del uso de los satélites.
- **1994:** Primer vuelo de un UAV operativo modelo "Predator" de la compañía General Atomics equipado con el sistema de posicionamiento global GPS en lugar de estar pre-programado o de usar la línea de visión, por lo que lo hace mucho más fiable.
- **1998** Sobre esta fecha la compañía Northrop-Grumman desarrolla el UAV "RQ-4 Global Hawk", con capacidad de alcanzar gran altitud y con un largo alcance, diseñado para permanecer en el aire mucho tiempo sobre un territorio enemigo.

A lo largo de la historia se han acuñado los términos que tienen hoy en día una validez y aplicación internacional y casi única en todos los ámbitos. Estos términos son [3]:

- Aeronave pilotada remotamente (*Remotely-Piloted Aircraft, RPA*): una aeronave en la que el piloto al mando no está a bordo.
- Sistema de aeronave pilotada remotamente (*Remotely-Piloted Aircraft System, RPAS*): un conjunto de elementos configurables formado por un RPA, su estación de pilotaje remoto asociada (RPS, *Remote Pilot Station*), el sistema requerido de enlace de mando y control y cualquier otro elemento requerido en cualquier punto durante la operación del vuelo.

El resto de los acrónimos se corresponden con:

- UMA = Unmanned Aircraft
- APV = Automatically Piloted Vehicle
- UTA = Unmanned Tactical Aircraft
- UCAV = Unmanned Combat Air Vehicle;
- ROA = Remotely Operated Aircraft.
- UAV = Unmanned Aerial Vehicle
- UAS = Unmanned Aerial System

2. EL SISTEMA DE CONTROL DE MISIONES DE UN RPA

2.1. DESCRIPCIÓN DE UAV Y UAS

Significan "Unmanned Aerial Vehicle" y "Unmanned Aerial System", respectivamente. La primera se refiere exclusivamente a la plataforma de vuelo, mientras que la segunda al sistema completo, es decir, incluyendo no sólo el segmento aéreo sino también el enlace de comunica-

ciones y la estación de tierra en el caso de comunicaciones sin línea de visión. Por lo tanto, ambas apelaciones son correctas, dependiendo de si nos referimos a una parte o al conjunto del sistema [4], [5], [6], [7], [8].

El término "Unmanned" puede traducirse como "no tripulado", por lo que un UAV (o UAS) es cualquier aeronave (o sistema) en que el piloto no esté físicamente a bordo.

2.2. ELEMENTOS QUE COMPONEN UN UAV

Un UAV es un sistema que incorpora una serie de elementos, que operando de

forma conjunta, lo convierten en una plataforma de gran capacidad funcional.

Los elementos clave de una plataforma UAV son:

- El fuselaje, batería y motor del UAV dependiendo de la clase.
- El sistema de guiado automático o "Flight Control System" (FCS).
- Unidad Inercial IMU y magnetómetro.
- Sistema de posicionamiento GPS.
- El sistema de control del "payload".
- Plataformas de observación fijas o ventrales giro-estabilizadas.
- Sistemas sensor requeridos para mediciones atmosféricas y medioambientales.

- Sistemas de transmisión / recepción de datos.

2.3. ESTACIONES TERRENAS

Las estaciones de control de UAV actuales pueden ser terrestres (GCS, *Ground Control Station*), marítimas (SCS, *Ship Control Station*) o aéreas (ACS, *Airbone Control Station*).

Dentro de las terrestres y dependiendo del tipo de UAV que se quiera manejar, se tienen distintos tipos de estaciones (Ver Fig. 2. Tipologías en estaciones de tierra. UNVEX14. *Airbus Defence&Space*):

- Las portátiles para tipo micro y mini UAS que se encuentran dentro de la clase 0, que llegan hasta los 10 km de alcance.
- Las desplegables para las plataformas tácticas, clase 1, que abarcan desde 10 a 200 km.
- Y para los sistemas más grandes de clase 2 y 3 en los que los sistemas de tierra están distribuidos y se pueden controlar en modo BVLOS (*Beyond visual Line of Sight*).

2.3.1. Elementos de Estaciones de Control Terrenas

La GCS (*Ground Control Station*) es la interfaz hombre-máquina con el *Vehículo Aéreo No Tripulado* (VANT) del sistema (Fig. 3). De esta manera, los operadores pueden enviar órdenes a la aeronave a través del sistema de comunicaciones de



Figura 3: Estación de control terrestre del UAV K50 de la compañía USOL. (Fuente: congreso UNVEX14)

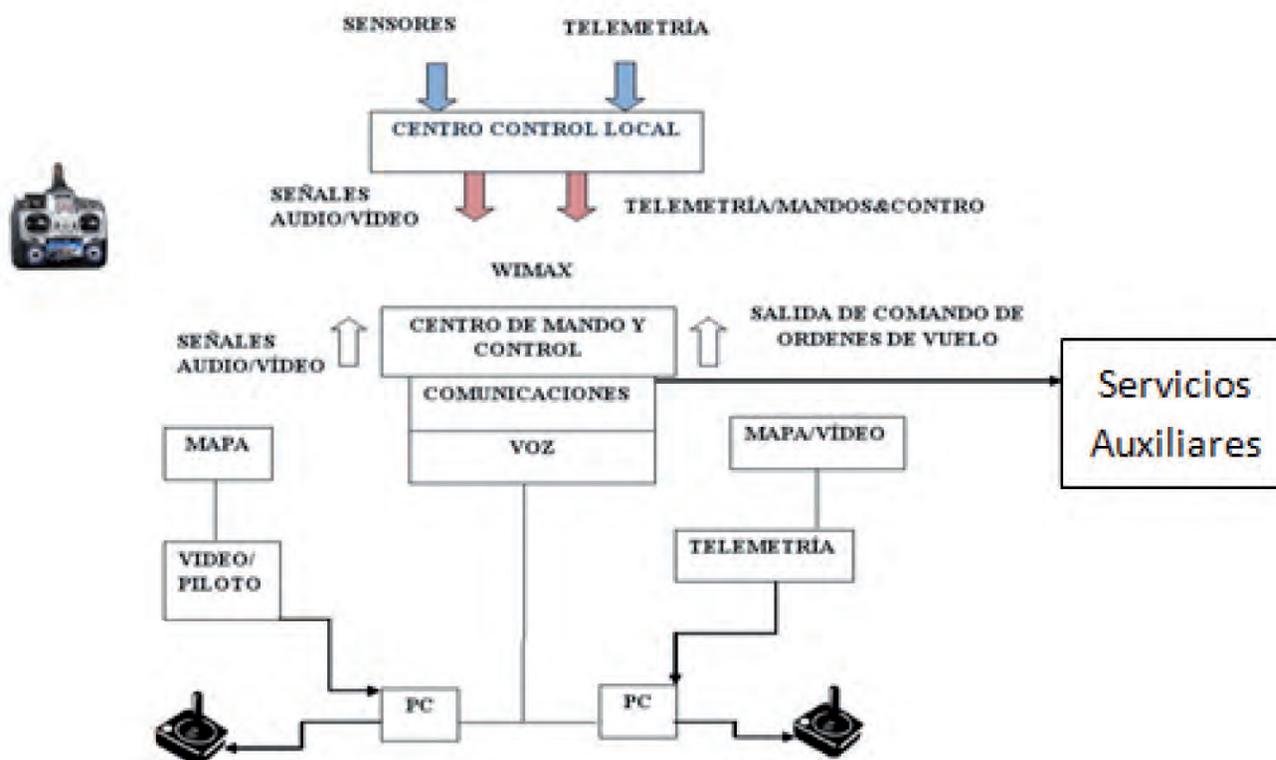


Figura 4: Esquema simplificado de CMC

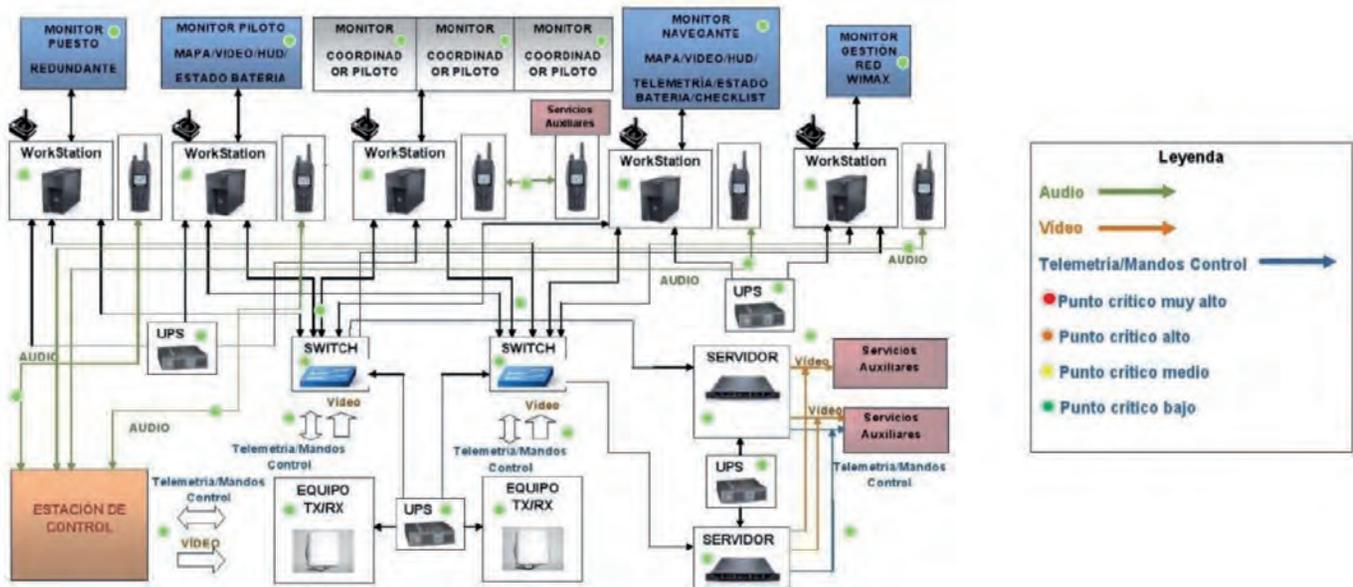


Figura 5: Esquema de la estación terrestre CMC remota mejorado con análisis de Fiabilidad

enlace ascendente con el fin de establecer el perfil de vuelo o para controlar el *payload* (carga útil) de la aeronave.

El avión devolverá información e imágenes a los operadores a través de las comunicaciones de enlace descendente, ya sea en tiempo real o bajo comandos. La información suele incluir datos de las cargas útiles, información sobre la situación de los sub-sistemas de la aeronave, la altitud y velocidad, e información de la posición.

El lanzamiento y la recuperación de la aeronave pueden ser controlados desde el

Centro de Control Local (CCL) *Visual Line of Sight* (VLOS), o desde el centro de mando y control (CMC) vía WIMAX o satélite *Beyond Visual Line of Sight* (BVLOS).

El CCL contendrá un determinado tipo de subsistemas, requeridos para lograr su funcionamiento general. Esto dependerá del alcance y tipo de misiones previstas y las características de los UAV que operará. En general, los subsistemas serán los siguientes:

- **Subsistema de control de vuelo de UAV:** El control de vuelo puede ser realizado de manera automáti-

ca o en tiempo real de manera manual. Para el primer caso, es posible encontrar comandos para realizar hover, flotar sobre un punto seleccionado (utilizado en multicópteros), ascender a una determinada altitud, etc. En todos los casos será conveniente la muestra de los datos gráficamente a través de una GUI (*Graphic User Interface* o Interfaz Gráfica de Usuario).

- **Subsistema de payload:** Reconoce y ajusta el payload instalado en el UAV, además de controlarlo. Inclu-



Figura 6: Interoperabilidad. Centro de mando y control. Airbus. (Fuente congreso UNVEX14)

ye también *displays* para visualizar los datos recibidos y el estado de los equipos instalados.

2.3.2. GCS de mini-UAV

Las GCS de aeronaves mini-UAV suelen ser de tipo "man-portable" con un sistema de comunicaciones y una antena embarcados en un maletín. Como ejemplo comercial, encontramos la GCS de *Thales*, *Expace* y *UAV-Tools*, las cuales incorporan una interfaz gráfica de usuario (GUI) y cuenta con un ordenador portátil con pantalla táctil, permitiendo a los operadores introducir con facilidad *waypoints* en un mapa.

La información básica mostrada puede integrar la imagen de una cámara, que iría en la posición del piloto, o ventral, la telemetría GPS e inercial, indicando variables como velocidad (en tierra) posición, ángulos de alabeo, cabeceo (horizonte artificial) y guiñada, relación de ascenso/descenso, compás con rumbo trazado y orientación del aparato y la posición sobre un mapa en 2D/3D.

2.3.3. GCS de Sistemas de UAV de Corto Alcance

En estos sistemas, el avión suele ser lanzado mediante una rampa o es de tipo VTOL (*Vertical Take Off and Landing*). Los requisitos y las capacidades de ambos sistemas serán en general similares, a excepción de los aspectos específicos del control durante el lanzamiento y la recuperación.

El GCS para los sistemas de corta alcance, por lo general, será móvil y alojado dentro de un vehículo todo-terreno. Suelen tener una antena DGPS (*Differential Global Positioning System*) montada en el techo para obtener medidas de posición con errores reducidos.

2.3.4. GCS de Sistemas de UAV MALE y HALE

Un sistema MALE (*medium-altitude, long-endurance unmanned aircraft system*), como el General Atomics MQ-1 Predator de 15 m. de envergadura, emplea normalmente una GCS móvil, ya sea en un vehículo motor o en un remolque para que pueda ser convenientemente posicionado en relación con la pista de aterrizaje.

El sistema HALE (*High-Altitude Long Endurance*) del *Global Hawk* de 40 m. de envergadura, emplea dos Comandos en Tierra/Elementos de control. Se trata del Sistema o Elemento de Lanzamiento y Recuperación (LRE) (*Launch and Recovery System-LRS*), y el Elemento de Control de la Misión (MCE).

También el MCE supervisa la operación automática de la aeronave durante su despegue y aterrizaje, que está apoyado por el Sistema de Posicionamiento Global Diferencial (DGPS).

Las comunicaciones entre el LRE y el MCE del *Global Hawk* se realizarán vía satélite y las comunicaciones vía radio se hacen vía UHF/VHF.

2.4. CENTRO DE MANDO Y CONTROL

Un Sistema de Control puede ser definido como un sistema o subsistema que está constituido por un conjunto de componentes que regulan el comportamiento de un sistema (o de sí mismos) para lograr un objetivo. En nuestro caso al tratar el control de misión de UAS, el objetivo es controlar todas aquellas partes móviles del avión que al ser utilizadas cambiando de posición, provocarán un efecto aerodinámico que alterará el curso del vuelo y tendrán la seguridad de un control correcto de la aeronave.

Para aplicaciones civiles en el caso de gestión de emergencias, el Instituto de Investigación IUSIANI de la Universidad de Las Palmas de G.C. ha desarrollado conceptualmente dos centros de mando que pueden trabajar subordinados o en paralelo según se disponga, interconectados por una red WIMAX [4]. En este caso un *Centro de Control Local* (CCL) supervisaría las operaciones del VANT (RPA) en modo de visión directa (VLOS) y toda la información, incluida imágenes, se trasladaría a *Centro de Mando y Control remoto* (CMC) en forma síncrona. Si se decide que el CMC tome el mando la operación del VANT pasaría a ser en modo BVLOS híbrido. Los diagramas que se corresponden con el centro de mando y control propuesto serían los que se ilustran en la Fig. 4 y Fig. 5.

Para el diseño se han tenido en cuenta criterios de fiabilidad de los equipos, utilizando técnicas AMFE.

2.5. CARACTERÍSTICAS A TENER EN CUENTA EN EL DISEÑO DEL CENTRO DE MANDO Y CONTROL EN CUANTO A INTEROPERABILIDAD

Las necesidades de los centros de mando y control contemplan las características que se muestran en la Fig. 6.

Es decir que permitan:

- Estaciones de control configurables que con un mismo mecanismo de control maneje diferentes plataformas de distintas clases e incluso al mismo tiempo, lo cual implica una

disminución de los costes.

- Mediante estándares abiertos y arquitecturas modulares ser capaces de ofrecer capacidad multisensor configurable, es decir, dependiendo de la plataforma y los sensores instalados, el segmento de tierra es capaz de adaptarse a las funcionalidades requeridas para manejar sensores electroópticos, sensores radar etc.
- Que todo forme parte de una red intercomunicada.
- Y que abarque múltiples misiones y/o una misión en la que existan distintos organismos interconectados.

2.5.1. Características a tener en cuenta en el diseño del centro de mando y control en cuanto a factores Humanos

Por último, desde el punto de vista ergonómico y en cuanto al factor humano se deben tener en cuenta los siguientes aspectos de diseño en los centros de mando y control:

- Sistema ergonómico.
- HMI (Interface hombre – máquina) intuitivo mediante el uso de pantallas táctiles.
- Sistema de automatización flexible.
- Optimización de la carga de trabajo.

Estas consideraciones harán que el factor de riesgo disminuya en relación al error humano debido a estrés y carga de trabajo.

PARA SABER MÁS

- [1] Trabajo Fin de Grado Aplicación de los Vehículos Aéreos No Tripulados civiles, (VANTS civiles), en la Seguridad, las Emergencias y el Control de Riesgos en Canarias". Autor: Alfredo Álvarez Hernandez
- [2] UAV Universe. <https://sites.google.com/site/uavuni/>. Última consulta: abril 2016
- [3] <http://drones.uv.es/origen-y-desarrollo-de-los-drones/>. Universidad de Valencia. Última consulta: abril 2016
- [4] Trabajo Fin de Grado Diseño del Centro de Mando y Control Remoto de un Vehículo Aéreo No Tripulado, utilizando técnicas AMFE. Autora: Lidia Esther Trejo Medina (EITE-ULPGC)
- [5] Trabajo Fin de Grado Diseño del sistema de control local de vuelo de un vehículo aéreo no tripulado utilizando técnicas AMFE Autor: Mario San Miguel Montesdeoca (EITE-ULPGC)
- [6] Sopt. Sistema de observación y prospección tecnológica del ministerio de defensa. http://www.tecnologiaeinnovacion.defensa.gob.es/Lists/Publicaciones/Attachments/18/monografia_sopt_1.pdf
- [7] http://www.seguridadaerea.gob.es/lang_castellano/rpas/28_enero.aspx (AESAs)
- [8] Project no.: 314680 (Call: FP7-AAT-2012-RTD-1) ULTRA Unmanned Aerial Systems in European Airspace.

Estrategia para la consecución de Edificios de Consumo de Energía Casi Nulo (EECN) en la Unión Europea (UE): La perspectiva Española

Itziar Martínez-de-Alegría Mancisidor¹, Izaskun Alvarez-Meaza¹, Enara Zarrabeitia-Bilbao¹, Gorka Bueno-Mendieta¹, Maria-Azucena Vicente-Molina²
 Universidad del País Vasco UPV-EHU.
¹ Facultad de Ingeniería
² Facultad de Economía y Empresa

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7851>

1. INTRODUCCIÓN

Los objetivos de Energía y Clima de la Unión Europea (UE) (también conocidos como objetivos 20-20-20) están centrados, en primer lugar, en la mejora de la eficiencia energética en todos los eslabones del sistema energético. Dado que al sector de la edificación le corresponde el 40% del consumo final de energía y el 36% de la emisiones de CO₂ en Europa, y que el sector está expandiéndose [1], La UE alienta a los Estados miembros a desarrollar medidas legislativas, financieras y de otra naturaleza para hacer posible la transformación competitiva de los edificios existentes en Edificios de Consumo de Energía Casi Nulo (EECN).

Tal y como queda expuesto en la refundida Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios (EPBD, por sus siglas en inglés), para diciembre de 2020 todos los edificios de nueva construcción deberán ser edificios EECN (2018 en el caso de los edificios públicos) [1]. Este objetivo puede ser considerado un pilar de la estrategia de la UE sobre clima y energía. El objetivo de este trabajo es explorar la actual estrategia del gobierno de España de cara a lograr el mencionado objetivo EECN.

2. METODOLOGÍA

A fin de analizar la estrategia del gobierno de España de cumplir con los objetivos EECN para el año 2020, la sección Resultados explora, en primer lugar, la definición de EECN y otros aspectos fundamentales de la EPBD (sección 3.1). Posteriormente se estudia el caso español (sección 3.2). Esta sección presenta

una revisión de los principales actores políticos en España a cargo de la implementación de la EPBD y analiza las principales medidas legislativas adoptadas en el sector de la construcción para lograr el objetivo EECN a 2020. Posteriormente, considerando la estrecha relación existente entre el concepto de EECN y el autoconsumo de energía renovable, se estudia el estado de las regulaciones afectadas. Finalmente, se incluye una revisión de las agencias de la energía en España, nacional y regionales. La revisión se centra en los instrumentos políticos adoptados (legislativos, financieros y educativos) para la promoción de edificios EECN. Los resultados muestran los datos obtenidos de una revisión realizada en el año 2014, basada en la información ofrecida por una selección de agencias de energía en sus páginas web. Las conclusiones principales se presentan en la sección 4. Debe subrayarse que, a pesar del potencial de mejora de la eficiencia energética en los hogares que puede ser lograda a través de políticas de gestión de la demanda (*Demand Side Management* (DSM)), especialmente en el contexto de un sistema de redes inteligentes [2], la legislación y la política estratégica concernidas a ese aspecto han sido excluidas del ámbito de este trabajo, así como la legislación relacionada con el aumento de la eficiencia energética en el país (especialmente la Ley 18/2014 para crear un Fondo Nacional de Eficiencia Energética), y la Ley 15/2014 para la mejora de la contratación pública¹.

3. RESULTADOS

3.1. SIGNIFICADO DEL CONCEPTO EECN

Un edificio de consumo de energía casi nulo, tal y como viene definido en la EPBD, es un "edificio con un nivel de eficiencia energética muy alto, en el que la cantidad

casi nula o muy baja de energía requerida debería estar cubierta, en muy amplia medida, por energía procedente de fuentes renovables, incluida energía procedente de fuentes renovables producida in situ o en el entorno" [1]. La EPBD establece que el desempeño de un edificio debe incluir un indicador numérico sobre el rendimiento de energía primaria expresado en términos de kWh/m² anuales. La EPBD también requiere que los Estados miembros tengan en cuenta la optimización de costes al establecer los requerimientos de rendimiento energético mínimo que dé lugar a los costes de construcción más bajos posible. Tal y como explican Congedo et al. para ello, la Directiva introduce una metodología para establecer los patrones de referencia de los estándares nacionales [3]. En el marco de esta metodología comparada, los Estados miembros son requeridos para: definir una o varias referencias de edificios; definir medidas de eficiencia energética a ser evaluadas en dichos edificios; evaluar el consumo primario y final de energía (considerando las medidas de eficiencia energética ya mencionadas); y calcular el coste de esas medidas de eficiencia energética [1]. Por supuesto, el nivel óptimo de coste obtenido puede depender de factores tales como los costes energéticos, las condiciones climáticas, y otros elementos que pueden variar sustancialmente de un Estado miembro a otro (e incluso entre regiones de un mismo país), y pueden dar lugar a significados completamente diferentes de lo que es un edificio EECN en diferentes Estados miembros, así como a requerimientos de eficiencia energética sustancialmente diferentes. En cualquier caso, tal y como se ilustra en Romero et al., la clave para la consecución de un EECN radica en una demanda minimizada que debe ser complementada por unas instalaciones eficientes y potenciada por unas instalacio-



¹ Todas las referencias relativas a la legislación española están incluidas en la sección "Material adicional".

| Requisitos a los Estados miembros | Detalles concernientes a la transposición |
|--|---|
| Certificados de rendimiento energético | Legislación en vigor: RD 235/2013; Orden FOM/1635/2013 |
| Mantenimiento e inspección regular de los sistemas de calefacción y aire acondicionado | Cumplimiento de este requisito transferido a las Comunidades Autónomas |
| Requisitos mínimos de rendimiento energético | Nuevos requisitos sobre rendimiento energético establecidos en 2006 en el Código Técnico de la Edificación (CTE) (incluyendo un máximo de la transmitancia térmica (U); ej. en el caso de Madrid, el máx. U para fachadas se redujo desde 1,20 W/m ² (fijado en el anterior CTE) a 0,66 W/m ² en el de 2006). El CTE introduce para 2013 un máximo de consumo y demanda energética (medidos en kWh/m ² anuales). Se incluyen requisitos mínimos de aprovechamiento de energía solar térmica y electricidad fotovoltaica (Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios (RITE); 2006 CTE) |
| Plan Nacional para el incremento del número de edificios EECN | Noviembre 2014: El Plan Nacional Español para el incremento del objetivo EECN es enviado a las autoridades europeas |
| Informe del "nivel de coste óptimo" de los requisitos mínimos sobre rendimiento energético | Enviado a la Comisión Europea de acuerdo con la Directiva EPBD y el Reglamento delegado 244/2012; establece una revisión inicial del CTE en 2013 y otra más extensa a realizar en 2016 |

Tabla I: Requisitos para que los Estados miembros apoyen la transición hacia los edificios EECN y detalles concernientes al nivel de transposición en España

nes de generación de energía distribuida de origen renovable [4].

3.2. POLÍTICA ESPAÑOLA PARA EL CUMPLIMIENTO DEL OBJETIVO EECN

3.2.1. Medidas legislativas para el logro del objetivo EECN en España²

La Tabla I muestra la información acerca de los requisitos mínimos para que los Estados miembros apoyen el aumento del número de edificios EECN, y los detalles acerca del nivel de transposición en España. Los tres primeros requisitos son los ya establecidos por la anterior Directiva EPBD³; los dos últimos, son los requisitos para desarrollar un plan nacional para el incremento del número de edificios EECN, y también el "nivel de coste óptimo" nacional (ambos en color blanco) establecidos por la nueva directiva EPBD de 2010.

Tal y como ya exigía la anterior Directiva EPBD sobre eficiencia energética en la edificación, los principales instrumentos legislativos para establecer los requisitos mínimos de eficiencia energética (ver la cuarta fila de la Tabla I) son, por un lado, el Real Decreto 314/2006, que aprueba el Código Técnico de la Edificación (CTE), y por otro, el Real Decreto 1027/2007, que aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE)⁴. Ambos Decretos establecen el requerimiento de una aportación mínima de energía solar en los nuevos edificios. En junio de 2013

se publicó el informe español de "nivel de coste óptimo" [5] (ver última fila de la Tabla I). En él se afirma que el enfoque normativo para llevar el CTE acorde con las exigencias de los EECN será gradual, y se basará en los resultados del citado informe de "nivel de coste óptimo". En septiembre de 2013, con la aprobación de la Orden FOM/1635/2013 se actualiza el Documento Básico DB-EH (sección de Ahorro de Energía del CTE). Esta nueva legislación podría dar lugar a un cambio fundamental en la mejora de la eficiencia energética de los nuevos edificios del país, debido, por un lado, a que por primera vez se incorpora un indicador en el CTE de rendimiento del uso de energía primaria expresado en kWh/m² por año; y por otro lado, a que este nuevo documento DB-EH establece los niveles máximos de consumo de la energía primaria consumida no renovable (HEO), así como las demandas máximas de energía (HE1) (medidos en kWh/m² por año). Uno de los avances de este nuevo sistema, de cara a la obtención y mejora de la calificación en la certificación energética de los edificios, es que se limita de forma significativa el incentivo existente con la legislación anterior, que permitía enfocar los esfuerzos en el abastecimiento de energía (incluyendo, por ejemplo, el uso de la energía procedente de biomasa), en lugar de en la eficiencia energética. Siguiendo con la certificación energética de los edificios, la Ley 8/2013 establece la exigencia de un informe de evaluación del edificio y establece las sanciones por la infracción de los requisitos de certificación energética. El Real Decreto 235/2013 (que sustituye al anterior Real Decreto 47/2007) para la certificación energética de los edificios nuevos incluye la obligación de que todos

los nuevos edificios construidos a partir del 31 de diciembre 2018, que estén ocupados o sean propiedad de las autoridades públicas deben ser EECN (ver segunda fila de la Tabla I). Además, en la actualidad, esta es la principal herramienta legislativa utilizada por los técnicos⁵ responsables de la certificación energética en España. El software utilizado para implementar el método oficial de cálculo es conocido como CALENER. Los cambios también se han introducido en el método del CALENER para adaptarlo a las exigencias del CTE, y ahora, los certificados de eficiencia energética se expresan en kWh/m² por año, lo que puede ayudar a mejorar la eficacia del sistema de certificación de cara a evaluar la eficiencia energética de los edificios.

Tal y como ilustra la tabla I, en noviembre de 2014 se envió a las autoridades europeas el Plan Nacional Español para aumentar el número objetivo de EECN. El Plan pone de manifiesto que las medidas financieras se centran principalmente en los edificios existentes. Asimismo, el Plan afirma que para el 2015 se elaborará (Fase I) la "definición reglamentaria de determinados objetivos intermedios para un elevado rendimiento energético", y que para el 2018 se adoptará la "definición regulatoria" de EECN [6].

3.2.2. La legislación vinculada al autoabastecimiento de electricidad renovable

Según lo expuesto en la EPBD, y confirmado por diferentes autores [4] existe una relación estrecha entre el concepto

² Los planes y actores políticos principales en relación con la implementación de la legislación contenida en esta sección están detallados en "Material adicional".

³ Directiva 2002/91/EC.

⁴ Posteriormente modificado por el RD 1826/2009 y actualizado por el Real Decreto 238/2013.

⁵ Arquitectos o ingenieros autorizados para firmar proyectos de construcción.

| GOBIERNO ESTATAL Y REGIONAL | Políticas y medidas | Políticas y medidas necesarias para alcanzar los objetivos con el fin de estimular la transformación de los edificios que están siendo renovados a edificios de consumo de energía casi nulo (EECN) | | |
|-----------------------------|-----------------------|--|---|---|
| | | Certificación energética de edificio nuevos o existentes | Mejora en la eficiencia energética de los edificios | Uso de fuentes de energía renovables en edificios nuevos o existentes |
| ESTATAL | | | | |
| ESPAÑA | Líneas de actuación | <p>Certificados de Eficiencia Energética: uso y diseño con relación al estándar EECN</p> <ul style="list-style-type: none"> - Certificación energética de los edificios nuevos y en los edificios en los que se realicen reformas importantes - Aplicación de la certificación energética en los edificios públicos - Las Comunidades Autónomas están al frente del registro, inspección y control de los certificados de eficiencia energética | <ul style="list-style-type: none"> • Plan de Actuación de Eficiencia Energética para edificios de la Administración Central (min. objetivo de ahorro 20% para el año 2016) • Plan de Eficiencia Energética 2011-2020 (PNAEE 2011-2020) • CTE (Código Técnico de Edificación) del 2006; actualizado en 2013 con máximo de consumo y demanda (kWh/m² por año); nuevo, se anuncian requisitos más estrictos para el año 2016 | <p>Objetivos para el 2020: proporción de energía procedente de fuentes de energía renovables (FER) en el consumo final bruto (participación 2005: 8.7%)</p> <p>FER-calor por tecnología</p> <ul style="list-style-type: none"> - Geotérmica: 0.2 % - Solar: 11.4 % - Biomasa: 87.5 % - Bomba de Calor: 0.9 % <p>El CTE y RITE (regulación para las instalaciones térmicas en los edificios) establecen requerimientos mínimos para el uso de FER en edificios nuevos y en edificios en los que se realicen reformas importantes</p> |
| | Medidas financieras | No existen medidas | <ul style="list-style-type: none"> • Rehabilitación térmica de la envolvente de los edificios existentes • Mejora de la eficiencia energética en instalaciones térmicas y de iluminación en edificios existentes • Deducción en el impuesto sobre la renta en España por trabajos de mejora en edificios residenciales • Reducción en el IVA en España para trabajos de reparación y renovación en la vivienda habitual • Construcción de nuevos edificios y renovación de edificios existentes con alta calificación energética • Construcción o renovación de edificios con consumo de energía casi nulo • Vivienda social y plan RENOVE | Tradicionalmente, las energías renovables han recibido ayudas a través de las tarifas reguladas. Sin embargo, el apoyo para las nuevas fuentes de energía renovables ha sido temporalmente interrumpido (ver sección 3.2.2) |
| | Medidas educacionales | Cursos y guías relativas a la certificación energética en edificaciones existentes | Cursos de formación en las nuevas políticas energéticas para la edificación | No existen medidas |

Tabla II: Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en el sector Terciario y Residencial: Principales Políticas y Medidas lanzadas por el Gobierno Español y algunas Agencias Regionales de Energía

EECN y el autoabastecimiento de energía renovable. Después de la cancelación en 2012 de las primas para las nuevas instalaciones a través del Real Decreto 1/2012 [7], el autoabastecimiento de electricidad renovable con balance neto ha funcionado probablemente como la única alternativa para las nuevas instalaciones fotovoltaicas en España. Este sistema implica un marco de consumo/generación para equipos de pequeña escala conectados a la red en el cual el excedente de electricidad se vierte directamente a la red cuando esta no se consume localmente. Esta energía

es medida para compensar la electricidad proporcionada por la distribuidora eléctrica al consumidor cuando la generación *in situ* no puede satisfacer la demanda local, pagando el consumidor por el balance neto de la electricidad consumida a lo largo de un período determinado, normalmente un mes, o un año. Este sistema de autoconsumo exige una perspectiva de balance neto, que es reconocida como compatible con la EPBD[8]⁶.

El marco regulador para el autoconsumo de electricidad con balance neto se ha implementado recientemente en España a través del Real Decreto 900/2015. Según lo indicado por este Real Decreto, el balance neto se llevará a cabo sobre una base horaria, impidiendo así los balances en todo un año, una estación, cada mes, e incluso cada día. Por otro lado, el Real Decreto también establece un peaje de respaldo para la electricidad autoconsumida en sistemas con una conexión de potencia superior a 10 kW. Dicho peaje (a modo de ejemplo 60,73 €/MWh para la tarifa 2.1A)

⁶ Para más detalles ver "Material adicional".

| GOBIERNO ESTATAL Y REGIONAL | Políticas y medidas | Políticas y medidas necesarias para alcanzar los objetivos con el fin de estimular la transformación de los edificios que están siendo renovados a edificios de consumo de energía casi nulo (EECN) | | |
|-----------------------------|-----------------------|---|--|---|
| | | Certificación energética de edificio nuevos o existentes | Mejora en la eficiencia energética de los edificios | Uso de fuentes de energía renovables en edificios nuevos o existentes |
| REGIONAL | | | | |
| ANDALUCIA | Líneas de actuación | Plan Andaluz de Sostenibilidad Energética 2007-2013: <ul style="list-style-type: none"> • Actuaciones: Certificación Energética Andaluza • Medidas: Promover el certificado energético andaluz en las viviendas; publicitar el contenido del Certificado Energético; desarrollar planes de formación con el objetivo de formar técnicos en edificación energética Ley 2/2007 que promueve el fomento de las energías renovables y del ahorro y eficiencia energética de Andalucía, siendo posteriormente desarrollada mediante el Decreto 169/2011: <ul style="list-style-type: none"> • Ayuda a alcanzar los objetivos del Plan relativos a la certificación energética del marco legislativo | Plan Andaluz de Sostenibilidad Energética 2007-2013: <ul style="list-style-type: none"> • Tendencias referentes: eficiencia energética de los edificios (máxima calificación) • Medidas: Promover la adaptación de las viviendas existentes a los requerimientos exigidos en la certificación energética Ley 2/2007 que promueve el fomento de las energías renovables y del ahorro y eficiencia energética de Andalucía y siendo posteriormente desarrollada mediante el Decreto 169/2011: <ul style="list-style-type: none"> • Se introducen planes obligatorios para la gestión energética de los edificios nuevos y existentes que están incluidos en el objetivo del Decreto | Plan Andaluz de Sostenibilidad Energética 2007-2013: <ul style="list-style-type: none"> • Tendencias referentes: Edificios con auto-suficiencia energética utilizando recursos renovables Ley 2/2007 que promueve el fomento de las energías renovables y del ahorro y eficiencia energética de Andalucía, siendo posteriormente desarrollada mediante el Decreto 169/2011: <ul style="list-style-type: none"> • Se plantean los requerimientos energéticos del CTE en relación con las energías renovables |
| | Medidas financieras | No existen medidas | <ul style="list-style-type: none"> • Aprovechamientos geotérmicos • Generación de electricidad para consumo propio mediante energía renovable • Instalación de sistemas de microgeneración • Optimizar la gestión y control energético • Renovar las envolventes de los edificios • Construir edificios con alta calificación energética • Producción térmica centralizada para suministrar varios edificios o centros de consumo | Fondos para promocionar las energías renovables y la eficiencia energética Ayudas para vivienda <ul style="list-style-type: none"> • Instalaciones solares • Geotérmico HVAC • Calderas de biomasa |
| | Medidas educacionales | Seminarios para técnicos y profesionales sobre la experiencias en certificación en Andalucía | Conferencias relativas al desarrollo de oportunidades en el desarrollo y aplicación de las nuevas regulaciones energéticas en el sector de la construcción, y eficiencia energética en los edificios Guía para el diseño de viviendas energéticamente eficientes en Andalucía | Varios seminarios, cursos y guías |

Tabla II: Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en el sector Terciario y Residencial: Principales Políticas y Medidas lanzadas por el Gobierno Español y algunas Agencias Regionales de Energía

es, de hecho, significativamente más alto que el precio de la electricidad en el mercado mayorista español (un promedio de 43,59 €/MWh en 2014 [9]). Además, dicha regulación impide que los productores puedan cobrar por el excedente de electricidad suministrada a la red —la electricidad debe entregarse a la distribuidora sin cargo—, a menos que se pague un peaje de acceso suplementario. Este peaje se suma al otro peaje de acceso al consumo que

el productor/consumidor también tendría que pagar como cualquier otro consumidor en España.

3.2.3. Estudio de las Agencias Españolas Regionales y Nacionales de Energía

En este apartado se presentan los resultados del estudio llevado a cabo sobre las principales agencias españolas regionales y nacionales de energía, y se esbozan las principales medidas (legislativas,

financieras y educativas) adoptadas por las mismas para apoyar la transición hacia los EECN en el ámbito nacional y regional⁷. La tabla muestra que, tanto a nivel nacional, y en especial en el ámbito regional, se han puesto en marcha un gran número de muy variadas medidas legisla-

⁷ Para más detalles de la metodología del estudio ver "Material adicional".

| GOBIERNO ESTATAL Y REGIONAL | Políticas y medidas | Políticas y medidas necesarias para alcanzar los objetivos con el fin de estimular la transformación de los edificios que están siendo renovados a edificios de consumo de energía casi nulo (EECN) | | |
|-----------------------------|-----------------------|--|---|---|
| | | Certificación energética de edificio nuevos o existentes | Mejora en la eficiencia energética de los edificios | Uso de fuentes de energía renovables en edificios nuevos o existentes |
| REGIONAL | | | | |
| CATALUÑA | Líneas de actuación | Plan de Energía y Cambio Climático de Cataluña 2012-2020: <ul style="list-style-type: none"> • Certificación energética de los Edificios | Plan de Ahorro y Eficiencia Energética en los edificios y equipamientos de la Generalitat de Cataluña 2011-2014 <ul style="list-style-type: none"> • Creación de una base de datos de consumo energético para monitorizar y adoptar medidas específicas para el ahorro y eficiencia energética y el uso de energías renovables • Plan de inversiones para la mejora del ahorro y eficiencia energética • Proyectos piloto • Desarrollar e implementar programas de actuación para informar, formar y divulgar el ahorro y la eficiencia energética y las energías renovables a los empleados del gobierno Plan de Energía y Cambio Climático de Cataluña 2012-2020: <ul style="list-style-type: none"> • Estrategia: Edificios sostenibles | Plan de Ahorro y Eficiencia Energética en los edificios y equipamientos de la Generalitat de Cataluña 2011-2014 <ul style="list-style-type: none"> • Creación de una base de datos de consumo energético para monitorizar y adoptar medidas específicas para el ahorro y eficiencia energética y el uso de energías renovables |
| | Medidas financieras | No existen medidas | Construir edificios más eficientes energéticamente: la envolvente del edificio | Construir edificios más eficientes energéticamente: producción de agua caliente usando energía solar térmica |
| | Medidas educacionales | Cursos de formación en certificación de eficiencia energética en los edificios | No existen medidas | No existen medidas |
| MADRID | Líneas de actuación | Plan de Energía de la Comunidad de Madrid (2004-2012): <ul style="list-style-type: none"> • Este plan promueve inspecciones para comprobar la actual aplicación de la legislación de eficiencia energética en los edificios | Plan de Energía de la Comunidad de Madrid (2004-2012): <ul style="list-style-type: none"> • En el desarrollo del plan energético la implementación de la Directiva 2002/91/EC será obligatoria • Un plan de ayudas directas para nuevos edificios que reúnen los requisitos de implementación esperados | Plan de Energía de la Comunidad de Madrid (2004-2012): <ul style="list-style-type: none"> • Promoción y uso de energías renovables |
| | Medidas financieras | No existen medidas | <ul style="list-style-type: none"> • Mejora de la envolvente térmica • Mejora de los sistemas de instalaciones térmicas | <ul style="list-style-type: none"> • Instalación de paneles solares |
| | Medidas educacionales | Cursos de certificación energética en los edificios | Varios cursos relativos a la eficiencia energética en los edificios Publicaciones: <ul style="list-style-type: none"> • Guía estándar casa Pasiva • Soluciones de eficiencia energética en los edificios | Curso relativo al uso de energías renovables en la rehabilitación energética de los edificios |

Tabla II: Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en el sector Terciario y Residencial: Principales Políticas y Medidas lanzadas por el Gobierno Español y algunas Agencias Regionales de Energía

tivas, financieras y educativas. Además, existe una gran diversidad entre las regiones en cuanto a las medidas adoptadas, siendo algunas de ellas, como por ejemplo Andalucía, mucho más activas que otras. Todas las medidas adoptadas siguen, en su conjunto, la estrategia declarada por el *Plan Nacional de Ahorro y Eficiencia*

Energética (PNAEE) 2011-2020 [10]. En cuanto a alcanzar el objetivo de conseguir que para el 2020 los nuevos edificios sean EECN, la Tabla II muestra que la mayoría de los incentivos financieros van destinados a la eficiencia energética de los edificios existentes, y que son muy pocos los incentivos que se ofrecen relacionados

con la eficiencia energética de los nuevos edificios. De hecho, solo el *Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía* (IDAE) y la *Agencia Andaluza de la Energía* (AAE) aportan incentivos financieros para la construcción de nuevos edificios con alta calificación energética o consumo casi nulo de energía, lo que significa

| GOBIERNO ESTATAL Y REGIONAL | Políticas y medidas | Políticas y medidas necesarias para alcanzar los objetivos con el fin de estimular la transformación de los edificios que están siendo renovados a edificios de consumo de energía casi nulo (EECN) | | |
|-----------------------------|-----------------------|--|---|--|
| | | Certificación energética de edificio nuevos o existentes | Mejora en la eficiencia energética de los edificios | Uso de fuentes de energía renovables en edificios nuevos o existentes |
| REGIONAL | | | | |
| VALENCIA | Líneas de actuación | Plan de Ahorro y Eficiencia Energética: <ul style="list-style-type: none"> El desarrollo de estándares relativos a: cualificación y certificación de edificios y etiquetado energético Inspección pública de los registros de los certificados en los edificios existentes Información relativa al decreto que regula el proceso básico para la certificación energética de los edificios | Plan de Ahorro y Eficiencia Energética: <ul style="list-style-type: none"> Servicios de asesoramiento para la mejora de la eficiencia energética en los edificios públicos Desarrollo de estándares relativos al aislamiento térmico | Plan de Ahorro y Eficiencia Energética: <ul style="list-style-type: none"> Mejorar el uso de energías renovables en edificios públicos y privados Desarrollo de estándares relativos a instalaciones térmicas |
| | Medidas financieras | No existen medidas | Plan de Ahorro y Eficiencia Energética: <ul style="list-style-type: none"> Instalaciones de calefacción Instalaciones de iluminación Promover nuevos edificios con alta calificación energética | Programa de Energías Renovables: <ul style="list-style-type: none"> Energía solar térmica e instalaciones híbridas (energía solar térmica – biomasa) Instalaciones de energía solar fotovoltaica aislada y mixta aislada (energía eólica- fotovoltaica) Energía eólica aislada Energía geotérmica Energía de la biomasa térmica/ eléctrica |
| | Medidas educacionales | Cursos de formación: Certificación energética de los edificios nuevos y existentes | <ul style="list-style-type: none"> Curso: Ahorro de energía e instalaciones de aire acondicionado Información y campañas de sensibilización para el uso más eficiente de los sistemas de iluminación | No existen medidas |
| GALICIA | Líneas de actuación | El plan no hace mención de esta área. Pero si existe una información muy detallada acerca del proceso de certificación y del Decreto que regula el proceso básico de certificación energética | Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2010-2015: desarrollado por la administración del gobierno regional de Galicia: <ul style="list-style-type: none"> Definir una estrategia para el ahorro energético Estimular y llevar a cabo el programa de actuación | Este Plan no hace mención de esta área |
| | Medidas financieras | No existen medidas | No existen medidas | No existen medidas |
| | Medidas educacionales | No existen medidas | No existen medidas (existen guías de ayuda) | No existen medidas (existen guías de ayuda) |
| PAÍS VASCO | Líneas de actuación | No existen planes de actuación. Existe un decreto que regula la certificación energética de los nuevos edificios | Estrategia Energética para el País Vasco 2020: <ul style="list-style-type: none"> Área de actuación: Reducir el consume energético en los edificios | Estrategia Energética para el País Vasco 2020: <ul style="list-style-type: none"> Área de actuación: Incrementar el uso de renovables en los edificios |
| | Medidas financieras | No existen medidas | <ul style="list-style-type: none"> Rehabilitación de la envolvente térmica Renovación de equipamiento e instalaciones en los edificios existentes | <ul style="list-style-type: none"> Instalaciones solares térmicas de baja temperatura Instalaciones de intercambio geotérmicas Instalaciones eólicas conectadas a la red eléctrica (consumida en el mismo lugar y suministrada a la red eléctrica) Instalaciones solares fotovoltaicas conectadas a la red eléctrica (consumido en el mismo lugar y suministrado a la red eléctrica) |
| | Medidas educacionales | No existen medidas | No existen medidas (existen guías de ayuda) | No existen medidas (existen guías de ayuda) |

Tabla II: Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en el sector Terciario y Residencial: Principales Políticas y Medidas lanzadas por el Gobierno Español y algunas Agencias Regionales de Energía



que puede haber diferencias sustanciales de unas regiones a otras en lo que se refiere a los objetivos de EECN para el 2020.

4. CONCLUSIONES

La flexibilidad existente para los Estados miembros en cuanto a la definición y el establecimiento de los límites para determinar qué son los EECNs puede conducir a que el concepto adquiera significados completamente diferentes en los distintos países, lo cual podría a su vez dar lugar a diferencias sustanciales en cuanto a los niveles de eficiencia energética de estos edificios en toda Europa.

Respecto al marco regulador español, la adopción en 2013 del DB-EH (la sección de Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación (CTE)) puede suponer un cambio sustancial en términos de mejora de la eficiencia energética de los nuevos edificios en el país, con la inclusión en el CTE de un indicador de eficiencia energética para el uso de energía primaria expresado en kWh/m² por año (como exige la EPBD). Esta medida también limita el incentivo del abastecimiento de energía, para sustituirlo por la eficiencia energética a la hora de obtener una puntuación más alta en la certificación energética. Además, para el 2016 se han anunciado nuevas medidas más estrictas. Todas estas medidas pueden ser fundamentales para el sector de la construcción en el fomento de mejoras significativas de la eficiencia energética. Sin embargo, el apoyo a las nuevas fuentes de energía renovable a través de sistemas de primas se ha suspendido temporalmente, y el Real Decreto 900/2015 recientemente implementado para cubrir el autoabastecimiento de

energía eléctrica mediante el sistema de balance neto en los edificios parece específicamente diseñado para desalentar e incluso bloquear cualquier posible desarrollo de este sistema, que es clave para el cumplimiento de los objetivos de EECN para 2020.

El estudio específico de las ayudas públicas promulgadas en el ámbito regional nos lleva a la conclusión de que existen grandes diferencias entre los esfuerzos realizados por las regiones españolas analizadas, y que solo una de ellas (Andalucía) ofrece incentivos financieros específicos para los EECN. El resto de los incentivos financieros ofrecidos por las regiones españolas se centran en el aumento de la eficiencia energética en los edificios ya existentes. Teniendo en cuenta la necesidad de promover las cuestiones relacionadas con la eficiencia energética y la sostenibilidad en las primeras etapas del proceso de diseño de edificios, parece fundamental un flujo financiero más equilibrado de las ayudas públicas para la promoción de nuevos edificios EECN.

La falta de definiciones claras, de objetivos intermedios y de medidas de apoyo financiero para ayudar a que los nuevos edificios se conviertan en EECN, parecen reflejar el escaso nivel de la aplicación de la EPBD y del progreso en lo que respecta a los objetivos EECN en España. Esto aumenta el riesgo de no cumplir los plazos establecidos, y también significa que el sector español de la construcción se enfrenta a un estado de incertidumbre en lo que a las políticas y su marco regulatorio se refiere, que, a su vez, puede retrasar las inversiones necesarias en tecnología, procesos y capacitación.

PARA SABER MÁS

- [1] Unión Europea, "Directiva 2010/31/EU del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de Mayo de 2010 sobre la Eficiencia Energética en Edificios," 2010. DOI:10.3000/17252512.L_2010.153.
- [2] I. Laicane, D. Blumberga, A. Blumberga and M. Rosa. Reducing household electricity consumption through demand side management: The role of home appliance scheduling and peak load reduction. *Energy Procedia* 72pp. 222-229. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.06.032>.
- [3] P. M. Congedo, C. Baglivo, D. D'Agostino and I. Zacà. Cost-optimal design for nearly zero energy office buildings located in warm climates. *Energy* 91pp. 967-982. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.078>.
- [4] A. Romero-Amorrortu, E. Barreiro-Sánchez and V. Sanchez-Zabala, "Net positive energy buildings," *DYNA*, vol. 85, pp. 746-759, Diciembre 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/3842>
- [5] Ministerio de Fomento, "Report on Cost Optimal Calculations and Comparison with the Current and Future Energy Performance Requirements of Buildings in Spain," Ministry of Development of Spain. Directorate for Architecture, Housing and Planning. Spain, 2013.
- [6] Ministerio de Obras Públicas, "Pilot project 6424/14/MOVE. notification of information under articles 9 of directive 2010/31/EU. energy performance of buildings," Ministry of Public Works, 2014.
- [7] C. Gallego-Castillo and M. Victoria, "Cost-free feed-in-tariffs for Renewable Energy deployment in Spain," *Renewable Energy*, vol. 81, pp. 411-420, 2015.
- [8] K. Voss, I. Sartori and R. Lollini, "Nearly-zero, Net zero and Plus Energy Buildings. How definitions & regulations affect the solutions," *RHVA Journal*, vol. 6, pp. 23, 2012.
- [9] OMIE. Resultados del mercado, <<http://www.omie.es/files/flash/ResultadosMercado.swf>>. Último acceso Noviembre 2015
- [10] IDAE, Plan De Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020. Madrid: Ministerio de Industria Turismo y Comercio, 2011.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/7851-1.pdf



Simulation study on the classification efficiency of hydrocyclone with double vortex finders



Estudio de simulación sobre la eficiencia en la clasificación por hidrociclones con boquillas de doble vortex



Yuekan Zhang¹, Peikun Liu¹, Junru Yang¹, Xinghua Yang¹ and Yuying Yan²

¹ College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qianwangang Road 579#, Qingdao, 266590, Shandong, China

² Faculty of Engineering, the university of Nottingham. University Park, Nottingham, NG7 2RD, United Kingdom

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8050> | Recibido: 09/03/2016 • Aceptado: 07/07/2016

RESUMEN

- La clasificación de eficiencia de los hidrociclones es uno de los problemas fundamentales que requieren soluciones que promuevan el desarrollo de un sistema de separación sólido-líquido. Se propone un nuevo modelo de hidrociclón para mejorar la estructura tradicional y la precisión en la clasificación de eficiencia. Por lo tanto, un tubo de rebosadura coaxial con un diámetro pequeño se inserta en el tubo original, lo que hace posible obtener tres diferentes productos con diferentes grados de tamaño en un ciclo. Posteriormente, usando la dinámica de fluidos computacional, el modelo de estrés de Reynolds se introdujo en el Reynolds-promediado de Navier-Stokes; el modelo matemático de mezcla sólido-líquido de flujo multifásico fue establecido. Finalmente, un estudio sobre la simulación de los efectos de los parámetros estructurales (por ejemplo, sub-desbordamiento diámetro de orificio, el diámetro interno del tubo de rebose, e insertó la profundidad del tubo de desbordamiento interno) sobre la clasificación de eficiencia de subdesbordamiento, desbordamiento interno y externo del desbordamiento de doble tubo de rebosadura hidrociclón fue realizado. Los resultados muestran que puede obtenerse tres diferentes clasificaciones en grado de producto, a saber, subdesbordamiento, desbordamiento interior y desbordamiento exterior. Los parámetros estructurales han demostrado que juegan un papel importante en la eficiencia de la clasificación del hidrociclón con doble vórtice finders. Este estudio proporciona una buena referencia para la optimización de los parámetros estructurales de doble tubo de rebosadura de los hidrociclones.
- **Palabras clave:** Ciclón, hidrociclón con doble vórtice finders, eficiencia de clasificación, parámetros estructurales, simulación numérica.

ABSTRACT

Classification efficiency of hydrocyclone is one of the kernel problems requiring solutions to promote the development of a solid-liquid separation system. A new hydrocyclone model was proposed to improve traditional structure and precise classification efficiency. Consequently, a coaxial overflow pipe with a small diameter was inserted into the original pipe, thereby possibly obtaining three different products with different size grades in one cycle. Then, using computational fluid dynamics, the Reynolds stress model was introduced into the Reynolds-averaged Navier-Stokes; the mathematical model of solid-liquid mixture multiphase

flow was established. Finally, a study on the numerical simulation of the effects of structural parameters (e.g., underflow orifice diameter, internal overflow pipe diameter, and inserted depth of internal overflow pipe) on the classification efficiency of underflow, internal overflow, and external overflow of double overflow pipe hydrocyclones was conducted. Results show that one classification can obtain three different narrow-grade-classification products, namely, underflow, inner overflow, and outer overflow. The structural parameters are proven to play an important role in the classification efficiency of the hydrocyclone with double vortex finders. This study provides a good reference for the optimization of structural parameters of double overflow pipe hydrocyclones.

Keywords: Hydrocyclone with double vortex finders, Classification efficiency, Structural parameters, Numerical simulation.

1. INTRODUCTION

Hydrocyclones refer to devices that can separate phases with density difference or particle size difference using centrifugal sedimentation [1, 2]. Hydrocyclones have been widely used in the field of mineral processing, petroleum, chemical engineering, air pollution, power plants, and process industries because of the absence of its moving parts, simple structure, high working capacity, high separation efficiency, low maintenance costs, and small physical size of the device [3, 4]. Conventional single overflow pipe hydrocyclones can generate overflow and underflow only, resulting in broadly distributed size grades of the products. Notably, the classification efficiency of hydrocyclone is one of the kernel issues requiring solutions in the methods. A double overflow pipe hydrocyclone that can achieve precise grading is proposed to obtain several size grades in one cycle. More specifically, coaxial overflow pipes with different diameters are employed to expel fine particles from the internal overflow pipe; medium particles are expelled from the external overflow pipe, and coarse particles are expelled from the underflow orifice. Consequently, three different products with different size grades are obtained in one cycle. In contrast to conventional hydrocyclones focusing on hydrocyclone separation, the double overflow pipe hydrocyclone can achieve several products with a narrow particle size range, thus improving grading precision and reducing energy dissipation. Structural parameters, such as underflow orifice diameter, internal overflow pipe diameter, and inserted depth of internal overflow pipe, are important factors affecting hydrocyclone separation performance [5-10]. A reliable computer-aided design (such as computational fluid dy-

namics (CFD) package with fluid flow equations) is employed to analyze the effect of geometry changes and structural parameters on cyclone efficiency. Therefore, designing a new structural hydrocyclone is necessary to deal with the aforementioned problem.

The structure and size of the hydrocyclone are highly significant to the separation efficiency. Recently, the influence of different structures of the hydrocyclone on the separation efficiency has been investigated by many researchers at home and abroad. D.P. Obeng and S. Morrell et al. [11, 12] designed a hydrocyclone with two coaxial overflow tubes and with different diameters. Therefore, one classification can obtain three different narrow-grade-classification products, namely, the inner overflow, the outer overflow, and the underflow. The separation of two different density particles in a three-product hydrocyclone [13, 14] was investigated, and three different diameter particles were obtained. Mahmoud M. Ahmed et al. [6] designed a three-product hydrocyclone; the coarse particle was sent back to the ball mill, and the fine grinding rate of the ball grinding mill was improved. P. Bagdi et al. [15-20] investigated the grading efficiency of double overflow pipe hydrocyclones using numerical simulations. However, all the aforementioned studies did not consider the influence of structural parameters on the separation efficiency. Thus, improved work must be conducted to examine the influence of the underflow diameter, the overflow diameter, and the insertion depth of the overflow tube on separation ratio and classification efficiency. This study utilizes software FLUENT6.3 and the mixture multiphase flow model to establish the mathematical model of the solid-liquid multiphase flow for a hydrocyclone with a two-overflow-tube structure.

The remainder of this paper is organized as follows: Section 2 describes the methodology of the model of the cyclone separator with double vortex finders and the numerical method. Section 3 presents the numerical simulation results using CFD. The conclusions are summarized in Section 4.

2. MATERIALS AND METHODS

This model includes two main steps. The first step is establishing the mathematical model of the hydrocyclone with double vortex finders. This step introduces the Reynolds stress model into the Reynolds-averaged Navier-Stokes. Mixture models of gas-liquid and solid-liquid multiphase flows for a hydrocyclone with a two-overflow-tube structure are established. The second step is establishing the flow field model and boundary conditions. In this step, inlet conditions, flow rate, particle size, and volumetric concentrations of the feedstock are introduced and outlet conditions, wall modification, and numerical simulations are determined.

2.1. MATHEMATICAL MODEL OF THE HYDROCYCLONE

The structure of the hydrocyclone is cylindrical, and flow motion inside the hydrocyclone is rotational. Therefore, the equation of flow motion in the hydrocyclone is described using a cylindrical coordinate system.

The continuity equation is expressed as follows:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{u_r}{r} = 0 \quad (1)$$

N-S (Navier-Stokes) equation is expressed as follows:

$$\rho \left(u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{u\theta^2}{r} \right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial r} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} - \frac{u_r}{r^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left(u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \frac{u_r u_\theta}{r} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 u_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} - \frac{u_\theta}{r^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho \left(u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

Concerning the nature of turbulence, Reynolds proposed the theory of time-averaged flow field, which divides the instantaneous motion parameters into two parts, namely, the time-averaged values and the fluctuating values.

$$u = \bar{u} + u' \quad (5)$$

Where, u , \bar{u} and u' are instantaneous velocity, time-averaged velocity and fluctuating velocity, respectively. Substituting the equation (5) into the continuity equation and N-S equation. The continuity equation and the N-S equation in cylindrical coordinate system are expressed as follows:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{u_r}{r} = 0 \quad (6)$$

$$\rho \left(u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{u\theta^2}{r} \right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial r} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} - \frac{u_r}{r^2} \right) - \rho \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \overline{ru_r'^2}}{\partial r} + \frac{\partial \overline{u_r' u_z'}}{\partial z} + \frac{1}{r} \overline{u_\theta'^2} \right) \quad (7)$$

$$\rho \left(u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \frac{u_r u_\theta}{r} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 u_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} - \frac{u_\theta}{r^2} \right) - \rho \left(\frac{\partial \overline{u_r' u_\theta'}}{\partial r} + \frac{\partial \overline{u_\theta' u_z'}}{\partial z} + \frac{2}{r} \overline{u_r' u_\theta'} \right) \quad (8)$$

$$\rho \left(u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) - \rho \left(\frac{\partial \overline{u_r' u_z'}}{\partial r} + \frac{\partial \overline{u_z'^2}}{\partial z} \right) \quad (9)$$

2.2. FLOW FIELD MODEL AND BOUNDARY CONDITIONS

Fig. 1. shows the hydrocyclone with double vortex finders. This study proposes a three-product hydrocyclone with two overflow tubes. The hydrocyclone is designed with two coaxial overflow tubes with different diameters. During overflow, light and fine particles exit from the inner overflow tube. The mid-sized particles overflow from the outer overflow tube. The coarse particles can be obtained from the underflow tube. Therefore, one classification can obtain three different narrow-grade-classification products, namely, underflow, inner overflow, and outer overflow. Fig. 2. shows the flow field model of double overflow pipe hydrocyclones. Table I. shows the structural parameters. Using an structured mesh arrangement with hexahedral elements, the meshing results of the hydrocyclone were obtained as shown in Fig. 3. and there are 140577 nodes in total. The influences of mesh number and grid type on the simulation accuracy were analyzed. The results proved that the separation efficiency is independent of the mesh size and grid type.

The Reynolds stress model and mixture multiphase flow model were involved. Since the RSM (Reynolds Stress Model) accounts for the effects of streamline curvature, swirl, rotation, and rapid changes in strain rate, it has greater potential to give accurate predictions for simulating cyclone flows.

The mixture model is designed for two or more phases. The

mixture model solves for the mixture momentum equation and prescribes relative velocities to describe the dispersed phases.

The boundary conditions are defined as follows:

Inlet conditions: The flow rate is 5 m/s, CaCO₃ particles with seven different sizes (1, 5, 10, 15, 20, 30, and 40 μm) were introduced, and the volumetric concentration of the feedstock is 3.5% (0.3%, 0.5%, 0.7%, 0.7%, 0.5%, 0.5%, and 0.3% for different particles).

Outlet conditions: The overflow orifice and underflow orifice were pressure outlets.

Wall modification: No permeation or sliding were assumed to have been observed, and near wall modification using standard wall functions was involved to improve the calculation precision.



Fig. 1: Photo of the three-product hydrocyclone

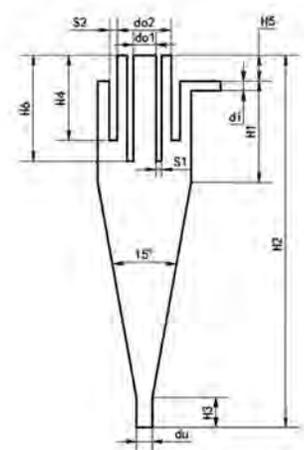


Fig. 2: Flow field of the cyclone

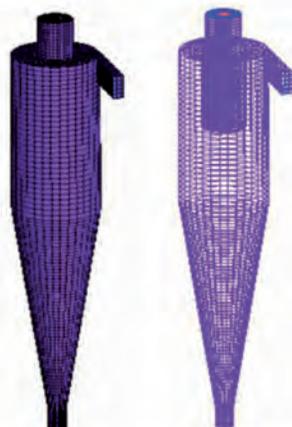


Fig. 3: Meshes of the hydrocyclone

In the numerical simulations, the pressure/speed coupling was treated using the SIMPLE pattern; the pressure dispersion of the governing equations was achieved using the PRESTO pattern; and the momentum dispersion was achieved using the QUICK pattern.

| Structural parameter | Structural dimensions |
|--|-----------------------|
| Hydrocyclone diameter D (mm) | 50 |
| Inner vortex finder diameter d_{o1} (mm) | 5, 6, 7, 9, 10 |
| Outer vortex finder diameter d_{o2} (mm) | 20 |
| Underflow port diameter d_u (mm) | 6, 8, 10, 12, 14 |
| Feed inlet equivalent diameter d_i (mm) | 12 |
| Outer overflow pipe insertion depth H_4 (mm) | 85 |
| Inner overflow pipe insertion depth H_6 (mm) | 65, 75, 85, 95, 105 |
| Thickness of the overflow pipe s_1, s_2 (mm) | 2, 2.5 |
| Extension length of the overflow pipe H_5 (mm) | 28 |
| Cylinder height H_1 (mm) | 116 |
| Total height H_2 (mm) | 310 |
| Underflow pipe height H_3 (mm) | 15 |

Table I: Main structural parameters of the hydrocyclone with double vortex finders

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1. SIMULATION MODEL VERIFICATION

In the paper, with the same parameters, the simulation model verification of the hydrocyclone with the diameter of 75mm proposed by Hsieh is firstly carried out. The simulation results are compared with the measured data of the flow field studied by Hsieh [21] in 1988 with LDV (Laser Doppler Velocimetry), as shown in Fig. 4, which shows that the simulation results are basically consistent with the experimental data. Then the simulation model and the solution are reasonable, and the internal flow field of hydrocyclone can be predicted well by simulation.

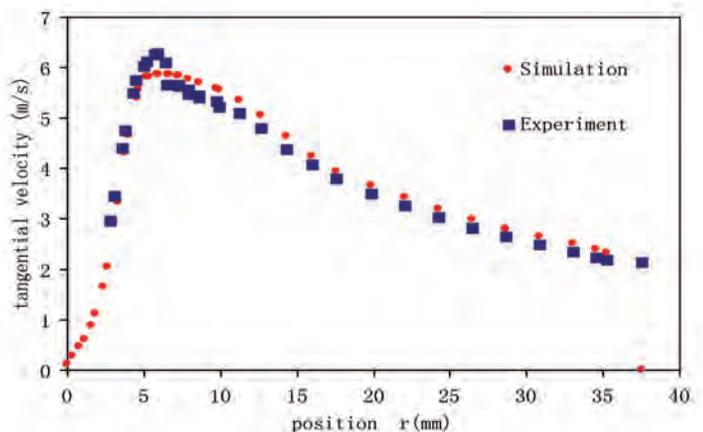


Fig. 4: Comparisons of tangential velocity between simulation and experiment

3.2. EFFECTS OF UNDERFLOW ORIFICE DIAMETER ON UNDERFLOW GRADING EFFICIENCY

The parameters of the hydrocyclones mentioned Table I used are as follows: diameter of external overflow pipe is 20 mm; diameter of internal overflow pipe diameter is 6 mm; and inserted depth of internal overflow pipe is 85 mm. Grading efficiency

curves of the double overflow pipe hydrocyclone in cases where the underflow orifice diameter is 6, 8, 10, 12, and 14 mm were obtained. Furthermore, the effects of underflow orifice diameter on underflow grading efficiency were investigated.

Particle separation efficiency at the underflow orifice refers to the mass flow rate ratio of the target particles and the feedstock particles after separation. The underflow orifice particle separation efficiency with particle sizes of 1, 5, 10, 15, 20, 30, and 40 μm and underflow orifice diameters of 6, 8, 10, 12, and 14 mm were obtained by simulating. The results showed that the particle separation efficiency at the underflow orifice increases (i.e., more coarse particles are separated) with the particle diameter. The separation size (d_{50}) is defined as the particle size corresponding to the underflow separation efficiency of 50%, indicating that the possibilities of these particles being expelled from underflow orifice and overflow orifice were 50%. For solid-liquid hydrocyclones, particles with diameters $<d_{50}$ are expelled from the overflow orifice, whereas particles with diameters $>d_{50}$ are expelled from the underflow orifice. d_{50} was 22, 19, 18, 14, and 8 μm for the underflow orifice diameters of 6, 8, 10, 12, and 14 mm, respectively. Considering that a small separation size indicates a high recovery rate of the hydrocyclone, the underflow orifice diameter should be increased to improve the hydrocyclone recovery rate.

The underflow productivity increased with the underflow orifice diameter, regardless of the particle size. However, the underflow productivity does not indicate the separation precision of the hydrocyclone. Indeed, the increase magnitudes of different particles were significantly different, as follows: the increase magnitudes of fine particles were larger than that of coarse particles. In other words, the particle size was reduced as the underflow orifice diameter increased. As coarse particles are preferred at the end of the separation, the underflow orifice diameter should be reduced.

3.3. EFFECTS OF INTERNAL OVERFLOW PIPE DIAMETER ON UNDERFLOW GRADING EFFICIENCY

The parameters of the double overflow pipe hydrocyclones used are as follows: the diameter of the external overflow pipe is 20 mm, the diameter of the underflow orifice diameter is 6 mm, and the inserted depth of the internal overflow pipe is 85 mm. The underflow grading efficiency curves of the double overflow pipe hydrocyclone in cases where the diameter of the internal overflow pipe is 5, 7, 9, and 10 mm were obtained.

The particle separation efficiency at the underflow orifice increases with the particle diameter. d_{50} is 22.5, 21, 19, and 17.5 μm for the internal overflow pipe diameters of 5, 7, 9, and 10 mm, respectively. As the separation size decreases as the internal overflow pipe diameter increases, the internal overflow pipe diameter should be increased to improve the hydrocyclone recovery rate.

The underflow productivity increased with the underflow orifice diameter, regardless of the particle size. However, the increase magnitudes of different particles were significantly different, as follows: the increase magnitudes of fine particles ($<20 \mu\text{m}$) were larger than that of coarse particles (30 or 40 μm). In other words, the particle size was reduced as the underflow orifice diameter increased. Therefore, the internal overflow pipe diameter should be reduced.

3.4. EFFECTS OF OVERFLOW PIPE INSERTED DEPTH ON THE UNDERFLOW GRADING EFFICIENCY

The parameters of the double overflow pipe hydrocyclones used are as follows: the diameter of the external overflow pipe is 20 mm, the diameter of the internal overflow pipe diameter is 6

mm, the diameter of the underflow orifice diameter is 6 mm, and the inserted depth of the external overflow pipe is 85 mm. Grading efficiency curves of the double overflow pipe hydrocyclone in cases where the inserted depth of the internal overflow pipe is 65, 75, 85, 95, and 105 mm were obtained. The particle separation efficiency at the underflow orifice increases with the particle diameter. d_{50} is 20, 21, 22, 23, and 24 μm for the inserted depths of the internal overflow pipe of 65, 75, 85, 95, and 105 mm, respectively. d_{50} increased with the inserted depth of the internal overflow pipe, indicating that the inserted depth of the internal overflow pipe should be reduced.

Fig. 5. illustrates the underflow grading efficiency curves at different internal overflow pipe diameters and feedstock particles (X-axis is the inserted depth of internal overflow pipe and Y-axis is the underflow productivity). As shown in the figure, the underflow productivity decreased as the inserted depth of the internal overflow pipe increased, regardless of the particle size. This finding can be attributed to the axial flow rate, which decreases as the inserted depth of the internal overflow pipe increases. As the axial flow rate decreases, the residence duration of particles increases, which resulted in improved particle separation. Conversely, vertical moving distances of particles in the upstream are reduced, and increasing fine particles enter the overflow pipe. However, the decrease magnitudes of different particles were significantly different, as follows: the decrease magnitudes of fine particles ($<15 \mu\text{m}$) and coarse particles ($>40 \mu\text{m}$) were smaller than that of particles with diameters between 20 μm and 30 μm . This finding can be attributed to 20 and 30 μm , which are close to d_{50} in this case. Conversely, the distance from the internal overflow pipe and cone wall decreases, and the zero-velocity envelop panel shifts outward as the inserted depth increases. Consequently, several particles in the underflow join the overflow. Therefore, the effects of the inserted depth of the internal overflow pipe on the underflow particle diameter are dependent on the decrease magnitudes of underflow productivity corresponding to different particle sizes as follows: underflow particle size decreases as the decrease magnitude of underflow productivity increases and vice versa.

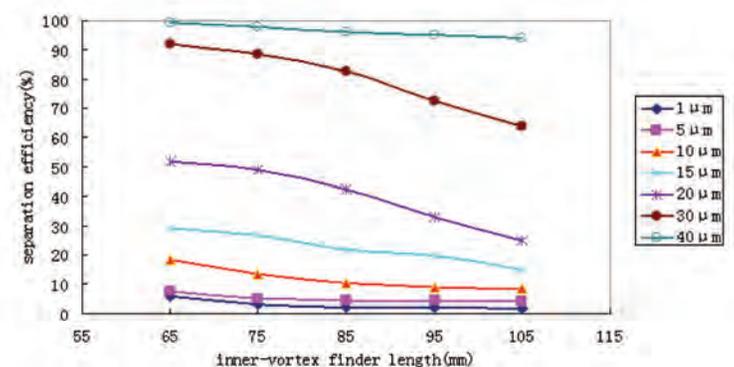


Fig. 5: Effect of the inner vortex finder length on the separation efficiency

3.5. EFFECTS OF UNDERFLOW ORIFICE DIAMETER ON THE RECOVERY RATE OF INTERNAL OVERFLOW PARTICLES

The recovery rate of internal overflow particles is defined as the mass flow rate ratio of the target particles at the internal overflow orifice and the feedstock particles after separation. The underflow orifice particle separation efficiency with particle sizes of 1, 5, 10, 15, 20, 30, and 40 μm and the underflow orifice diameter is 6, 8, 10, 12, and 14 mm were obtained through numerical simulations. Obviously, the recovery rate of internal overflow

particles decreased as the particle size increased, and the content of fine particles was significantly higher than that of coarse particles. Furthermore, the internal overflow productivity was negligible at an underflow orifice diameter of 12 or 14 mm. This finding can be attributed to the internal overflow pipe being occupied by air columns, and no particles can be expelled from the internal overflow pipe.

Fig. 6. illustrates the recovery rates of the internal overflow particles at different underflow orifice diameters (X-axis is the underflow orifice diameter and Y-axis is the internal overflow productivity). As shown in the figure, the recovery rate of the internal overflow particles decreased significantly as the underflow orifice diameter increased, and the decrease magnitude increased as the particle size decreased. In other words, the content of fine particles exhibited a larger decrease magnitude, indicating that the recovery rate of the internal overflow particles decreases and the particle size increases as the underflow orifice diameter increases.

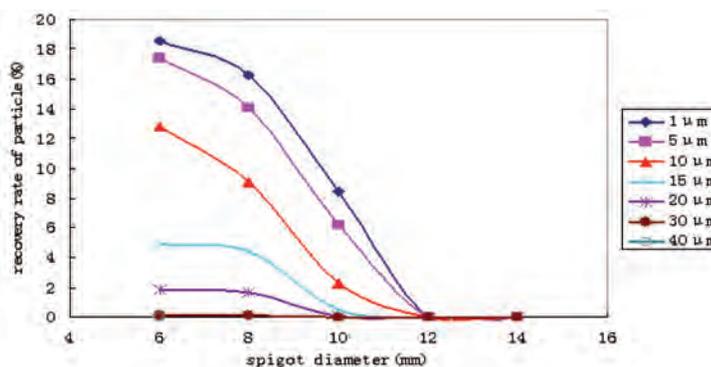


Fig. 6: Effect of the spigot diameter on the inner vortex recovery rate

3.6. EFFECTS OF OVERFLOW PIPE DIAMETER ON THE RECOVERY RATE OF THE INTERNAL OVERFLOW PARTICLES

The recovery rates of the internal overflow particles with seven different sizes (1, 5, 10, 15, 20, 30, and 40 μm) in cases where the diameter of the internal overflow pipe is 5, 7, 9, and 10 mm were obtained through numerical simulations. The content of particles in the internal overflow decreases as the particle size increases. At the internal overflow pipe diameter of 5 mm, the internal overflow pipe was occupied by air columns, and no particles can be recovered from the internal overflow pipe.

Fig. 7. illustrates the recovery rates of the internal overflow particles at different internal overflow pipe diameters (X-axis is the internal overflow pipe diameter and Y-axis is the internal overflow productivity). As shown in the figure, the recovery rate of internal overflow particles increases with the internal overflow

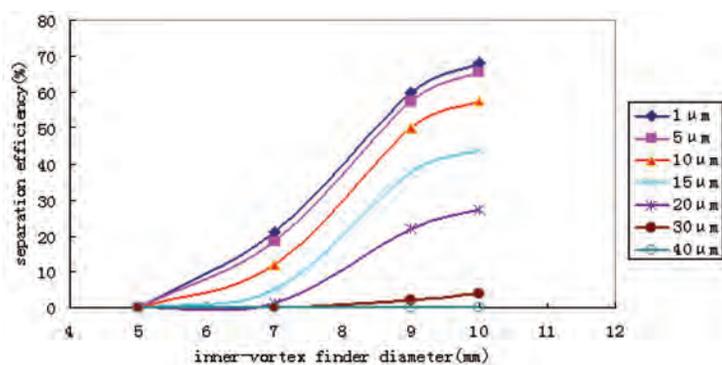


Fig. 7: Effect of the inner vortex finder diameter on the inner vortex recovery rate

pipe diameter. Furthermore, the increase magnitudes of fine particles were larger than that of coarse particles, indicating that the size of internal overflow particles decreases as the internal overflow pipe diameter increases.

3.7. EFFECTS OF OVERFLOW PIPE INSETED DEPTH ON THE RECOVERY RATE OF INTERNAL OVERFLOW PARTICLES

The recovery rates of internal overflow particles with seven different sizes (1, 5, 10, 15, 20, 30, and 40 μm) were obtained through numerical simulations in cases where the inserted depth of the internal overflow pipe is 65, 75, 85, 95, and 105 mm. The recovery rate decreases as the particle size increases, indicating that the content of fine particles in the internal overflow was relatively high. Furthermore, the recovery rate of internal overflow particles was affected by the inserted depth of internal overflow pipe. At the inserted depth of the internal overflow pipe of 85 mm (same as the inserted depth of the external overflow pipe), the recovery rate was maximized.

Fig. 8. illustrates the recovery rates of internal overflow particles at different inserted depths of the internal overflow pipe (X-axis is the inserted depth of the internal overflow pipe and Y-axis is the internal overflow productivity). In cases where the inserted depth of the internal overflow pipe is less than the inserted depth of the external overflow pipe, the recovery rate of internal overflow particles increases with the inserted depth of the internal overflow pipe. Moreover, the increase magnitude of fine particles was larger than that of coarse particles, indicating that the size of particles in the internal overflow decreased. In cases where the inserted depth of the internal overflow pipe is greater than the inserted depth of the external overflow pipe, the recovery rate of internal overflow particles decreases with the inserted depth of the internal overflow pipe.

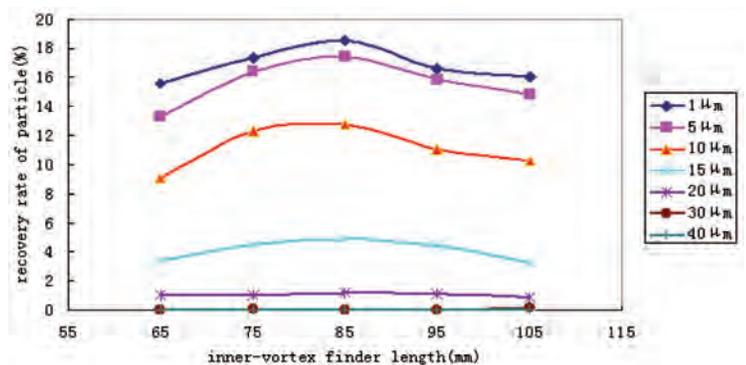


Fig. 8: Effect of the inner vortex finder length on the inner vortex recovery rate

3.8. EFFECTS OF UNDERFLOW ORIFICE DIAMETER ON THE RECOVERY RATE OF EXTERNAL OVERFLOW PARTICLES

The recovery rate of external overflow particles is defined as the mass flow rate ratio of the target particles at the external overflow orifice and the feedstock particles after separation. The recovery rates of external overflow particles with seven different sizes (1, 5, 10, 15, 20, 30, and 40 μm) were obtained through numerical simulations in cases where the underflow orifice diameter is 6, 8, 10, 12, and 14 mm. The content of fine particles was significantly higher than that of coarse particles. Furthermore, the decrease magnitude of coarse particles in the external overflow resulting from an increasing particle size was lower than that of coarse particles in the underflow, whereas the content of coarse particles in the internal overflow decreased rapidly as the particle

size increased. In other words, the size of particles in the external overflow was larger than that of the particles in the internal overflow.

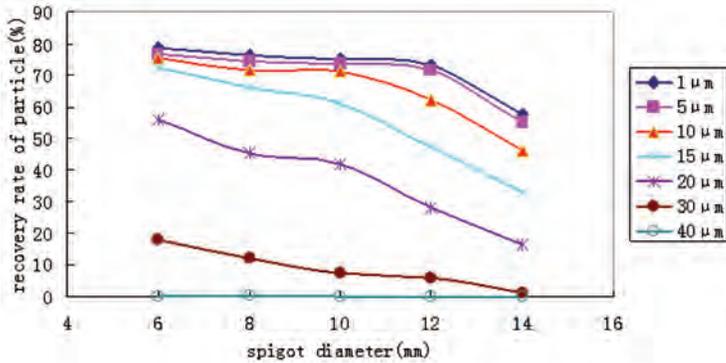


Fig. 9: Effect of the spigot diameter on the outer vortex recovery rate

Fig. 9. illustrates the recovery rates of external overflow particles at different underflow orifice diameters (X-axis is the underflow orifice diameter and Y-axis is the external overflow productivity). As shown in the figure, the recovery rate of external overflow particles increases with the underflow orifice diameter. Given the decreasing content of coarse particles, the size of particles in the external overflow decreases as the underflow orifice diameter increases.

3.9. EFFECTS OF INTERNAL OVERFLOW PIPE DIAMETER ON THE RECOVERY RATE OF EXTERNAL OVERFLOW PARTICLES

Fig. 10. shows the recovery rate curves of external overflow particles with particle size of 1, 5, 10, 15, 20, 30, and 40 μm and internal overflow pipe diameter of 5, 7, 9, and 10 mm. Obviously, the recovery rate of external overflow particles in double overflow pipe hydrocyclones decreases as the particle size increases. Fig. 11. illustrates the effects of internal overflow pipe diameter on the recovery rate of external overflow particles. Compared with the recovery rate of coarse particles, the recovery rate of fine particles decreases more significantly with the internal overflow pipe diameter. Combined with simulation analysis, the size of particles in the external overflow can be concluded to increase with the diameter of the internal overflow pipe.

3.10. EFFECTS OF THE INSERTED DEPTH OF THE INTERNAL OVERFLOW PIPE ON THE RECOVERY RATE OF EXTERNAL OVERFLOW PARTICLES

Fig. 12. shows the recovery rate curves of external overflow particles with inserted depth of the internal overflow pipe of 65, 75, 85, 95, and 105 mm, and the particle size is 1, 5, 10, 15, 20, 30, and 40 μm, respectively.

As shown in Fig. 12. The content of fine particles in the external overflow was higher than that of coarse particles. In cases where the inserted depth of the internal overflow pipe is <85 mm, the contents of coarse particles ($d = 30 \mu\text{m}$) and fine particles ($d = 10, 15, \text{ and } 20 \mu\text{m}$) increase with the inserted depth; whereas the content of fine particles increases more rapidly. In cases where the inserted depth of the internal overflow pipe is larger than the inserted depth of the external overflow pipe, the content of fine particles increases at a significantly higher rate with the inserted depth of the internal overflow pipe, indicating that the size of

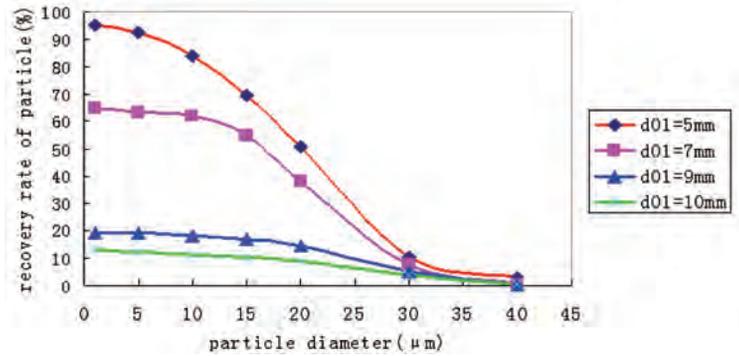


Fig. 10: Effect of the particle diameter on the outer vortex recovery rate

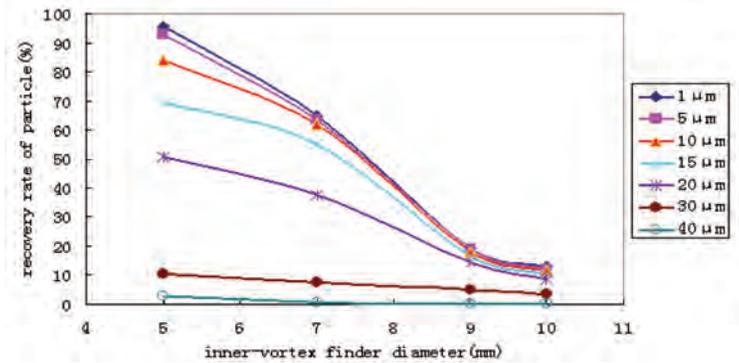


Fig. 11: Effect of the inner vortex finder diameter on the outer vortex recovery rate

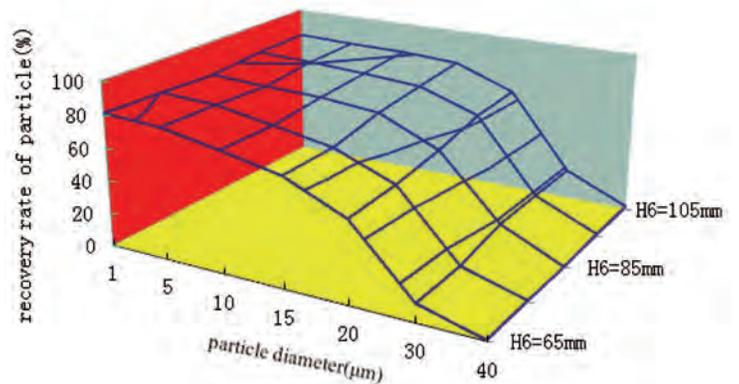


Fig. 12: Effect of the particle diameter on the outer vortex recovery rate

particles in the external overflow decreases as the inserted depth of the internal overflow pipe increases.

4. CONCLUSIONS

In this study, a precise grading double overflow pipe hydrocyclone that can achieve three different products with different size grades in one cycle is proposed. Using CFD, the influence of the underflow diameter, the overflow diameter, and the insertion depth of the overflow tube on classification efficiency is obtained. The results show that structural parameters play an important role in classification efficiency.

- (1) The underflow productivity increases as the underflow orifice diameter increases, the diameter of the internal overflow pipe increases, and the inserted depth of the internal overflow pipe decreases.

- (2) The numerical simulations revealed that the size of underflow particles decreased as the underflow orifice diameter increased and the diameter of the internal overflow pipe increased. The effects of the inserted depth of the internal overflow pipe on the size of underflow particles are dependent on the initial contents and decrease magnitudes of different particles.
- (3) The size of the internal overflow particles increases and the internal overflow productivity decreases as the underflow orifice diameter increases. The effect of the inserted depth of the internal overflow pipe on the internal overflow productivity is negligible.
- (4) The effects of the underflow orifice diameter, the diameter of the internal overflow pipe, and the inserted depth of the internal overflow pipe on the recovery rate of external overflow particles are as follows: the recovery rate and size of external overflow particles decrease as the underflow orifice diameter increases; the recovery rate of the external overflow particles decreases, whereas their size increases as the diameter of internal overflow pipe increases; the size of the external overflow particles decreases with the inserted depth of the internal overflow pipe, although its effect on the recovery rate of external overflow particles is negligible.

The results obtained in the study have important theoretical and practical values in engineering and will be valuable to explain the separation essence fully, explore the separation principle, enrich rotational flow classification theory, and develop energy-efficient multiproduct hydrocyclones. Further research based on this model is required, particularly for the cone angle and feeding inlet of a three-product hydrocyclone.

BIBLIOGRAPHY

- [1] Bhasker C. "Flow simulation in industrial cyclone separator". *Advances in Engineering Software*. February 2010. Vol.41-2. p. 220-228. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.advengsoft.2009.08.004>.
- [2] Pei-Kun Liu, Liang-Yin Chu, Jing Wang, et al. "Enhancement of Hydrocyclone Classification Efficiency for Fine Particles by Introducing a Volute Chamber with a Pre-Sedimentation Function". *Chemical Engineering and Technology*. March 2008. Vol.31. p. 474-478. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/ceat.200700449>.
- [3] Z. Qi, S.B. Kuang, A.B. Yu. "Numerical investigation of the separation behaviours of fine particles in large dense medium cyclones". *International Journal of Mineral Processing*. September 2015. Vol.142. p.35-45. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2015.05.006>.
- [4] Dwari R.K., Biswas M.N., Meikap B.C. "Performance characteristics for particles of sand FCC and fly ash in a novel hydrocyclone". *Chemical Engineering Science*. February 2004. Vol. 59. p.671-684. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2003.11.015>.
- [5] Mainza A., Narasimha M. Powell M.S. et al. "Study of flow behaviour in a three-product cyclone using computational fluid dynamics". *Minerals Engineering*. August 2006. Vol.19. p. 1048-1058. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2006.03.014>.
- [6] Mahmoud M. Ahmed, Galal A. Ibrahim, Mohamed G. Farghaly. "Performance of a three-product hydrocyclone". *International Journal of Mineral Processing*. April 2009. Vol.91. p. 34-40. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2008.11.005>.
- [7] M. Ghodrati, S.B. Kuanga, A.B. Yua, et al. "Numerical analysis of hydrocyclones with different vortex finder configurations". *Minerals Engineering*. August 2014. Vol.63. p.125-138. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2014.02.003>.
- [8] Narasimha M., Mainza A.N., Holtham P.N. "A semi-mechanistic model of hydrocyclones - Developed from industrial data and inputs from CFD". *International Journal of Mineral Processing*. December 2014. Vol.133. p.1-12. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2014.08.006>.
- [9] M. Ghodrati, S. B. Kuang, A. B. Yu, et al. "Computational Study of the Multiphase Flow and Performance of Hydrocyclones: Effects of Cyclone Size and Spigot Diameter". *Industrial and Engineering Chemistry Research*. November 2013. Vol.52. p.16019-16031. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/ie402267b>.
- [10] Y. Rama Murthy, K. Udaya Bhaskar. "Parametric CFD studies on hydrocyclone". *Powder Technology*. November 2012 Vol. 230. p.36-47. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2012.06.048>.
- [11] D.P. Obeng, S. Morrell. "The JK three-product cyclone-performance and potential applications". *International Journal of Mineral Processing*. March 2003. Vol.69. p. 129-142. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-7516\(02\)00125-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-7516(02)00125-4).
- [12] D.P. Obeng, S. Morrell, T.J. Napier-Munn. "Application of central composite rotatable design to modelling the effect of some operating variables on the performance of the three-product cyclone". *International Journal of Mineral Processing*. June 2005. Vol.76. p. 181-192. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2005.01.002>.
- [13] Mainza A., Powell M.S., Knopjes B. "Differential classification of dense material in a three-product cyclone". *Minerals Engineering*. June 2004. Vol.17. p.573-579. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2004.01.023>.
- [14] Ahmed, Mahmoud M., Ibrahim, Galal A., Farghaly, Mohamed G. "Performance of a three-product hydrocyclone". *International Journal of Mineral Processing*. April 2009. Vol.91. p.34-40. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2008.11.005>.
- [15] P. Bagdi, P. Bhardwaj, A. K. Sen. "Analysis and Simulation of a Micro Hydrocyclone Device for Particle Liquid Separation". *Journal of Fluids Engineering*. 2012. Vol.134. p. 1-9. DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.4006020>.
- [16] Yanxia Xu, Xingfu Song, Ze Sun et al. Numerical Investigation of the Effect of the Ratio of the Vortex-Finder Diameter to the Spigot Diameter on the Steady State of the Air Core in a Hydrocyclone. "Industrial and Engineering Chemistry Research". April 2013. Vol.52. p.5470-5478. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/ie302081v>.
- [17] Sonali Swain, Swati Mohanty. "A 3-dimensional Eulerian-Eulerian CFD simulation of a hydrocyclone". *Applied Mathematical Modelling*. March 2013, Vol.37. p. 2921-2932. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2012.06.007>.
- [18] Y.Rama Murthy, K.Udaya Bhaskar. "Parametric CFD studies on hydrocyclone". *Powder Technology*. November 2012. Vol.230. p.36-47. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2012.06.048>.
- [19] S.B. Kuang, K.W. Chu, A.B. Yu, et al. "Numerical study of liquid-gas-solid flow in classifying hydrocyclones: effect of feed solids concentration". *Minerals Engineering*. May 2012. Vol.31. p.17-31. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2012.01.003>.
- [20] Cullivan J.C., Williams R.A., Cross C.R. "Understanding the hydrocyclone separator through computational fluid dynamics". *Chemical Engineering Research and Design*. April 2003. Vol.81. p.455-466. DOI: <http://dx.doi.org/10.1205/026387603765173718>.
- [21] Hsieh K T. A phenomenological model of the hydrocyclone [D]. Salt Lake City: University of Utah, 1988.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (No.21276145) and Natural Science Foundation of Shandong province (ZR2013EEM016).

Análisis de las carencias en normalización para la trazabilidad metrológica de equipos médicos: caso de termómetros clínicos, ultrasonidos y onda corta



Analysis of gaps in standardization in metrological traceability for medical devices: case of clinical thermometers, ultrasounds and shortwave

Alfonso Marín Fernández-Sánchez¹, Alfonso López-Díaz², Carlos Jiménez-Alonso³, María Ana Saenz-Nuño⁴, Jesús De Vicente y Oliva⁵

¹ FREMAP. Hospital y Centro de Rehabilitación. Carretera de Pozuelo, 61 – 28222 Majadahonda (Madrid). Tfno: + 34 916 26 56 80

² Universidad Católica de Ávila. Calle de los Canteros, s/n – 05005 Ávila. Tfno: +34 920 25 10 20

³ Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Madrid. Calle Hernán Cortés, 13 – 28004 Madrid. Tfno: +34 915 31 55 83

⁴ Universidad Pontificia Comillas. Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICA). Dpto. Ingeniería Mecánica. Calle de Alberto Aguilera, 25 – 28015 Madrid. Tfno: +34 915 42 28 00

⁵ Universidad Politécnica de Madrid. ETSII. Calle José Gutiérrez Abascal, 2 – 28006 Madrid. Tfno: +34 913 36 30 60

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7854> | Recibido: 22/10/2015 • Aceptado: 21/03/2016

ABSTRACT

- The metrology or study of the measures, it was found at all levels of the reality of the society. The correct measure requires that international organizations that establish the market rules and the quality of life, defined what and how they're obtained. To this end, there is the international system of units and the International Bureau of Weights and Measures (IBWM), which define the units and to carry out experiments. Making that countries can recourse for a metrological traceability that guarantees all the variables that are used in the world. In the daily lives of the people there are multitude of magnitudes that are measured with a determined accuracy, as the water pressure or the electricity power. The calibrations are the processes for verifying the accuracy of the measures, by means of accuracy. The processes of calibration and verification of the magnitudes should be reproducible. The unified standards are documents that under the international recognition and with the participation of all the officers involved have been developed to establish a series of common requirements for which there is a compatibility in everything that is manufactured. There must be rules establishing the metrological traceability of measures or magnitudes, ensuring any measure or magnitude. In this set of rules have to be dealt with the magnitudes and medical measures, taking its relevant standardization. By time has not been a specific study with the standardization in terms of metrological traceability for medical equipment. This article aims to give a response to the situation for the clinical thermometers, ultrasound, and shortwave.
- Keywords: Electromedicine, medical unit, traceability, metrology, biomedicine, UNE rule.

RESUMEN

La metrología o estudio de las medidas, se encuentra a todos los niveles de la realidad de la sociedad.

La medida correcta requiere que las organizaciones internacionales que establecen las reglas de mercado y la calidad de vida, definan cuales son y cómo se obtienen. Con este fin existe el Sistema Internacional de Unidades y el Bureau Internacional de Pesas y

Medidas (BIPM), que definen las unidades y los experimentos para su realización. Haciendo que los países puedan acogerse a una trazabilidad metrológica que garantiza todas las magnitudes que se utilizan en el mundo.

En la vida diaria de las personas existen multitud de magnitudes que se miden con una exactitud determinada, como son la presión del agua o la potencia de la electricidad. Las calibraciones son los procesos para comprobar la veracidad de las medidas, por medio de la exactitud.

Los procesos de calibración y comprobación de las magnitudes deben ser reproducibles.

Las normas unificadas son documentos que bajo el reconocimiento internacional y con la participación de todos los agentes implicados se han desarrollado para establecer una serie de requisitos comunes para que haya una compatibilidad en todo lo que se fabrica. Deben existir normas estableciendo la trazabilidad metrológica de medidas o magnitudes, garantizando toda medida o magnitud. En este conjunto de normas tienen que estar las que se ocupen de las magnitudes y medidas médicas, teniendo su normalización correspondiente.

Por el momento no se ha realizado un estudio concreto de cómo se encuentra la normalización en cuanto a trazabilidad metrológica para los equipos médicos. Este artículo pretende dar una respuesta a la situación para los termómetros clínicos, ultrasonidos y onda corta.

Palabras clave: Electromedicina, equipo médico, trazabilidad, metrología, biomedicina, norma UNE.

1. INTRODUCCIÓN

Se ha de tener una descripción de la situación de los equipos médicos dentro de la gestión de la sanidad. La actualidad sanitaria no se entiende sin la tecnología, el avance de ésta ha llevado a hacer posibles diagnósticos y tratamientos nunca imaginables para cuidar al ciudadano. Este nivel tecnológico ha provocado que los equipos que se utilizan hayan llegado a una complejidad tal que se precisa personal muy especializado para su cuidado. Cualquier equipo médico que interactúa con el paciente, de forma directa o indirecta, puede suponer un riesgo para éste, bien por dañarle,

bien por influir en el diagnóstico que lleva a un tratamiento determinado (medicamentoso, fisiológico o de otro tipo).

La responsabilidad respecto al funcionamiento y los posibles eventos no deseados con estos equipos, está recogida para todos los agentes implicados en la directiva de producto sanitario transpuesta a ley nacional [20, 24, 30]. Esta directiva [20,24,30] no contempla la obligatoriedad de realizar calibraciones o comprobaciones metrológicas, que declaren la veracidad de las magnitudes en unidades (Fig. 1), pero los centros propietarios son los responsables. La normalización puede cubrir este espacio, permitiendo garantizar la trazabilidad metrológica, con la ayuda de los comités de normalización.

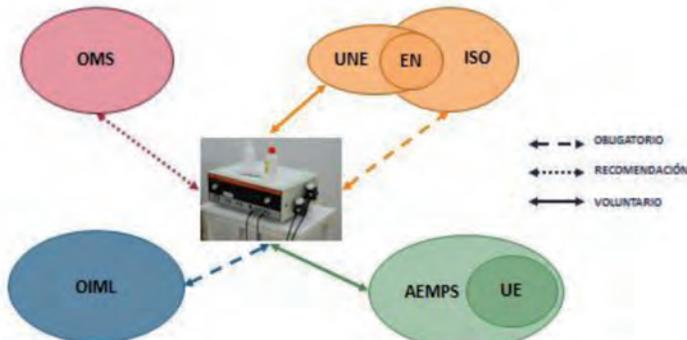


Fig. 1: Organizaciones que establecen principios para un correcto estado de los equipos médicos

Eventos como el ocurrido en Zaragoza [18], demuestran que las magnitudes deben estar trazadas a las unidades de referencia, es decir, estar dentro de la cadena de calibraciones que determina la veracidad de los valores utilizados.

Todo equipo médico que mide o genera una magnitud, sus medidas deben estar trazadas metrológicamente a los patrones de referencia nacionales o internacionales.

El presente artículo muestra un estudio realizado sobre la normalización que afecta a tres tipos de equipos hospitalarios representativos, de alto uso por personal sin conocimientos metrológicos y no altamente cualificado, poniendo de manifiesto las carencias en las normas existentes.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. NORMATIVA EXISTENTE PARA LOS EQUIPOS OBJETO DE ESTUDIO

Es poca la bibliografía normativa existente que trate casos o métodos de calibración, como el que se muestra en la (Fig. 2), para equipos médicos, pero si existe una gran cantidad de normas para equipos en aspectos de seguridad (<http://www.aenor.es>).

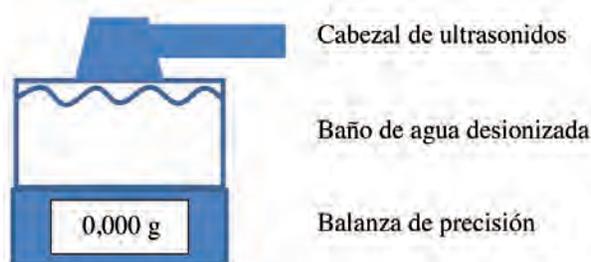


Fig. 2: Esquema de sistema de calibración de ultrasonidos, conforme a norma

Son varios los comités de AENOR que trabajan en las normas del ámbito de la salud y los equipos médicos:

- AEN/CTN 110 - MATERIAL DE ANESTESIA Y REANIMACIÓN RESPIRATORIA
- AEN/CTN 111 - APARATOS Y DISPOSITIVOS MÉDICOS Y QUIRÚRGICOS
- AEN/CTN 209 - EQUIPOS ELECTRÓNICOS

Los tres tipos de equipos objeto de estudio (termómetros clínicos, ultrasonidos y onda corta) han de estar sometidos a mantenimiento, seguridad y trazabilidad metrológica, por lo que el análisis contempla las diferencias en cuanto a la normalización existente para estos tres aspectos.

La trazabilidad metrológica se encuentra incluida en varios niveles de normas, hay normas que establecen los requisitos de gestión o técnicos de una organización y hay normas con requisitos específicos para equipos o aparatos, desde el nivel de gestión hasta el de equipo hay una serie de normas intermedias. Se pueden separar aquellas normas que intervienen en todos los niveles y establecen la secuencia para la trazabilidad metrológica de las medidas, desde requisitos generales hasta específicos para una medida con un equipo. Esto se puede entender representándolo en forma de pirámide jerárquica. En la parte superior están las normas que definen los sistemas de gestión, apoyándose esta en las normas que afectan a servicios, áreas o grupos asistenciales y quedando como pie el conjunto de normas que tratan los aspectos concretos de equipos o técnicas sanitarias, que establecen los requisitos específicos para los equipos y sus magnitudes (Fig. 3).

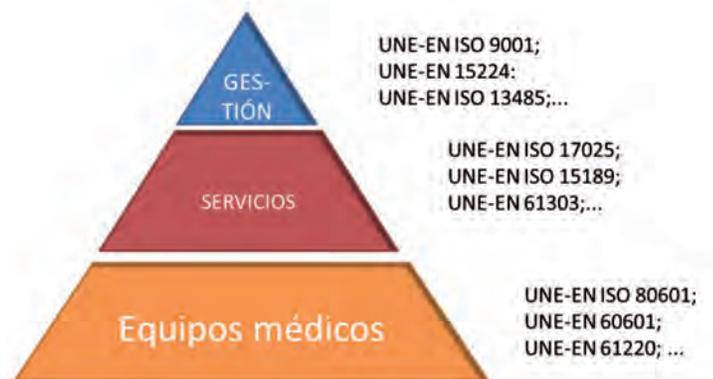


Fig. 3: Pirámide normativa de trazabilidad

3. RESULTADOS

La norma ISO 9001 [16] es el modelo más universalmente utilizado para la certificación de conformidad de sistemas de calidad.

La nueva versión de la ISO 9001 [16], en su apartado 7.1.5 define los requisitos que han de cumplir los equipos para una correcta trazabilidad metrológica de las mediciones, sean estos exigidos legalmente o por reglamentos, por el cliente o parte interesada o por la propia organización. Los instrumentos deberán ser verificados o calibrados antes de su utilización o en periodos de tiempo fijados, frente a patrones trazados a referencias internacionales o nacionales.

La norma UNE-EN ISO 13485:2013 [13] para la fabricación de equipos médicos, describe requisitos para el control de equipos de seguimiento y medición.

201.101.2 EXACTITUD DE LABORATORIO [15]

Este apartado de la norma define el método de calibración, estableciendo una exactitud de 0,3 °C para los termómetros clínicos de modo ajustado y 0,2 °C para el resto.

Los termómetros tienen establecido un rango de indicación en el que hay que realizar los ensayos.

Para la calibración se precisan los siguientes equipos:

- Baño de fluido o cuerpo negro.
- Termómetro de referencia con incertidumbre no superior a 0,07 °C (para k=2)

Pasos a seguir:

- a) Estabilizar el termómetro clínico a temperatura de mitad del rango.
- b) Llevar el termómetro de referencia a temperatura de mitad del rango del termómetro clínico, estabilizar durante 30 minutos.
- c) Se miden la temperatura de la referencia y el termómetro clínico, se registran.
- d) Se repiten los pasos c y d dos veces, una en el límite superior ± 1 °C y otra en el inferior ± 1 °C, del rango.
- e) Termómetros con rango extendido se realiza en los límites $\pm 0,5$ °C.
- f) Realizar el proceso para cuatro puntos.
- g) Se calcula el error de medición, e, para cada medición, ecuación (1).
- h) Se verifica que el error de medición cumple el requisito.

$$E = t_{TUT} - t_{ref} \quad (1)$$

donde

t_{TUT} temperatura medida.

t_{ref} temperatura de referencia.

Tabla I: Resumen de calibración norma UNE-EN 80601-2-56:2013[15]

La norma UNE-EN ISO 10012[12] en su apartado 4 de requisitos generales establece que *los requisitos metrológicos que la organización especifique necesarios para su actividad, deben derivar de los que ha de cumplir el producto y de los que sean necesarios para los equipos, así como para los procesos de medición.* Para los equipos médicos el producto es el diagnóstico, el tratamiento, etc. Utilizando la norma se deben definir los indicadores que permitan decidir que esas medidas aseguren el producto, considerando conceptos como están escritos en la norma: *error máximo permitido, incertidumbre permitida, límites de medición, estabilidad, resolución, condiciones ambientales o habilidades del operador.*

3.1. ANÁLISIS PARA LOS TERMÓMETROS CLÍNICOS

La norma UNE-EN 80601-2-56:2013[15] establece los requisitos que han de cumplir los termómetros clínicos eléctricos compactos con dispositivo de máxima (Tabla I), que registran la mayor temperatura en un tiempo definido.

La norma está muy orientada a la validación de modelos de termómetros por parte del fabricante, estableciendo requisitos a cumplir por los termómetros, pero también métodos de ensayos para comprobar que se cumplen esos requisitos.

La aplicación de todos los ensayos que contiene la norma asegura una correcta medición por parte de los termómetros que vende el fabricante. Con la realización de los mismos se asegura el correcto funcionamiento durante un tiempo, pero pueden ocurrir eventos en la utilización cotidiana que lleven a que el equipo no mida correctamente o que adquiera una deriva fuera de los errores permitidos. El propietario final del equipo debe comprobar que el equipo sigue teniendo la misma exactitud.

Los propietarios pueden recurrir a los ensayos de exactitud que describe la norma (201.101.2 Exactitud de laboratorio Tabla I), comprobando que los valores de medida que se obtienen con el termómetro, están dentro de los errores de medición que establece.

El ensayo de la norma es similar al de la recomendación 115[25] de la OIML, en la que se establecen requisitos de máximo error. Existen otras publicaciones que describen métodos en el mismo sentido, como el Procedimiento de Comprobación de Termómetros Clínicos [1] del Grupo de Metrología de la Salud de la AEC, que incluye un ejemplo con cálculos reales realizados en un hospital.

No solo existen estos métodos de calibración, como ejemplo el Hospital y Centro de Rehabilitación de FREMAP en Majadahonda, dispone de un procedimiento que se diferencia por la realización de correcciones para el estudio de los valores dados por el termómetro. Este método lleva a una trazabilidad completa de los termómetros, obteniendo un valor de incertidumbre para las desviaciones de las medidas.

Los propietarios de termómetros clínicos que lo utilizan para diagnóstico, seguimiento o tratamiento de pacientes, tienen que estar seguros de los valores medidos. En el año 2014 se acentuó la epidemia del Ébola, para la que se establecieron protocolos de control [28], en los que el parámetro que motivaba su completa aplicación era la medida de la temperatura.

La norma no incluye un requisito que establezca que todos los termómetros deben ser sometidos a todos los ensayos que se indican en la misma.

3.2. ANÁLISIS PARA LOS ULTRASONIDOS

Estos equipos se han de encontrar incorporados dentro de la gestión de la trazabilidad metrológica, conforme a los requisitos de la UNE-EN ISO 9001[16] y la UNE-EN ISO 10012[12]. De la misma forma que para los termómetros clínicos, no existe una norma que establezca la gestión de esa trazabilidad metrológica para equipos de fisioterapia o rehabilitación.

Las normas para equipos de ultrasonido han sufrido una evolución, de la anterior norma UNE 20640:1981[3] se ha llegado a

un conjunto de normas que se utilizan para su calibración[19]. Las publicadas por AENOR al respecto, son:

| | |
|---------------------------|---|
| UNE-EN 61161:1996[9] | Medida de la potencia ultrasónica en líquidos en el rango de frecuencia de 0,5 MHz a 25 MHz |
| UNE-EN 61689:1999[10] | Requisitos funcionales y métodos de medida en el rango de frecuencias de 0,5 MHz a 5 MHz. Sistemas de fisioterapia. Ultrasonidos. |
| UNE-EN 61157:1996[8] | Requisitos para la declaración de las emisiones acústicas de los aparatos de diagnóstico médico por ultrasonidos |
| UNE-EN 60601-2-37:2009[7] | Equipos electromédicos. Parte 2-37: Requisitos particulares para la seguridad de los equipos médicos de diagnóstico y monitorización por ultrasonido. |

Tabla II: Normas AENOR para ultrasonidos [19]

Con este conjunto de normas (Tabla II) está asegurada la trazabilidad metrológica de las magnitudes ultrasónicas utilizadas en medicina, tanto para diagnóstico como para terapia. Existen publicaciones de trabajos realizados para determinar la situación de estos equipos [26], dando información del número de equipos que se han sometido a calibración en centros sanitarios.

Las normas no contemplan ensayos que puedan comprobar las magnitudes que generan al interactuar con los tejidos, aunque hay laboratorios que se dedican a estudio al respecto para poder establecer estándares que permitan la calibración. Para el mantenimiento de equipos médicos, los servicios técnicos aplican la norma UNE-EN 62353:2009[11], pero esta norma no contiene requisitos de trazabilidad metrológica.

3.3. ANÁLISIS PARA ONDA CORTA

Los equipos de onda corta son muy habituales en los tratamientos rehabilitadores (por medio de una radiación electromagnética con frecuencia superior a 100 kHz se genera calor dentro del tejido del paciente, derivando en efectos fisiológicos y terapéuticos). Son equipos que no sólo se encuentran en hospitales, también hay en consultas profesionales.

No hay normas que establezcan métodos de calibración o comprobación metrológicas específicas, pero sí que existen normas en el ámbito de la seguridad de equipos.

| | |
|-----------------------------|--|
| UNE 20613-2-3:1985[2] | Equipos electromédicos. Parte 2: requisitos particulares de seguridad para los equipos de terapia por onda corta |
| UNE-EN 60601-2-3/A1:2000[5] | Equipos electromédicos. Parte 2: Requisitos particulares de seguridad para los equipos terapéuticos de onda corta. |
| UNE-EN 60601-2-3:1996[6] | Equipos electromédicos. Parte 2: Requisitos particulares de seguridad para los equipos terapéuticos de onda corta. |

Tabla III: Normas AENOR de seguridad para onda corta

Las normas de seguridad (Tabla III) no describen métodos de calibración o comprobación metrológica, sus ensayos se limitan a la seguridad del equipo. No existen publicaciones sobre daños causados por una incorrecta señal en el tratamiento por estos equipos. Los manuales de los equipos contienen advertencias para evitar daños por contaminación electromagnética, para los usuarios del equipo, siendo mayor si no existe una calibración [21].

También existen normas de seguridad y mantenimientos generales, recogidos en UNE-EN 60601-1[4] o UNE-EN 62353[11]. Los ensayos que contienen son los esenciales para seguridad y mantenimiento, pero no de trazabilidad metrológica.

4. DISCUSIÓN

El presente estudio pone de manifiesto la necesidad de afrontar la calibración de equipos y su situación, a partir de la normalización. El poder tener una situación clara de cómo llegar a establecer un método de calibración y con ello la seguridad en la medida de los equipos, se establece como una necesidad para la seguridad del paciente.

Son muchos los centros que disponen de los equipos analizados, para los que este documento les puede reportar el conocimiento de la situación normativa al respecto de la trazabilidad metrológica de estos.

Al destinarse el estudio a la situación normativa, mostrando las carencias a todos los niveles, aporta una visión a las organizaciones de normalización de las deficiencias existentes en el momento de dar trazabilidad metrológica a los equipos de estudio.

El trabajo se ha realizado sobre tres equipos modelo, pero podría extenderse a más equipos médicos. Existe normalización para asegurar la trazabilidad de los equipos de ultrasonidos, como se ha demostrado, pero no se ha tratado su coste y complejidad, aunque su calibración es necesaria.

Los equipos de onda corta se encuentran muy contemplados por las normas de seguridad eléctrica, pero la normalización sólo les afecta en aspectos de seguridad. Como se ve en el estudio, normativamente no hay un método de calibración descrito que asegure el funcionamiento del equipo en cuanto a sus magnitudes.

ACRÓNIMOS

- OMS: Organización Mundial de la Salud
- OIML: Organización Internacional de Metrología Legal
- ISO: Organización Internacional de Normalización
- UE: Unión Europea
- EN: Norma Europea
- AEMPS: Agencia Española de Medicamentos y Productos Sanitarios
- UNE: Una Norma Española
- AEC: Asociación Española para la Calidad
- AENOR: Asociación Española de Normalización
- AEN/CTN: Comité Técnico de Normalización de AENOR
- BIPM: Bureau International des Poids et Mesures

BIBLIOGRAFÍA

- [1] AEC, Grupo de Metrología de la Salud formado por vocales del Comité AEC de Metrología y por vocales del Comité AEC de Salud. «Procedimiento de comprobación de termómetros clínicos.» AEC - Asociación Española para la

- Calidad. Julio de 2013. http://www.aec.es/c/document_library/get_file?p_l_id=263206&folderId=1786171&name=DLFE-15309.pdf (último acceso: 2015).
- [2] AENOR. UNE 20613-2-3:1985 Equipos electromédicos. Parte 2: Requisitos particulares de seguridad para los equipos de terapia por onda corta. Norma UNE, AENOR, 1985.
- [3] AENOR. UNE 20640:1981 Prueba y calibración de los equipos de ultrasonidos para usos terapéuticos. Norma UNE, AENOR, 1981.
- [4] AENOR. UNE-EN 60601-1:2008 Equipos electromédicos. Parte 1: Requisitos generales para la seguridad básica y el funcionamiento esencial. Norma UNE, AENOR, 2008.
- [5] AENOR. UNE-EN 60601-2-3/A1:2000 Equipos electromédicos. Parte 2: Requisitos particulares de seguridad para los equipos terapéuticos de onda corta. Norma UNE, AENOR, 2000.
- [6] AENOR. UNE-EN 60601-2-3:1996 Equipos electromédicos. Parte 2: Requisitos particulares de seguridad para los equipos terapéuticos de onda corta. Norma UNE, AENOR, 1996.
- [7] AENOR. UNE-EN 60601-2-37:2009 Equipos electromédicos. Parte 2-37: Requisitos particulares para la seguridad de los equipos médicos de diagnóstico y monitorización por ultrasonidos. Norma UNE, AENOR, 2009.
- [8] AENOR. UNE-EN 61157:1996 Requisitos para la declaración de las emisiones acústicas de los aparatos de diagnóstico médico por ultrasonidos. Norma UNE, AENOR, 1996.
- [9] AENOR. UNE-EN 61161:1996 Medida de potencia ultrasónica en líquidos en el rango de frecuencia de 0,5 MHz a 25 MHz. Norma UNE, AENOR, 1996.
- [10] AENOR. UNE-EN 61689:1999 Requisitos funcionales y métodos de medida en el rango de frecuencias de 0,5 MHz a 5 MHz. Sistemas de fisioterapia. Ultrasonidos. Norma UNE, AENOR, 1999.
- [11] AENOR. UNE-EN 62353:2009 Equipo electromédico. Ensayos recurrentes y ensayos después de reparación del equipo electromédico. Norma UNE, AENOR, 2009.
- [12] AENOR. UNE-EN ISO 10012:2003 Sistemas de gestión de las mediciones. Requisitos para los procesos de medición y los equipos de medición. Norma UNE, AENOR, 2003.
- [13] AENOR. UNE-EN ISO 13485:2013 Productos sanitarios. Sistema de Gestión de la Calidad. Requisitos para fines reglamentarios. Norma UNE, AENOR, 2013.
- [14] AENOR. UNE-EN ISO 17025:2005 Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. Norma UNE, AENOR, 2005.
- [15] AENOR. UNE-EN ISO 80601-1-56:2013 Equipos electromédicos. Parte 2-56: Requisitos particulares para la seguridad básica y funcionamiento esencial de los termómetros clínicos para la medición de temperatura corporal. Norma UNE, AENOR, 2013.
- [16] AENOR. UNE-EN ISO 9001:2015 Sistemas de Gestión de Calidad. Requisitos. Norma UNE, AENOR, 2015.
- [17] Alfonso Fernández, María Ana Saenz, Nestor Pérez. «Gestión Metroológica en la Salud.» AENOR Revista de la normalización y la certificación, 2015: 38-43. ISSN: 2255-0801
- [18] Argos, Lucía. «El accidente del Clínico de Zaragoza, una cadena de fallos humanos única en el mundo, según los expertos.» Prensa diaria, 12 de Octubre de 1991: 1.
- [19] Chinchurreta Segovia, Francisco José. «Medida y caracterización de campos ultrasónicos médicos en el instituto de acústica del CSIC, PACS: 43.58. Vb.» CSIC. Instituto de Acústica, Laboratorio de Metrología Acústica. 2006. <http://digital.csic.es/bitstream/10261/7194/1/ULT002.pdf> (último acceso: Septiembre de 2015). ISBN : 84-87985-11-4
- [20] Consejo de las Comunidades Europeas. Directiva 93/42/CEE del Consejo, de 14 de junio de 1993, relativa a los productos sanitarios. Legislación Europea, DOUE, 1993.
- [21] European Commission. «Health and electromagnetic fields.» EU-funded research into the impact of electromagnetic fields and mobile telephones on health. 2005. http://www.etsist.upm.es/estaticos/catedra-coitt/web_salud_medioamb/documentos/brochure_en.pdf (último acceso: Septiembre de 2015). DOI: KI-70-05-528-EN-C ISBN: 9279001876
- [22] FREMAP, FREMAP Mutua Colaboradora de la Seguridad Social nº 61. Calibración de Termómetros Clínicos. Procedimiento interno, FREMAP, 2013.
- [23] JCGM (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP y OIML). Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados. Madrid: Centro Español de Metrología, 2012.
- [24] Ministerio de Sanidad y Política Social. Gobierno de España. Real Decreto 1591/2009, de 16 de octubre, por el que se regulan los productos sanitarios. Legislación Española, BOE, 2009.
- [25] OIML (Organisation Internationale de Métrologie Légale). «<http://www.oiml.org/en>» http://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r115-e95.pdf (último acceso: 12 de 2015).
- [26] Paul A Artho, Jason G. Thyne, Barry P. Warring, Chris D. Willis, Jean-Michel Brisme y Neal S. Latman. «A Calibration Study of Therapeutic Ultrasound Units.» *Physical Therapy*. Volume 82. Number 3. March 2002, 2002: 257-263.
- [27] R. Giannetti, M. A. Saenz, J.M. Valderrama, A. Fernández. «Desing and test of a semi-automated system for metrological verification of non-contact clinic thermometers.» *IOP Publishing.IMEKO. Journal of Physics: Conference Seris* 459 (2013) 012018, 2013. DOI:10.1088/1742-6596/459/1/012018.
- [28] Laboral, Ponencia de Alertas de Salud Pública y Planes de Preparación y Respuesta. Ponencia de Salud. «PROTOCOLO DE ACTUACIÓN FRENTE A CASOS SOSPECHOSOS DE ENFERMEDAD POR VIRUS ÉBOLA (EVE).» Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad. 26 de Noviembre de 2014. http://www.msssi.gob.es/profesionales/saludPublica/ccayes/alertasActual/ebola/docs/5.12.2014_Protocolo-Ebola.pdf (último acceso: Septiembre de 2015).
- [29] Secretaría General de Sanidad y Consumo. Dirección General de Salud Pública, Calidad e Innovación. Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad. «<http://www.msssi.gob.es>» http://www.msssi.gob.es/profesionales/saludPublica/ccayes/alertasActual/ebola/docs/5.12.2014_Protocolo-Ebola.pdf. 26 de 11 de 2014.
- [30] Unión Europea. Corrección de errores de la Directiva 2007/47/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de septiembre de 2007, por la que se modifica la Directiva 90/385/CEE del Consejo relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre los productos sanitarios implantables activos, la Directiva 93/42/CEE del Consejo relativa a los productos sanitarios y la Directiva 98/8/CE relativa a la comercialización de biocidas. Legislación Europea, DOUE, 2007.
- [31] WHO (World Health Organization). Electromagnetic fields (EMF) . 2015. <http://www.who.int/peh-emf/about/WhatisEMF/en/> (último acceso: Septiembre de 2015).

Control automático global sobre transporte neumático de productos en una planta de pastelería industrial



Global automatic control over pneumatic conveying for food products in an industrial bakery



Basil Mohammed-Al-Hadithi^{1,2}, José A. Perales-Gómez¹, Agustín Jiménez-Avello²

¹ Universidad Politécnica de Madrid. Calle Ronda de Valencia, 3 - 28012 Madrid. Tfno: +34 913 36 76 99.

² Universidad Politécnica de Madrid-CSIC. Centro de Automática y Robótica. Calle José Gutiérrez Abascal, 2 - 28006 Madrid. Tfno: +34 913 36 30 60

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7848> | Recibido: 27/01/2015 • Aceptado: 17/10/2015

ABSTRACT

• The main idea of this article seemed focused on designing a system of total control to become the transport system ingredients specializes in the manufacture of food products in a completely automated factory. The system must know at all times the demand for the products in each workstation, as well as other key features in the making.

At first automation is implemented only with the aid of a PLC logic controller (PLC) and a screen human machine interface (HMI) to allow an operator to monitor and control the entire installation without leaving your job. However, it was decided to carry out automation with a wide and varied selection of electronic devices. So also we implemented a Field Programmable Gate Array (FPGA), a microprocessor Arduino. The timing of all these devices can not only get a more economical and effective, but also a success of broad industrial interest, to cover several typical areas of Engineering.

• **Keywords:** Automation, FPGA, Communication, PLC, Food Industry, Microprocessor.

RESUMEN

La idea principal de este artículo se ve enfocada en diseñar un sistema de control total que convierta el sistema de transporte de ingredientes de una fábrica especializada en la elaboración de productos alimenticios en un proceso completamente automatizado. El sistema debe saber en todo momento la demanda de los productos en cada estación de trabajo, así como otras características clave en la fabricación.

En un primer momento se implementa la automatización únicamente mediante la ayuda de un autómata *programmable logic controller* (PLC, Controlador Lógico Programable) y una pantalla *human machine interface* (HMI, Interfaz Humano Máquina) que permitiese a un operario monitorizar y controlar toda la instalación sin moverse de su puesto. Sin embargo, se decide llevar a cabo una automatización con una selección más amplia y variada de dispositivos electrónicos. Así, se implementa además una *Field Programmable Gate Array* (FPGA, Vector Matriz de Puertas Programable), y un microprocesador Arduino. Con la sincronización de todos estos dispositivos se consigue no solamente un sistema más económico y eficaz, sino también un caso de éxito de amplio interés industrial, al abarcar varias áreas típicas de la Ingeniería.

Palabras clave: Automatización, FPGA, Comunicaciones, PLC, Alimentación, Microprocesadores.

1. INTRODUCCIÓN

La industria alimentaria incluye los colectivos de negocios y manufacturas que, en conjunto, proporcionan productos alimentarios a la gente para ser consumidos^[1]. El control de la higiene y la calidad son las principales prioridades en sus procesos. Para asegurar la calidad y seguridad en la comida, se deben implementar procesos de automatización y control en las operaciones de manufacturación de alimentos^{[2][3][4]}. Dichos procesos son realizados implementando una serie de dispositivos programados en base a una lógica determinada, y usando las diferencias entre los valores medidos de las variables controladas y sus valores deseados para regular el proceso de salida^{[5][6][7]}.

Inicialmente se cuenta con una fábrica especializada en la producción de productos alimenticios centrados en la pastelería. Las máquinas empleadas para ello responden a un sistema de control manual o semi-automático, así como los sistemas de transporte. Además contamos con unos silos en los cuales se depositan los ingredientes para los distintos productos.

Este trabajo se ve enfocado en diseñar un sistema de control total que convierta los sistemas de transporte de ingredientes de la fábrica en un proceso completamente automatizado. El sistema sabrá en todo momento las distintas cantidades de ingredientes que se encuentran en los silos, la demanda de los productos en cada estación de trabajo, así como otras características clave en la fabricación. Es decir, se intentará controlar todo el proceso de producción, de manera que éste se pueda realizar sin intervención humana y sabiendo en todo momento las condiciones de contorno de cada punto del sistema, empleando para ello las tecnologías adecuadas, tales como automatización de procesos con PLCs, pantallas de diálogo hombre-máquina, *Field Programmable Gate Array* (FPGA, *Vector Matriz de Puertas Programable*), microcontroladores y redes de comunicación.

En la Figura 1 se exponen las distintas partes del proceso a automatizar. Se han eliminado las referencias a los distintos nombres de los componentes dentro de la instalación y a la propia empresa donde se realizó por motivos de privacidad.

De izquierda a derecha del esquema, el sistema se comporta del modo:

- Contamos con tres silos de ingredientes, de los cuales uno contiene azúcar y los otros dos portan harina. Dichos silos llevan incorporados un fondo vibrante y una válvula de mariposa cada uno. La válvula de mariposa ha de abrirse para extraer el contenido de los mismos, mientras el fondo vibrante se activa para facilitar su vaciado.

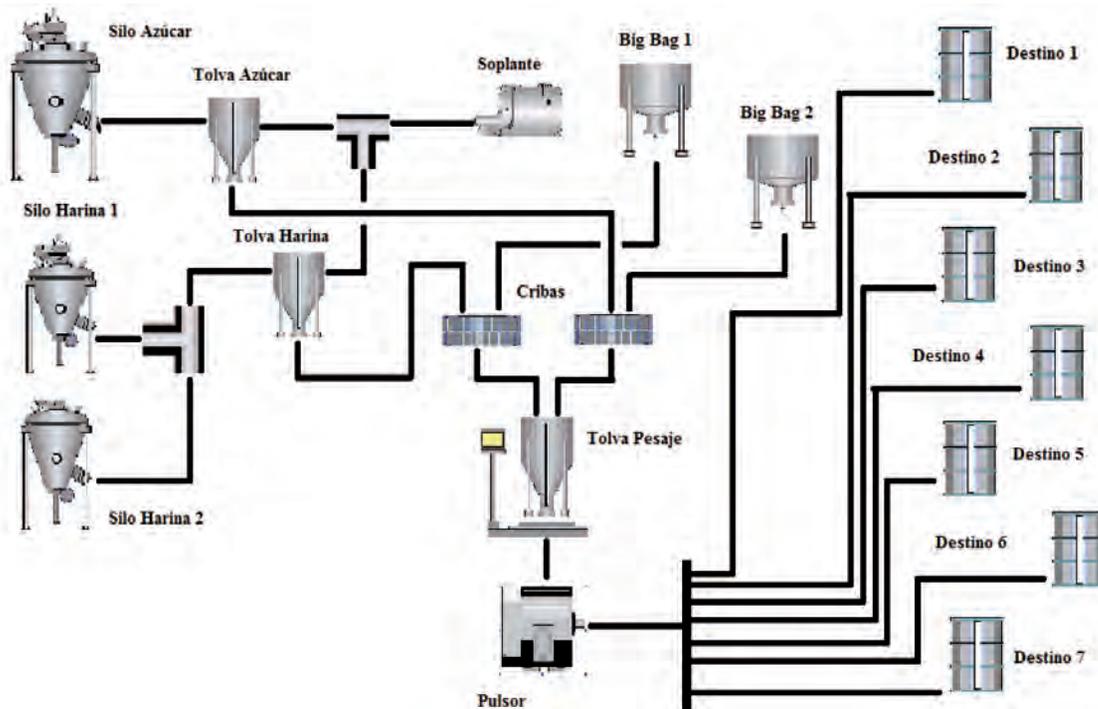


Fig. 1: Esquema explicativo de los componentes a automatizar dentro de la instalación

- Por medio de tuberías los silos están conectados a dos tolvas, una para el azúcar y otra para la harina. Los dos silos de harina convergen en la misma tolva, pero el contenido de estos no debe mezclarse, por lo que un desviador se encargará de conectar únicamente un silo con esta tolva. Cada tolva dispone de sensores que nos indican cómo de llenas están y una válvula que se abrirá cuando la tolva requiera ser vaciada.
- Para efectuar el transporte de ingredientes desde los silos hasta las tolvas de harina y azúcar contamos con un motor soplante, que dispone de una válvula rompe-vacío de seguridad, el cual aspirará el contenido de los silos hasta las tolvas correspondientes. Con el objetivo de evitar que los ingredientes lleguen al soplante, se han instalado filtros en las dos tolvas, los cuales necesitan un soplo de aire cada cierto tiempo para evitar que se atasquen mientras estén funcionando.
- También disponemos de dos contenedores portátiles llamados *Big Bag* (*Mochila Grande* en inglés). Uno de ellos se usa para introducir en el sistema azúcar glas, de manera que se ha instalado un tamiz para su filtrado. En el otro *Big Bag* se puede colocar cualquier ingrediente que se desee, funcionando como entrada alternativa de ingredientes dentro de la instalación.
- Las tolvas de harina y azúcar, y el *Big Bag* que no dispone de tamiz están conectados mediante tuberías a dos cribas de filtrado. Los ingredientes circularán por ella mediante la acción de tornillos sin fin. Tras ser filtrado, el material, mediante la acción de otros tornillos sin fin, será conducido hasta una tolva especial denominada Tolva de Pesaje. Dicha tolva costa de un volumen inferior al de las otras tolvas, pero dispondrá de un sensor especial que nos indicará el peso de ingrediente contenido en la misma.
- Cuando la Tolva de Pesaje sea llenada con la cantidad deseada del ingrediente pedido, su válvula se abrirá y verterá su contenido con la ayuda de otro tornillo sin fin a un pulsor.

Sin embargo, se decidió instalar entre la Tolva de Pesaje y el pulsor un separador de metales para evitar que el ingrediente no pueda contener ningún residuo metálico, mejorando la calidad del mismo.

- El pulsor es una máquina especial que se encargará de enviar el ingrediente al destino deseado mediante el aumento de presión dentro de su compartimento, por lo que el contenido será empujado al mismo. Disponemos de un total de siete destinos diferentes, cada uno situado en una parte de la fábrica. La necesidad de instalar dicho pulsor, y no otro sistema compuesto por una tubería y un tornillo sin fin, viene dada por el hecho de que las distancias entre esta parte del sistema y los distintos destinos es bastante elevada.
- Para la elección del destino correcto, se ha instalado una válvula especial con distintas etapas. El modelo comercial idóneo para este caso es una válvula de diez etapas, pues no existen de siete etapas, y además, así se prevé la adición de más destinos en un futuro.

Abordaremos el problema de la automatización del sistema de transportes, presentando los inconvenientes y planteamientos iniciales, así como el método a desarrollar para poder solucionarlos adecuadamente y respondiendo a las necesidades del cliente. Se verá cómo la automatización al completo estará gobernada por un PLC. El operario podrá comunicarse con él por medio de una pantalla táctil HMI para poder comprobar el estado del proceso e indicarle las acciones que la automatización debe llevar a cabo. Sin embargo, observaremos las diferentes mejoras en ciertas partes de la automatización para crear un sistema más efectivo. Se expondrá como desarrollar unos sensores de pesaje con un microprocesador, el cual podrá medir cualquier peso que le pidamos y transmitirá un número entero al PLC, para que este traduzca el valor a peso que estamos buscando. Así estos sensores de pesaje serán flexibles y en un futuro podremos implementarlos en cualquier parte de la instalación que se vaya precisando. Incluso hemos utilizado un dispositivo semiconductor denominado FPGA para controlar el arranque del motor utilizado para aspirar los ingredientes de los

silos. De esta forma conseguiremos que el autómata tenga menos responsabilidades y podamos ahorrar, al poder elegir modelos más económicos.

2. MATERIALES Y METODOS

En esta sección se exponen tanto los problemas iniciales a la hora de automatizar la instalación como las soluciones tomadas. Para una mayor comprensión, se ha dividido en varios apartados, cada uno correspondiente a un dispositivo en concreto utilizado.

2.1. AUTÓMATA DEL PROCESO

Todos los dispositivos posteriores descritos en este capítulo deberán ser conectados por medio de un autómata para su sincronización. Dicho autómata tendrá que ser capaz de recibir las diferentes señales de cada uno de ellos, tomar las decisiones acertadas y poder enviar señales de salida hacia los distintos dispositivos para que éstos realicen las acciones deseadas en ese preciso momento del proceso.

Sin embargo, su principal función será controlar la mayoría de los sensores y actuadores de toda la instalación. Adoptará por tanto la lógica más compleja y elaborada de todos los dispositivos. En otras palabras, será el núcleo de la automatización y pieza indispensable del mismo. Se decidió que dicho autómata fuera un modelo PLC por diversas consideraciones:

- A día de hoy, los PLCs han resultado ser de los dispositivos más fiables del mercado para el desarrollo de las tareas que se precisan realizar con nuestro autómata, con una capacidad de memoria, una velocidad de comunicación^[8] y un abanico de recursos a la hora de programar más que aceptables^[9].
- Posibilidad de programar un código en diversos lenguajes dentro del mismo PLC. Esto facilita en gran medida la tarea del programador al poder aprovechar las mejores ventajas de cada uno de los lenguajes empleados, lo que se traduce en una reducción de horas empleadas en la programación, que equivale a una reducción del coste de la automatización.
- Capacidad de añadirle adaptadores Ethernet y Puerto Serie para comunicarlo tanto con la pantalla HMI como con los sensores de pesaje que hemos desarrollado.

Todos los demás dispositivos enviarán al autómata señales de distinta índole (digitales, analógicas, puerto serie y protocolo MODBUS), que recogerá y analizará para generar la toma de decisiones acertada. Tras esto, el PLC enviará señales a todos los dispositivos indicándoles qué deberían hacer.

La instalación tiene dos Big Bag que pueden ser cargados con cualquier ingrediente y tres silos: dos de harina y uno de azúcar. Los ingredientes depositados en estos cinco contenedores irán a parar a siete destinos diferentes de la fábrica. Se podría programar únicamente el envío de un tipo de ingrediente específico a cada destino, puesto que por regla general solamente va a enviarse un tipo de ingrediente a cada destino. Sin embargo, por petición del cliente, se debe hacer una programación en la que se pueda enviar cualquier tipo de ingrediente a cualquier destino. Esto es debido a que el cliente desea poder enviar cualquier ingrediente a cualquier destino si así fuera necesario.

La Figura 2 muestra los distintos módulos de programación. Como puede observarse, a la izquierda de los nombres de las secciones hay un cuadrado con las letras "LD" y "SFC", el cual hace referencia al lenguaje en el que se han escrito. LD corresponde a lenguaje *Ladder*, extensamente utilizado para la programación de autómatas. SFC corresponde a Diagrama Funcional Secuencial. Es

un lenguaje inspirado en los graficet, el cual permite realizar programas de forma muy organizada y de fácil lectura.

En primer lugar, el programa recoge toda la información de las entradas del PLC, la proporcionada por la pantalla HMI a través de comunicaciones por protocolo MODBUS, y el valor enviado por puerto serie desde el sensor de pesaje elaborado con el microprocesador *Arduino*. Con dicha información, las demás secciones pueden empezar a trabajar y tomar decisiones.

Se ha dividido las secciones para que administren una parte del proceso cada una. Cada sección se dividió a su vez en dos secciones, una escrita en SFC y otra en LD. Las secciones SFC están programadas de manera similar a un graficet, indicando, según la información y las decisiones tomadas en todo el proceso, en qué estado se encuentra la sección correspondiente. Las secciones LD analizan el estado en el que se encuentra su sección SFC correspondiente, y en función de ello toman las decisiones pertinentes.

Tras ejecutarse todas las secciones anteriores, la última parte del programa recoge las decisiones (en forma de señales del PLC) producidas durante la ejecución, y ordenan activar los actuadores que deban funcionar en ese momento preciso del proceso. También recogen los posibles errores producidos para parar la sección o secciones correspondientes si fuera necesario, y preparan la información que enviarán por comunicaciones a la pantalla HMI para que ésta se muestre al operario.

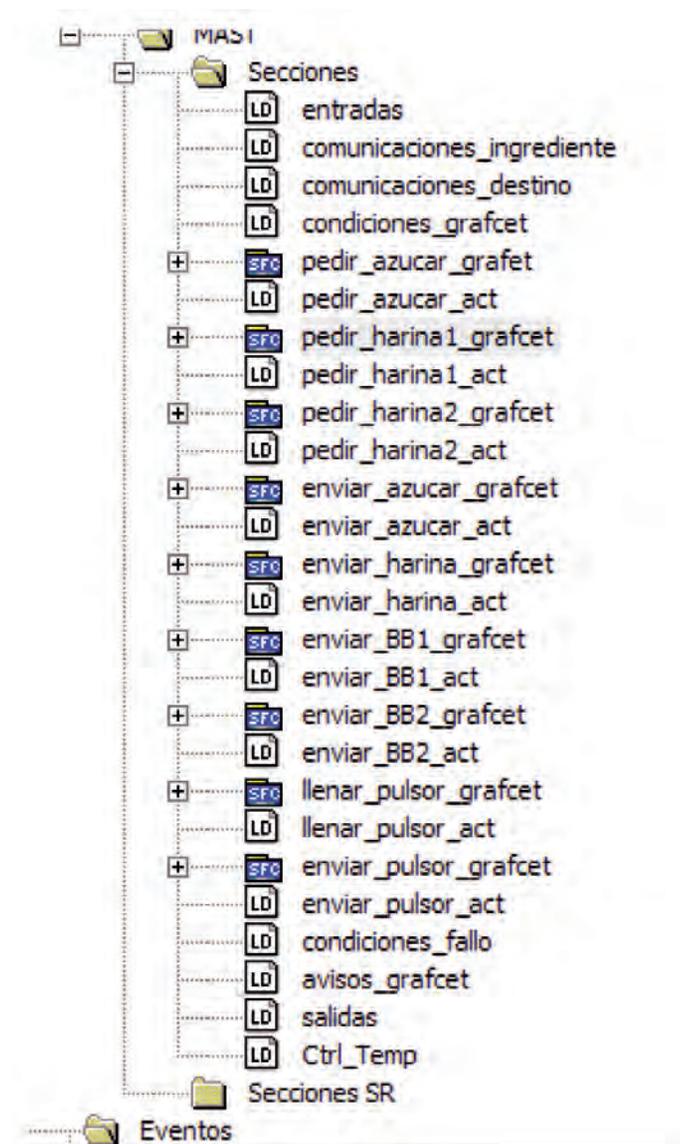


Fig. 2: Conjunto de secciones que componen el programa del PLC

2.2. CONTROL DEL SOPLANTE MEDIANTE FPGA

Los soplantes de aire son usados extensamente en la industria [10]. El rendimiento de dichos soplantes depende principalmente de que su diseño permita un buen aprovechamiento de la presión de aire. Para un buen funcionamiento del soplante que suministra ingredientes a las tolvas pulmón, se deben controlar además de este un determinado número de válvulas.

Con el objetivo de controlar de la manera más eficiente posible dicho soplante, se ha decidido implementar una FPGA en el sistema que funcione como una caja negra. Su tecnología hace del proceso de modelado una tarea simple y reduce el tiempo de diseño del sistema [11][12]. Otras razones por las que se ha elegido su implementación son la oportunidad de poder mejorar la automatización en un futuro (por ejemplo, añadiendo un control robusto) sin tener que emplear otro dispositivo [13][14][15] y su bajo coste [16].

Por un lado, al comienzo de funcionar el soplante, este tiene que trabajar sin vacío para evitar un sobreesfuerzo. Dispondremos para ello de una válvula rompe-vacío, la cual tendrá que abrir el sistema de tuberías cuando el soplante se arranque, y cerrarse a los tres segundos, para, con el soplante en pleno funcionamiento, crear un vacío que permita a los ingredientes desplazarse hasta la tolva pulmón correspondiente.

Antes de que el soplante comience a funcionar, el sistema de tuberías debe de estar conducido hacia la tolva pulmón deseada. Hay dos caminos disponibles, la tolva pulmón de harina y la tolva pulmón de azúcar. Hay que controlar que esté abierta la válvula del ingrediente deseado, y solo esa. De lo contrario, no se podrá

activar el soplante, pues los ingredientes podrían mezclarse antes de tiempo.

También, al tiempo que se comprueba que las válvulas que conducen el material están en la posición correspondiente, se deben activar la rotativa y el fondo vibrante del silo correspondiente, para que el material fluya mejor desde el silo hasta la tolva correspondiente.

2.3. PESAJE DE SILOS

Disponemos de tres silos, uno de azúcar y dos de harina. Los silos presentan una forma cilíndrica, achatada en la parte inferior. Están sujetos por una estructura con tres columnas. Debajo de cada silo hay un fondo vibrante y una rotativa para conducir los ingredientes desde los silos a las tolvas pulmón. Se necesita medir el pesaje de los distintos silos del sistema.

El principal inconveniente es que no se puede situar un único sensor en el centro, dado que esa zona está ocupada. Se tratará de resolver con tres sensores de pesaje situados en las columnas. Para unirlos, utilizaremos micro-controladores, dado que, para un sensor, el coste de una FPGA sería excesivo, y con un micro-controlador se solucionaría perfectamente, ahorrando en costes.

La idea principal es diseñar un microcontrolador que le lleguen las tres señales de los tres postes de forma analógica, hacer un algoritmo para sumarlas y mandar el valor del pesaje como una salida, ya sea analógica o digital.

De forma teórica, se ha desarrollado un circuito que cuenta con tres puentes de *Wheatstone* [17] con una resistencia piezoeléctrica

cada uno que sea capaz de resistir la tercera parte del peso total como mínimo. Esto es debido a que los tres puentes están situados en las tres columnas del silo de forma equidistante y formando un triángulo equilátero, por lo que las fuerzas se distribuyen equitativamente entre los tres.

Un circuito perfectamente válido para la toma de señales podría ser el que se encuentra en la Figura 3. La señal de salida del puente de *Wheatstone* posiblemente sea muy pequeña, por lo que habría de amplificarla. Para ello, empleando un amplificador operacional que regule su ganancia para conseguir un voltaje de 0-5V es suficiente.

La ventaja de este circuito es que, debido al uso del primer amplificador operacional, la salida será lineal, lo que nos evitará muchos fallos más adelante. Además, regulando las dos resistencias R1 y R2 podremos ajustar la ganancia a la deseada. La ecuación (1) recoge el valor de la tensión de salida en función de las resistencias empleadas.

$$V_s = \frac{R_2 + V}{2R_1} x \quad (1)$$

Estos resultados son teóricos. En la práctica si el circuito resultante emplease amplificadores operacionales

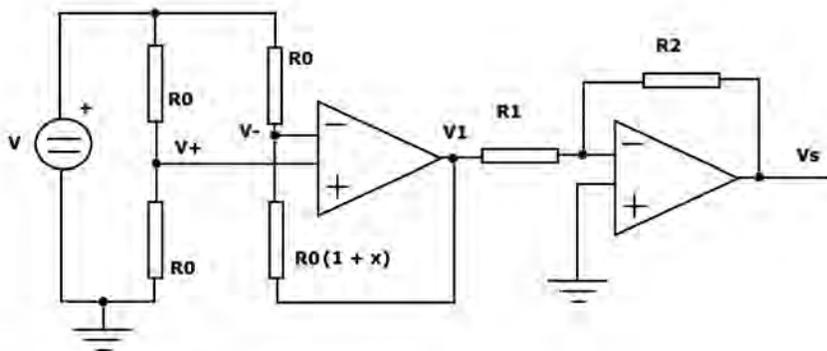


Fig. 3: Circuito teórico de acondicionamiento de la señal de entrada al Arduino

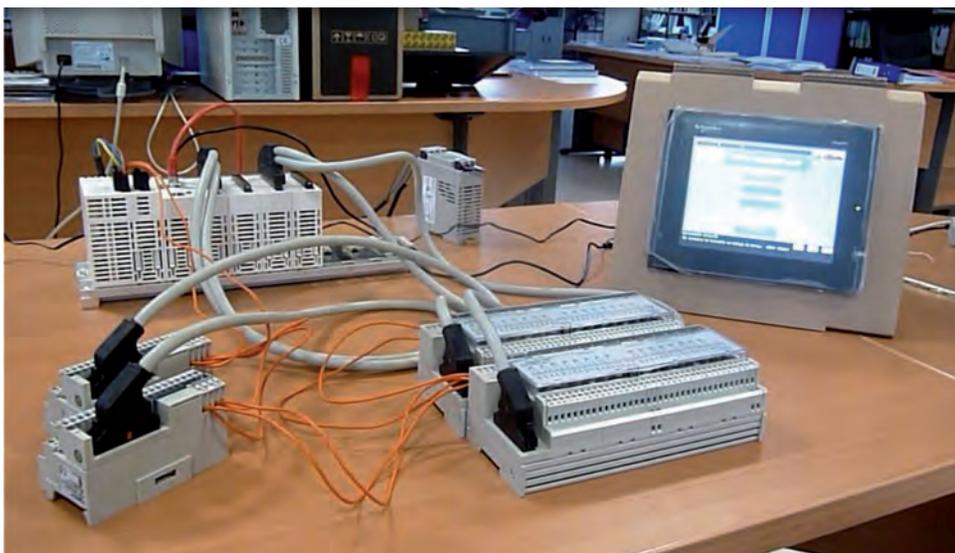


Fig. 4: Conjunto del autómatas PLC y la pantalla HMI empleados en la automatización, conectados mediante protocolo MODBUS

normales y resistencias piezoeléctricas con esta configuración, se vería muy influenciado por el ruido eléctrico y sería poco preciso.

Para la práctica se recomienda utilizar células de carga industriales [18] [19]. Estas células de carga tienen un circuito ya integrado, y en la hoja de características el fabricante especifica el voltaje que devuelve en función del peso, y el peso máximo permitido, por lo que simplemente sería conectarlas a las columnas del silo.

2.4. PANTALLA HMI

Para un correcto funcionamiento del proceso, el operario debería poder tener alguna forma de interactuar con toda la instalación, tanto para realizar las peticiones de material como visualizar las fases en las que se encuentra. Existen varios dispositivos capaces de realizar tal función, cuyas diferencias tanto de calidad como precio varían hasta dar lugar a un amplio catálogo de posibilidades [20] [21] [22].

En la industria, el uso de las pantallas HMI se ha extendido exponencialmente debido a varios factores, como su gran flexibilidad [23] y su capacidad de poder comunicarse con otros dispositivos [24]. Por estas razones, se ha decidido implementar una pantalla HMI en la instalación para que el operario pueda visualizar todo el proceso sin moverse de su puesto al tiempo que pueda realizar las peticiones deseadas. Para mayor comodidad tanto para el operario como para el programador, elegiremos una pantalla táctil.

Una vez establecida la conexión, para compartir una variable, basta con declararla en los dos dispositivos y asignarle la misma dirección de memoria. Por ejemplo, si disponemos de una variable llamada "ejemplo", y la declaramos en los dos dispositivos en el hueco de memoria M200.1, al cambiarla en un dispositivo será cambiada automáticamente en el otro. Ante dos cambios de la variable, se ha decidido que predomine la acción del PLC, al tener este más peso dentro de la instalación.

3. RESULTADOS

Tras los cálculos, desarrollos y programaciones realizadas, se consiguió automatizar satisfactoriamente el sistema de transporte de ingredientes de la fábrica.

Toda la automatización está gobernada por el PLC, el cual recoge el valor de la mayoría de los sensores implementados en la instalación, toma decisiones según los datos obtenidos, y en base a esas decisiones acciona los actuadores correspondientes. Por medio del protocolo MODBUS, está comunicado con una pantalla HMI, que muestra toda la información del proceso al responsable de la planta. En la Figura 4 puede observarse el PLC conectado a la pantalla HMI mediante el protocolo MODBUS por medio de una red.

El PLC controla que todo el proceso funcione perfectamente, elaborando las decisiones pertinentes para que el pedido deseado se realice correctamente. Existe la posibilidad de "conectarnos on-line" al PLC mientras está realizando su labor, y, gracias al lenguaje SFC, podemos observar el estado exacto en el que se encuentran cada una de las secciones, por lo que su comprensión resulta extremadamente sencilla. En la Figura 5 puede observarse una de las secciones durante una simulación de un pedido.

Desde la pantalla, el trabajador puede realizar cualquier pedido que desee, especificando el ingrediente, la cantidad y el destino que desee. El automatismo será el encargado de coordinar todo el proceso para que el sistema lleve a cabo dicho pedido. Además, el responsable de planta puede observar mediante la pantalla el estado actual de su pedido y de todo el sistema de transportes. También le informará de los posibles fallos que hayan acontecido durante la realización del mismo.

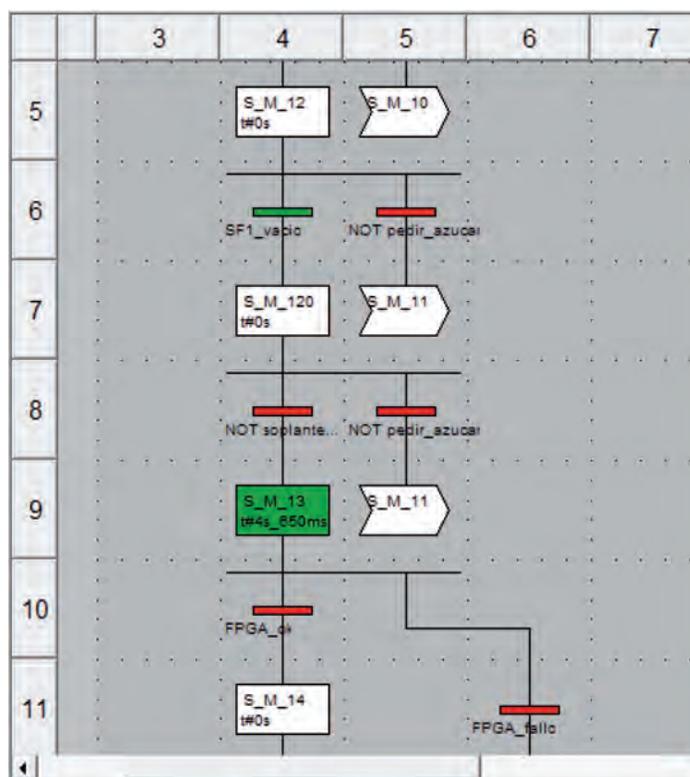


Fig. 5: Sección del PLC durante una simulación. Se muestra en qué estado está y las distintas condiciones

El PLC consta de un total de 21 entradas y 23 salidas. Gracias a la inclusión de la FPGA que controla el soplante, hemos ahorrado entradas y salidas dentro del PLC, lo cual ha abaratado el coste de la instalación al no tener la necesidad de adquirir más módulos de entradas y salidas [25].

Sin embargo, la principal ventaja que nos ha aportado la FPGA es el hecho de tratar el arranque del motor soplante y el llenado de las tolvas de harina y azúcar como una caja negra. El automatismo únicamente ha necesitado de tres salidas y dos entradas para controlar toda esa sección dentro del proceso. Las salidas del PLC necesarias indican al entorno del soplante si se desea azúcar o harina, una señal de marcha para que comience a extraer y una señal de emergencia por si se necesita detener el proceso. Como entradas al PLC, éste recibe del entorno del soplante si la extracción se está llevando a cabo correctamente y si se ha producido algún fallo.

Para comprobar sus resultados, se realizó la simulación de su código mediante un *testbench*, mostrado en la Figura 6. El tiempo de simulación que necesitamos es muy superior al que nos podía ofrecer el simulador, por lo que se realizó una reducción proporcional del tiempo. Es decir, conseguimos una simulación que comprobaba de igual forma el funcionamiento de la FPGA, pero en un tiempo menor y proporcional para evitar fallos.

La simulación comienza pidiendo un envío de azúcar, prosigue gestionando un envío de harina, y termina comprobando posibles situaciones en las que pudiera darse un error. El funcionamiento general de la FPGA, como puede observarse, es posicionar el desviador hacia el silo determinado, activar el motor soplante, y una vez se ha posicionado el desviador correctamente, poner en funcionamiento la válvula de mariposa y el fondo vibrante del silo correspondiente. Al tiempo la válvula rompe-vacio actúa, comenzando la extracción. Cada 30 segundos, se produce un pulso de aire para evitar que el filtro de la tolva se atranque.

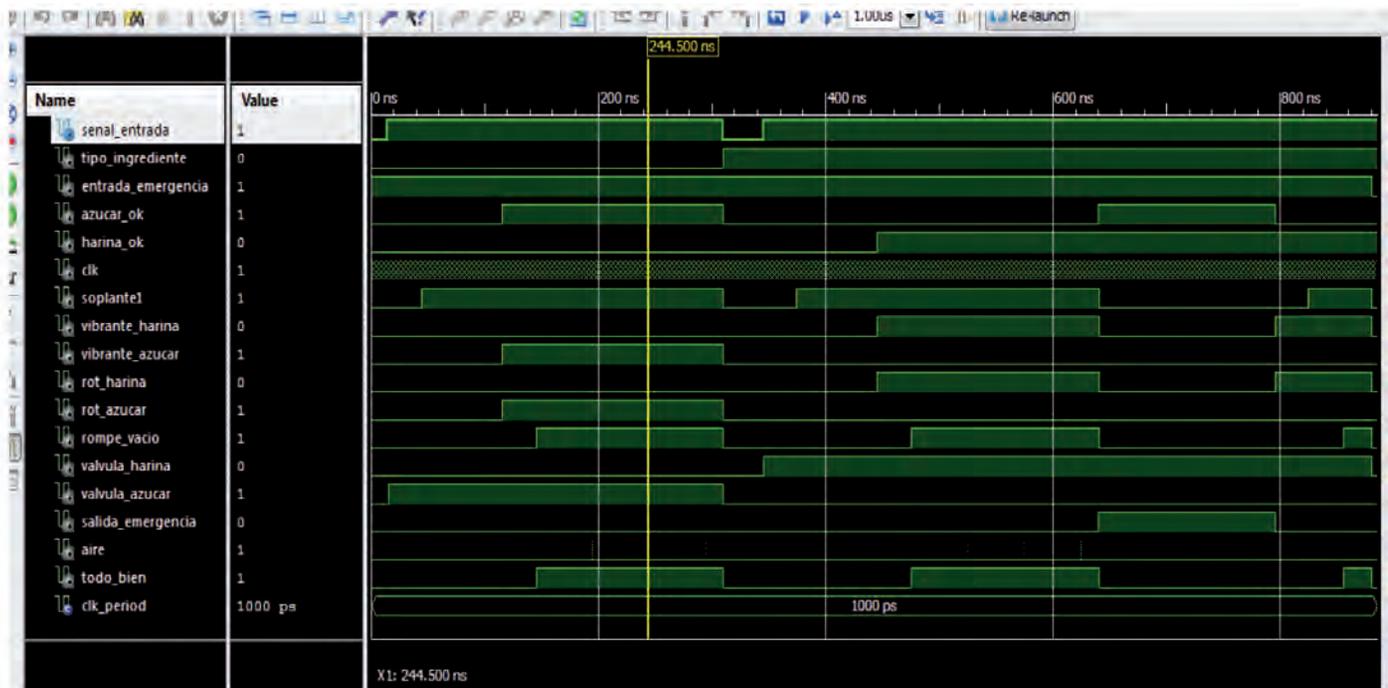


Fig. 6: Simulación de FPGA mediante su testbench

El desarrollo del sensor de pesaje con un microprocesador Arduino nos ha dado la posibilidad de, no solamente ahorrar en la automatización, sino también disponer de sensores universales que en un futuro, si se desea, podrán implementarse en otras partes de la instalación. Las placas Arduino recogen el resultado de la medición del circuito electrónico y la envían a través de su puerto serie al PLC. Pero esta medición no es de carácter absoluto, sino proporcional. La placa Arduino envía un valor entero comprendido entre 0 (valor enviado cuando el depósito a medir se encuentre vacío) y 3072 (valor enviado cuando el depósito se encuentra lleno). Se han empleado tres circuitos, uno por cada pata, por lo que la placa lee tres voltajes, traduce cada voltaje en un número entero de 0 a 1024 (para valores entre 0V y 5v) y los suma. De ahí que el valor máximo sea 3072.

Este valor es recogido por el autómata y convertido al valor real del peso del depósito medido por medio de una linealización del resultado. La mayor ventaja de este sensor es que puede ser implementado en cualquier depósito que queramos medir y tendremos un valor fiable acerca de su peso, ya que su error relativo es siempre el mismo. Por tanto, hemos conseguido un sensor de pesaje flexible a un precio muy económico [26] [27] [28] y con un error que, aunque dependa del peso máximo permitido en el depósito a medir, siempre será aceptable y cumplirá los requisitos para poder ser incluido en la automatización [29].

En definitiva, hemos realizado la automatización del sistema de transportes de la fábrica de forma satisfactoria y económica, gracias al empleo de conocimientos y dispositivos de diversas áreas de la Ingeniería. Se adjunta una tabla con precios orientativos para la realización de la automatización:

| Nombre | Precio |
|---|--------|
| Autómata único con módulos suficientes para la realización de la automatización | 800€ |
| Pantalla HMI | 400€ |
| FPGA | 80€ |
| Arduino | 25€ |

Tabla I: Lista de precios orientativos

Si bien es verdad que el uso de tantos dispositivos distintos podría presentar un coste mayor a priori [30], sin duda a largo plazo resultará más eficiente y económico, puesto que en el momento que se desee implementar un control más avanzado en la instalación o dotarle de mayor complejidad para abarcar más áreas dentro de la planta, no tendremos que invertir en más dispositivos o dispositivos mejores, pues con este diseño la mejora tecnológica de la instalación puede realizarse sin inconveniente alguno [31].

4. DISCUSIÓN

4.1. CONCLUSIONES

Se podría haber automatizado todo el proceso con una serie de autómatas conectados a la pantalla HMI. Sin embargo, se ha decidido incluir tal variedad de dispositivos para poder realizar mejoras en el proceso en un futuro. Nuestro artículo constituye, de esta forma, un nexo de unión entre varias áreas de Ingeniería Electrónica Industrial.

Se ha demostrado así, que a pesar de ser de artes distintos, pueden unirse entre sí para conseguir resultados tremendamente eficaces, tanto en términos de calidad, pues la automatización ha resultado ser bastante eficiente en su cometido, como en términos económicos, debido a que gracias a la inclusión de diferentes dispositivos, el autómata escogido no precisa de una gran capacidad, por lo que puede elegirse modelos más baratos.

Quizás el resultado más importante del artículo ha sido la creación de una zona dentro de la fábrica que no dispone de la necesidad de la acción humana más allá de la supervisión. Hemos conseguido, a través de la pantalla HMI, poder comunicarnos con la fábrica de manera que la maquinaria haga todo el trabajo, logrando una automatización completa.

4.2. FUTUROS TRABAJOS

Observando el desarrollo del artículo, las futuras labores a desempeñar pueden tomar dos vías distintas: mejora de la automatización, o automatización de otras partes de la fábrica. Dentro de la propia automatización, podría estudiarse si los protocolos de

comunicación empleados son los óptimos en estos tipos de automatización, o por el contrario, hay protocolos mejores o más avanzados. Incluso, podría estudiarse la posibilidad de comunicar los dispositivos de manera inalámbrica.

Con vistas al resto de la fábrica, podría continuarse la automatización de las instalaciones, avanzando en el proceso y evaluando si sería necesaria la instalación de más autómatas a lo largo del sistema. En una situación óptima, podría a llegar a poder crearse una fábrica completamente automatizada en la que la acción del ser humano, como ya hemos conseguido en esta parte de la instalación, sea inexistente en una ausencia de fallos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] K. Khodabandehloo, "Robotics in food manufacturing", en *Advanced Intelligent Mechatronics '97. Final Program and Abstracts*, IEEE/ASME International Conference on, (Page: 10), Conference Location: Tokyo, Japan, Year: 1997. DOI: 10.1109/AIM.1997.652868
- [2] T. Mäkinen, T. Varkoi and J. Soini, "Integration of Software Process Assessment and Modeling" en *Management of Engineering and Technology*, Portland International Center for (Page(s): 2476 – 2481), Conference Location: Portland, OR, Year: 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/PICMET.2007.4349583>
- [3] X. Wang, Y. Zhao, Y. Liao, "Dynamic Performance Analysis of PID Controller with one Memristor" en *Information Science and Technology (ICIST)*, International Conference on (Page(s): 1234 – 1237), Conference Location: Nanjing, Year: 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICIST.2011.5765194>
- [4] M. Khalid and S. Omatu, "A neural network based control scheme with an adaptative neural model reference structure" en *Neural Networks, IEEE International Joint Conference on (Volume: 3, Page(s): 2128 – 2133)*, Conference Location: Singapore, Year: 1991. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IJCNN.1991.170702>
- [5] G. H. Lee and S. Jung, "Control of Inverted Pendulum System Using a Neuro-Fuzzy Controller for Intelligent Control Education" en *Mechatronics and Automation, 2008, ICMA 2008. IEEE International Conference on (Page(s): 965 – 970)*, Conference Location: Takamatsu, Year: 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICMA.2008.4798889>
- [6] F. Gandino and M. Rebaudengo, "On Improving Automation by Integrating RFIP in the Traceability Management of the Agri-Food Sector" en *Industrial Electronics, IEEE Transactions on (Volume: 56, Issue: 7 Page(s): 2357 – 2365)*, Year: 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2009.2019569>
- [7] P. Dao-gang, Z. Hao, Y. Li, L. Hui, "Design and Realization of Modbus Protocol Based on Embedded Linux System" en *Embedded Software and Systems Symposia, ICESS Symposia '08. International Conference on (Page(s): 275 – 280)*, Conference Location: Sichuan, Year: 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICISS.Symposia.2008.32>
- [8] J. Huidobro. (2003). "La PLC, Alternativa Para El Acceso". *DYNA*, 78(4). 24-26
- [9] M. Gandiaga-Alberdi. (2002). "Automatización En Líneas De Proceso Continuo". *DYNA*, 77(3). 27-32
- [10] L. Jitang, L. Zhouhang, L. Jianfeng et al., "Air Flow Simulation in High-pressure Air Blower with Splitter Blade" en *Electric Information and Control Engineering (ICEICE)*, 2011 International Conference on (Page(s): 1969 – 1972), Conference Location: Wuhan, Year: 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICEICE.2011.5777012>
- [11] I. Garcia-Pacheco, E. Guzman-Ramirez, E. Guerrero-Ramirez, C. Pacheco-Agüero. (2015). Design Of FPGA-Based Experiments At Engineering Education To Control Direct Current Motors. *DYNA*, 90(4). 372-379. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7049>
- [12] X. Weikun, Z. Huibin and Z. Qiuli, "Testing FPGA Devices on a Automatic Test Equipment" en *IEEE Journal of Applied Physics (Volume: 99, Issue: 11, Page(s): 114302 – 114304)*, Conference Location: Singapore, Year: 2013.
- [13] M. Y. Niamat, K. M. Attravanam, M. Alam, "Testing FPGAs using JBits RTP cores", en *Circuits and Systems*, 2005. 48th Midwest Symposium on (Volume: 2, Page(s): 1131 – 1134), Conference Location: Covington, KY, Year: 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MWSCAS.2005.1594305>
- [14] E. Sanchez-Tapia, J. Melo-Urbe. (2010). "Low Cost Control For Haptic Devices". *DYNA*, 85(3). 237-244. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/3018>
- [15] F. Mayer-Lindenberg, "High-level FPGA programming through Mapping Process Networks to FPGA Resources" en *Reconfigurable Computing and FPGAs*, 2009. ReConFig'09. International Conference on (Page(s): 302 – 307), Conference Location: Quintana Roo, Year: 2009. DOI: 10.1109/

ReConFig.2009.73

- [16] Jian Gong, Tao Wang, Jiahua Chen et al., "An Efficient and Flexible Host-FPGA PCIe Communication Library" en *Field Programmable Logic and Applications (FPL)*, 2014 24th International Conference on (Page(s): 1 – 6), Conference Location: Munich, Year: 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/FPL.2014.6927459>
- [17] R. Ab Rahim, A.N. Nordin, N. Abd Malik, B. Bais, B.Y. Majlis, en "Fabrication of monolithic Wheatstone bridge circuit for piezoresistive microcantilever sensor", *Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP)*, 2015 Symposium on, (Pages: 1 – 5), Conference Location: Montpellier, Year: 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DTIP.2015.7160998>
- [18] Y. A. Badamasi, "The Working Principle of an Arduino" en *Electronics, Computer and Computation (ICECCO)*, 2014 11th International Conference on (Page(s): 1 – 4), Conference Location: Abuja, Year: 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICECCO.2014.6997578>
- [19] A. A. Galadima, "Arduino as a learning tool" en *Electronics, Computer and Computation (ICECCO)*, 2014 11th International Conference on (Page(s): 1 – 4), Conference Location: Abuja, Year: 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICECCO.2014.6997577>
- [20] B. Dorninger, W. Beer, M. Moser, R. Zailinger and A. Kern, "Automated Reengineering of Industrial HMI Screens by Static Analysis" en *Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)*, 2014 IEEE (Page(s): 1 – 4), Conference Location: Barcelona, Year: 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ETFA.2014.7005269>
- [21] P. Falkman, E. Helander and M. Andersson, "Automatic Generation: A way of ensuring PLC and HMI standards" en *Emerging Technologies Et Factory Automation (ETFA)*, 2011 IEEE 16th Conference on (Page(s): 1 – 4), Conference Location: Toulouse, Year: 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ETFA.2011.6059201>
- [22] J. Cancelas-Caso, F. Mateos-Martín, (2001). "Aplicaciones De La Informática En La Industria". *DYNA*, 76(4). 29-36
- [23] P. Dao-gang, Z. Hao, Y. Li, L. Hui, "Design and Realization of Modbus Protocol Based on Embedded Linux System" en *Embedded Software and Systems Symposia, 2008. ICESS Symposia '08. International Conference on (Page(s): 275 – 280)*, Conference Location: Sichuan, Year: 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICISS.Symposia.2008.32>
- [24] E. Mandado, J.M. Acevedo, C. Fernández, J.I. Armesto, S. Pérez, "Autómatas programables. Entorno y aplicaciones", Universidad de Vigo (Page: 464-465), Editorial: Ediciones Paraninfo, S.A. Year: 2005
- [25] E. Mandado, J.M. Acevedo y S. Pérez, "Controladores lógicos y autómatas programables" (Page: 112-282), Editorial: Boixareu Editores, Year: 1992
- [26] J. Amador, "Electrónica Industrial", (Page: 261-268), Ed. EUITI, Universidad Politécnica de Madrid, Year: 2004
- [27] Castro-Gil, M., Garcia-Villa, P., Martin-Gutierrez, S. (2015). "ANDROID APP FOR WIRELESS SYSTEM CALCULATION OF HYDRIC FLOW IN OPEN FOIL WITH WINDLASS HYDROMETER". *DYNA New Technologies*, 1(1). DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT7340>
- [28] Suarez-Marcelo, J., Fernandez-Muñoz, J., Moreno-Rabel, M.. (2015). A SUPERVISED EMERGENCY STOP ELECTRONIC DEVICE FOR INDUSTRIAL MACHINERY. *DYNA*, 90(5). 556-562. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7481>
- [29] J.M. Angulo, I. Angulo, "Microcontroladores PIC. Diseño práctico y aplicaciones" (Page: 1-4), Editorial: McGraw Hill, Year: 1997.
- [30] Rodriguez-Mendez, M., Carcel-Carrasco, F. (2014). COST OF THE CHANGE PROCESS OF TOOLS. *DYNA*, 89(5). 504-509. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7139>
- [31] Otero-Mateo, M., Pastor-Fernandez, A., Portela-Nuñez, J.. (2015). CREATION OF VALUE THROUGH THE PROJECT DIRECTION AND MANAGEMENT. *DYNA*, 90(1). 18. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7182>.

AGRADECIMIENTOS

A OPEGASA S.L., pues ayudó a financiar los dispositivos empleados en las simulaciones e implementaciones de la automatización. El trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, proyecto DPI 2014-53525-C3-1-R, Navegación Asistida Mediante Lenguaje Natural.

Simulation verification analysis of anchoring characteristics of transverse rib steel bar during pull-out test



Análisis de la verificación por simulación de las características de anclado de barras de acero con entalla transversal durante el ensayo de extracción



Shuren Wang^{1,2*}, Huaiguang Xiao², Chen Cao^{1,3}, Zhengsheng Zou^{1,2} and Xiliang Liu^{1,2}

¹ Opening Laboratory for Deep Mine Construction, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, China

² School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, China

³ School of Civil, Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong, Wollongong 2522, NSW, Australia

* E-mail: w_sr88@163.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8077> | Recibido: 06/04/2016 • Aceptado: 23/06/2016

RESUMEN

- Para evaluar las características mecánicas de anclado de una barra de acero con entalla transversal durante el ensayo de extracción, se llevaron a cabo diferentes métodos complementarios, como pruebas de laboratorio, simulación numérica y análisis teórico. Los resultados muestran que el bloque de anclado, durante el desarrollo de los ensayos de extracción, presenta un modo de fallo por agrietamiento y que la curva de relación fuerza de anclaje-desplazamiento, puede ser definida en cuatro pasos: fase de despegue, fase de avance, fase de agrietamiento y fase residual. Por eso la presentación analítica y las expresiones obtenidas para la curva de relación fuerza de anclaje-desplazamiento en los diferentes pasos se realizó usando un modelo de cilindro por elementos. Además, los resultados de la simulación numérica verificaron que el bloque cara a la entalla transversal desarrollaba la fuerza en forma de cuña y que se destruyó mostrando un modo de fractura por agrietamiento. Se encontró que la fuerza de anclaje y bloque residual cara a la entalla transversal aumentaban durante los ensayos de extracción con el incremento de la altura de la entalla. Estos resultados pueden facilitar una referencia básica para los diseños de refuerzo y la ingeniería práctica de construcción.
- **Palabras clave:** Ensayo de extracción, Barra con entalla transversal, Modelo de cilindro por elementos, Simulación numérica.

ABSTRACT

To evaluate the anchoring mechanical characteristics of transverse rib steel bar during the pull-out test, the comprehensive methods such as laboratory test, numerical simulation and theoretical analysis were conducted. The results show that the anchorage grout during the pull-out tests display the splitting failure mode and the relationship curve of anchorage force-displacement can be simplified into four stages: debonding stage, ascent stage, splitting stage, and residual stage. Then the analytical derivation and segregate expressions to the relationship curve of anchorage force-displacement at different stages were carried out by using the nested cylinder model. Furthermore, the numerical simulation results verified that the grout in front of the transverse rib presented the wedge-shape force and the anchorage grout displayed the splitting failure mode ultimately. It was found that the anchorage force and the remained grout in front of the transverse rib increase with the transverse rib height increasing during the pull-

out tests. The results can provide a basic reference for the reinforcement design and safety construction of practice engineering.

Keywords: Pull-out test, Transverse rib bar, Nested cylinder model, Numerical simulation.

INTRODUCTION

The stress of steel bar in the reinforced concrete structure mainly depends on the bond anchorage effect between the steel bar and concrete, and the anchorage force of steel bar is the basis of the concrete structure. The engineering accidents of anchorage failure often occur owing to the loss of anchorage force of the steel bar. If the anchorage force is invalid, the bearing capacity of concrete structure is disabled, and the structure is destroyed. For anchoring theory lags the practice at present, it is of important theoretical significance and practical value to study the bearing performance of the pulled steel bar by using the methods such as laboratory experiments, numerical simulation, and theoretical analysis.

In recent years, there have been obtained lots of achievements about the anchorage mechanical property between the steel bar and bonding material. For examples, C. Li and B. Stillborg stated that both the bolt-grout interface and the rock-grout interface were easy to be destroyed in the rock anchor system, and the finally failure mode was depended on which interface was more weak during the pull-out test [1]. E. Hoek and D. F. Wood deemed that the bolt-grout interface was easier to be destroyed than other positions [2]. C. Cao et al. pointed out that it was very important to study the interaction mechanism in the rock anchor system [3]. S. Yazici and P. K. Kaiser proposed the bond strength model to analyze the bond of the bolt-grout interface, and the grout stress state could be divided into three stages: elastic stage, fully split stage, and partially split with an elastic portion stage [4]. C. R. Windsor regarded the fully-grouted bolt as continuously mechanically coupled system and carried out the anchorage mechanical property study [5]. J. H. Chen et al. investigated the shear stress distribution along the full length of the cable/grout interface when peak load occurring, they found that the non-uniform shear stress distribution along the interface was more apparent for cable bolts with long embedment length [6]. Y. C. Yin et al. studied the stress distribution evolution law and influencing factors along bolt anchorage segment by using laboratory tests and particle flow simulation [7]. Q. B. Wang et al. researched the complicated coupling effect between the anchorage force loss of anchor cable

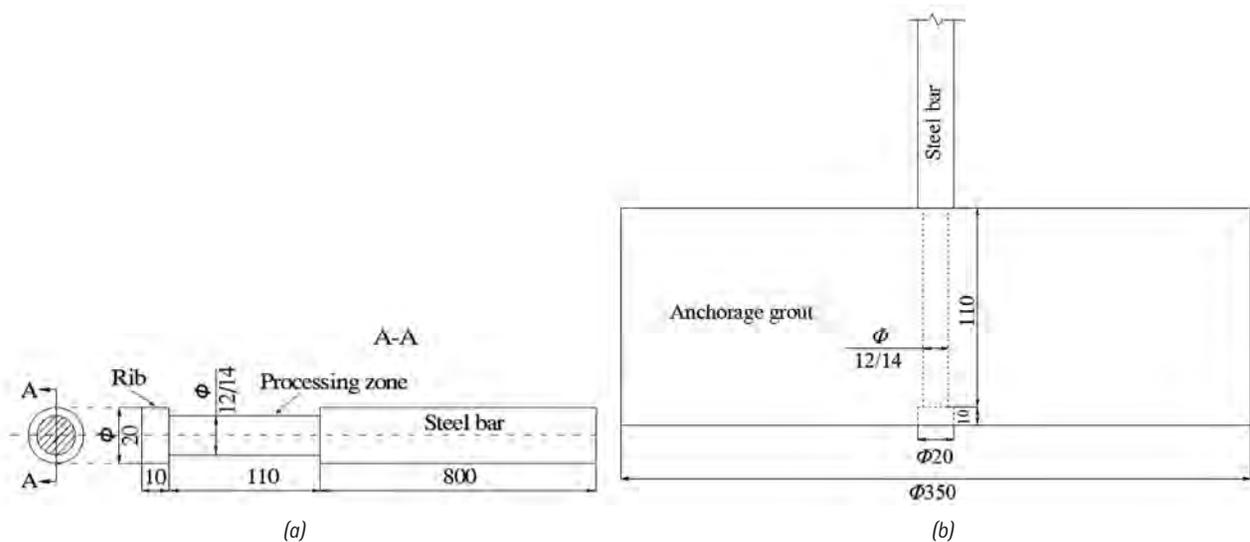


Fig. 1: Sizes of the rib bar and the test model (mm). (a) Sizes of the transverse rib bar; (b) Sizes of the test model

and rock or soil creep [8]. X. R. Liu et al. analyzed the pre-stress loss laws under different tensile and cyclic loads in field tests [9].

In terms of the anchoring force and displacement relationship, L. A. Lutz and P. Gergely obtained the shear and displacement relationship by using the pull-out test of the special signal rib bar [10]. S. Ma et al. proposed the shear stress distribution model of the bolt-grout interface, and deduced the anchorage force and displacement relationship for the fully-grouted bolts [11]. B. Benmokrane et al. analyzed the shear bond stress-slip relationship of the bolt-grout interface by using the tri-linear simplified model [12]. F. F. Ren et al. proposed that the full-range behavior of the bolt-grout interface consists of five consecutive stages: elastic stage, elastic-softening stage, elastic-softening-debonding stage, softening-debonding stage, and debonding stage. And they deduced the anchorage force-displacement relationship for each stage [13]. C. A. You deduced the formula of shear stress and axial force distribution along the axis direction of the fully-grouted bolts by using Mindlin's displacement solution [14]. M. H. Huang et al. established a non-linear differential equation of the anchorage segment load transfer and the non-linear shear slip model of the anchoring bolt based on the load-displacement curve. And they obtained the analytical solutions of shear stress and axial force behavior along the anchor rod [15]. W. P. Zhao et al. simulated the bond-slip relationship between steel bar and concrete by using ANSYS, and obtained the relationship curve of anchorage force-slip [16].

In a word, the above mentioned results mainly focused on the anchor force-displacement relations of the fully-grouted steel bar being pulled out from the anchorage body. This paper will analyze the anchorage mechanical property and anchorage force-displacement

relationship during the transverse rib steel pull-out tests under the condition of the grout displaying the splitting mode. The remainder of this paper is organized as follows. Section 2 conducts the numerical and analytical analysis of anchorage performance of the transverse rib bar, respectively. Section 3 makes a discussion on the results. Section 4 summarizes the conclusions.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 SPECIMENTS AND TEST PROCESS

The basic materials in the pull-out test include the ordinary portland cement, HRB400 steel bar and PVC tube. As shown in Fig. 1(a), the transverse rib bar was made as the rib height 3.0 mm or 4.0 mm, respectively. The physical model of the anchorage grout was a cylinder, for which the diameter was 350 mm and the height was 120 mm (Fig. 1(b)). There were four specimens for different rib heights being tested in the laboratory, respectively.

The sensor of BL100-V-1000 was used to measure the displacement in the pull-out test and the electrical resistance strain pressure sensor of BLR-1/50t was used to monitor the axial force in the test, as shown in Fig. 2, and the eight-channel data acquisition system software of BL800-E8 was used to record the data of displacement and axial force in the test. According to the Building Anchor Bolt Test Method (China Code DG/TJ08-003-2000), the loading rate was 10 kN/min and the loading should be kept continuous and uniformly.

The test process was as follows: Firstly, the test specimen was fixed outside of the reaction force frame, and the loading device, the compressive and displacement sensors were set inside of the frame as shown in Fig. 2. Secondly, the steel bar was sequentially through the hole, the hollow jack and the compressive sensor, and the forepart of steel bar was fixed by the spherical anchorage. One end of the displacement monitoring was fixed to the frame, and the other end was fixed to the compressive sensor by the magnet. Thirdly, under the above mentioned conditions, when the anchorage force exceeded its maximum or the specimen was split completely, the loading test would be stopped.

2.2 NUMERICAL ANALYSIS OF ANCHORAGE PERFORMANCE

According to the test model in the laboratory (Fig. 1(b)), the numerical computational model was built as shown in Fig. 3. To improve the computational efficiency, the computational model

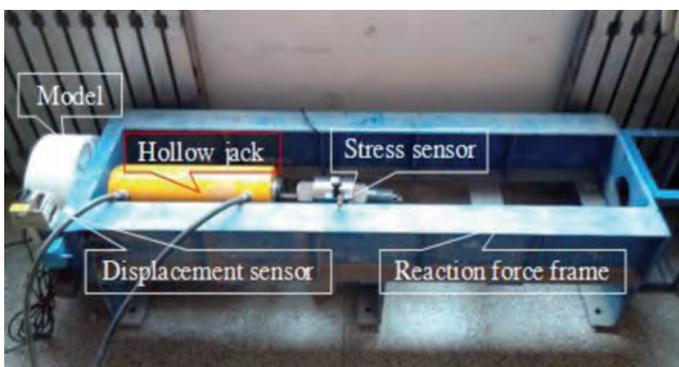


Fig. 2: Test equipment of the pull-out test

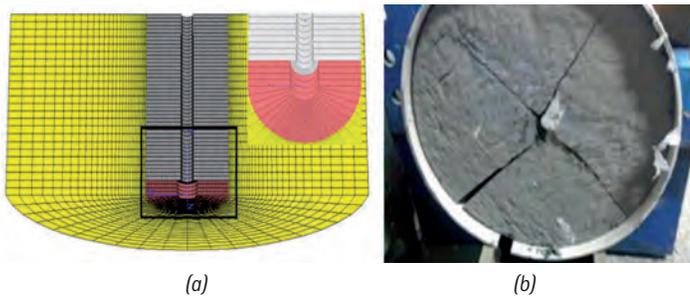


Fig. 3: The computational model (a) and the radial distribution cracks of the grout (b)

was simplified the semi-cylinder model, and the diameter and the height of the model were 350 mm and 120 mm, respectively. The middle void of the model was the position of the anchorage steel bar. Since the anchorage steel bar was only affected by axial force, and the axial force only acted on the transverse rib, the steel bar axial force was equivalent to the transverse rib force, and the anchorage steel bar could be modeled by null model in FLAC^{3D}.

The out and top boundaries of the model were fixed, and the bottom boundary was free. The radial boundary of the steel bar in the middle void position of the model was fixed, and the axial boundary of the steel bar was free.

As shown in Fig. 3, the anchorage grout finally displayed the split failure mode when the transverse rib bar was pulled out during the pull-out test. It was supposed that the grout material conformed to the strain softening strength model in FLAC^{3D}. The mechanical parameters of the grout were listed in Table 1.

In the numerical simulation test, a velocity was applied to the transverse rib plane of the model to simulate the pull-out force, and the axial displacement of the anchor steel bar and the maximum unbalanced force in front of transverse rib plane were recorded automatically. When the recorded anchorage force declined and showed the stable residue force, the numerical simulation was stopped.

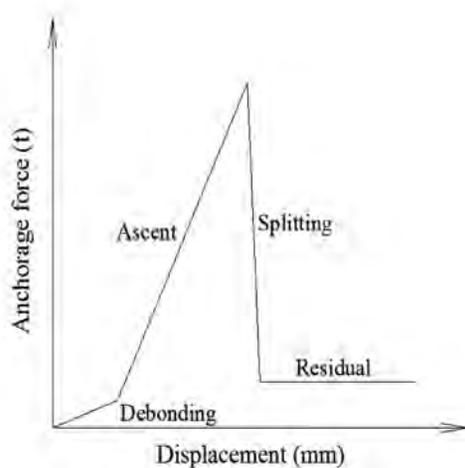


Fig. 4: The simplified anchorage force-displacement curve

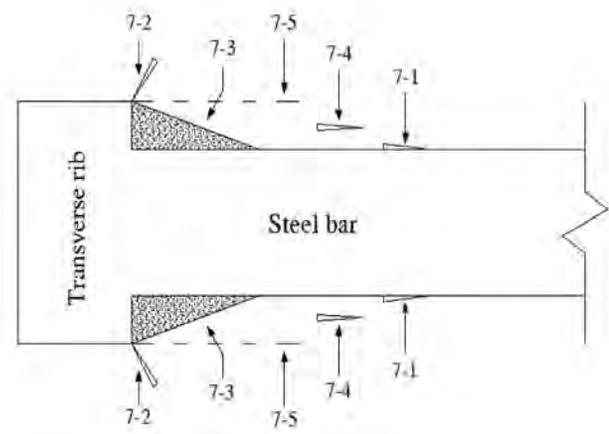


Fig. 5: The developing cracks in the pull-out test

2.3 ANALYTICAL EXPRESSION OF ANCHORAGE PERFORMANCE

As shown in Fig. 4, based on the laboratory test results, the anchorage force-displacement curve could be divided into four stages, such as debonding stage, ascent stage, splitting stage, and residual stage. The evolutionary process analysis of mechanical mechanism was shown in Fig. 5.

Debonding stage: with the load increasing in the pull-out test, the crack between the steel and the grout appeared and the local slipping emerged at step 7-1. With the load continuous increasing, the diagonal cracks of the top of the transverse rib appeared at step 7-2. In this stage, the anchorage force was small.

Ascent stage: with the load increasing and the local slipped interface developing, the grout in the front of the transverse rib displayed crushed damage and being piled into the wedge-shape mode to prevent from further slip at step 7-3. With the new slip interface appearing, the normal stress on the slip interface could be decomposed into normal stress and shear stress causing the longitudinal split cracks at step 7-4.

Splitting stage: with the longitudinal split cracks expanding, the grout in the front of the transverse rib being continuously further crushed, and after the anchorage force exceeding the maximum value, the longitudinal split cracks sharply expanded and then the anchorage force abruptly decreased at step 7-5.

Residual stage: the anchorage steel bar was pulled out, and the residual anchor force was smaller and basically remained stability.

In the pull-out test, it needed to be considered the steel bar strain how to influence on the axial slip displacement. The steel bar strain can be written in the form:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \tag{1}$$

The steel bar stress is

$$\sigma = \frac{F}{S} \tag{2}$$

| Name | Bulk modulus (GPa) | Shear modulus (GPa) | Cohesion (MPa) | Friction angle (°) | Tension (MPa) | UCS (MPa) |
|---------------------|--------------------|---------------------|----------------|--------------------|---------------|-----------|
| The actual grout | 1.20 | 0.65 | 2.20 | 29 | 1.40 | 31.57 |
| The simulated grout | 1.20 | 0.65 | 2.20 | 29 | 1.40 | |
| Steel bar | 157.50 | 87.31 | | | 420 | |

Table 1: The mechanical parameters of the grout

And the circular section area of the steel bar is

$$S = \pi r^2 \quad (3)$$

where the radius $r=0.01$ m, and the elastic modulus $E=210$ GPa.

The maximum anchorage forces in Table 2 were put into the Formulas (1) to (3), and then the maximum strain $\epsilon=4.6 \times 10^{-4}$ of the steel bar could be calculated. Since the calculated strain compared with the displacement was very small, the calculated strain did not play a obvious affect on the axial slip displacement, so the steel bar could be regarded as a absolutely rigid material and it could not consume the internal works.

To simplify the analysis process, the anchorage force-displacement curve was divided into four stages, and each stage was analytical expressed.

| No. | Water : cement | h (mm) | F (t) |
|-----|----------------|----------|---------|
| 1 | 0.4 | 4.0 | 3.03 |
| 2 | 0.4 | 3.0 | 2.60 |

Table 2: The maximum anchorage force in the pull-out tests

Debonding stage: before the new slip interface appearing, the formula of this stage was

$$F = k_1 u_{x1} \quad (4)$$

where $k_1 = \frac{5}{4\sqrt{h}}$, $u_{x1} \in (0, 0.8h)$, and h was the height of the transverse rib.

Ascent stage: as shown in Fig. 5, since the grout in front of the transverse rib was wedge-shape, the planar mechanical model (Fig. 6(a)), of this stage could be simplified as a nested cylinder model shown in Fig. 6(b). The confining pressure of the grout could be simplified as the uniformly distributed load to act on the transverse rib bar. Based on the energy theory, the steel bar pull-out force work was equal to the grout radial stress with the radial displacement work. The formula was

$$F u_{x2} = \sigma_r S u_r \quad (5)$$

In the pull-out test, the force of the transverse rib bar during before-and-after displacement was shown in Figs. 7(a) and 7(b). So the radial stress was

$$\sigma_r = K \cdot u_r \quad (6)$$

The radial stiffness was

$$K = \frac{E}{(1+\nu)\alpha} = \frac{E}{(1+\nu)(r+u_r)} \quad (7)$$

The relationship between the radial displacement and the axial displacement is

$$u_r = u_{x2} \tan \alpha \quad (8)$$

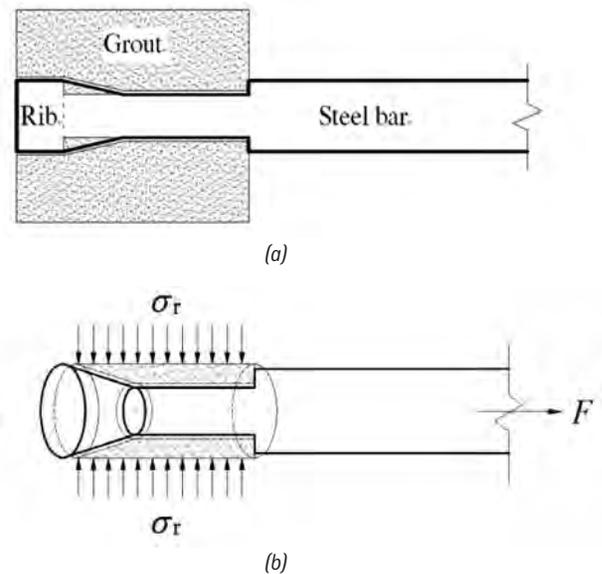


Fig. 6: The mechanical model and the nested cylinder model. (a) The mechanical model; (b) The nested cylinder model

The radial acted area caused by the radial displacement was

$$S = 2\pi(r+u_r) \left(\frac{h}{\tan \alpha} \right) \quad (9)$$

By formulas (5) to (9), it could be deduced the anchorage force F

$$F = \frac{E}{(1+\nu)(r+u_r)} u_r \cdot 2\pi(r+u_r) \left(\frac{h}{\tan \alpha} \right) \cdot \frac{u_r}{u_{x2}} = \frac{2\pi E h u_r}{1+\nu} = \frac{2\pi E h \tan \alpha}{1+\nu} u_{x2} \quad (10)$$

where $u_{x2} \in \left(0, \frac{12}{h} \right)$.

From the above deduced formulas, it was found that the anchorage force and the axial displacement had a liner relationship in the ascent stage. When the radial stress reached the maximum value, the grout displayed the splitting failure mode and the anchorage force reached the maximum value. The anchorage force was related to the rib height and the grout property.

Splitting stage: after the anchorage force reaches the maximum value, the anchorage force sharply declines and the anchorage capability was lost.

$$F = k_3 u_{x3} \quad (11)$$

where $k_3 = -0.9F_{\max}$, $u_{x3} \in (0, 1)$.

Residual stage: after the grout being split, the new slip interface appears and the residual anchorage force become very small.

$$F = t \quad (12)$$

where $t = 0.1F_{\max}$.

3. RESULTS AND DISCUSSION

As shown in Fig. 8(a), both the laboratory test and the numerical simulation of the curve trends of the anchorage force-displacement relationships of the transverse rib bar (the rib height was 4.0 mm) were basic consistent. So the numerical simulation test was reliable. The anchorage force and the axial displacement relationship curves were shown in Fig. 8(b). It was found

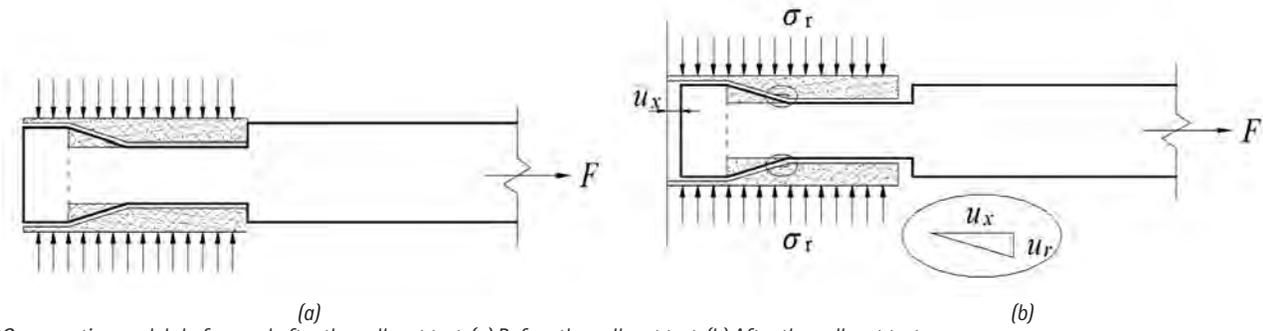


Fig. 7: Comparative models before and after the pull-out test. (a) Before the pull-out test; (b) After the pull-out test

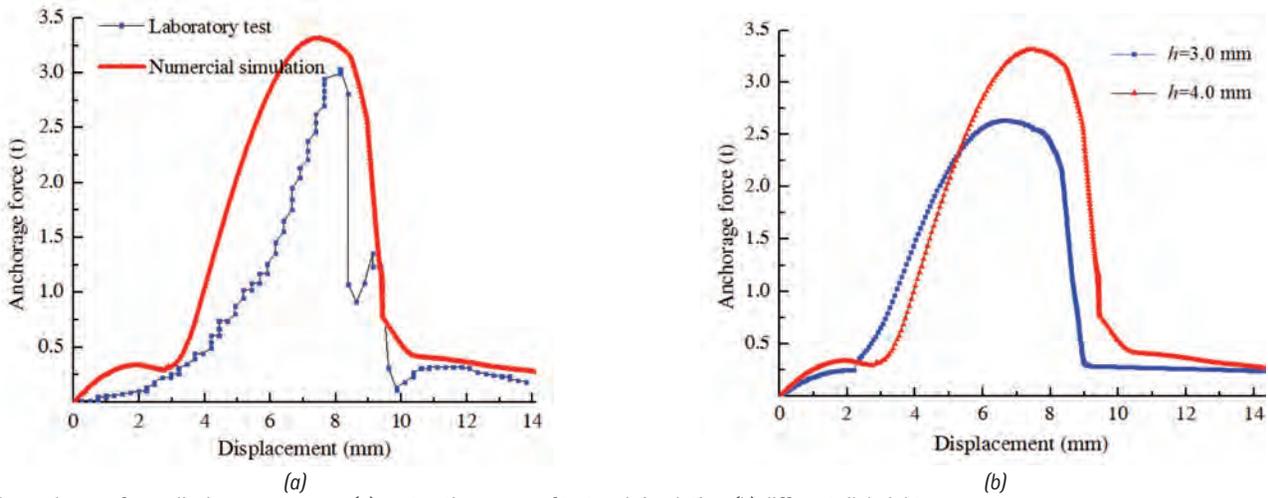


Fig. 8: The anchorage force-displacement curves. (a) contrastive curves of test and simulation; (b) different rib heights

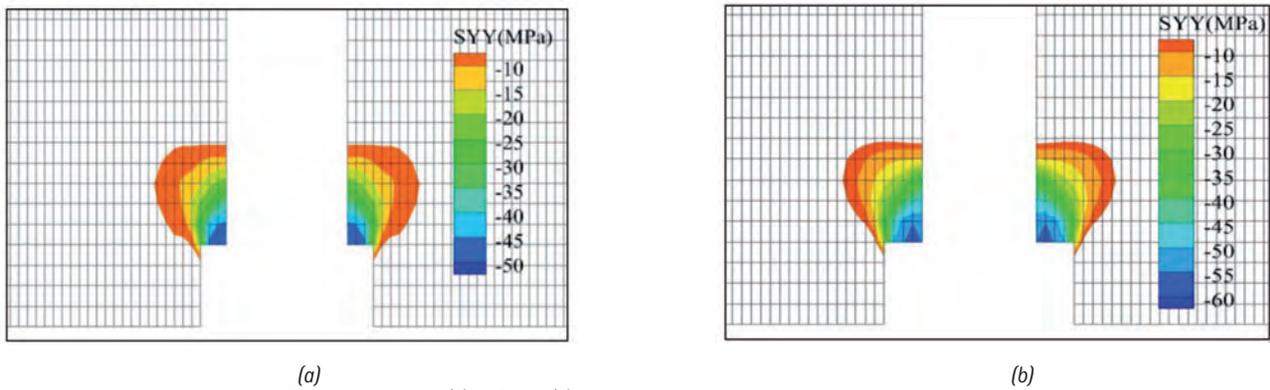


Fig. 9: The axial stress contours under different rib heights. (a) $h=3\text{mm}$; (b) $h=4\text{mm}$

that the pull-out force first increased and then decreased with the axial displacement increased. When the pull-out force gradually reached the peak value, the axial displacement at ascent stage displayed a larger distance than that the pull-out force from peak value to the anchorage force losing at splitting stage. Compared two curves with different rib heights, it can be seen that the maximum anchorage force increased with the rib height increasing.

As shown in Fig. 9, the axial stress counters showed that the acted force on the grout in front of the transverse rib displaying wedge-shape. Compared Figs. 9(a) with 9(b), when the rib height was higher, the remained grout volume was lager and the compressive stress was also lager obviously.

According to the analytical expression of anchorage performance, submitting the grout elastic modulus $E=1.60\text{ GPa}$ and the Passion's ratio $\nu=0.3$ into formula 10. When the rib height is 3.0 mm and 4.0 mm, the effective transverse angle is 16.7° , respectively. Thus, from formulas (4) to (12), the anchorage force-displacement curves can be obtained as shown in Fig. 10.

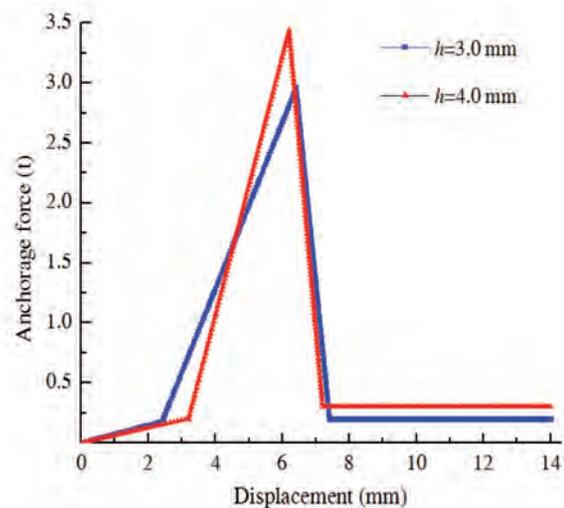


Fig. 10: Analytical expressions of anchorage force-displacement curves

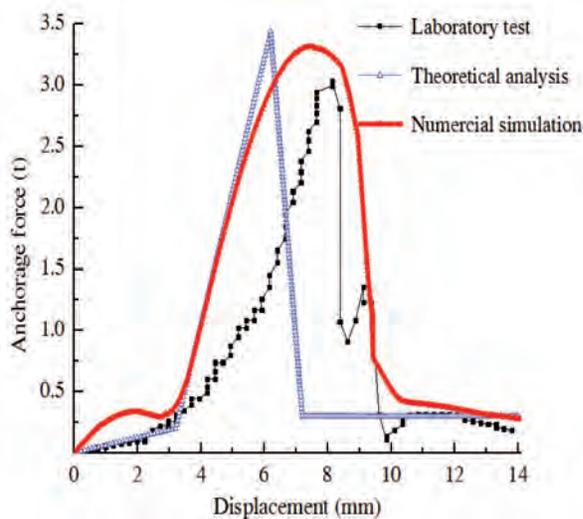


Fig. 11: The anchorage force-displacement curves under different conditions

As shown in Fig. 11, through the pull-out tests (the transverse rib height was 4.0 mm), the three types curves (laboratory test, theoretical analysis, and numerical simulation) of anchorage force-displacement were obtained, the segmentation of each curve was obvious and the curve deformation trends of three types were basically consistent. Namely, with the displacement increasing, the anchorage force first increased and then decreased. Since the grout material was supposed conforming to the strain softening strength model in numerical simulation, the anchorage force gradually reached the peak value, and the grout displayed gradual softening not splitting sharply, so the displacement became larger. In addition, the transverse rib bar was regarded as absolutely rigid material in the theory analysis, so the displacement was relatively small and the anchorage force peak value was relatively large.

In the pull-out test of the transverse rib bar, with the displacement increasing, the anchorage force first increased and then decreased under the grout displaying the splitting failure mode. Before the anchorage force reaching the peak value, the axial displacement was large, and when the anchorage force reached the peak value until to losing the anchorage force, the axial displacement was smaller. S. M. Mirza and J. Houde stated that the anchorage force-displacement relationship curve first increased and then decreased by conducting many pull-out tests.

This deformation tendency is consistent with the results in this paper [17]. In this paper, since there was not the confining pressure being acted on the grout out boundaries, when the anchorage force reached the peak value, the anchorage force declined sharply and the anchorage capability was lost quickly.

4. CONCLUSIONS

Based on the laboratory tests, the anchorage force-displacement relationship curves can be simplified four stages, such as debonding stage, ascent stage, split stage, and residual stage. And the axial displacement in the ascent stage was larger than that in the split stage.

According to the anchorage force-displacement relationship curves, these analytical expressions to four stages were carried out and the maximum anchorage force formula was deduced by using the nested cylinder model.

The numerical simulation results verified that the anchorage force and the remained grout volume in front of the transverse rib

increased with the transverse rib height increasing. The results are of reference significance for the steel bar with similar ribs in reinforcement design and safety construction of practice engineering.

BIBLIOGRAPHY

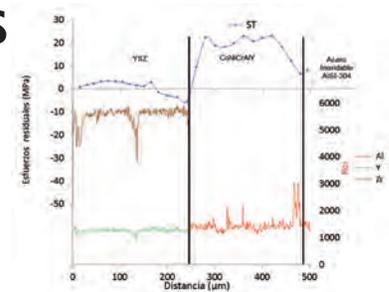
- [1] Li C, Stillborg B. "Analytical models for rock bolts". International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. December 1999. Vol. 36-8. p. 1013-1029. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1365-1609\(99\)00064-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1365-1609(99)00064-7)
- [2] Hoek E, Wood D F. "Rock support". World Tunnlg. April 1989. Vol. 2-2. p. 131-136.
- [3] Cao C, Ren T, Cook C, et al. "Analytical approach in optimising selection of rebar bolts in preventing rock bolting failure". International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. December 2014. Vol. 72. p. 16-25. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.04.026>
- [4] Yazici S, Kaiser P K. "Bond strength of grouted cable bolts". International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. May 1992. Vol. 29-3. p. 279-292. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062\(92\)93661-3](http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(92)93661-3)
- [5] Windsor C R. "Rock reinforcement systems". International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. September 1997. Vol. 34-6. p. 919-951. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)80004-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80004-4)
- [6] Chen J H, Saydam S, Hagan P C. "An analytical model of the load transfer behavior of fully grouted cable bolts". Construction and Building Materials. December 2015. Vol. 101-1. p. 1006-1015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.099>
- [7] Yin Y C, Zhao T B, Tan Y L, et al. "Research of stress distribution evolution law and influencing factors". Journal of Mining & Safety Engineering. October 2013. Vol. 30-5. p. 712-716.
- [8] Wang Q B, Zhang G, Wang H, et al. "Study of coupling effect between anchorage force loss of prestressed anchor cable and rock and soil creep". Rock and Soil Mechanics. August 2014. Vol. 35-8. p. 2150-2156.
- [9] Liu X R, Liu Y Q, Kang J W, et al. "Prestress loss laws of anchor cables in foundation pits and control measures of tension by steps". Chinese Journal of Geotechnical Engineering. October 2015. Vol. 37-10. p. 1794-1801.
- [10] Lutz L A, Gergely P. "Mechanics of bond and slip of deformed bars in concrete". Am Concrete Inst Journal & Proceedings. November 1967. Vol. 64-11. p. 711-721.
- [11] Ma S, Nemcik J, Aziz N. "An analytical model of fully grouted rock bolts subjected to tensile load". Construction & Building Materials. December 2013. Vol. 49-1. p. 519-526. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.084>
- [12] Benmokrane B, Chennouf A, Mitri H S. "Laboratory evaluation of cement-based grouts and grouted rock anchors". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. October 1995. Vol. 32. p. 633-642. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062\(95\)00021-8](http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(95)00021-8)
- [13] Ren F F, Yang Z J, Chen J F, et al. "An analytical analysis of the full-range behavior of grouted rockbolts based on a tri-linear bond-slip model". Construction & Building Materials. March 2010. Vol. 24-3. p. 361-370. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.021>
- [14] You C A. "Mechanical analysis on wholly grouted anchor". Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. March 2000. Vol. 19-3. p. 339-341.
- [15] Huang M H, Zhou Z, Ou J P. "Nonlinear analysis on load transfer mechanism of wholly grouted anchor rod along anchoring section". Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. August 2014. Vol. 33(S2). p. 3992-3997. DOI: <http://dx.doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2014.s2.076>
- [16] Zhao W P, Fan Y H, Li G. "Numerical simulation of bond-slip between HSC and steel bar". Journal of Lanzhou Jiaotong University. December 2010. Vol. 29-6. p. 20-24. DOI: <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-4373.2010.06.005>
- [17] Mirza S M, Houde J. "Study of bond stress-slip relationships in reinforced-concrete". Journal of the American Concrete Institute. January 1979. Vol. 76-1. p. 19-46.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51474188; 51474097; 51074140), the Natural Science Foundation of Hebei Province of China (E2014203012), the International Cooperation Project of Henan Science and Technology Department (162102410027), the Doctoral Fund of Henan Polytechnic University (B2015-67), and Program for Taihang Scholars. All these were gratefully acknowledged.

Estudio de la evolución de esfuerzos residuales debido al ataque de depósitos vítreos (CMAS) en recubrimientos de barrera térmica

Study of the evolution of residual stresses due to glassy deposits (CMAS) attack in thermal barrier coatings



Pedro Yáñez-Contreras¹, José-Dolores-Oscar Barceinas-Sánchez², Carlos-Agustín Poblano-Salas³, José-Martín Medina-Flores⁴, Adrián-Luis García-García² y Iván Domínguez-López²

¹ Universidad Politécnica de Guanajuato. Avda. Universidad Sur, 1001 - 38483 Cortazar (México). Tfno: +52 411 4414300

² Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada. Cerro Blanco, 14 - 76090 Querétaro (México). Tfno: +52 01 442 229 0804

³ Centro de Tecnología Avanzada - CIATEQ. Av. del Retablo, 150 - 76150 Querétaro (México). Tfno: +52 01 442 211 2600

⁴ Instituto Tecnológico de Celaya. Avda. Tecnológico esq. Antonio García Cubas - 38010 Celaya (México). Tfno: +52 461 617 7770

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7907> | Recibido: 15/12/2015 • Aceptado: 13/04/2016

ABSTRACT

- This work was conceived as an integral project aimed to understand and tackle thermal barrier coating (TBC) spalling and delamination phenomena occurring in gas turbines due to CMAS attack. Such attack is thought to have an influence on the magnitude of residual stresses in the coating and, in turn, on the integrity of TBCs. A thermal barrier coating was manufactured by deposition of two layers of different chemical composition, i. e., CoNiCrAlY and yttria-stabilized zirconia (YSZ) on an AISI 304 stainless steel substrate. Both layers were deposited by employing thermal spraying processes, the bonding metallic layer (BC) was deposited by employing a HVOF gun, whereas the ceramic component (TC) by atmospheric plasma spray (APS). The TBCs were heat treated at 1250 °C, with CMAS attack by concentration of 10 mg/cm² for different soaking times (2, 4 & 6 hours), in order to evaluate CMAS effect on the magnitude of the state of residual stresses in the coating. The stress state of the coating was determined by employing the Modified Layer Removal Method for Duplex Coatings (MLRMDC). It was noted that longer exposure times at high temperature resulted in an increase in the state of residual compressive stress in the TC, due to the effect of CMAS. Furthermore, it is confirmed that with increasing the thickness of thermally grown oxide (TGO), the magnitude of the compressive residual stresses increased.
- **Key Words:** Thermal barrier coating (TBC), residual stresses, thermal spraying, region of interest (Roi) and molten calcium-magnesium-alumino-silicate (CMAS).

RESUMEN

Este trabajo se originó de un proyecto integral concebido para entender y solucionar el problema del desprendimiento que sufren los recubrimientos de barrera térmica en turbinas de gas debido al ataque por CMAS (óxidos fundidos de calcio, magnesio, aluminio y silicio), el cual se cree influye en la magnitud del perfil de esfuerzos residuales y en la integridad de dichos recubrimientos. Se fabricó un recubrimiento barrera térmica (TBC) mediante la deposición de dos capas de diferente composición química, i.e. CoNiCrAlY y zirconia estabilizada con itria (YSZ), sobre un sustrato de acero inoxidable AISI 304. Ambas capas fueron depositadas mediante procesos de rociado térmico, la capa metálica de enlace

(BC) fue depositada mediante una pistola de rociado a alta velocidad por combustión de oxígeno (HVOF), mientras que la cerámica (TC) mediante rociado por plasma atmosférico (APS). Los TBC's fueron tratados térmicamente con una temperatura de 1250 °C, con un ataque de CMAS con concentración de 10 mg/cm², durante diferentes tiempos de exposición (2, 4 y 6 horas), con el fin de evaluar el efecto del CMAS sobre la magnitud del estado de esfuerzos residuales del recubrimiento. El estado de esfuerzos del recubrimiento fue determinado mediante el método de remoción de capa modificada para recubrimiento bicapa (MRCMRB). Se observó que los tiempos de exposición más largos a alta temperatura resultaron en un incremento en el estado de esfuerzo residual de compresión en el TC debido al efecto del CMAS. Además, se confirmó que a medida que aumentó el espesor del óxido crecido térmicamente (TGO), la magnitud de los esfuerzos residuales de compresión se incrementó.

Palabras Clave: Recubrimiento de barrera térmica (TBC), esfuerzos residuales, rociado térmico, región de interés (Roi) y óxidos fundidos de calcio, magnesio, aluminio y silicio (CMAS).

1. INTRODUCCIÓN

Los recubrimientos de barrera térmica ("Thermal Barrier Coatings" - TBC) se utilizan en los álabes que se encuentran en la sección de alta temperatura de una turbina de gas, con el objetivo de disminuir la transferencia de calor que se genera por el paso de los gases producto de la combustión a través de los álabes, con el fin de protegerlos contra la oxidación y la corrosión en caliente, con lo cual se incrementa su vida útil [1]. Generalmente, un TBC consiste de dos capas depositadas sobre un sustrato, una de material cerámico, denominada capa superior ("Top Coat" - TC), y otra de una aleación metálica, denominada capa de enlace ("Bond Coat" - BC), como se muestra en la Figura 1 (Anexo I). La TC es comúnmente de zirconia estabilizada con itria (YSZ) y el BC de una aleación tipo MCrAlY ($M = Ni + Co, Ni$ o Co). La YSZ es el material que más se aplica en recubrimientos TBC, debido a sus propiedades térmicas, como son la baja conductividad térmica, resistencia al choque térmico y su relativamente bajo coeficiente de expansión térmica [2], las partículas de este polvo son esféricas, aunque hay algunas ligeramente deformadas, como se observa en la Figura 2 (Anexo I), la geometría esférica garantiza un buen flujo a través del

sistema de alimentación de polvo [3]. La *BC* promueve una buena adherencia entre la *TC* y el sustrato debido a que su coeficiente de expansión térmica es similar al de los sustratos empleados en este tipo de sistemas [4], además protege contra la oxidación y corrosión en caliente [5]. Para fabricar *TBC*'s se utilizan métodos de rociado térmico, debido a que son procesos económicos y rápidos [6]. En la última década varios investigadores [7, 8 y 9] han demostrado que durante la deposición de recubrimientos de barrera térmica (*TBC*) se generan esfuerzos conocidos como residuales, los cuales afectan las propiedades físicas del recubrimiento, reduciendo su vida útil y del componente que recubren. Por tal motivo, la medición de estos esfuerzos y encontrar la forma de reducirlos es importante. De acuerdo con Widjaja et al. [9] los esfuerzos residuales generados durante la deposición en recubrimientos *TBC*, utilizando la técnica de rociado térmico por plasma, se debe a la transformación de fases, contracción súbita de las gotas rociadas ("*splats*") y desajuste entre los coeficientes de expansión térmica del sustrato y el recubrimiento.

El método de rociado por plasma atmosférico ("*Atmospheric Plasma Spray*" - *APS*) proyecta partículas fundidas a baja velocidad, mientras que el rociado a alta velocidad por oxi-combustible ("*High Velocity Oxy Fuel*" - *HVOF*) proyecta partículas fundidas y semi-fundidas a alta velocidad y a una temperatura relativamente baja; en ambos métodos el impacto de las partículas sobre el sustrato genera esfuerzos residuales de compresión [10], los cuales se oponen a los esfuerzos de tensión que eventualmente causan la delaminación de un recubrimiento en operación [11].

La mejora en la tecnología de deposición del *TBC* conduce a las turbinas de gas que operan a una temperatura de 1200°C aproximadamente, a una mayor eficiencia y un mayor rendimiento en el gasto de combustible [12], con lo cual disminuye la generación de gases de efecto invernadero [13]; sin embargo, debido a las altas temperaturas a las que operan las turbinas, los *TBC* están expuestos a cargas térmicas y mecánicas, además de un ambiente corrosivo y oxidante lo que puede originar desprendimiento de la capa cerámica [14]. También, los *TBC* son susceptibles a la degradación debido a los *CMAS* resultantes de la ingestión de desechos minerales silíceos (polvo, arena, cenizas) contenidos en los gases calientes provenientes de la cámara de combustión que llegan a la turbina [15]. Cuando los gases llegan a la turbina a una temperatura alrededor de 1200 °C, el *CMAS* se funde y se infiltra en el *TBC*, por lo que un mecanismo de desprendimiento del *TBC* puede ser activado [16], lo que eleva la tasa de liberación de energía y altera las propiedades mecánicas del *TBC*, también la diferencia del coeficiente de expansión térmica entre los *CMAS* y el *TBC*, provoca esfuerzos térmicos durante el enfriamiento a temperatura ambiente [17], lo que hace que el *TBC* sea susceptible a los mecanismos de generación de grietas y a la delaminación [18, 19]. En años recientes se han realizado estudios utilizando diferentes técnicas para predecir los esfuerzos residuales en los *TBC*, como: difracción de rayos-X [20], indentación [21], simulación por el método de elementos finitos [22], remoción sucesiva de material [23] y medición de curvatura [21], sin embargo, en ningún estudio se muestra el efecto en la magnitud del perfil de esfuerzos residuales originados debido al ataque de *CMAS*. En la presente investigación se determina la magnitud del perfil de esfuerzos residuales de los *TBC*, expuestos a diferentes condiciones: Sin tratamiento térmico (*ST*); con tratamiento térmico durante 2 horas (2H-SC1, 2H-SC2), 4 horas (4H-SC1, 4H-SC2) y 6 horas (6H-CC1, 6H-CC2), y con tratamiento térmico y ataque de *CMAS* durante 2 horas (2H-CC1, 2H-CC2), 4 horas (4H-CC1, 4H-CC2) y 6 horas (6H-CC1, 6H-CC2), mediante la técnica *MRCMRB* [22].

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. DEPOSICIÓN DEL TBC

Antes de depositar el recubrimiento, los sustratos se limpiaron con acetona y fueron sometidos al proceso de granallado con partículas de alúmina, utilizando un equipo denominado "Grit Blasting Central Pneumatic", aplicando una presión de 6 bar y colocando la boquilla a un ángulo de incidencia de 45° a una distancia de 200 mm. Se depositaron los *TBC* sobre los sustratos de acero inoxidable AISI 304, con dimensiones de 25.4 mm X 25.4 mm X 6.35 mm mediante las técnicas de rociado térmico. La *BC* se depositó utilizando un polvo de CoNiCrAlY (*AMDRY* 9954, Co32Ni21Cr8Al0.5Y, Sulzer Metco) mediante un sistema *HVOF* modelo Sulzer DJH2700, con un flujo de alimentación de polvo de 38 g/min y una distancia de deposición de 203 mm; el espesor promedio de esta capa fue 300 µm. La *TC* se depositó utilizando un polvo de YSZ (*NS-204*, Sulzer Metco) mediante un sistema *APS* Sulzer 9MB, con un flujo de alimentación de polvo de 20 g/min a una distancia de deposición de 90 mm, el potencial utilizado fue 67 V y la corriente 600 A; el espesor promedio de esta capa fue 250 µm. Para cada capa se aplicaron 16 pasadas, a una velocidad de desplazamiento de la pistola de 1.5 m/s. La Tabla 1 (Anexo I) muestra los valores de presión (bar) y flujo (SLPM, en inglés Standard Liters per Minute) de los gases utilizados en la deposición de cada capa.

2.2. TRATAMIENTO TÉRMICO CON ATAQUE DE CMAS EN LOS TBC'S

Después de depositar el recubrimiento de barrera térmica sobre las muestras de acero inoxidable AISI 304, se le realizó calorimetría diferencial de barrido al *CMAS* (*Mordenita*), para determinar su temperatura de fusión, la magnitud de esta temperatura es importante para realizar el tratamiento térmico, lo que puede asegurar que el *TC* será infiltrado por el *CMAS* fundido, en la Figura 3 (Anexo I), se observa que el resultado es aproximadamente de 1250°C. La composición química de la *Mordenita* se muestra en la tabla 2 (Anexo I).

Después de determinar la temperatura de fusión del *CMAS*, se realizó el tratamiento térmico de los *TBC*'s en un horno tubular *SWG-1600x*, a una temperatura de 1250°C, éstos se agruparon en seis pares para realizar una corrida con una réplica, las muestras 2H-CC1, 2H-CC2, 4H-CC1, 4H-CC2, 6H-CC1 y 6H-CC2, durante el tratamiento térmico fueron sometidas a un ataque de *CMAS*, el *CMAS* se colocó sobre la superficie recubierta, con una concentración aproximada de 10 mg/cm², en la Tabla 3 (Anexo I) se observan las condiciones del tratamiento térmico. La rampa de calentamiento de las muestras fue de 10 °C/min hasta alcanzar la temperatura de 1250°C, la rampa de enfriamiento de 6 °C/min con un vacío de 10⁻⁵ mm Hg. Se tomaron un par de muestras sin tratamiento térmico (*ST-1* y *ST-2*) para propósitos de comparación. En el Anexo I se muestran las micrografías (Figs. 4-9) de las muestras sometidas a sus diferentes condiciones de tratamiento térmico.

2.3. CÁLCULO DEL PERFIL DE ESFUERZOS RESIDUALES

El perfil de los esfuerzos residuales en los *TBC*'s, se determinó mediante la técnica *MRCMRB* [24], utilizando las propiedades físicas de los materiales, mostradas en la Tabla 4 (Anexo I).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del perfil de esfuerzos de las muestras *ST*, se observan en la Figura 10, en el *TC* se observan valores cercanos

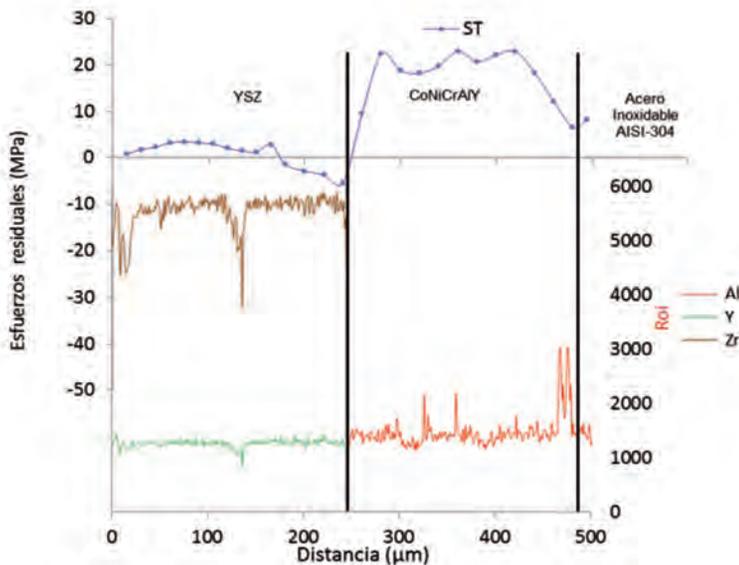


Figura 10: Perfil de esfuerzos residuales y la región de interés (Roi) de las muestras ST

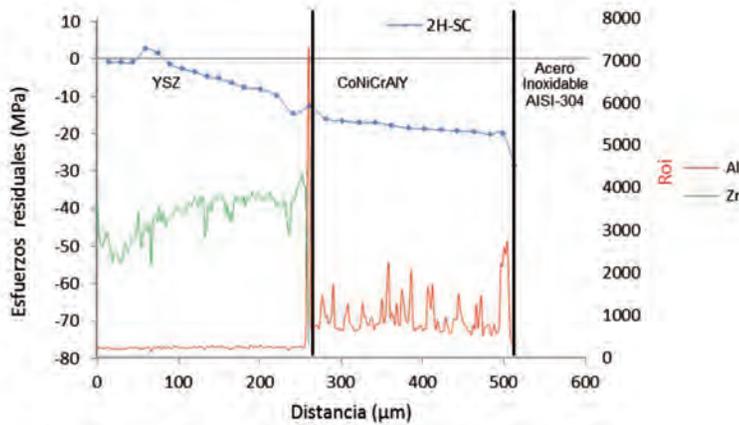


Figura 11: Perfil de esfuerzos residuales y la región de interés (Roi) de las muestras 2H-SC

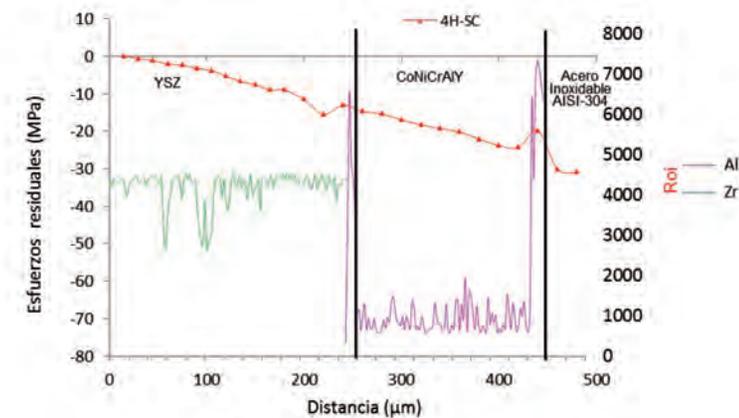


Figura 12: Perfil de esfuerzos residuales y la región de interés (Roi) de las muestras 4H-SC

a cero, semejantes a los reportados por Weyant et al. [3]. Este equilibrio en el nivel de esfuerzos se debe al esfuerzo de tensión producido por el enfriamiento rápido de las gotas rociadas por el plasma, que llegan al sustrato y a la superficie del recubrimiento en proceso de crecimiento, que están a una temperatura más baja que las partículas rociadas fundidas, y al esfuerzo térmico de compresión que se genera porque el coeficiente de expansión térmica del TC es más bajo que el del sustrato [23]. En el TC al

acercarse al BC, se observa un esfuerzo residual de 5 MPa en compresión y al entrar en el BC el esfuerzo cambia a tensión (23 MPa). Al acercarse al sustrato los esfuerzos de tensión disminuyen hasta alrededor de 5 MPa. La generación de esfuerzos de compresión puede atribuirse a que el BC fue procesado por HVOF. Durante la deposición con HVOF se generan esfuerzos de compresión en el BC debido al efecto de granallado provocado por la relativa baja temperatura de las partículas fundidas y semi-fundidas que impactan a gran velocidad sobre las capas previamente depositadas. Además, se observa la relación del perfil de esfuerzos residuales y de la concentración de Zr, Al e Y en la región de interés (Roi) en las piezas recubiertas ST. En el TC se puede observar que a medida que aumenta la concentración de zirconio, hacia regiones más cercanas a la interfase con el recubrimiento de enlace, el perfil de esfuerzos residuales sufre un cambio de tensión a compresión, al llegar a la interfase con el BC, la concentración de zirconio disminuye y el perfil de esfuerzos cambia de compresión a tensión, manteniéndose casi constante hasta llegar a la interfase con el sustrato.

En el perfil de esfuerzos residuales del TC, de las muestras 2H-SC (Fig. 11), se puede observar que aproximadamente a 15 μm de la superficie el esfuerzo es de compresión de aproximadamente 1 MPa, posteriormente a 60 μm , existe un cambio en el sentido de los esfuerzos residuales alcanzando 2 MPa a tensión, al aproximarse a la interface con el BC los esfuerzos residuales cambian a compresión hasta alcanzar un máximo de 14 MPa, antes de entrar al BC existe una disminución del esfuerzo hasta 12 MPa en compresión, al entrar al BC se incrementa la magnitud del esfuerzo hasta 16 MPa. Después de ese punto se observa un incremento gradual hasta un máximo de -20 MPa, al acercarse al sustrato se observa una pequeña disminución hasta -19 MPa, y al llegar a la interface con el sustrato puede observarse un incremento aún mayor del esfuerzo de compresión.

Además, en la Figura 11 se muestra la relación del perfil de esfuerzos residuales y la región de interés (Roi) de la concentración de los elementos de las piezas recubiertas 2H-SC. En el TC se observa como a medida que aumenta la concentración del zirconio el perfil de esfuerzos residuales aumenta a compresión, al llegar a la interfase con el BC, la concentración de zirconio disminuye y el nivel de esfuerzos residuales disminuye ligeramente, sin embargo, al entrar al BC el perfil de esfuerzos de compresión aumenta lo que puede atribuirse al TGO (6 μm de espesor).

En el perfil de esfuerzos residuales del TC, de las muestras 4H-SC (Fig. 12), se puede observar que el esfuerzo de compresión en el TC se incrementa gradualmente desde aproximadamente de 1 MPa a 30 μm de la superficie hasta 15 MPa como máximo, al acercarse a la interface con el BC los esfuerzos residuales disminuyen a 13 MPa, al entrar al BC se incrementa la magnitud del esfuerzo hasta un máximo de 24 MPa. Al acercarse al sustrato se observa una pequeña disminución hasta -19 MPa, y al llegar a la interface con el sustrato puede observarse un incremento hasta 30 MPa en esfuerzo de compresión. También, se muestra la

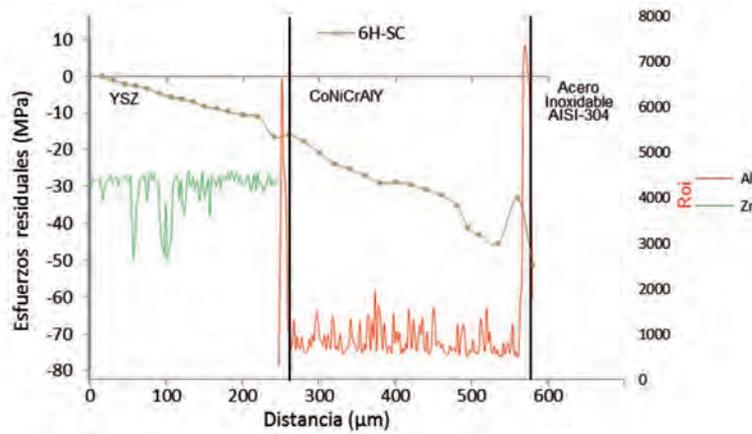


Figura 13: Perfil de esfuerzos residuales y la región de interés (Roi) de las muestras 6H-SC

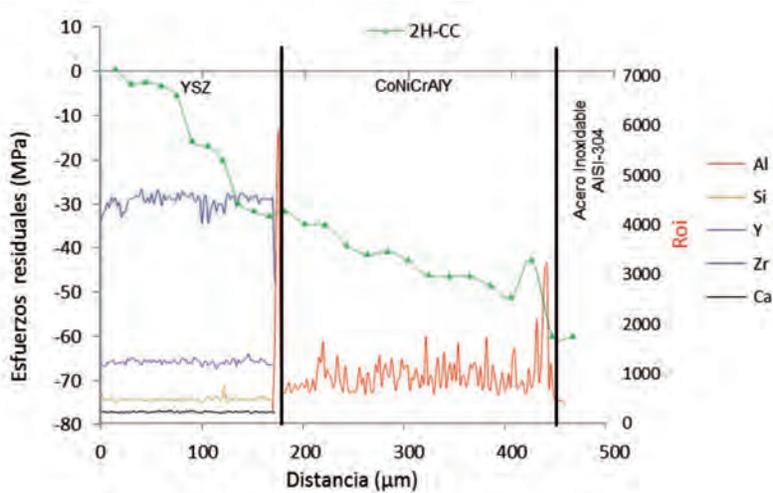


Figura 14: Perfil de esfuerzos residuales y la región de interés (Roi) de las muestras 2H-CC

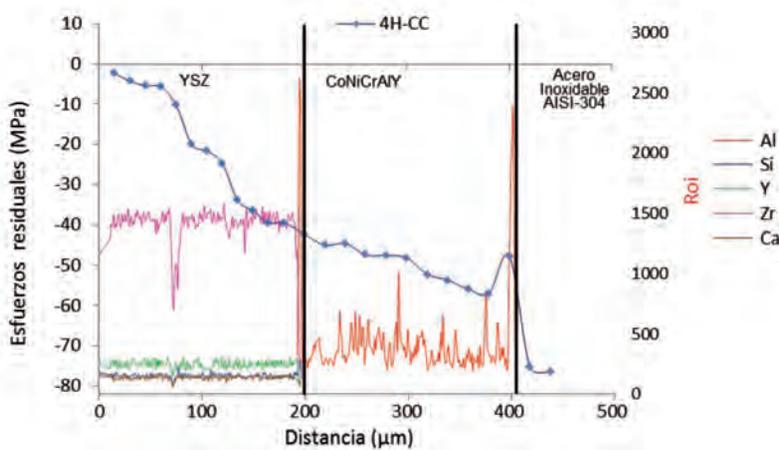


Figura 15: Perfil de esfuerzos residuales y la región de interés (Roi) de las muestras 4H-CC

relación entre el perfil de esfuerzos residuales y la región de interés (Roi) de la concentración de los elementos, de las piezas recubiertas 4H-SC. En el TC se observa como a medida que aumenta la concentración del zirconio el perfil de esfuerzos residuales aumenta a compresión, al llegar a la interfase con el BC, la concentración de zirconio disminuye y el nivel de esfuerzos residuales disminuye ligeramente, sin embargo, al entrar al BC el perfil de esfuerzos de compresión aumenta lo que puede atribuirse al TGO (8 μm de espesor).

En la Figura 13, se muestra el perfil de esfuerzos residuales, de las muestras 6H-SC, se puede observar a lo largo de la profundidad del TC un esfuerzo de compresión que se incrementa desde aproximadamente de 1 MPa a 30 μm de la superficie hasta 16.5 MPa como máximo, al acercarse a la interface con el BC los esfuerzos residuales tienen un pequeño decremento hasta a 16 MPa, al entrar al BC se incrementa la magnitud del esfuerzo hasta un máximo de 45 MPa. Al aproximarse al sustrato se observa una disminución hasta -33 MPa, y al llegar a la interface con el sustrato puede observarse un incremento de 51 MPa en esfuerzo de compresión. También, se muestra la relación del perfil de esfuerzos residuales y la región de interés (Roi) de la concentración de los elementos, de las piezas recubiertas 6H-SC. En el TC se observa como a medida que aumenta la concentración del zirconio el perfil de esfuerzos residuales aumenta a compresión, al llegar a la interfase con el BC, la concentración de zirconio disminuye y el nivel de esfuerzos residuales sufre una disminución, sin embargo, al entrar al BC el perfil de esfuerzos de compresión aumenta lo que puede atribuirse al TGO (10 μm de espesor).

En la Figura 14, se observa el perfil de esfuerzos residuales, de las muestras 2H-CC, determinado por medio del método experimental método de remoción de capa modificada para recubrimiento bicapa (MRCMRB), se puede observar en el TC que aproximadamente a 15 μm de la superficie el esfuerzo es aproximadamente cero, posteriormente los esfuerzos residuales van aumentando a compresión hasta alcanzar un máximo 32 MPa, al aproximarse a la interface con el BC los esfuerzos disminuyen hasta 31 MPa en compresión, al entrar al BC se incrementa la magnitud del esfuerzo hasta 34 MPa. Después de ese punto se observa un incremento gradual hasta un máximo de 51 MPa. Al acercarse al sustrato se observa una disminución hasta 42 MPa, y al llegar a la interface con el sustrato puede observarse un incremento aún mayor del esfuerzo de compresión (59 MPa). En la Figura 14, se muestra la relación del perfil de esfuerzos residuales y la región de interés (Roi) de la concentración de los elementos de las piezas recubiertas 2H-CC. En el TC se observa como a medida que aumenta la concentración del zirconio el perfil de esfuerzos residuales aumenta a compresión, al llegar a la interfase con el BC, la concentración de zirconio disminuye y el nivel de esfuerzos residuales disminuye ligeramente, sin embargo, al entrar al BC el perfil de esfuerzos de compresión aumenta lo que puede atribuirse al TGO (6 μm de espesor). La tendencia es semejante a las muestras 2H-SC (Fig. 11), sin embargo, existe un nivel de esfuerzos residuales de compresión más alto en las muestras de 2H-CC, debido al efecto que ocasionó el CMAS infiltrado en la capa cerámica.

En la Figura 15, se observa el perfil de esfuerzos residuales, de las muestras 4H-CC, determinado por MRCMRB, en el TC se muestra que aproximadamente a 15 μm de la superficie el esfuerzo es de 2 MPa a compresión, los esfuerzos residuales van aumentando su magnitud a compresión hasta alcanzar un máximo de 39 MPa, al aproximarse a la interface con el BC, la magnitud

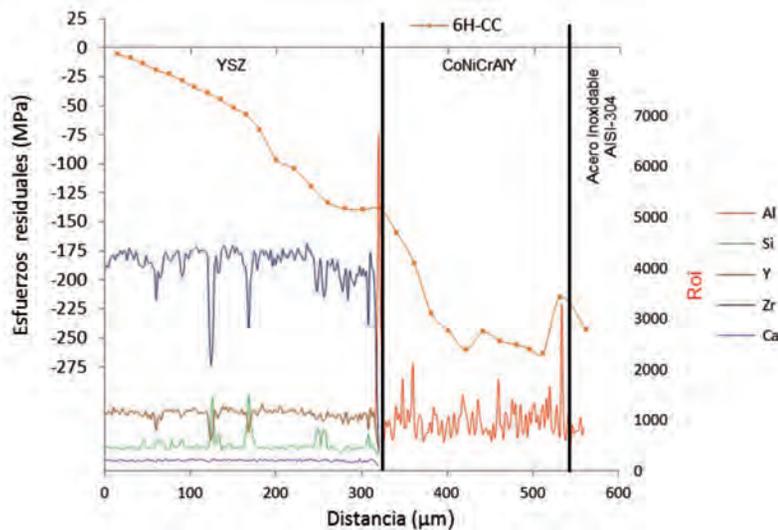


Figura 16: Perfil de esfuerzos residuales y la región de interés (Roi) de las muestras 6H-CC

de los esfuerzos disminuyen en compresión, al entrar al BC se incrementa la magnitud del esfuerzo hasta 34 MPa. Después de ese punto se observa un incremento gradual hasta un máximo de 56 MPa. Al acercarse al sustrato se observa una disminución hasta 47 MPa, y al llegar a la interface con el sustrato puede observarse un incremento del esfuerzo de compresión hasta 75 MPa. En la Figura 15, se muestra la relación del perfil de esfuerzos residuales y la región de interés (Roi) de la concentración de los elementos, de las piezas recubiertas 4H-CC. En el TC se observa como a medida que aumenta la concentración de zirconio el perfil de esfuerzos residuales aumenta a compresión, al llegar a la interfase con el BC, la concentración de zirconio disminuye y el nivel de esfuerzos residuales disminuye ligeramente, sin embargo, al entrar al BC el perfil de esfuerzos de compresión aumenta lo que puede atribuirse al TGO (6 μm de espesor). La tendencia es semejante a las muestras 4H-SC (Fig. 12), sin embargo, existe un nivel de esfuerzos residuales de compresión más alto en las muestras de 4H-CC, debido al efecto que ocasionó el CMAS infiltrado en la capa cerámica.

En la Figura 16, se observa el perfil de esfuerzos residuales, de las muestras 6H-CC, determinado por MRCMRB, en el TC se muestra que aproximadamente a 15 μm de la superficie el esfuerzo es aproximadamente 5 MPa a compresión, los esfuerzos residuales van aumentando su magnitud a compresión hasta alcanzar un máximo de 139 MPa, al aproximarse a la interface con el BC, la magnitud de los esfuerzos disminuyen ligeramente en compresión, al entrar al BC se incrementa la magnitud del esfuerzo hasta 159 MPa. Después de ese punto se observa un incremento gradual hasta un máximo de 263 MPa. Al acercarse al sustrato se observa una disminución hasta 214 MPa, y al llegar a la interface con el sustrato puede observarse un incremento del esfuerzo de compresión (243 MPa). Además, se muestra la relación del perfil de esfuerzos residuales y la región de interés (Roi) de la concentración de los elementos, de las piezas recubiertas 6H-CC. Al igual que en los casos anteriores, el perfil de esfuerzos residuales tiene una tendencia semejante, sin embargo, debido a que el espesor del TGO (12 μm de espesor), es mucho mayor que las muestras 2H-CC y 4H-CC, los esfuerzos residuales de compresión se incrementaron. Lo anterior concuerda con Armengol [29] y Hui et al. [30], quienes comentan, que el crecimiento del TGO proporciona esfuerzos de compresión, al ser impedido por el sustrato. Ahrens et al. [31], comentan en su trabajo de investigación que la distri-

bución del esfuerzo residual depende del espesor del óxido crecido térmicamente (TGO).

En este trabajo se pudo observar que a medida que el tiempo de exposición aumenta el perfil de los esfuerzos residuales se incrementaron, semejante a lo obtenido en trabajo previo, donde las muestras fueron tratadas térmicamente a una temperatura de 1200°C, durante 8 y 16 h respectivamente [24], lo que corrobora, que el esfuerzo residual de compresión aumenta conforme el tiempo de tratamiento se incrementa. Esto concuerda con lo observado por Khan et al. [20]. Ellos concluyeron que el esfuerzo residual de compresión aumenta conforme el tiempo de tratamiento se incrementa, esto se debe que a medida que va aumentando el tiempo de exposición de las muestras la relajación de esfuerzos residuales de enfriamiento se van dando paulatinamente hasta llegar a una relajación total, lo que resulta en un estado de esfuerzos residuales de compresión [3]. De la misma forma se observa que en las muest-

ras 2H-SC, 4H-SC y 6H-SC (Figs. 11, 12, y 13, respectivamente), existe un incremento en el perfil de esfuerzos residuales de compresión a medida que el espesor del TGO aumenta (6, 8 y 10 μm, respectivamente). De acuerdo con Armengol [29], esto se puede atribuir a que la dureza aumenta por fenómeno de densificación debido al tratamiento térmico, donde el material se compacta y las partículas se unen entre sí eliminando las porosidades. También se observó que el perfil de esfuerzos residuales de compresión es de mayor magnitud, en las muestras con ataque de CMAS (2H-CC, 4H-CC y 6H-CC) que en las muestras sin ataque de CMAS (2H-SC, 4H-SC y 6H-SC). Esto se puede atribuir a que posiblemente el CaO estabilizó parcialmente al ZrO₂ empobrecida con Y₂O₃ resultante del tratamiento térmico, debido a que el radio iónico del Ca²⁺ es similar al del Zr⁴⁺ [32], lo que probablemente evitó la activación de los mecanismos de agrietamiento y delaminación, definidos por Krämer et al. [18] en sus investigaciones.

4. CONCLUSIONES

En el perfil de esfuerzos residuales de los TBC's, depositados mediante HVOF y APS, sometidos a tratamiento térmico a una temperatura de 1250°C, con y sin ataque de CMAS durante diferentes tiempos de exposición de 2, 4 y 6 horas, fueron obtenidos mediante la técnica experimental MRCMRB, se concluyó lo siguiente:

- a) En general, en todas las muestras tratadas térmicamente, se pudo observar que a medida que el tiempo de exposición aumenta la magnitud en el perfil de esfuerzos residuales de compresión se incrementa.
- b) En el TC de las muestras sin ataque de CMAS, se observó como a medida que aumenta la concentración de zirconio el perfil de esfuerzos residuales aumenta a compresión, esta tendencia también se observa en las muestras con ataque de CMAS, aunque es menos notoria, posiblemente por la degradación sufrida debida al ataque de CMAS.
- c) Se observó un incremento en el perfil de esfuerzos residuales de compresión a medida que el espesor del TGO aumentó. Lo que se puede atribuir a que la dureza aumenta por el fenómeno de densificación debido al tratamiento térmico, donde el material se compacta y las partículas se unen entre sí eliminando las porosidades.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M.H. Habibi, L. Wang y S.M. Guo. Evolution of hot corrosion resistance of YSZ, Gd₂Zr₂O₇, and Gd₂Zr₂O₇ + YSZ composite thermal barrier coatings in Na₂SO₄ + V₂O₅ at 1050 °C. *Journal of the European Ceramic Society* 32 (2012) 1635–1642. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2012.01.006>
- [2] R. Rajendran. "Gas turbine coatings – An overview". *Engineering Failure Analysis*. 26 (2012) 355–369. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.07.007>
- [3] C.M. Weyant, J. Almer y K.T. Faber. "Through-thickness determination of phase composition and residual stresses in thermal barrier coatings using high-energy X-rays". *Acta Materialia* 58 (2010) 943–951. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2009.10.010>
- [4] H.J. Jang, D.H. Park, Y.G. Jung, J.C. Jang et al.. "Mechanical characterization and thermal behavior of HVOF-sprayed bond coat in thermal barrier coatings (TBCs)". *Surface & Coatings Technology* 200 (2006) 4355 – 436. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.02.170>
- [5] L. Zhao y E. Lugscheider. "High velocity oxy-fuel spraying of a NiCoCrAlY and an intermetallic NiAl-TaCr alloy". *Surface and Coatings Technology* 149 (2002) 231–235. [http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01444-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01444-X)
- [6] J. Gómez-García, P. Poza y V. Utrilla. "Crecimiento y caracterización de recubrimientos cerámicos con aplicaciones como barreras térmicas". 2006, B. Cerámica y vidrio, págs. 70-74. <http://ceramicayvidrio.revistas.csic.es>
- [7] V. Teixeira, M. Andriantschky, W. Fischer, H.P. Buchkremer y D. Stöver. Effects of deposition temperature and thermal cycling on residual stress state in zirconia-based thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology* 120–121 (1999). [http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00341-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00341-2)
- [8] M.S.J. Hashmi, C. Pappalettere y F. Ventola. Residual stresses in structures coated by a high velocity oxy-fuel technique. *Journal of Materials Processing Technology* 75 (1998) 81–86. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00295-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00295-1)
- [9] S. Widjaja, A. M. Limarga y T. H. Yip. Modeling of residual stresses in a plasma-sprayed zirconia y alumina functionally graded-thermal barrier coating. *Thin Solid Films* 434 (2003) 216–227. [http://dx.doi.org/10.1016/S0040-6090\(03\)00427-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0040-6090(03)00427-9)
- [10] P. Bansal, P.H. Shipway y S.B. Leen. Residual stresses in high-velocity oxy-fuel thermally sprayed coatings – Modelling the effect of particle velocity and temperature during the spraying process. *Acta Materialia* 55 (2007) 5089–5101. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2007.05.031>
- [11] R.C. Lima y J.M. Guilemany. Adhesion improvements of Thermal Barrier Coatings with HVOF thermally sprayed bond coats. *Surface & Coatings Technology* 201 (2007) 4694–4701. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.10.005>
- [12] I. Taymaz. The effect of thermal barrier coatings on diesel engine performance. *Surface & Coatings Technology* 201 (2007) 5249–5252. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.07.123>
- [13] A. Loganathan y A. S. Gandhi. Effect of phase transformations on the fracture toughness of t' yttria stabilized zirconia. *Materials Science & Engineering A* 556 (2012) 927–935. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2012.07.095>
- [14] K.A. Khor y Y.W. Gu. Effects of residual stress on the performance of plasma sprayed functionally graded ZrO₂:NiCoCrAlY coatings. *Materials Science and Engineering A* 277 (2000) 64–76. [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00565-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00565-1)
- [15] R. Wellman, G. Whitman y J.R. Nicholls. CMAS corrosion of EB PVD TBCs: Identifying the minimum level to initiate damage. *Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 28 (2010) 124–132. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2009.07.005>
- [16] C. Mercer, S. Faulhaber, A.G. Evans y R. A Darolia. Delamination mechanism for thermal barrier coatings subject to calcium–magnesium–aluminum–silicate (CMAS) infiltration. *Acta Materialia* 53 (2005) 1029–1039. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2004.11.028>
- [17] G. Witz, V. Shklover, W. Steurer, S. Bachegowda y H.-P. Bossmann. High-temperature interaction of Yttria Stabilized Zirconia Coatings with CaO–MgO–Al₂O₃–SiO₂ (CMAS) Deposits. *Surface & Coatings Technology* 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.07.034>
- [18] S. Krämer a, S. Faulhaber, M. Chambers, D.R. Clarke, C.G. Levi, J.W. Hutchinson y A.G. Evans. Mechanisms of cracking and delamination within thick thermal barrier systems in aero-engines subject to calcium–magnesium–aluminum–silicate (CMAS) penetration. *Materials Science and Engineering A* 490 (2008) 26–35. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2008.01.006>
- [19] F. Stolzenburg, P. Kenesei, J. Almer, K.N. Lee, M.T. Johnson y K.T. Faber. The influence of calcium–magnesium–aluminum–silicate deposits on internal stresses in Yb₂Si₂O₇ multilayer environmental barrier coatings, *Acta Materialia*, Volume 105, 15 February 2016, Pages 189–198. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2015.12.016>
- [20] A. N. Khan, J. Lu y H. Liao. "Effect of residual stresses on air plasma sprayed thermal barrier coatings". *Surface and Coatings Technology* 168 (2003) 291–299. doi:10.1016/S0257-8972(03)00207-X
- [21] Xi Chen, Jin Yan, Anette y M. Karlsson. On the determination of residual stress and mechanical properties by indentation. *Materials Science and Engineering. A* 416 (2006) 139–149. doi:10.1016/j.msea.2005.10.034
- [22] H.W. Ng, Z. Gan. A finite element analysis technique for predicting as-sprayed residual stresses generated by the plasma spray coating process. *Finite Elements in Analysis and Design* 41 (2005) 1235–1254 <http://dx.doi.org/10.1016/j.finel.2005.02.002>
- [23] C.R.C. Lima, J. Nin y J.M. Guilemany. Evaluation of residual stresses of thermal barrier coatings with HVOF thermally sprayed bond coats using the Modified Layer Removal Method (MLRM). *Surface & Coatings Technology* 200 (2006) 5963–5972. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.09.016>
- [24] P. Yáñez-Contreras, J. D. O. Barceinas-Sánchez, C. A. Poblano-Salas, J. M. Medina-Flores, A. L. García-García y I. Domínguez-López. Study of the evolution of profile of residual stresses in thermal barrier coating on stainless steel AISI 304. *Dyna-Colombia*. En proceso de revisión.
- [25] W.G. Mao, Y.C. Zhou, L. Yang y X.H. Yu. Modeling of residual stresses variation with thermal cycling in thermal barrier coatings. *Mechanics of Materials* 38 (2006) 1118–1127. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmat.2006.01.002>
- [26] J.M. Meza, E.E. Franco, M.C.M. Farias, F. Buiochi, R. M. Souza y J. Cruz. Medición del módulo de elasticidad en materiales de ingeniería utilizando la técnica de indentación instrumentada y de ultrasonido. *REVISTA DE METALURGIA [Online]*, 44 (1) (2008). Available at: <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/viewFile/95/94>
- [27] L.V. Wiesner, N. P. Bansa. Mechanical and thermal properties of calcium–magnesium aluminosilicate (CMAS) glass. *Journal of the European Ceramic Society* 35 (2015) 2907–2914. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2015.03.032
- [28] <http://data.irestal.com/files/files/2012030204152933979.pdf>
- [29] S. Armengol González. Tesis "Caracterización micro estructural y mecánica de barreras térmicas por APS y EB-PBD degradadas por fatiga térmica y por contacto". Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Ingeniería de Materiales. Barcelona, España 2006. <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3196>
- [30] D. Hui, Y. Guan-Jun, C. Hong-Neng, D. Hang, L. Cheng-Xin y L. Chang-Jiu. The influence of temperature gradient across YSZ on thermal cyclic life time of plasma-sprayed thermal barrier coatings. *Ceramics International*. 41(2015) 11046–11056. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.05.049>
- [31] M. Ahrens, R.Vassen y D.Stöver, Stress distributions in plasma-sprayed thermal barrier coatings as a function of interface roughness and oxide scale thickness, *Surf. Coat. Technol.* 161(2001)26–35. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897202003596>
- [32] A. M. Arato Tovar. Tesis "Obtención de circonia estabilizada con MgO". Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Nuevo León, México 1995. <http://eprints.uanl.mx/331/1/1020074695.PDF>

AGRADECIMIENTOS

El presente estudio se desarrolló gracias al apoyo económico de PROMEP, a través de una beca para estudios Doctorales del autor principal, del CICATA-IPN Querétaro donde se recibió cátedra para la formación Doctoral; además a CIATEQ y la Universidad Politécnica de Guanajuato, que permitieron desarrollar el trabajo experimental.

MATERIAL SUPLEMENTARIO: ANEXO I

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/7907-1.pdf



Propulsión acuática bio-inspirada basada en aleteo: revisión y últimos avances



Bio-inspired aquatic flapping propulsion: review and recent developments



Francisco J. Huera-Huarte

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI. Dpto de Ingeniería Mecánica. Avda. Països Catalans, 26 - 43007 Tarragona. Tfno: +34 977 558452.
francisco.huera@urv.cat

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7870> | Recibido: 02/11/2015 • Aceptado: 05/01/2016

ABSTRACT

- The advances in the last years in the field of bio-inspired aquatic propulsion, have to do without a doubt with the new capabilities introduced by novel optical measurement techniques for fluids such as particle image velocimetry and the use of increasingly detailed and precise numerical simulations. Thanks to these techniques, progress has been done into ways of implementing engineering systems based on flapping propulsion, and they have allowed a better understanding of the physics of the fluid-structure interaction phenomena.
- There is a vast amount of open literature describing the swimming of fish and of canonical systems that simulate animal flapping, and as a result, the role of kinematics and flexibility in propulsion, the role of fin shape and how important are three-dimensional effects, and other aspects such as interference with other wakes, are now better understood.
- In this brief review, the intention is to highlight the most important aspects related to flapping aquatic propulsion and to point out not intensively, some of the recent most influential works.
- Key Words:** Bio-mechanics, Bio-inspiration, flapping, swimming, fluid-structure interaction.

RESUMEN

Los avances que se han producido en los últimos años en el campo de la propulsión acuática bio-inspirada, tienen que ver indiscutiblemente, con las nuevas capacidades introducidas por técnicas de medida ópticas en fluidos como la velocimetría por imagen de partículas y por el uso de simulaciones numéricas cada vez más detalladas y precisas. Gracias a estas técnicas se ha podido avanzar hacia soluciones que se están ya empezando a implementar en sistemas de ingeniería, y han permitido entender parte de la física asociada a la interacción fluido-estructura en sistemas que se propulsan aleteando.

Se dispone de abundante literatura publicada que describe el nado de peces y sistemas que simulan canónicamente animales que aletean, y gracias a ello se está empezando a entender cuál es el rol de la cinemática y de la flexibilidad en la propulsión, cuales son los efectos de la forma de las aletas y como de importantes son los efectos tri-dimensionales, así como otros aspectos como por ejemplo la interferencia con otras estelas.

En esta breve revisión se pretenden destacar aquellos aspectos más importantes relativos al nado por aleteo y destacar así de forma no intensiva algunos de los trabajos recientes de interés.

Palabras Clave: bio-mecánica, bio-inspiración, aleteo, natación, interacción fluido-estructura.

1. INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista biológico y más en concreto pensando en aspectos evolutivos, la descripción a nivel de la física de la locomoción de especies que se desenvuelven en medio acuático, ha recibido gran atención en las últimas décadas. Además del interés asociado a la biología, ya desde el siglo XVI, Leonardo Da Vinci se inspiraba en la naturaleza para construir algunas de sus máquinas voladoras. La bio-inspiración, que consiste en la observación de la naturaleza como fuente de inspiración para diseñar sistemas artificiales, se ha establecido como una parte fundamental de la ingeniería, y se aplica en campos tan diversos como por ejemplo la mecánica, la aeronáutica, la robótica, la informática, la química y la medicina.

En el campo de la ingeniería mecánica, naval y aeronáutica, el estudio de nuevos sistemas de propulsión pasa por la bio-inspiración sin lugar a dudas. Sin ir más lejos, y para enfatizar con un ejemplo la importancia de este nuevo paradigma, destacar que un consorcio de empresas con sede en los Países Bajos presentó recientemente el *MS Triade*, un barco que se propulsa mediante un sistema basado en aleteo y no con hélices. Está basado en un mecanismo que permite transformar el giro desarrollado por un motor en un eje, a un movimiento de aleteo sencillo que permite propulsar la embarcación, de grandes dimensiones, y con gran eficiencia. Los creadores del sistema, la empresa O-foil, comentan que la eficiencia aumenta hasta un 50% si se compara a la propulsión por hélice. También en el mundo de la robótica y en especial en aquellos robots que se desenvuelven en medio fluido, aparecen constantemente nuevos conceptos basados en resultados que la naturaleza ha encontrado previamente como solución a adaptaciones específicas.

Con este manuscrito se pretende hacer una breve revisión de la física de la interacción fluido-estructura que se ha venido estudiando a partir de la observación de la natación de animales que se desenvuelven en medio acuático, y de estudios de sistemas bio-inspirados diseñados con el fin de reproducir aspectos concretos de la locomoción acuática. Otras revisiones más extensas son por ejemplo las de Sfakiotakis et al. (1999); Triantafyllou et al. (2004); Triantafyllou et al. (2005) y Wu (2010). No se pretende realizar una revisión a nivel de la fisiología u otros aspectos biológicos de especies concretas, ni tampoco de la gran variedad de robots biomiméticos que han ido apareciendo imitando la naturaleza.

2. DINÁMICA DEL ALETEO

En la naturaleza existen multitud de morfologías resultado de la adaptación al medio y de la especialización. El nado en medio

acuático puede analizarse de forma genérica simplificada, pensando en un cuerpo alargado de longitud L , que se mueve a velocidad U por un medio fluido de densidad ρ y viscosidad μ . Esta simplificación implica tratar el nado de un pez por ejemplo, simplemente estudiando la cinemática de una sección longitudinal del mismo, una especie de línea media del pez (figura 1). Como característica común, en todas las cinemáticas generadas, en la cola se tiene una amplitud A que varía con frecuencia f . Esta amplitud puede resultar de movimientos de sólido rígido o de cinemáticas muy diversas de la línea media. En los anguiliformes está basada en un movimiento ondulatorio que implica gran parte de la longitud del cuerpo, mientras que en los carangiformes solo es en la parte final del cuerpo, en la cola, donde se produce el movimiento (Lindsey, 1978). Entre estos modos de locomoción, existen muchos otros en función de la cinemática, de la forma y morfología, etc. Algunos autores han destacado el hecho de que en realidad existe la incertidumbre en relación a los modos de natación ya que se sabe por ejemplo que los anguiliformes usan cinemáticas muy parecidas a las de los carangiformes dependiendo de en qué condiciones nadan o de si están acelerando o no, etc. (Donley & Dickson, 2000).

Por otro lado, está claro que el problema es de naturaleza claramente tri-dimensional, por la forma, la relación de aspecto de los peces, las tipologías de aleta, etc. y por tanto los modelos dos dimensionales que se basan en el análisis de la línea media, introducen gran incertidumbre en este aspecto. En cualquier caso, si se asume el modelo bidimensional, es el movimiento de la cola y/o parte del cuerpo, lo que desplaza el fluido a su alrededor, generando una variación de cantidad de movimiento que resulta en una reacción que genera el empuje. Parece pues evidente que tanto la cinemática, como la forma como las características mecánicas de la cola así como las características del medio en el que se produce el aleteo, serán cruciales para entender el mecanismo físico por el que se genera la propulsión. La huella que el animal deja en el fluido al desplazarse, la estela, es también determinante para entender la mecánica del sistema. Si se mira el problema en términos de potencias, la energía generada por el nadador, se utiliza en su desplazamiento o empuje y en modificar el fluido a su alrededor, es decir en producir su estela. De hecho es el estudio de la estela, lo que ha permitido en las dos décadas pasadas, explicar muchas de las diferencias en el nado de diferentes especies, atribuibles a aspectos tri-dimensionales que en el pasado eran desconocidos al no estar implícitamente incluidas en los modelos bi-dimensionales.

Una de las teorías bi-dimensionales que más impacto ha tenido en el pasado, fue propuesta por Lighthill (1971). Se trata de la teoría para cuerpos alargados, en la que el autor desarrolla un modelo bidimensional basado en el cómputo de las reacciones que originan la propulsión en forma de empuje producidas por las variaciones de masa añadida (debidas a la aceleración impuesta por el nadador en el fluido que le rodea), en el que se desprecian las fuerzas viscosas. El modelo tiene especial relevancia por tanto cuando las fuerzas inerciales dominan frente a las viscosas, aspecto descrito por el número de Reynolds ($Re = \rho UL/\mu$), donde L es la longitud del nadador y μ es la viscosidad del fluido. En términos promediados, Lighthill concluye que el empuje se puede relacionar únicamente con el mo-

vimiento del canto de salida de la aleta, que es donde se inyecta la variación de cantidad de movimiento al fluido.

Tal y como se ha descrito en el párrafo anterior, el número de Reynolds describe la relación entre fuerzas inerciales y viscosas en un fluido, pero en el caso de la locomoción, no informa acerca de lo relativo a la cinemática de la aleta o del perfil analizado en el nado. En el pasado se ha utilizado el número de Strouhal ($St = fA/U$) ampliamente para describir estelas de cuerpos romos, en particular las generadas por cilindros en flujo cruzado. Por extensión, también aquellas asociadas a la cinemática del aleteo (Triantafyllou et al., 1993). El St para el caso del aleteo, puede entenderse como la relación existente entre la velocidad del extremo del apéndice que está aleteando y la del flujo libre, o lo que es lo mismo la velocidad del pez que se auto-propulsa. Es una manera de describir la cinemática impuesta al sistema en relación al campo fluido y a la vez de describir la periodicidad de la estela al aletear. Se ha comprobado además que tiene una relación directa con el empuje y con la eficiencia y que en general a más St más empuje se produce. Examinando curvas de eficiencia frente a St , aparecen máximos claramente definidos y por eso ha recibido especial atención en las últimas décadas (Triantafyllou et al., 1993). Aunque muchos de los peces aletean con St alrededor de 0.3-0.4 cuando se dan los óptimos de eficiencia, parece estar claro que el St no tiene un carácter universal, y por tanto no todos los animales o los sistemas que aletean tienen que hacerlo con un St determinado para ser más eficientes, de hecho hay casos muy claros en la naturaleza que aletean con St muy alejado de ese rango (Rohr & Fish, 2004).

Recientemente se han venido pensando en otros conceptos como el número de formación (Gharib et al. 1998) que indica de forma adimensional hasta cuando la vorticidad puede crecer en un remolino antes de aparezcan inestabilidades y nuevas estructuras que se separan del vortex o remolino en cuestión. Si observamos la formación de un anillo vortical (Gharib et al. 1998) puede verse como cuando el número de formación llega a un valor concreto, el vortex no puede seguir aumentando su circulación y parecen nuevas estructuras a su alrededor. En Dabiri (2009) el autor comenta como en varios flujos biológicos estudiados (propulsión a chorro en calamares y medusas, flujos cardíacos, etc.) el número de formación que aparece asociado a la formación de vórtices en la estela es 4, sugiriendo que podría indicar un óptimo y que por extensión podría aparecer de forma generalizada en la naturaleza. Preguntas como si ese óptimo es extensible a cualquier geometría o si la mayoría de seres que se propulsan en medio acuático lo hacen generando vórtices que acaban teniendo ese número de formación, están todavía en el aire y se continúan investigando.

En un reciente trabajo publicado por Gazzola et al. (2014), los autores proponen un nuevo número adimensional alternativo al St , destacando el hecho de que el St solo tiene en cuenta una de las escalas geométricas asociadas al nado de organismos alargados y que además mezcla los parámetros de entrada derivados de la cinemática con el resultado que es la velocidad del animal. En su nuevo parámetro, el número de nado o *Swimming number*, Sw ($\rho fAL/\mu$), aparecen las escalas de longitud y amplitud del aleteo con la frecuencia, además de la viscosidad del fluido, teniéndose en cuenta de esta forma el medio en el que se realiza la locomoción. Los autores compilan gran cantidad de datos experimentales y numéricos de forma que al graficar el Sw frente al Re , organismos aparecen claramente ordenados pudiéndose apreciar dos zonas muy claras, una en la que se mantiene la relación $Re Sw$ es lineal para régimen laminar y otra para el turbulento en el que debido al tamaño de los animales considerados frente a la capa límite, dominan las fuerzas de presión claramente frente a la fricción.



Fig. 1: Simplificación del análisis del nado mediante la línea media del pez

La teoría bidimensional de Lighthill, ha hecho que en las últimas dos décadas se haya utilizado como modelo canónico del nado por aleteo, el de un perfil alar o una placa moviéndose con una determinada cinemática impuesta en el seno de un fluido (al igual que la línea media mostrada en la figura 1), para poder estudiar el fenómeno de la propulsión por aleteo, ya sea a nivel experimental o numérico. Numerosos trabajos han aparecido en los que la cinemática impuesta consiste en una placa (flexible o rígida) girando alrededor de un eje (Alben, 2008; Godoy-Diana et al. 2008; Marais et al. 2012; Fernandez-Prats et al. 2015; Raspa et al. 2014; Green and Smits 2008; Bucholz and Smits, 2008); oscilando en su eje sin girar (Heathcote & Gursul, 2007; Cleaver et al. 2014; Quinn et al. 2014) o modelos que combinan placas o perfiles rígidos que además de girar cabeceando oscilan linealmente en su canto de ataque (Muijres & Lentink, 2007; Schouveiler et al. 2005). La mayoría de estos autores se han centrado en intentar describir aspectos concretos de la propulsión y la eficiencia de sus sistemas en relación a algunos de los números adimensionales descritos.

Las aletas de los peces morfológicamente son muy complejas al estar hechas de tejido biológico y cartilago, y por tanto son flexibles de forma pasiva, pero también pueden ser actuadas localmente mediante musculatura, que se usa para modificar localmente la rigidez y/o la forma. En la actualidad, gracias a todos los trabajos realizados en los últimos años, está claro que los modelos que no incluyen de alguna forma la flexibilidad, están lejos de poder representar los fenómenos de interacción fluido-estructura que se dan en la naturaleza (Lauder et al., 2012). Está también claro que la eficiencia aumenta con la flexibilidad y se ha demostrado que es debido a que los cambios en la flexibilidad producen cambios en la manera en la que se mueve el canto de salida de la aleta y por tanto para una misma cinemática impuesta, la deformación pasiva de aletas con diferentes rigideces resulta en diferentes prestaciones (Ramanarivo et al. 2013).

3. HIDRODINÁMICA Y ESTRUCTURAS EN LA ESTELA

Las topologías de las estelas que aparecen aguas abajo de sistemas que aletean, son muy similares a aquellas que se dan en cuerpos romos, con la principal diferencia que en las primeras se genera empuje y en las últimas por el contrario fuerzas de arrastre. Hasta los años 80 no se tienen formas de cuantificar en detalle los campos de velocidad aguas abajo de sistemas que aletean. Previamente se habían realizado visualizaciones de flujo a nivel cualitativo (Rosen, 1959), pero no aportaban la posibilidad de obtener parámetros que son de especial interés para analizar la propulsión, como son la vorticidad (velocidad angular local del flujo) a partir de la que se pueden estimar por ejemplo las fuerzas de empuje. Las estructuras en estela se han indagado en las décadas pasadas, gracias al uso de técnicas de medida óptica del campo de velocidad en fluidos, en particular la velocimetría por imagen de partículas o DPIV siglas en inglés de *Digital Particle Image Velocimetry* (Willert and Gharib, 1991). Gracias a esta técnica se puede obtener el campo de velocidades en un fluido y por tanto derivar luego otras magnitudes como la vorticidad, la circulación y determinar las estructuras coherentes en las estelas. Sus extensiones en versión volumétrica basada en desenfoque o *Defocusing DPIV* (Willert and Gharib, 1992), han permitido también en la última década detallar más todavía esas estructuras que aparecen en la estela. Por otro lado la dinámica de fluidos computacional o CFD en sus siglas inglesas, ha permitido también con la rápida evolución del hardware en las últimas décadas, realizar simulaciones más y más precisas y por tanto obtener descripciones completas del flujo en sistemas

basados en aleteo, como por ejemplo en Dong et al. (2006), Gazzola et al. (2011) o Huhn et al. (2015). La simulación completa de este tipo de sistemas es tremendamente compleja debido a que no solo consiste en el estudio numérico del fluido sino que también es necesario acoplar a través de las fuerzas hidrodinámicas, sus efectos sobre la parte estructural del sistema. Las deformaciones que experimenta la parte estructural cambian la dinámica del fluido a su alrededor y viceversa, por lo que los problemas se hacen realmente complicados y caros computacionalmente. Existe una gran cantidad de literatura disponible producida mediante el uso de las diferentes vertientes del DPIV o de CFD, con el objetivo de entender mejor la propulsión por aleteo, ya sea directamente usando seres vivos en el laboratorio o estudiando aspectos fundamentales de la propulsión mediante modelos simplificados. En general el estudio de peces en el laboratorio implica túneles hidrodinámicos en los que se coloca el pez y se le somete a diferentes tipos de flujo, por lo que responde aleteando para equilibrar el arrastre hidrodinámico. En esas condiciones se utilizan las técnicas de DPIV y sus variantes para estudiar la estela, así como vídeos de alta velocidad para medir la cinemática. El grupo del Profesor G. Lauder en Harvard, ha producido gran número de contribuciones en este sentido. A modo de ejemplo, en la figura 2, aparece una representación esquemática de la estela producida por un carangiforme en la que pueden apreciarse una serie de anillos vorticales unidos entre sí y caracterizados por chorros centrales con alta velocidad (indicados cualitativamente mediante una flecha), que implican variación de momento lineal y que por tanto producen empuje en la dirección del movimiento.

Si por el contrario se estudia el nado por aleteo mediante sistemas canónicos y no mediante especies concretas, existen multitud de trabajos de diferentes autores. A modo de ejemplo también, en la figuras 3 y 4 se muestran medidas obtenidas por Huera-Huarte et al. (2015), mediante el uso de velocimetría volumétrica (DDPIV). El experimento en concreto se realizó actuando en su canto de ataque una lámina de Mylar de 170 μm de espesor y dimensiones 100x33 mm (relación de aspecto 0.33). La cinemática que aparece en la figura 4, se impuso controlando el eje al que estaba unida la lámina, haciéndolo oscilar sinusoidalmente con una frecuencia de aproximadamente 1 Hz y una amplitud de 50 grados, mediante un motor paso a paso. En la imagen de la figura 3 pueden verse isosuperficies de vorticidad (criterio Q) que muestran los anillos comentados previamente y observados en el nado de animales que aletean en medio fluido. Este tipo de estudios pretenden simular mediante sistemas robóticos sencillos, aspectos concretos del nado de peces, y permiten aislar las variables a estudiar cosa que con animales vivos es normalmente imposible.

4. CONCLUSIONES Y TENDENCIAS FUTURAS

En los años venideros se espera que el número de estudios numéricos crezca a medida que la computación se abarate y a medida que los resultados vayan validándose con mediciones de calidad tri-dimensionales ya existentes. Las simulaciones proporcionarían una visión mucho más detallada del problema ya que



Fig. 2: Esquema de la estela producida por una caballa nadando, adaptado de Lauder, Nauder & Drucker (2002)



Fig. 3: Estela aguas abajo de una lámina flexible utilizada para simular el nado ondulatorio. La lámina es actuada por un motor que impone una señal senoidal de posición angular en su canto de ataque. Las estructuras que aparecen son isosuperficies de vorticidad (criterio Q) derivadas de medidas realizadas mediante el uso de velocimetría volumétrica o DDPV (Huera-Huarte et al., 2015)

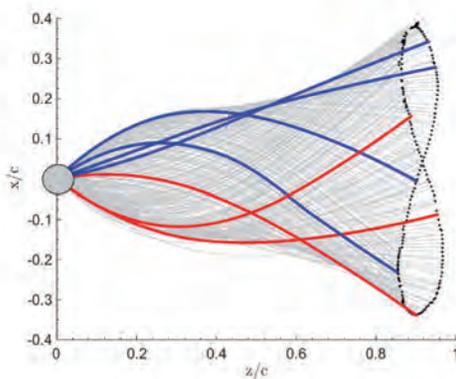


Fig. 4: Ejemplo de cinemática impuesta en los experimentos de Huera-Huarte et al. (2015) que aparecen en la figura 2. Cada línea muestra la deformación de la lámina en un instante de tiempo de un ciclo completo de aleteo

permitirán analizar en detalle todas las variables del problema, cosa que experimentalmente a día de hoy es imposible. La experimentación con seres vivos tiene el principal problema de no permitir aislar de forma exacta todos los parámetros deseados y es por eso que los experimentos y las simulaciones con sistemas simplificados o canónicos seguirán siendo necesarias en el futuro.

Desde el punto de vista de la ingeniería, y en ámbito naval en especial, queda claro que la observación de la naturaleza es importantísima si se pretenden diseñar sistemas más eficientes o sistemas tremendamente especializados, la clave está en lograr aquellos diseños que basándose en los conocimientos adquiridos por medio de la bio-inspiración, resulten en mecanismos sencillos para aletear con el menor número de grados de libertad posibles, la mayor sencillez constructiva y alta fiabilidad y que permitan niveles de eficiencia alta en los regímenes de trabajo deseados.

BIBLIOGRAFÍA

[1] M Sfakiotakis, D M Lane and J B C Davies. Review of Fish Swimming Modes for Aquatic Locomotion. IEEE Journal Of Oceanic Engineering, 24, 2, 1999. <http://dx.doi.org/10.1109/48.757275>
[2] M S Triantafyllou, A H Techet and F S Hover. Review of Experimental Work in Biomimetic Foils. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 29, 3, 585-594, 2004. <http://dx.doi.org/10.1109/joe.2004.833216>
[3] M. S. Triantafyllou, F. S. Hover, A. H. Techet D. K. P. Yue. Review of Hydrodynamic Scaling Laws in Aquatic Locomotion and Fishlike Swimming. Applied Mechanics Reviews, 58, 2005. <http://dx.doi.org/10.1115/1.1943433>

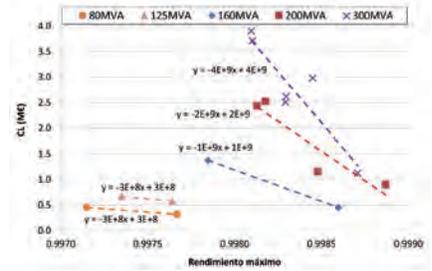
[4] T Y Wu. Fish Swimming and Bird/Insect Flight. Annu. Rev. Fluid Mech., 43, 25-58, 2011. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-fluid-122109-160648>
[5] C.C. Lindsey. Form, Function, and Locomotory Habits in Fish. Fish Physiology, Academic Press, 7, 1-100, 1979. [http://dx.doi.org/10.1016/s1546-5098\(08\)60163-6](http://dx.doi.org/10.1016/s1546-5098(08)60163-6)
[6] J M Donley and K A Dickson. Swimming kinematics of juvenile kawakawa tuna (euthynnus affinis) and chub mackerel (scomber japonicus). Journal of Experimental Biology, 203, 3103-3116, 2000
[7] M J Lighthill. Large-amplitude elongated-body theory of fish locomotion. Proc. R. Society London B. 179, 125-138, 1971. <http://dx.doi.org/10.1137/1.9781611970517.ch5>
[8] G S Triantafyllou, M Triantafyllou and MA Grosenbaugh, M.A. Optimal Thrust Development in Oscillating Foils with Application to Fish Propulsion. Journal Fluids and Structures, 7, 2, 205-224, 1993. <http://dx.doi.org/10.1006/jfls.1993.1012>
[9] J Rohr and F Fish. Strouhal numbers and optimization of swimming by odontocete cetaceans. The Journal of experimental biology, 207, 10, 1633-1642, 2004. <http://dx.doi.org/10.1242/jeb.00948>
[10] M Gharib, E Rambod, K Shariff. A universal time scale for vortex ring formation. Journal of Fluid Mechanics, 360, 121-140, 1998. <http://dx.doi.org/10.1017/s0022112097008410>
[11] J O Dabiri. Optimal Vortex Formation as a Unifying Principle in Biological Propulsion. Annu. Rev. Fluid Mech. 41:17-33, 2009. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-fluid.010908.165232>
[12] M Gazzola, M Argentina and L Mahadevan. Scaling macroscopic aquatic locomotion. Nature Physics, 10, 758-761, 2014. <http://dx.doi.org/10.1038/nphys3078>
[13] S. Alben. Optimal flexibility of a flapping appendage in an inviscid fluid. J. Fluid Mech., 614, 355-380, 2008. <http://dx.doi.org/10.1017/s0022112008003297>
[14] R Godoy-Diana, J L Aider and J E Wesfreid. Transitions in the wake of a flapping foil. Physical Review E, 77, 016308, 2008. <http://dx.doi.org/10.1103/physreve.77.016308>
[15] C. Marais, B. Thiria, J. E. Wesfreid and R. Godoy-Diana. Stabilizing effect of flexibility in the wake of a flapping foil. J. Fluid Mech., 710, 659-669, 2012. <http://dx.doi.org/10.1017/jfm.2012.390>
[16] R Fernández-Prats, V Raspa, B Thiria, F Huera-Huarte and R Godoy-Diana. Large-amplitude undulatory swimming near a wall. Bioinspir. Biomim., 10, 016003, 2015. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-3190/10/1/016003>
[17] V. Raspa, S. Ramanarivo, B. Thiria, and R. Godoy-Diana. Vortex-induced drag and the role of aspect ratio in undulatory swimmers. Physics of Fluids, 26, 041701, 2014. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4870254>
[18] M. Green and A. Smits. Effects of three-dimensionality on thrust production by a pitching panel. Journal of Fluid Mechanics, 615, 208, 2008. <http://dx.doi.org/10.1017/s0022112008003583>
[19] J.H.J Buchholz and A. J. Smits. The wake structure and thrust performance of a rigid, low-aspect-ratio pitching panel. J. Fluid Mech., 603, 331-365, 2008. <http://dx.doi.org/10.1017/s0022112008000906>
[20] S. Heathcote and I Gursul. Jet switching phenomenon for a periodically plunging airfoil. Phys. Fluids 19, 027104, 2007. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2565347>
[21] D.J. Cleaver, I. Gursul, D.E. Calderon and Z. Wang. Thrust enhancement due to flexible trailing-edge of plunging foils. Journal of Fluids and Structures, 51, 401-412, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2014.09.006>
[22] D. B. Quinn, K. W. Moored, P. A. Dewey and A. J. Smits. Unsteady propulsion near a solid boundary. Journal of Fluid Mechanics, 742, 152-170, 2014. <http://dx.doi.org/10.1017/jfm.2013.659>
[23] F T Muijres and D Lentink. Wake visualization of a heaving and pitching foil in a soap film. Exp Fluids, 43, 665-673, 2005. <http://dx.doi.org/10.1007/s00348-007-0379-y>
[24] L. Schouveiler, F.S. Hover and M.S. Triantafyllou. Performance of flapping foil propulsion. Journal of Fluids and Structures, 20, 949-959, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2005.05.009>
[25] G. V. Lauder, B. Flammang and S. Alben. Passive Robotic Models of Propulsion by the Bodies and Caudal Fins of Fish. Integrative and Comparative Biology 52, 5, 576-587, 2012.
[26] S. Ramanarivo, R. Godoy-Diana and B. Thiria. Passive elastic mechanism to mimic fish-muscle action in anguilliform swimming. Journal of the Royal Society, Interface, 10, 88, 20130667, 2013. <http://dx.doi.org/10.1098/rsif.2013.0667>
[27] M. W. Rosen. Water flow about a swimming fish. Naval Ordnance Test Station, Technical Paper. 2298, 1-96, 1959.
[28] C.E. Willert and M. Gharib. Digital particle image velocimetry. Experiments in Fluids, 10, 4, 181-193, 1991. <http://dx.doi.org/10.1007/bf00190388>
[29] C.E. Willert and M. Gharib. Three-dimensional particle imaging with a single camera. Experiments in Fluids, 12 (6), 353-358, 1992. <http://dx.doi.org/10.1007/bf00193880>
[30] H. Dong, R. Mittal and F. M. Najjar. Wake topology and hydrodynamic performance of low-aspect-ratio flapping foils. Journal of Fluid Mechanics, 566, 309-343, 2006. <http://dx.doi.org/10.1017/s002211200600190x>
[31] M. Gazzola, P. Chatelain, W. M. van Rees, P. Koumoutsakos. Simulations of single and multiple swimmers with non-divergence free deforming geometries. Journal of Computational Physics, 230, (19), 7093-7114. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcp.2011.04.025>
[32] F. Huhn, W. M. van Rees, M. Gazzola, D. Rossinelli, G. Haller and P. Koumoutsakos. Quantitative flow analysis of swimming dynamics with coherent lagrangian vortices. Chaos, 25, (8), 087405, 2015. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4919784>
[33] G. V. Lauder, J. C. Nauen and E. G. Drucker. Experimental Hydrodynamics and Evolution: Function of Median Fins in Ray-finned Fishes. INTEGR. COMP. BIOL., 42:1009-1017, 2002. <http://dx.doi.org/10.1093/icb/42.5.1009>
[34] F.J. Huera-Huarte, V. Raspa, B. Thiria, R. Godoy-Diana. Three-dimensional volumetric velocimetry in the wake of an undulatory swimmer. 68th American Physical Society - Division of Fluid Dynamics, APS DFD, 2015, Boston, MA, USA.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece el soporte económico recibido a través de los proyectos DPI2012-37904 y DPI2015-71645-P del Ministerio de Economía y Competitividad.

Efecto de la adquisición, considerando la capitalización de pérdidas, en la eficiencia de flotas de transformadores de potencia

Effect of the acquisition, considering the capitalization of losses, in fleet efficiency of power transformers



Félix Ortiz-Fernández, Carlos J. Renedo-Estébanez, Fernando Delgado-San-Román, Alfredo Ortiz-Fernández, Inmaculada Fernández-Diego y Cristian Olmo-Salas

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA. Av. Los Castros, s/n - 39005 Santander. Tfno: +34 942 20 22 23. ortizfa@uncan.es

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7898> | Recibido: 30/11/2015 • Aceptado: 03/03/2016

ABSTRACT

- In the current context where the objective is the reduction of the world energy consumption, it has been published the Commission Regulation No 548 of 21 May 2014 on Implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament with regard to small, medium and large power transformers. This regulation establishes minimum performance values for each size and type of machine. The performance considered in this document corresponds to the maximum value developed for each transformer. This parameter is independent of the loading regime and helps to carry out performance comparisons in the operating point of minimal losses. On the other hand, some Transmission System Operators and Utilities consider the cost of losses when purchasing new transformers, this is known as capitalization of losses. This article has studied the effect of losses capitalization on the performance of power transformer fleets. For this objective, the losses of a large population of European power transformers have been considered. The machines analyzed are classified by the regulation as liquid immersed large power transformers. Moreover, the study takes into account machines with power higher than 100MVA. This European legislation proposes the same performance limits for any transformer exceeding this power.
- Keywords:** Power Transformer, Maximum performance, Losses Capitalization, Load Index, No-load losses, Load losses.

RESUMEN

En el contexto actual donde el objetivo es la reducción del consumo mundial de energía, se ha publicado el Reglamento nº548 de 21 de mayo de 2014 en aplicación de la Directiva 2009/125/CE del Parlamento Europeo con respecto a transformadores de pequeña, mediana y gran potencia. Este reglamento establece los valores mínimos de rendimiento para cada tamaño y tipo de máquina.

El rendimiento de un transformador no es constante, varía con el régimen de trabajo; no obstante, para poder realizar una comparación de diferentes máquinas, en este artículo se ha considerado el índice de eficiencia máximo del transformador, que queda definido en el Reglamento anterior.

Por otra parte, algunos operadores de sistemas de transmisión y compañías distribuidoras de energía eléctrica consideran el costo de las pérdidas en la compra de nuevos transformadores, esto se conoce como capitalización de pérdidas.

En este artículo se ha estudiado el efecto de la capitalización de pérdidas en el rendimiento de las flotas de transformadores

de potencia. Para este objetivo, se han considerado las pérdidas de una gran población de transformadores de potencia europeos.

Las máquinas analizadas se clasifican dentro del citado reglamento como grandes transformadores inmersos en líquido. Por otra parte, el estudio tiene en cuenta las máquinas con una potencia superior a 100 MVA. Esta legislación Europea propone los mismos límites de rendimiento para cualquier transformador superior a esta potencia.

Palabras clave: Transformador de potencia, Rendimiento máximo, Capitalización de pérdidas, Índice de carga, Pérdidas en vacío, Pérdidas en carga.

1. INTRODUCCIÓN

La gestión de la producción, distribución, uso y desmantelamiento de los equipos consumidores de energía tiene importantes consecuencias para el medio ambiente. Se pueden mencionar ejemplos como son: la reducción de los recursos naturales, la generación de residuos o la emisión de sustancias peligrosas al medio ambiente [1-4]. Se estima que durante la etapa de diseño de estos equipos queda determinado más del 80% de los impactos ambientales asociados a los mismos [5].

Además de los efectos ambientales, la crisis financiera global, que estalló en 2008, la necesidad de garantizar la seguridad de los equipos y el incremento del beneficio, son los factores que están motivando la toma de decisiones de los gestores de las instalaciones [6, 7]. Es en los países industrializados en los que estas medidas han alcanzado un nivel de desarrollo mayor.

Internacionalmente, hay diferentes instrumentos para procurar que se reduzca el consumo energético asociado a los equipamientos. Las herramientas más eficaces para promover el desarrollo y la difusión de dispositivos de bajo consumo son el etiquetado energético y las normativas sobre eficiencia que se imponen a los equipos en la fase de diseño [8, 9]. La primera estrategia consiste en llamar la atención de los usuarios de estos dispositivos, ya que la clasificación del equipo les indica si van a ahorrar energía y dinero. La segunda limitará la oferta a modelos con la eficiencia energética adecuada, de acuerdo con la legislación correspondiente.

A este respecto, la Unión Europea ha promovido la Directiva 125 de octubre de 2009, que crea un marco para el establecimiento de requisitos de diseño ecológico para los equipos consumidores de energía eléctrica. Esta directiva no contiene ninguna disposición directa sobre requisitos obligatorios para productos específicos. Los requisitos de eficiencia que deben cumplir los pro-

ductos que utilizan energía eléctrica se implementan a través de regulaciones y acuerdos voluntarios. La regulación específica para transformadores de potencia es el Reglamento n°548 de 21 de mayo 2014 [10] implementado bajo la Directiva 2009/125/CE del Parlamento Europeo [11].

1.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Los transformadores son dispositivos de gran importancia en la transmisión y distribución de energía eléctrica, ya que tienen un gran impacto en la eficiencia económica y la fiabilidad de la red [12, 13]. La mayor parte de la energía eléctrica consumida está sujeta a varias etapas en las que el nivel de tensión se aumenta o se reduce. Las principales causas de estos cambios son: la necesidad de transportar la energía a la tensión más alta posible, reduciendo así las pérdidas, y la necesidad de consumir energía en el nivel de tensión más bajo posible, para aumentar la seguridad de los usuarios. De las plantas de generación a los puntos de consumo, la energía cambia un promedio de tres veces su nivel de tensión. Dos son los tipos de empresas que juegan un papel principal en la transformación de la energía; los operadores del sistema de transmisión (TSO) y los operadores del sistema de distribución (DSO). Por lo general, los primeros gestionan la red con una tensión superior a 150kV, bajo la supervisión del gobierno; y los segundos gestionan la red con una tensión inferior a 150kV, siendo generalmente empresas privadas.

Las pérdidas asociadas con los transformadores de distribución pueden llegar hasta un 26,6% de las pérdidas en los sistemas de transmisión y distribución, lo que supondría el 7,5% de la energía generada [14].

La mejora de la eficiencia de estas máquinas contribuye a disminuir el consumo de energía y por lo tanto reducir la demanda de recursos naturales y las emisiones de gases de efecto invernadero [15, 16]; que son cuestiones cruciales para un desarrollo sostenible. El ahorro de energía es la forma menos costosa de aumentar la seguridad del suministro y reducir la dependencia de las importaciones energéticas. Por lo tanto, se requiere un estudio adecuado en la fase de diseño del transformador ya que la contaminación producida durante el ciclo de vida de estas máquinas se determina en esta etapa [11].

Las pérdidas en un transformador se dividen en tres componentes: pérdidas en vacío, pérdidas en carga y pérdidas de refrigeración [17-24]. La reducción de estas pérdidas mejora la eficiencia de los transformadores [25, 26]. Los costes asociados a estas pérdidas se deben considerar en el proceso de evaluación económica del ciclo de vida del transformador [27]. Esta evaluación analiza el coste total que supone la propiedad de un transformador (TOC). Cuando se trata de elegir entre los diseños de transformador de dos o más fabricantes, el TOC se utiliza para apoyar la compra del transformador más eficiente [29]. Esto puede fomentar el desarrollo de modelos matemáticos o físicos de optimización, que permitan encontrar la mejor configuración de transformador desde el punto de vista energético, así como la optimización de los costos de materiales y mano de obra utilizada en la fabricación, considerando nuevas técnicas de fabricación y nuevos tipos de materiales para el núcleo [12, 29].

El TOC se define como el coste de adquisición más la capitalización de las pérdidas. La segunda parte representa el impacto económico debido al coste de las pérdidas durante el periodo de tiempo evaluado. El transformador más rentable y eficiente es el que tiene un TOC más bajo [26].

Diferentes autores han definido una variada gama de técnicas de evaluación de las pérdidas [9, 17, 26, 28-33]. Es destacable que, aunque estas técnicas de evaluación son similares, hay cambios

importantes en la definición y evaluación de los costes del sistema y los parámetros que caracterizan la carga [28]. Algunos de estos trabajos han tenido en cuenta los efectos socio-ambientales causados por las emisiones de gases de efecto invernadero del sector energético. Con el fin de internalizar los costes en el medio ambiente, estos autores incluyen en el TOC los costes de emisión de gases de efecto invernadero asociados con las pérdidas del transformador de potencia a lo largo de su vida útil.

Estos trabajos muestran las ventajas resultantes del uso de transformadores de alta eficiencia [17, 31]. En este sentido, se han propuesto diferentes soluciones para conseguir una reducción significativa en las pérdidas en transformadores [14, 33] lo que apoya el uso de transformadores más eficientes [34]. Como resultado de todos estos trabajos, se concluye que, el aumento de la inversión inicial por la adquisición de transformadores eficientes, se compensa a lo largo de la vida útil de las unidades, ya que el costo asociado con sus pérdidas es significativamente menor que el que se tiene con los transformadores de baja eficiencia.

Es importante señalar el hecho de que aunque en los últimos 25 años las prácticas de adquisición de transformadores han considerado algún tipo de evaluación de las pérdidas, aún existen clientes que deciden según el precio de compra más bajo, ignorando el costo de las pérdidas durante la vida útil del transformador. Estos compradores no son generalmente responsables de la propiedad o de la operación del transformador. Los clientes con responsabilidad en la operación prefieren reducir las pérdidas, y especifican los valores de capitalización de las pérdidas. Esta capitalización de las pérdidas refleja el costo de esta energía perdida en el transformador durante su vida útil [29]. Además, hay algunos clientes que establecen en el momento de la compra las pérdidas máximas que pueden tener sus transformadores, sin tener en cuenta su efecto a lo largo de su periodo de operación.

1.2. OBJETIVO Y ALCANCE DEL TRABAJO

El objetivo de este artículo es analizar el efecto de la capitalización de las pérdidas en el máximo rendimiento de las flotas de transformadores de potencia. A este respecto, se han recogido los datos correspondientes a una flota de transformadores que actualmente están en funcionamiento en diferentes países europeos. En esta flota, la mayor parte de las máquinas fueron adquiridas sin tener en cuenta la capitalización de las pérdidas que se producen a lo largo de su vida; éstas sólo se han tenido en cuenta en unos pocos casos. Esto ha permitido evaluar, en función de la potencia y el máximo rendimiento, los costes que generalmente se utilizan para capitalizar las pérdidas de los transformadores europeos. También ha sido posible comparar el máximo rendimiento que tienen las máquinas adquiridas con y sin capitalización de pérdidas. Por último, se ha estudiado si las máquinas en las que se han capitalizado sus pérdidas están más cerca de cumplir con el Reglamento 548/2014 de la Unión Europea.

1.3. ORGANIZACIÓN DEL ARTÍCULO

La estructura de este trabajo es como sigue: en la segunda sección se presenta la definición del rendimiento máximo, que es independiente del índice de carga, la impedancia o el nivel de tensión, y que permite una comparación entre diferentes tipos de transformadores. En el tercer apartado se explica el análisis económico TOC, que permite definir el efecto de las pérdidas de potencia durante la vida en operación del transformador. En la cuarta sección se describen las características de una flota europea de grandes transformadores de distribución; considerando los costes que han asignado a las pérdidas en vacío y en carga las empresas

que han implementado capitalización de pérdidas en sus flotas. En el quinto apartado se compara el máximo rendimiento de esta población de máquinas con los límites propuestos en el Reglamento EU 548/2014; el objetivo de este apartado ha sido estudiar el efecto de la evaluación de pérdidas en el rendimiento máximo. Por último, se presentan las conclusiones obtenidas tras este análisis.

2. RENDIMIENTO MÁXIMO DE LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA

El Reglamento No 548/2014 de la Unión Europea [10] establece los requerimientos mínimos de eficiencia para transformadores de potencia. Estos límites se implementan mediante el rendimiento máximo que deben superar las máquinas de media y gran potencia. En este apartado se desarrolla la teoría que justifica este concepto. Las pérdidas en los transformadores P_p se componen de dos términos, pérdidas en vacío y pérdidas en carga.

$$P_p = P_0 + P_k \quad (1)$$

Donde:

P_0 se corresponde con las pérdidas en vacío

P_k se corresponde con las pérdidas en carga

Las pérdidas en vacío están asociadas a la magnetización del circuito magnético. Estas se conocen como las pérdidas en el hierro, y su valor es constante. Las pérdidas en carga están asociadas a la resistencia de los conductores, y por lo tanto su valor depende de la corriente circulante, y están fijadas por el índice de carga del transformador.

$$P_k = C^2 \cdot P_{sc} \quad (2)$$

Donde:

C se corresponde con el índice de carga

P_{sc} se corresponde con la potencia del ensayo en cortocircuito

Las pérdidas internas en el transformador P_p son iguales a la diferencia entre las potencias de entrada y de salida.

$$P_p = P_1 - P_2 \quad (3)$$

Donde:

P_2 se corresponde con la potencia de salida

P_1 se corresponde con la potencia de entrada

El rendimiento de un transformador, η , se puede determinar como el ratio entre las potencias de salida y entrada.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (4)$$

De forma similar, el rendimiento de un transformador se puede calcular como:

$$\eta = 1 - \frac{P_p}{P_1} = 1 - \frac{P_p}{P_2 + P_p} \quad (5)$$

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + C^2 \cdot P_{sc}}{P_2 + P_0 + C^2 \cdot P_{sc}} \quad (6)$$

La potencia de salida se puede obtener mediante la expresión:

$$P_2 = C \cdot S_2 \cdot \cos\varphi_2 \quad (7)$$

Donde:

S_2 es la potencia aparente de salida

$\cos\varphi_2$ es el factor de potencia

La Ecuación (4) permite calcular la energía perdida en un transformador, sin embargo no resulta de gran utilidad cuando se trata de estudiar regímenes de carga variables; en estos casos resulta más apropiada la Ecuación (6). Pero aunque esta expresión resulta mejor para calcular el rendimiento, no son fáciles de fijar con ella los límites de referencia para las pérdidas en vacío y en carga que puedan tener los grandes transformadores utilizados en distribución de energía eléctrica. Algunos factores que pueden tener influencia en estas pérdidas son: la impedancia, el índice de carga o el nivel de tensión.

Por lo tanto, si se comparan desde el punto de vista de la eficiencia energética transformadores similares, el rendimiento máximo resulta ser el mejor parámetro, estando asociado al diseño de cada transformador.

El rendimiento alcanza su máximo valor cuando las pérdidas en carga son iguales a las de vacío. Este rendimiento se obtiene mediante el índice carga óptimo, C_{opt} :

$$\eta_{max}(C_{opt}) \rightarrow P_k = P_0 = C_{opt}^2 \cdot P_{sc} \quad (8)$$

$$C_{opt} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{sc}}} \quad (9)$$

Considerando en la Ecuación (6) el valor óptimo del índice de carga, se obtiene el rendimiento máximo del transformador. Si además se considera el factor de potencia como la unidad, se puede comparar una población de transformadores in términos de rendimiento.

$$\eta_{max} = 1 - \frac{2P_0}{C_{opt} \cdot S_2 + 2P_0} \quad (10)$$

Por lo tanto, el rendimiento máximo se puede calcular conociendo únicamente las pérdidas en vacío, las pérdidas en cortocircuito, la potencia aparente de salida y el factor de potencia (considerado como 1).

Esta aproximación del cálculo de la eficiencia energética resulta de utilidad para comparar el rendimiento de grandes transformadores de distribución cuando las tensiones del primario resultan diferentes, ya que este método se centra en las pérdidas que tiene cada unidad. Otra opción podría ser dar las pérdidas máximas en vacío y en cortocircuito para cada tipo de transformador; sin embargo, podría resultar muy complejo ya que estos valores están asociados con diversas características técnicas.

Los cálculos de eficiencia llevados a cabo en este trabajo han considerado que, cuando no hay carga, las pérdidas asociadas al sistema de refrigeración están incluidas en P_0 , mientras que cuando el transformador trabaja en su máximo rendimiento las pérdidas por refrigeración están incluidas en P_k .

3. CAPITALIZACIÓN DE PÉRDIDAS EN LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA

El precio inicial de los transformadores con menores niveles de pérdidas es mayor que el de los menos eficientes. Esto es debido al mayor valor de los materiales necesarios para la fabricación de la máquina. Sin embargo, si se tiene en cuenta toda la energía transformada anualmente y el costo de las pérdidas, el precio adicional

de una máquina de alta eficiencia se amortiza en unos pocos años gracias a su mayor rendimiento.

En este contexto, tanto las TSOs como las DSOs pueden capitalizar las pérdidas de energía, que se podría definir como el cálculo de los ahorros obtenidos hoy, por el efecto de limitar las pérdidas en un transformador a lo largo de su vida útil. Para capitalizar correctamente las pérdidas se deben tener en cuenta dos datos; el precio previsto para la electricidad cada año de la vida del transformador, y el valor de las pérdidas en ese periodo. Este cálculo de futuros flujos de efectivo se debe corregir mediante las tasas de descuento apropiadas, con el fin de traducir el beneficio al momento de la compra de la máquina. Sin embargo, estos datos no se pueden obtener fácilmente y son a menudo demasiado inciertos. Esto hace necesario que se involucren expertos en la definición de factores de capitalización apropiados.

En el análisis de la capitalización se deben incluir las pérdidas de refrigeración, con las de vacío, presentes mientras el transformador está conectado, y con las de carga, que constituyen la componente variable que depende del nivel de carga. El TOC se define a continuación:

$$TOC = IC + OC + NLL \cdot (P_0 + P_{c0}) + LL \cdot (P_k + P_{cs} - P_{c0}) \quad (11)$$

Donde:

- IC es el coste inicial del transformador (€)
- OC son los costes asociados a la instalación, mantenimiento, desmantelamiento, etc (€)
- P_{c0} es la potencia necesitada para para refrigeración con el transformador en vacío (kW)
- P_{cs} es la potencia necesitada para la refrigeración para un factor de carga determinado (kW)
- NLL es el coste de capitalización para las pérdidas en vacío (€/kW)
- LL es el coste de capitalización para las pérdidas en carga (€/kW)

Los factores NLL y LL dependen de variables como la carga del transformador y los precios de la energía. Se pueden calcular con las Ecs. 12 y 13:

$$NLL = \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \cdot C_{kWh} \cdot 8760 \quad (12)$$

$$LL = \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \cdot C_{kWh} \cdot 8760 \cdot \left(\frac{i_i}{i_r}\right)^2 \quad (13)$$

Donde:

- i es la tasa de interés
- n es la esperanza de vida del transformador (años)
- C_{kWh} es el coste de las pérdidas en la mitad de la vida (€/kWh), no incluye el efecto de la inflación
- 8760 son el número de horas de un año (h/año)
- i_i es la intensidad en carga (amps)
- i_r es la intensidad nominal current (amps).

En la práctica, las especificaciones definen el tamaño y el peso que debe tener el transformador a diseñar, el método de instalación y el régimen de mantenimiento. La capitalización de pérdidas (CL) se define como la diferencia entre el TOC y la suma de IC + OC, Ec. 14.

$$CL = TOC - (IC + OC) = NLL \cdot (P_0 + P_{c0}) + LL \cdot (P_k + P_{cs} - P_{c0}) \quad (14)$$

Las pérdidas en vacío y sus pérdidas de refrigeración asociadas están presentes tan pronto como se energiza el transformador. Por lo tanto, el cálculo del coste de capitalización de estas pérdidas se puede obtener como el producto del precio de la energía y el tiempo de funcionamiento a lo largo de la vida del transformador.

Por lo general, la carga de un transformador se puede dividir entre la carga fija, que es constante y está presente durante todo el año, y la carga variable, que depende de las condiciones ambientales y está presente únicamente durante ciertos periodos de tiempo. Por lo tanto, el costo capitalización de estas pérdidas se define como la suma de los factores de carga multiplicada por el precio de la energía. Esto es cierto si la inversión se analiza sobre la base de que el promedio de carga del transformador es constante. En otro caso, se debe utilizar un factor corrector en función del incremento de la carga [28].

Las empresas que utilizan CL a la hora de adquirir un nuevo transformador no tratan de aumentar el rendimiento del transformador; quieren reducir, tanto como sea posible, la inversión. En otras palabras, tratan de optimizar el coste total de la máquina teniendo en cuenta su eficiencia. De esta manera, la CL se podría aceptar como una forma adecuada para optimizar el diseño del transformador, teniendo en cuenta los requisitos de los clientes.

4. ANALISIS DEL COSTE ASIGNADO A LAS PÉRDIDAS

Para este estudio se han considerado 3437 máquinas que pertenecen a TSOs y DSOs europeos. De esta población sólo 223 máquinas fueron adquiridas con CL (6,49%). Estos datos se han obtenido a partir de transformadores actualmente en funcionamiento en Noruega, Suecia, Reino Unido, España, Italia, Croacia y Rumanía. La capitalización de las pérdidas ha sido más comúnmente utilizada por las TSOs que por los DSOs. En la flota considerada, el porcentaje de unidades instaladas en los últimos 10 años ha sido del 31,3%. Los sistemas de refrigeración más utilizados son ONAN y ONAF. Algunas máquinas presentan refrigeración OFAF y ODAF, pero son sistemas de refrigeración menos comunes. El tamaño medio de los transformadores de transmisión es de 100 MVA. Por otra parte, los transformadores utilizados en las plantas generadoras y en la distribución de energía tienen una potencia media que oscila entre el 24,3 y el 37,2 MVA. La tensión más alta en los transformadores considerados varía entre 45kV y 400kV.

En esta sección, se evalúa el coste asignado por las empresas de distribución y de transmisión a las pérdidas en vacío y en carga. Por lo tanto, aquí sólo se consideran las empresas que implementan CL. La figura 1 muestra el coste asignado por varios TSOs a las pérdidas en vacío y en carga cuando implementaron la CL para la obtención del TOC de cada máquina. Las líneas de tendencia ayudan a observar que los rangos de variación de estos costes se mantienen aproximadamente constantes cuando la potencia de la máquina aumenta. Los costes asignados al LL varían de alrededor de 730 a 4000€/kW, y los costes asignados al NLL varían aproximadamente entre 3750 y 10000€/kW.

Del mismo modo, la Fig. 2 muestra el coste asignado por varios DSOs a las pérdidas en vacío y carga de sus transformadores. Estos costes se utilizan para evaluar las pérdidas de energía asociadas con cada máquina durante su vida útil, siendo parte del cálculo del TOC. Como en el caso de los TSOs, las líneas de tendencia muestran que los rangos de variación de estos costes siguen siendo aproximadamente constante a medida que la potencia de la máquina aumenta. Los costes asignados a LL varían aproximadamente entre 745 y 1900€/kW, y los costes asignados a NLL varían entre aproximadamente 4246 y 5265€/kW, con un caso singular de 7500€/kW.

La conclusión que se puede extraer de las figuras anteriores es que los DSO's utilizan menores costes de capitalización que los TSO's, tanto para las pérdidas en carga como para las en vacío.

Esto se debe a que los transformadores propiedad de TSO's son estratégicamente los más importantes en cada país, la mayoría de ellos tiene una potencia nominal superior a 150 MVA, mientras que las máquinas propiedad de DSO's tiene generalmente potencias por debajo de este valor.

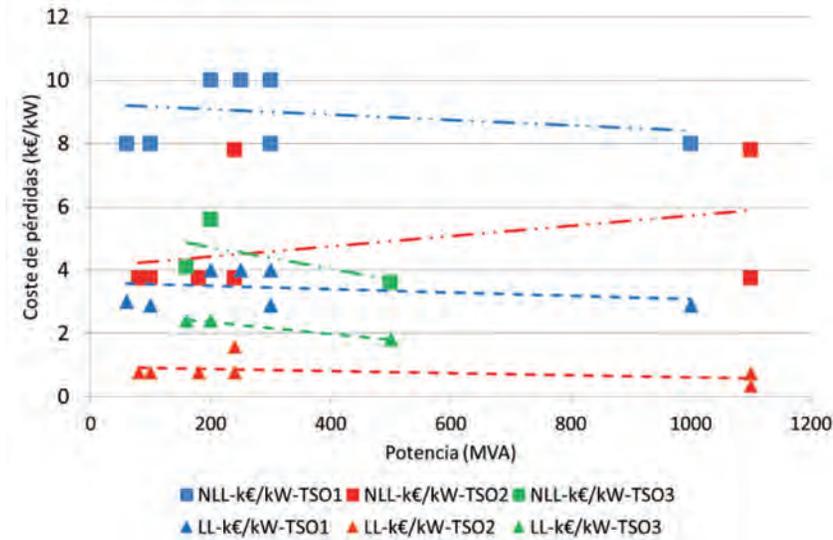


Fig. 1: Coste de las pérdidas en función de la potencia de las máquinas (TSO's)

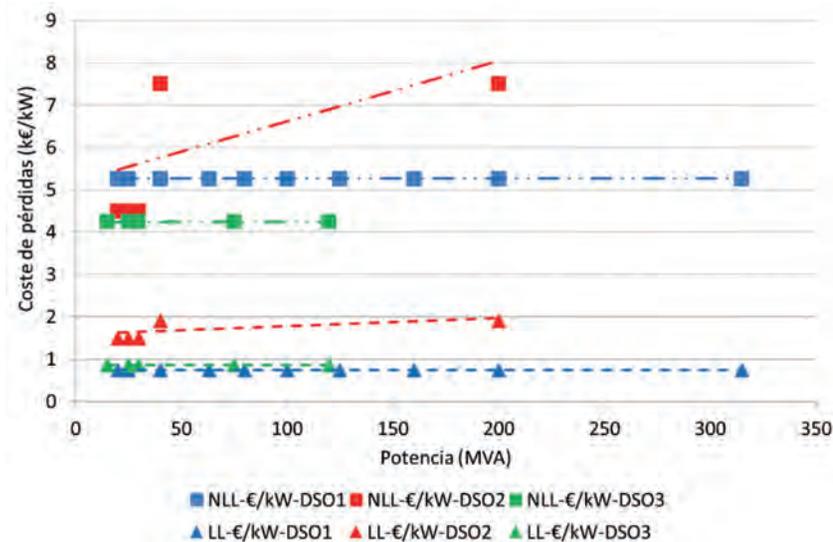


Fig. 2: Coste de las pérdidas en función de la potencia de las máquinas (DSO's)

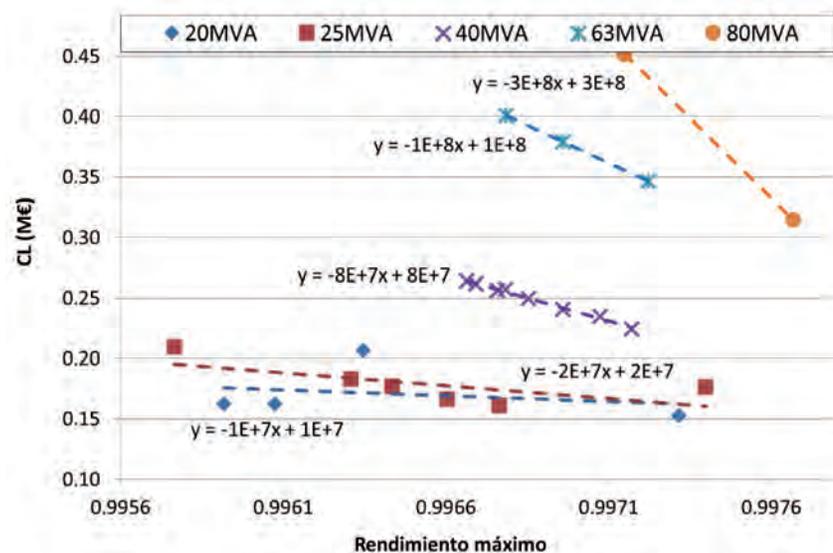


Fig. 3: Coste de las pérdidas en función del rendimiento (hasta 80MVA)

Por otra parte, si los datos anteriores, NLL y LL, se multiplican por las pérdidas correspondientes ($P_0 + P_{co}$) y $(P_k + P_{cs} - P_{co})$, se pueden obtener la cantidad de dinero con que se han valorado las pérdidas a lo largo de toda la vida de los transformadores estudiados (11).

En esta sección también se ha analizado la relación entre la CL y el rendimiento máximo de los transformadores. Las Figs. 3 y 4 muestran los resultados de esta comparación para máquinas con potencia nominal inferior y superior a 80 MVA, respectivamente. La primera observación que se puede extraer de estos datos es que la línea de tendencia es negativa para toda la gama de potencias analizada, lo que significa que cuanto mayor es la eficiencia del transformador, menores son las pérdidas y, en consecuencia, menor será su CL. Por otra parte, se puede observar cómo este efecto se acentúa cuando la potencia de transformar aumenta. Las Figs. 3 y 4 incluyen las ecuaciones correspondientes a las líneas de tendencia de cada potencia. La pendiente crece con la potencia, pasando de $1E+07$ para máquinas de 20 MVA, hasta $4E+09$ para las de 300 MVA. El hecho que no se hayan mostrado algunas potencias ha sido motivado por la falta de datos, o por la influencia de los diferentes niveles de precios entre los países estudiados.

5. RELACIÓN ENTRE LA CAPITALIZACIÓN DE PÉRDIDAS Y EL RENDIMIENTO MÁXIMO DE LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA

En esta sección se han tenido en cuenta los límites mínimos de rendimiento asignados por el Reglamento 548/2014 de la Comisión Europea a los transformadores que actualmente se compran en Europa. Este documento establece dos límites, el primero es aplicable desde 1 de julio de 2015 (Tier1) y el segundo tendrá efecto sobre las máquinas adquiridas después del 1 Julio 2021 (Tier2). Esta regulación tiene en cuenta diversos tipos de máquinas, en su sección segunda se presenta el máximo rendimiento que deben superar los grandes transformadores en baño de aceite a partir de 4 MVA y hasta 100 MVA [9].

Las figuras 5 y 6 muestran la variación de máximo rendimiento para un grupo de transformadores de potencias concretas. El signo "+" indica la máquina más eficiente, y el signo "-" indica la unidad con las mayores pérdidas. Cuando el signo "+" coincide con el signo "-" significa que los transformadores correspondientes a esa potencia tienen la misma eficiencia energética. Por otra parte, estas dos figuras muestran el Tier1 en rojo y el Tier2 en azul.

La figura 5 muestra el caso de los transformadores que fueron comprados por empresas que no

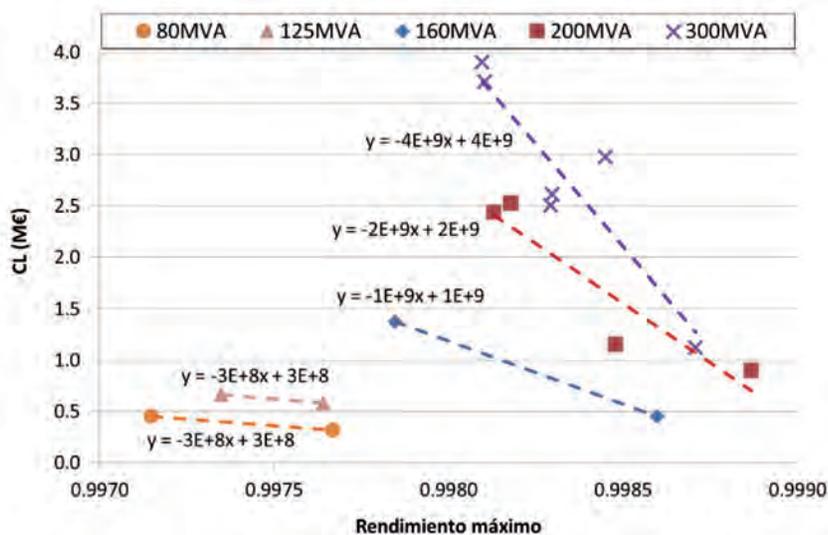


Fig. 4: Coste de las pérdidas en función del rendimiento (mayor de 80MVA)

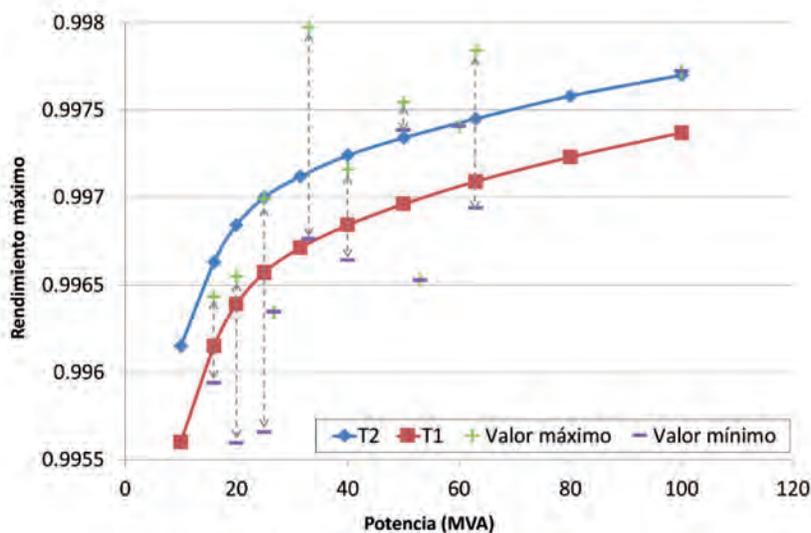


Fig. 5: Rendimiento máximo versus Potencia (compañías que no consideran la CL y transformadores hasta 100MVA)

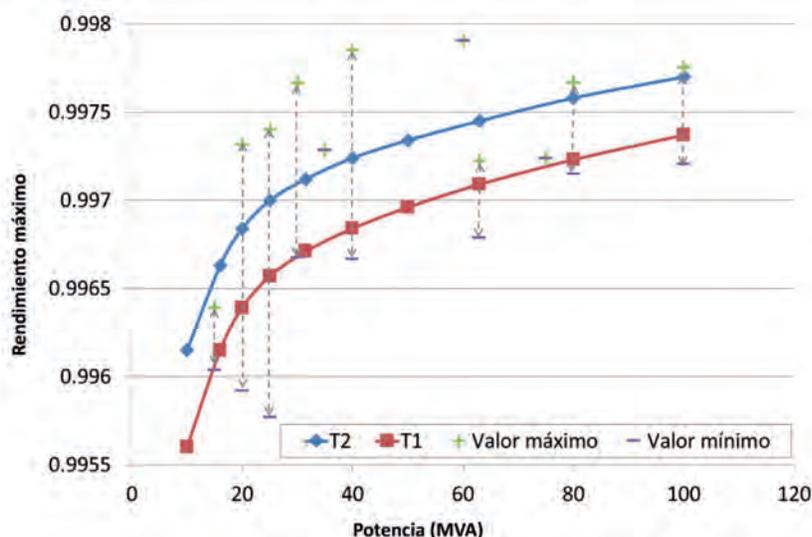


Fig. 6: Rendimiento máximo versus Potencia (compañías que consideran la CL y transformadores hasta 100MVA)

utilizaron CL. Los transformadores más eficientes de 33, 50 y 63 MVA superan el Tier2, mientras que las máquinas menos eficientes de estas potencias están cerca o sobre el valor del Tier1. Otro

grupo de potencias sería 16, 20, 25 y 40 MVA, en las que las mejores máquinas superan Tier1, pero no Tier2, estando los transformadores menos eficientes más lejos de cumplir Tier1 que en el caso anterior. En cuanto a las potencias en las que se dispone de un conjunto de máquinas iguales y con la misma eficiencia, se observan dos grupos diferentes; 26 y 53 MVA con una eficiencia inferior a la establecida por Tier1, y, 60 y 100 MVA con un rendimiento máximo prácticamente coincidente con el valor de Tier2.

En la Fig. 6 se representa el mismo análisis teniendo en cuenta a las empresas que utilizan CL en la compra de nuevos transformadores. En la actualidad, las máquinas más eficientes de casi todas las potencias analizadas; 20, 25, 30, 35, 40, 60, 80 y 100, superan el límite Tier2. Sólo las de 15, 63 y 75 MVA no superan Tier2, a pesar de que superan Tier1. En cuanto a las máquinas menos eficientes, la mayoría de ellas no superan los límites Tier1; sólo las de 15 y 30 MVA cumplen con Tier1.

Por otro lado, los transformadores sumergidos en aceite con una potencia nominal superior a 100 MVA, cumplirán el Reglamento 548/2014 si su rendimiento máximo es superior a 0,99737 en 2015 y a 0,9977 en 2021, que son los límites asociados con las máquinas de 100 MVA. Por lo tanto, de acuerdo con esta legislación, dos transformadores de 100 MVA y 1000MVA tienen que superar los mismos requisitos en términos de eficiencia energética.

También se ha evaluado en esta sección el efecto del Reglamento en los transformadores con potencia nominal superior a 100 MVA. Se ha observado que casi todos estos transformadores, teniendo en cuenta los dos tipos, los adquiridos con y sin CL, exceden el límite del Tier2. En este sentido, esta regulación no tendrá ningún efecto en máquinas de gran tamaño, ya que estas ya tienen una alta eficiencia.

6. CONCLUSIONES

La Regulación de la Unión Europea No 548 del 21 de Mayo de 2014 establece los límites de eficiencia mínima que deben cumplir los nuevos transformadores eléctricos de potencia superior a 1 kVA que se quieran instalar en las redes de transmisión y distribución, o en aplicaciones industriales. Esta normativa no ha tenido en cuenta la CL; sin embargo, en este trabajo se ha demostrado que cuando ésta se considera, se mejora el rendimiento de las flotas de transformadores instalados.

Tras analizar el efecto de la CL en una flota de grandes transformadores europeos, se ha demostrado que cuando se adquieren nuevos transformadores, las TSO's usan valores de capitalización mayores que las DSO's. Esto está justificado por la importancia estratégica de estas máquinas en sus redes de distribución.

La comparación del rendimiento máximo de los transformadores estudiados muestra que las máquinas adquiridas considerando CL son más eficientes que aquellas que fueron adquiridas sin con-

siderar el efecto de las pérdidas a lo largo de su vida. Los equipos de potencias superiores a 33MVA muestran los mayores valores de rendimiento, y están próximos a cumplir con los requisitos de la nueva regulación.

Respecto a transformadores de potencia superior a 100MVA, se ha observado que la CL es más común en este rango de potencias. En cualquier caso, el efecto de la CL desaparece para este nivel de potencias, ya que, independientemente de que los equipos fueran adquiridos considerando CL o no, todos los transformadores estudiados superan el límite establecido para el Tier2. En este sentido, la normativa establece los mismos valores de rendimiento mínimo para todas las potencias superiores a 100MVA.

En nuestra opinión, la CL debiera ser obligatoria cuando se adquiere un nuevo transformador. Esto impondría que el diseño de los nuevos transformadores se hiciera tratando de optimizar las pérdidas, lo redundaría en un incremento el rendimiento de los sistemas de distribución de energía eléctrica.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Ibarzabal A, Bielsa D. "El centro de transformación integrado y su contribución a la mejora medioambiental". *Dyna*. December 2005. Vol. 80-9. p. 8-10.

[2] McNeil MA, Iyer M, Meyers S, et al. "Potential benefits from improved energy efficiency of key electrical products: The case of India". *Energy Policy*. September 2008. Vol. 36-9. p. 3467-3476. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2008.05.020>.

[3] Spoor DJ, Howat C, et al. "Loss optimization in distribution networks". *Australasian Universities Power Eng. Conf. AUPEC*. December 2008, p. 1-6.

[4] Guo-Hua Q, Zheng R, et al. "A new life cycle cost model of power transformer and its comprehensive sensitivity analysis". *International Conf. on Power Syst. Technol. (POWERCON)*. October 2014. p. 1342-1348. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/POWERCON.2014.6993659>.

[5] Eco-design of Energy-Related Products. Last access on 26 December 2014. http://ec.europa.eu/energy/efficiency/ecodesign/eco_design_en.htm

[6] Li W, Zhu J, et al. "The energy-saving benefit evaluation methods of the grid construction project based on life cycle cost theory". *Energy Procedia*. 2012. Vol. 17-A. p. 227-232. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.02.088>.

[7] Hun Lee S, Kyu Lee A, et al. "Determining economic life cycle for power transformer based on life cycle cost analysis". *IEEE International Power Modulator and High Voltage Conf. (IPMHVC)*. June 2012. p. 604-607. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IPMHVC.2012.6518816>.

[8] Irrek W, Topalis F, et al. "Policies and measures fostering energy-efficient distribution transformers". *Report of European Commission Project No EIE/05/056/SI2.419632*. June 2008. p. 1-114.

[9] Pezzini P, Gomis-Bellmunt O, et al. "Energy efficiency optimization in distribution transformers considering Spanish distribution regulation policy". *Energy*. December 2010. Vol. 35-12. p. 4685-4690. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.09.035>.

[10] Commission Regulation (EU) No 548/2014 of 21 May 2014 on implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to small, medium and large power transformers.

[11] Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of eco-design requirements for energy-related products.

[12] Lamas WQ, "Exergoeconomic methodology applied to energy efficiency analysis, of industrial power transformers" *Elect. Power and Energy Syst*. December 2013. Vol. 53. p. 348-356. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.05.007>.

[13] Amoiralis EI, Tsili MA, et al. "Energy efficient transformer selection Implementing life cycle costs and environmental externalities". *9th International Conf. on Elect. Power Quality and Utilisation, EPQU*. October 2007. p. 1-6. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/EPQU.2007.4424160>.

[14] Olivares JC, Liu Y, et al. "Reducing losses in distribution transformers". *IEEE Trans. Power Delivery*. July 2003. Vol. 18-3, p. 821-826, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2003.813851>.

[15] Delarue E, Lamberts H, et al. "Simulating greenhouse gas (GHG) allowance cost and GHG emission reduction in Western Europe". *Energy*. August 2007. Vol. 32-8, p.1299-1309. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2006.09.020>.

[16] Georgilakis PS, Amoiralis EI. "Distribution transformer cost evaluation methodology incorporating environmental cost" *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2010. Vol. 4-7. p. 861-872. DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/iet-gtd.2009.0638>.

[17] Georgilakis PS. "Environmental cost of distribution transformer losses" *Appl. Energy*. September 2011. Vol. 88-9. p. 3146-3155. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.021>.

[18] IEEE Loss Evaluation Guide for Power Transformers and Reactors. *IEEE Standard C57.120.1991*. August 1991.

[19] Morin C, Khodabakhchian B, "765 kV power transformer losses upon energizations: A comparison between field test measurements and EMTF-RV simulations". *Electr. Pow. Syst. Res*. October 2014. Vol. 115. p. 35-42. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2014.04.015>

[20] Villén MT, Letosa J, et al. "Procedure to accelerate calculations of additional losses in transformer foil windings". *Electr. Pow. Syst. Res*. February 2013. Vol. 95. p. 85-89. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2012.08.006>.

[21] Susnjic L, Haznadar Z, et al. "3D finite-element determination of stray losses in power transformer". *Electr. Pow. Syst. Res*. October 2008. Vol. 78-10. p. 1814-1818. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2008.03.009>.

[22] Olivares JC, Escarela-Perez R, et al. "2D finite-element determination of tank wall losses in pad-mounted transformers". *Electr. Pow. Syst. Res*. October 2004. Vol. 71-2. p. 179-185. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2004.01.012>.

[23] Escarela-Perez R, Kulkarni SV, et al. "Multi-port network and 3D finite-element models for accurate transformer calculations: Single-phase load-loss test". *Electr. Pow. Syst. Res*. November 2008. Vol. 78-11, p. 1941-1945. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2008.03.026>.

[24] Al-Anbari K, Ramanujam R, et al. "Effect of iron core loss nonlinearity on chaotic ferroresonance in power transformers". *Electr. Pow. Syst. Res*. April 2003. Vol. 65-1. p. 1-12. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7796\(02\)00210-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7796(02)00210-9).

[25] Olivares JC, Cañedo J, et al. "Experimental study to reduce the distribution-transformers stray losses using electromagnetic shields". *Electr. Pow. Syst. Res*. August 2002. Vol. 63-1. p. 1-7. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7796\(02\)00096-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7796(02)00096-2).

[26] Georgilakis PS. "Decision support system for evaluating transformer investments in the industrial sector". *J. Mat. Process. Technol*. January 2007. Vol. 181-1-3. p. 307-312. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.040>.

[27] Frau J, Gutierrez J, et al. "Consider the true cost of transformer losses". *Transm. Distrib. World*. July 2007. Vol. 1. p. 50-55.

[28] Charalambous CA, Milidonis A, et al. "Loss evaluation and total ownership of power transformers-Part I: A comprehensive method". *IEEE Trans. Power Delivery*. July 2013. Vol. 28. p. 1872-1880. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2262506>.

[29] Carlen M, Xu D, et al. "Ultra-high efficiency distribution transformers". *IEEE PES Transmission and Distribution Conf. and Exposition*. April 2010. p. 1-7. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TDC.2010.5484301>.

[30] Amoiralis EI, Tsili MA, et al. "Power transformer economic evaluation in decentralized electricity markets" *IEEE Trans. Ind. Electron*. May 2012. Vol. 59-5. p. 2329-2341. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2011.2157291>.

[31] Georgilakis PS, Olivares-Galvan JC, et al. "Environmental cost of transformer losses for industrial and commercial users of transformers". *North American Power Symposium (NAPS)*. August 2011. p. 1-4. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/NAPS.2011.6024860>.

[32] Charalambous CA, Milidonis A, et al. "Loss evaluation and total ownership of power transformers-Part II: Application of method and numerical results". *IEEE Trans. Power Delivery*. July 2013. Vol. 28-3. p. 1881-1889. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2262507>.

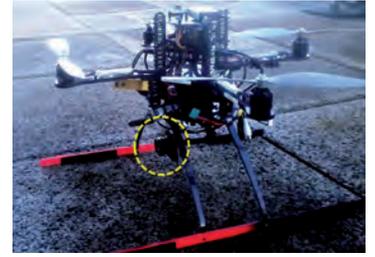
[33] Amoiralis EI, Tsili MA, et al. "Global transformer design optimization using deterministic and nondeterministic algorithms". *IEEE Trans. Ind. Appl*. February 2014. Vol. 50-1. p. 383-394. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2013.2288417>.

[34] European Commission, *External Costs: Research results on socio-environmental damages due to electricity and transport*, Directorate-General for Research, Brussels, Study 20198, 2003.

AGRADECIMIENTOS

La investigación llevada a cabo para la obtención de estos resultados ha recibido, a lo largo de los años, financiación de varias fuentes; los autores desean agradecer expresamente la financiación obtenida a través del Plan Estatal de I+D bajo el proyecto DPI2013-43897-P.

Monitorización del comportamiento térmico de fachadas mediante UAV: aplicaciones en la rehabilitación de edificios



Thermal monitoring of facades by UAV: applications for building rehabilitation



Beatriz González-Rodrigo¹, Ricardo Tendero-Caballero², María García-De-Viedma², Jesús Pestana-Puerta³, Adrián Carrio-Fernández³, José-Luis Sánchez-López³, Ramón Suárez-Fernández³, Pascual Campoy-Cervera³, Javier Bonatti-González⁴, Juan Gregorio Rejas-Ayuga⁵, Rubén Martínez-Marín⁵, Miguel Marchamalo-Sacristán⁵

¹ Universidad Politécnica de Madrid. ETSI Civil. Dpto. de Ingeniería Civil. Calle Alfonso XII, 3 y 5 - 28014 Madrid.

² Universidad Politécnica de Madrid. ETS de Edificación. Dpto. Construcciones Arquitectónicas y su Control. Avda. Juan de Herrera, 6 - 28040 Madrid.

³ Universidad Politécnica de Madrid. ETSI Industriales. Calle de José Gutiérrez Abascal, 2 - 28006 Madrid.

⁴ Universidad de Costa Rica. Centro de Investigación en Ciencias Atómicas, Nucleares y Moleculares (CICANUM). Ciudad de la Investigación. San Pedro de Montes de Oca (Costa Rica).

⁵ Universidad Politécnica de Madrid. ETSI de Caminos, Canales y Puertos. Calle Profesor Aranguren, 3 - 28040 Madrid.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7899> | Recibido: 01/12/2015 • Aceptado: 01/04/2016

ABSTRACT

• This paper presents the integration of data acquisition from land and unmanned aerial vehicles (mUAV) in the visible and thermal channels, validating the results for inspection and detection of different pathologies on facades of real case studies. An original methodology is proposed and tested for rapid inspection of building envelopes, supported by geospatial techniques. Frequent pathologies, as moisture damages and thermal losses are analyzed in real urban facades. UAV-based inspection allows checking inaccessible areas with visible and thermal sensors, obtaining homogeneous global models that can be analyzed with sufficient time and detail at the office (postprocessing). Based on these models, objective diagnosis can be performed even in the most complex neighborhoods and building designs, as well as energy balance analyses and detection of pathologies with economical and reliable means for large areas. This technology is ready for use in building inspection and it is very useful in the design of rehabilitation projects for tall and complex buildings in the framework of energy efficiency.

• **Keywords:** building inspection, computer vision, façade pathologies, thermal loss, multicopter, microUAV.

RESUMEN

Se presenta la integración de la adquisición de información desde vehículos aéreos no tripulados (mUAV) y tierra en los canales visible y térmico, validando los resultados para la inspección y detección de distintas patologías en fachadas de casos reales. Se propone y testa una metodología original para la inspección rápida de envoltentes, apoyada en técnicas geoespaciales. Se analizan patologías reales frecuentes en fachadas urbanas: daños por humedad y puentes térmicos. La inspección con mUAV permite revisar zonas inaccesibles, con sensores visibles y térmicos, para la obtención de modelos homogéneos globales que se pueden analizar con suficiente tiempo y detalle en la oficina (post-proceso). Con estos modelos se pueden realizar diagnósticos objetivos incluso en los diseños más complejos de barrios y edificios, así como análisis del balance energético de los edificios y detección de sus

patologías con medios económicos y fiables para grandes áreas. Se concluye que esta tecnología está preparada para su uso en inspección de edificios, siendo muy útil en el diseño de proyectos de rehabilitación de edificios altos y complejos en el marco de la eficiencia energética.

Palabras clave: inspección de edificios, visión por ordenador, patologías de fachada, pérdidas térmicas, multirrotores, microUAV.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

La rehabilitación es una disciplina prometedora en Arquitectura e Ingeniería Civil, ya que muchos edificios están llegando al final de su ciclo de vida en los países occidentales. Asimismo, la mejora de la eficiencia energética en zonas urbanas está promoviendo la renovación de edificios y la rehabilitación, en el marco de las Directivas Internacionales, como las EPBD (eficiencia energética de los edificios) 2002/91 / CE [1] y 2010/31 / UE [2]. La rehabilitación presenta retos complejos, ya que no hay soluciones generales para todos los edificios, sino soluciones técnicas que deben ser elegidas para cada edificio de acuerdo con sus especificidades [3].

En el ámbito de la UE se ha verificado que el consumo de energía en edificación está en aumento [2]. La estimación de los consumos energéticos en edificación es compleja y se suele computar como la diferencia entre consumos reales y estimados [4]. En este marco, la medición directa de los flujos de calor existentes eliminaría esta incertidumbre. Se estima que en España había aproximadamente 17.200.000 viviendas en 2010, de las que un 70% están en bloques de viviendas [5]. La transferencia térmica en edificios residenciales se produce principalmente (83%) a través de las ventanas y los muros [6]. Asimismo se estima que un 23 % de estas pérdidas se deben a anomalías como puentes térmicos o infiltraciones no deseadas, y el resto a procesos de ventilación o transmitancia a través de materiales sólidos.

Las auditorías energéticas en las zonas urbanas se complican cuanto más denso y complejo es el mosaico de un barrio. Incluso en el mismo edificio, se pueden observar distintas respuestas energéticas en diferentes partes del mismo, dependiendo principal-

mente de la orientación, pero también de detalles de construcción y ejecución [7][8]. El análisis de eficiencia energética debe hacerse a distintas escalas: ciudad, barrio, edificio. Para las escalas de ciudad y barrio se han desarrollado metodologías específicas que se basan en estimar y cuantificar efectos relacionados con las islas urbanas de calor (UHI, *Urban Heat Islands*) [9]. UHI es un fenómeno influido por muchos factores, como las propiedades térmicas de los materiales urbanos, la menor evapotranspiración comparada con el suelo no urbano, el efecto "cañón" de la topografía urbana, la contaminación y, muy especialmente, el calor generado por las actividades de calefacción, transporte y metabolismo. [10]

A escala de edificio, la inspección es un proceso clave en el diseño de proyectos de rehabilitación. La disponibilidad de modelos 3D termográficos y ortoimágenes es esencial para el diseño óptimo de proyectos de rehabilitación eficientes [11][12]. El desarrollo en los últimos años de pequeños sensores termográficos para vehículos no tripulados amplía las posibilidades para aplicaciones en teledetección. Las zonas urbanas presentan dificultades añadidas para la teledetección, dada la diversidad y complejidad de los materiales y tipologías de fachada [13]. Esto representa un inconveniente para el seguimiento y la gestión de estas áreas.

El desarrollo de *Unmanned Aerial Vehicles* (UAV) en la última década con múltiples aplicaciones [14], hace posible el diseño de una unidad termográfica de inspección de edificios a bordo de un UAV, propuesta como un reto a medio plazo [12]. Eschmann et al. [15] incluyeron este tipo de diseños en el marco de los avances prometedores en el dominio de los ensayos no destructivos (NDT).

1.2. TERMOGRAFÍA INFRARROJA Y TELEDETECCIÓN

La termografía infrarroja permite la medición de la radiación emitida por una superficie. Se registra la información de la radiación de la superficie en longitudes de onda largas (7 a 14 micras) del infrarrojo, denominado TIR (*Thermal Infrared*). Estos sensores se utilizan para adquirir datos de superficies a temperatura ambiente.

Las cámaras de infrarrojos se han desarrollado y expandido rápidamente en los últimos años debido al desarrollo de la tecnología de imagen digital y los bolómetros. En los últimos años se ha comenzado a fabricar detectores matriciales 2D de resolución media para sensores y cámaras de infrarrojos no refrigerados. Esto permite el montaje de cámaras térmicas de alta calidad de bajo coste. La tecnología de detectores IR no refrigerados dominante es la de los microbolómetros con más del 95% del mercado en 2010 [16].

Las termografías infrarrojas (termografías IR) permiten captar y representar la distribución de la temperatura superficial de una parte o el total de la envolvente de un edificio [17]. La intensidad de la imagen está afectada por la temperatura de la superficie, las características de la misma, las condiciones ambientales y el propio sensor. Tras la medición debe realizarse la interpretación de las imágenes térmicas (termogramas). Los flujos de calor pueden conducir al calentamiento o enfriamiento diferencial de las superficies de los edificios mediante mecanismos tales como la diferente inercia térmica de los materiales utilizados en fachadas, los puentes térmicos y las filtraciones de aire. La humedad de las superficies a menudo reduce la temperatura de las mismas debido a la refrigeración por evaporación [18]. La termografía infrarroja se puede utilizar en diversos campos de la rehabilitación de edificios, como la detección de anomalías y patologías (humedad, infiltración, puentes térmicos, defectos, ...) [19][20][21].

La inspección termográfica de envolventes de edificios se suele realizar sin utilizar ningún medio de excitación externo, es de-

cir, estudiando su propio patrón de emisión infrarroja en estado normal. Por ello, estas inspecciones se enmarcan en el campo de la termografía pasiva, en contraste con la termografía activa, en la que se aplica una excitación térmica artificial con el objetivo de inducir una excitación de los electrones de los átomos del material y el consecuente incremento de la emisión en forma de radiación infrarroja [22]. Las principales metodologías para obtener termografías de un área de interés son [23]: reconocimientos aéreos, vuelos automatizados, muestreos de pasada continua a pie de calle, muestreo a pie tradicional (externo; externo e interno), muestreos con repetición y muestreos time-lapse. Una descripción de cada tipo de muestreo con la bibliografía y características relacionados se pueden encontrar en Fox et al. [23].

Los principales problemas de la toma de datos de termografías IR de fachadas, provienen de la falta de accesibilidad y ángulo de visión, que incrementan el efecto de la temperatura reflejada en las imágenes. En ciudades es posible tomar imágenes correctamente de los primeros pisos desde pie de calle, pero en edificios altos, el efecto de la temperatura reflejada (TRFL) aumenta hacia arriba al disminuir el ángulo de incidencia, y se hace difícil separar la energía emitida de la reflejada.

Actualmente se plantea la oportunidad de aprovechar la complementariedad de las imágenes tomadas a pie de calle y las imágenes tomadas desde los UAV. Esto permite la inspección en lugares inaccesibles, asegurando una posición ortogonal de la cámara con respecto al paramento. Del mismo modo, es posible tomar imágenes de las cubiertas desde arriba, girando la posición de la cámara en el UAV.

1.3. INSPECCIÓN DE EDIFICIOS CON UAV

El uso de micro-vehículos aéreos no tripulados (mUAVs) es un medio para obtener imágenes aéreas en la inspección de edificios. Estas imágenes presentan la ventaja de cerrar la brecha entre las imágenes aeroportadas tradicionales y las imágenes tomadas desde tierra. Un tipo común de mUAV utilizado para aplicaciones de la fotografía son multirrotores, también conocidos como multicopteros.

La investigación basada en la realización de termografías con mUAVs ha sido escasa en el pasado, pero está ganando impulso recientemente. Martínez-De-Dios y Ollero [24] emplearon UAVs en termografía pasiva de edificios, específicamente para detectar la pérdida de energía procedente de las ventanas. Más tarde, el trabajo de Iwaszczuk et al. [25] se centró en la combinación de imágenes en los espectros visible e infrarrojo para complementar un modelo de edificio 3D existente. Eschmann et al. [15] fueron capaces de obtener mosaicos muy detallados de una fachada con un mUAV octocóptero. Estos autores mencionaron la posibilidad de utilizar sus algoritmos para adquirir imágenes térmicas, pero presentaron solamente resultados en espectro visible. En esta dirección, empleando imágenes en tierra, González-Aguilera et al. [12] aplicaron un tratamiento de reconstrucción 3D de la imagen con termografías para obtener un modelo termográfico de una fachada. En un trabajo reciente Yahyanejad y Rinner [26] se propusieron nuevos descriptores de entidades de imagen para mejorar la combinación de las imágenes en diferentes longitudes de onda. Estos autores aplicaron esta técnica a una imagen de mosaicos en los espectros visible y térmico, adquiridos desde varios cuadrirrotores.

Otro campo que está recibiendo mucha atención es la georeferenciación de las imágenes tomadas por mUAVs. En esta dirección, Lagüela et al. [27] desarrollaron una metodología para la extracción automática de la geometría del edificio directamente

desde imágenes termográficas oblicuas aéreas. Los modelos 3D geométricos y térmicos obtenidos pueden ser insertados así en un Sistema de Información Geográfica (GIS). La georeferenciación de imágenes adquiridas desde mUAVs a menudo se centra en las imágenes en el visible. Por ejemplo, el Grupo de Visión Aérea (Graz, Austria) ha centrado su investigación en combinar nubes de puntos con las fuentes de datos disponibles públicamente [28][29]. De esta manera, se pueden georeferenciar las imágenes adquiridas. En investigaciones más recientes se explora el uso de marcadores de referencia para mejorar para aumentar la calidad de las reconstrucciones 3D [30] así como en la detección automática de puentes térmicos en edificación [31].

1.4. OBJETIVOS

Este trabajo presenta una metodología para la integración de imágenes adquiridas desde UAV y tierra en los canales visible y térmico para la inspección de edificios, con dos objetivos específicos:

- Desarrollar una metodología basada en mUAV para la inspección de edificios integrando instrumentos y sensores.
- Validar el uso de las imágenes térmicas obtenidas desde UAV para la detección de patologías de fachadas.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1. SENSORES

MicroCam [32] es un sensor pasivo que registra la radiación procedente de las superficies en las longitudes de onda de 8 a 12 micrómetros. Se monta con una lente óptica de 7,5 mm. La sensibilidad térmica de esta cámara permite trabajar en un rango de temperatura de entre -20°C a 60°C , en una secuencia de imágenes máxima de 60 fotogramas por segundo. En estas condiciones, adquiere imágenes de 384×288 píxeles, con salida de vídeo NTSC (*National Television System Committee*) y una sensibilidad NEDT (*Noise equivalent differential temperature*) de 80mK.

Una de las características que hacen de este sensor particularmente interesante para el monitoreo cercano (o de corto alcance) es que el cálculo de la emisividad de las superficies puede ser realizado mediante calibración externa, comparando con otro sensor térmico (por ejemplo, una cámara de mano térmica calibrada). Por tanto, se pueden caracterizar diferentes cuerpos en el infrarrojo térmico en una adquisición sencilla a partir del cálculo del parámetro de emisividad.

Las imágenes a nivel de calle fueron tomadas con una cámara Flir B-335, de resolución de 320×240 píxeles y sensibilidad NEDT de 50-70mK [33]. Esta cámara funciona en un rango de temperatura de -20°C a 350°C y con un IFOV (*Instantaneous Field of View*) de 1,364 mRad.

2.2. INTEGRACIÓN Y OPERACIÓN UAV

La adquisición de las imágenes se realizó con un cuadricóptero AscTec Pelican [34], equipado con la cámara térmica MicroCam y un ordenador de a bordo, AscTec Atombord (Figura 1). Este cuadricóptero se utiliza en los laboratorios de investigación, gracias a su alta capacidad de carga útil, capacidad de vuelo y el diseño de su estructura, que permite la adición de sensores adicionales. El software de adquisición del sensor es modular utilizando el marco *Robot Operating System* [35], lo que permite determinar la configuración del sensor en tiempo de ejecución sin necesidad de recompilar las fuentes. El cuadricóptero es operado por un piloto humano. Esta configuración permite guardar las imágenes

adquiridas a 30 fps, y un tiempo de vuelo de unos 10 minutos por unidad de batería.

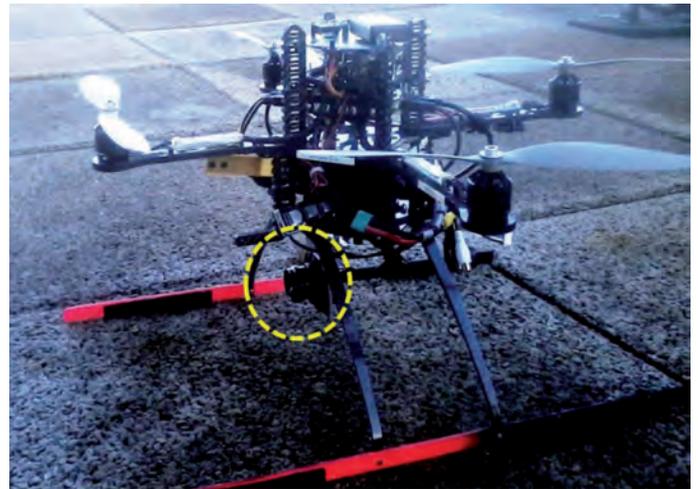


Fig. 1: Cuadricóptero AscTec Pelican con sensor térmico MicroCAM

2.3. TRABAJO DE CAMPO: EDIFICIOS SELECCIONADOS

Se eligieron dos edificios para el trabajo de campo, ambos centros académicos de la Universidad Politécnica de Madrid: el edificio principal de la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (ETSI Caminos) y el edificio de Automática y Robótica de la Escuela de Ingenieros Industriales (ETSI Industriales). El edificio de Caminos fue construido en 1963 en hormigón armado (estructura y fachada) con un diseño de líneas estrechas de ventanas con mal aislamiento. El edificio de Automática y Robótica se edificó en la década de 1930 con fachada de ladrillo. A comienzos del Siglo XXI se remodeló la cubierta y se instalaron nuevas ventanas aisladas. Las fachadas seleccionadas para el monitoreo presentan orientación norte (Caminos) y este (Industriales) para evitar el reflejo de la radiación solar de la tarde.

Durante el trabajo de campo, se muestrearon varios tipos de posibles patologías de fachadas: humedad, degradación y puentes térmicos. Estas patologías se estimaron por evaluación visual y posteriormente se contrastaron con el análisis de imágenes. Las temperaturas interiores y exteriores fueron medidas continuamente durante la captura de imágenes.

2.4. ANÁLISIS DE IMÁGENES

Las técnicas de procesamiento de datos empleadas incluyen la corrección geométrica, corrección radiométrica, y una serie de análisis de imagen (realces y mejoras de imagen, operaciones entre bandas de imagen y análisis estadísticos). La elección de las técnicas a aplicar depende de la calidad de imagen y la salida requerida. La función principal de los diferentes procesos aplicados a los datos adquiridos es producir un único archivo de múltiples fuentes perfectamente co-registrado. Esto tiene como objetivo realizar un análisis posterior destinado a correlacionar espacialmente los elementos de interés de monitoreo (paredes, ventanas, estructuras, materiales, ...) con la temperatura superficial registrada.

Las imágenes FLIR B-335 fueron procesadas con el software FLIR para ajustarlas, incluyendo la temperatura y la humedad ambiente medidos durante los trabajos de campo. Asimismo, se introdujeron en el software la emisividad conocida y la temperatura reflejada medidas en campo. De esta manera, se pudieron generar ráster de temperatura de las fachadas analizadas, que fueron empleados para validar la metodología de inspección que emplea el sensor MicroCAM en el mUAV.

Las imágenes del sensor MicroCAM fueron analizadas con software ENVI-ITT, aplicando termografía cualitativa para la detección de las posibles patologías, para lo cual no se requieren magnitudes absolutas de reflectancia superficial y/o emisividad. Se aplicaron algoritmos estándar de detección de anomalías espectrales como el RX [36] a ficheros multifuente formados por las bandas de imagen corregidas de la MicroCAM integradas con las de FLIR. Las distorsiones radiométricas detectadas se corrigieron con transformaciones basadas en PCA (Principal Component Analysis), como MNF (Minimum Noise Fraction) [37] y filtros de paso alto. La regularidad de la fachada de ladrillo hace que en toda su superficie se mantenga prácticamente constante la proporción entre el mortero de cemento visible en las juntas y el ladrillo. Esto permite ajustar un valor de emisividad conjunto para la fachada, que se incorpora a la corrección de las imágenes FLIR. Ambos materiales se encuentran dentro del mismo rango de emisividad, con valores medios asignados por diversos autores de 0,93 [38].

Cuando se produce una anomalía o singularidad térmica puede ser indicio de una patología constructiva. Esta anomalía se manifiesta como una variación poco frecuente de radiación infrarroja, detectable estadísticamente mediante un estudio discriminado por percentiles o cuantificando las variaciones con respecto a la media de valores alejados de las tolerancias de ejecución de los materiales empleados. No existe ningún documento o consenso sobre los diferenciales que pueden ser considerados como significativos. No obstante, en la práctica se consideran significativas las

variaciones instantáneas con valores superiores a 0,5 °C en obras de ladrillo (fábrica), yeso u hormigón (emisividades muy altas y conductividades bajas).

Las diferencias de temperatura observadas se corresponden con una fuente de calor o una diferencia de la composición o el estado de materiales teóricamente uniformes. En el caso de un cuerpo negro o de ensayos realizados en laboratorio con control preciso de la homogeneidad de la emisividad del material, las diferencias en la emisión de radiación infrarroja indican diferencias de temperatura, ya que la potencia emitida por un cuerpo es directamente proporcional al producto de la emisividad (1 en caso de un cuerpo negro), la constante de Stefan-Boltzmann y la cuarta potencia de la temperatura.

3. RESULTADOS

3.1. ANÁLISIS COMBINADO VISIBLE-TÉRMICO DE PATOLOGÍAS DE FACHADA

El mUAV permitió la adquisición de ambas fachadas completamente en imagen visual y térmica. Una vez llevado a cabo el filtrado y análisis de imágenes se identificaron posibles patologías en los canales visible y térmico. Estas patologías potenciales fueron validadas con una segunda visita de trabajo de campo en ambos edificios.

La Figura 2 presenta un ejemplo de detección combinada en visible y térmico de una patología por humedad. Se detectaron

dos zonas potenciales de humedad en la inspección visual (Fig. 2 arriba), mientras que las imágenes térmicas (Fig. 2 abajo) permitieron discriminar una zona muy húmeda (izquierda), mientras que la otra no estaba húmeda, correspondiendo a un daño por humedades pasadas, no activas en la actualidad (derecha).

La Figura 3 muestra la evaluación de las pérdidas térmicas en dos casos, uno relacionado con una ventana abierta y otro relacionado con aislamiento externo deficiente de la instalación de aire acondicionado. Similares pérdidas térmicas fueron identificadas con cámaras termográficas de mano en el edificio de 1953 del Instituto Eduardo Torroja (CSIC), con fachada de ladrillo y ventanas mal aisladas [39].

La Figura 4 mues-

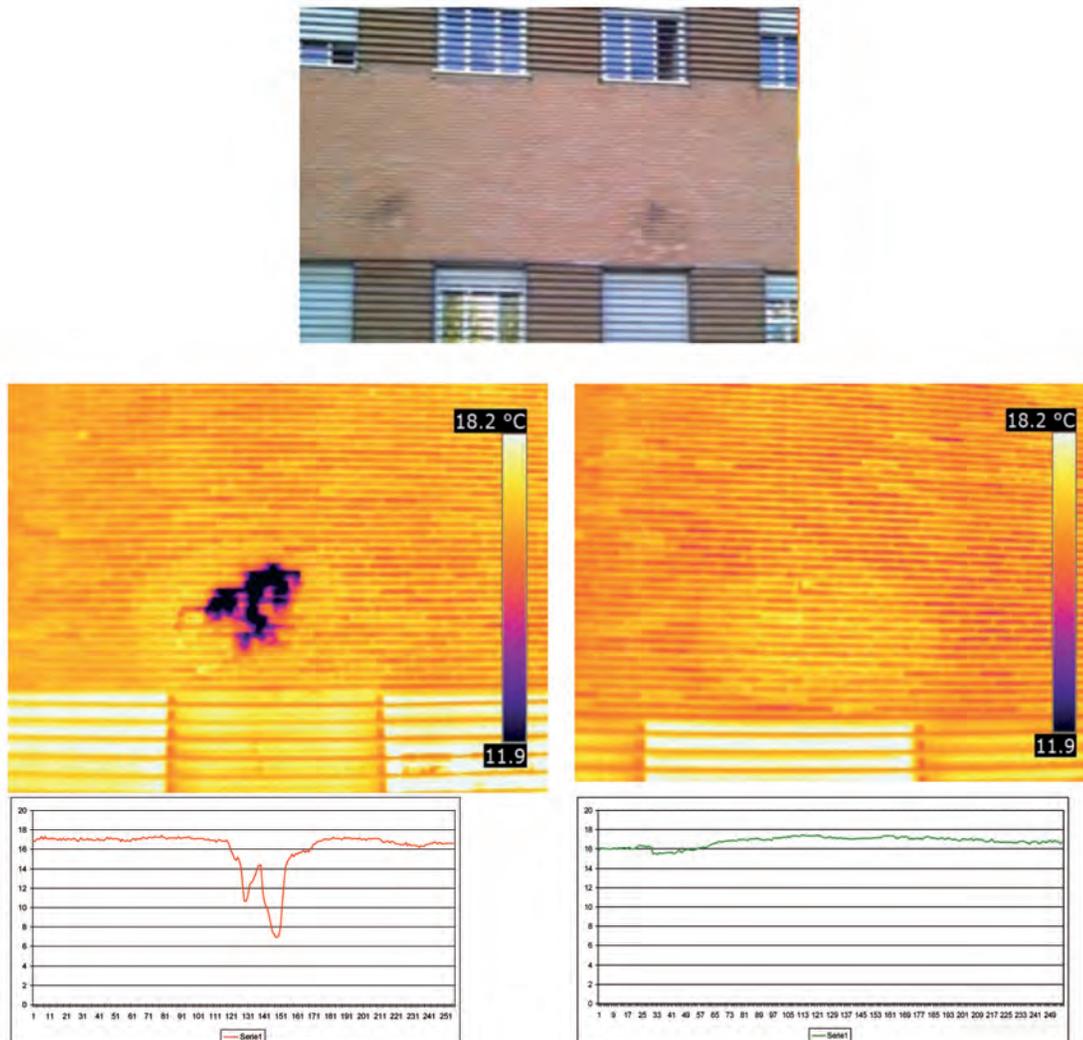


Fig. 2: Detección de patologías por humedad activa en la fachada de la ETSI Industriales (UPM): Arriba imagen en visible, debajo imágenes térmicas y perfiles de una humedad activa (izquierda) y no activa (derecha)

tra la detección de pérdidas térmicas en el contacto de un muro vertical con la fachada de hormigón del edificio de la ETSI Caminos UPM. En las imágenes FLIR se puede apreciar una pérdida térmica vertical en la unión entre el muro y la fachada de hormigón. El análisis de los perfiles de temperatura en los ficheros multifuente que integran los datos de ambos sensores permite confirmar la presencia de estos puentes térmicos. La Figura presenta asimismo la detección de anomalías térmicas relacionadas con forjados. El contacto entre forjado y fachada suele ser vulnerable a las pérdidas térmicas, ya que en estos puntos el aislamiento de fachada puede ser deficiente si el proceso de construcción no es cuidadoso.

Las imágenes del edificio de ETSI Caminos (hormigón) muestran un patrón de variación uniforme de la temperatura en toda la superficie, no relacionado con puentes térmicos u otras patologías, sino con la textura. La textura de esta fachada está condicionada por las huellas de las tablas de encofrado con el que fue hecha y la falta de planeidad. Como resultado, se aprecia una distorsión continua en la superficie, debido a pequeños cambios en la orientación de cada mesa de encofrado y, por tanto, los pequeños cambios de temperatura, registrados por el sensor térmico. En este

caso, sólo los cambios drásticos en la temperatura de la superficie pueden indicar patologías en estas áreas, por lo que en muchos casos ha sido necesario calentar durante la noche las oficinas para así detectar cambios relacionados con los puentes térmicos.

Las patologías detectadas se pueden clasificar en las siguientes clases:

- puentes térmicos en los componentes estructurales, principalmente en las uniones de los encofrados y los muros verticales con las fachadas de hormigón.
- patologías relacionadas con la humedad, claramente apreciadas en las imágenes térmicas.
- pérdidas térmicas en las ventanas y aberturas aisladas deficientemente.
- pérdidas térmicas en los circuitos de aire acondicionado.

Los edificios analizados presentan patologías típicas comunes a otros edificios del siglo XX en España, como el edificio del IETCC [39]. Numerosos barrios de nuestras ciudades fueron construidos en la época de la posguerra (1945 - 1965) por lo que sus edificios e infraestructuras se acercan al final de su vida útil. Por ello, varios

autores recomiendan realizar la inspección para la rehabilitación a nivel de barrio [40]. El trabajo de inspección a escala de barrio requerirá la combinación de varias técnicas a distintas escalas de trabajo, incluyendo imágenes de satélite, aeroportadas, UAV y tomadas a pie de calle.

3.2. DETECCIÓN DETALLADA DE ANOMALÍAS TÉRMICAS

Se realizó un análisis detallado de detección de anomalías térmicas en la fachada del edificio de la ETSI Caminos, como indicador de posibles puentes térmicos. Para ello se seleccionó una fracción del cerramiento exterior del edificio y se muestreó la imagen térmica FLIR con una ventana móvil de 50x50 cm calculando la media y desviación típica de la temperatura en cada sector. Las imágenes térmicas se escalan asignando dimensiones geométricas a las celdas de las matrices, con el fin de poder asignar temperaturas a las superficies

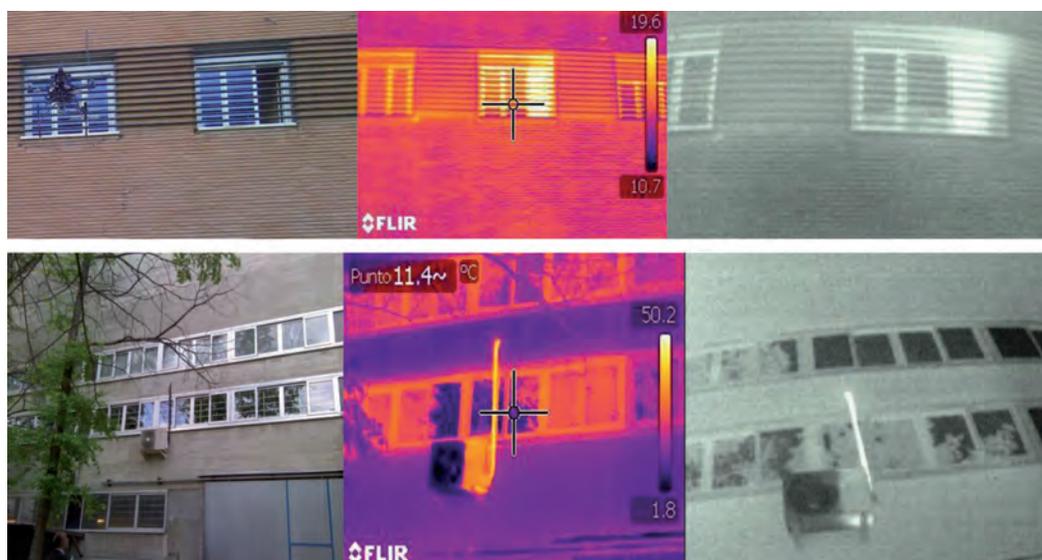


Fig. 3: Detección de pérdidas térmicas en cerramientos y conducciones de climatización: de izquierda a derecha (a) Visible; (b) FLIR; (c) MicroCAM

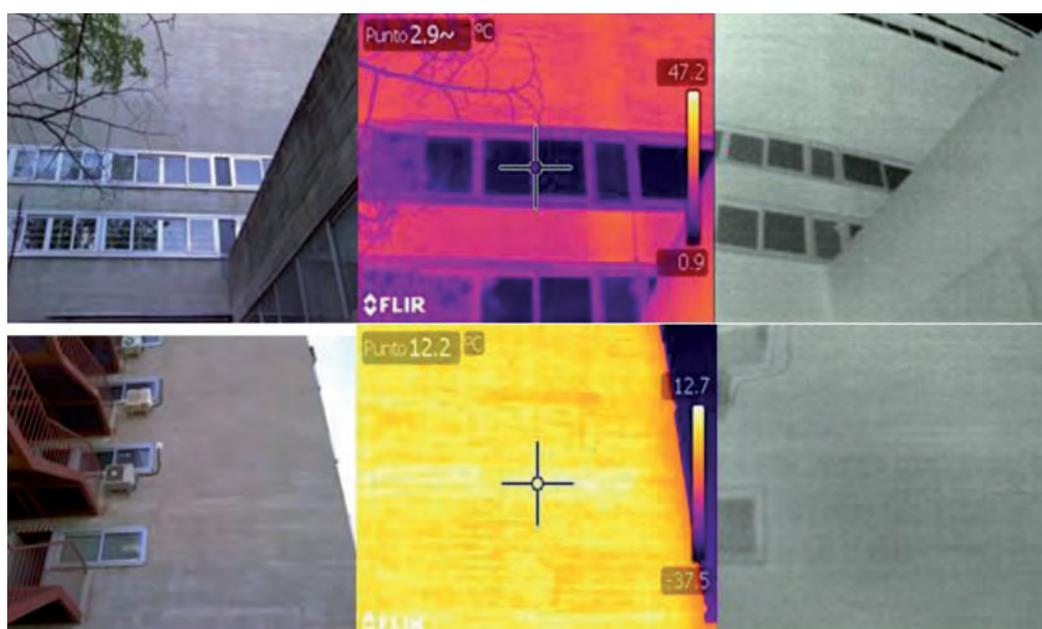


Fig. 4: Detección de pérdidas térmicas en el contacto de 1) muros verticales con fachadas de hormigón (arriba) y 2) forjados con fachadas de hormigón (debajo): de izquierda a derecha (a) Visible; (b) FLIR; (c) MicroCAM

analizadas. Una vez escalada la imagen se estableció el número de celdas que equivalen a una ventana de 50 cm x 50 cm, para analizar los estadísticos de la misma con la utilidad de ventanas móviles de una hoja de cálculo. La Tabla 1 presenta la dispersión de los valores de temperatura para cada sector analizado.

En la Tabla 1 se puede apreciar que el sector con mayor desviación de temperatura es el A10. Este hecho se puede considerar un indicador de posible puente térmico en el mismo. Para verificarlo, es necesario filtrar el ruido proveniente de pequeños cambios de temperatura debidos a las propiedades de los materiales y la irregularidad de su acabado. Una de estas distorsiones se presenta en el análisis de paramentos de superficie poliédrica y, por lo tanto con distinta temperatura reflejada. En la fachada de la ETSI Caminos, ejecutada en hormigón visto encofrado con tabla de madera, puede observarse como los valores de temperatura superficial aparentes obtenidos tienen variaciones debidas a esta circunstancia que es preciso descartar para estimar la temperatura superficial exterior.

La representación gráfica de estas desviaciones permite detectar potenciales anomalías térmicas en el paramento (Figura 5). Este análisis detallado permite identificar las zonas del cerramiento con una temperatura diferente en las que se presentan diferen-

cias de comportamiento frente al flujo de calor, es decir, puentes térmicos.

4. CONCLUSIONES

Esta investigación confirma que la inspección térmica con mUAV permite el registro y muestreo de fachadas obteniendo datos con una alta resolución espacial. El análisis exploratorio de datos, centrado en el estudio de la correspondencia espacial entre las anomalías térmicas y las patologías de las superficies, combinado con los perfiles de temperaturas, permiten identificar y localizar dichas patologías en las fachadas.

Se corrobora que la inspección con mUAV permite revisar lugares inaccesibles de los edificios, con sensores visibles y térmicos, para la obtención de modelos homogéneos globales que se pueden analizar con suficiente tiempo y detalle en la oficina (postproceso). Estos modelos globales permiten realizar diagnósticos objetivos incluso en los diseños más complejos de barrios y edificios.

Teniendo en cuenta la influencia de la textura de las fachadas en las diferencias de temperatura de la superficie, se concluye que estos estudios son más fiables en superficies más homogéneas. En superficies irregulares, es necesario filtrar el ruido proveniente de pequeños cambios de radiación infrarroja debidos a las propiedades de los materiales y la irregularidad de su acabado.

Esta tecnología es apta para la inspección de edificios e infraestructuras y es muy útil en el diseño de proyectos de rehabilitación de edificios altos y complejos en el marco de la eficiencia energética. Se recomienda aplicarla en estudios de edificios singulares que incluyan análisis energéticos y de patologías detallados.

Se proponen dos líneas de investigación para esta tecnología desde UAV: a) calibración y validación de la tecnología para un rango amplio de patologías y condiciones ambientales, determinando los umbrales de detección y b) la automatización de la detección de anomalías en envolventes.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] European Union. Directive 2002/91/EC of The European Parliament and of the council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings. Journal of the European Communities, 2003, 1: 65-71.
- [2] European Union. Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings. Official Journal of the European Union, 2010.
- [3] Charlot-Valdieu C, Outrequin P. "An approach and a tool for setting sustainable energy retrofiting strategies referring to the 2010 EPBD". Informes de la Construcción. 2011. Vol. 63(Extra) p. 51-60. doi: http://dx.doi.org/10.3989/ic.11.064

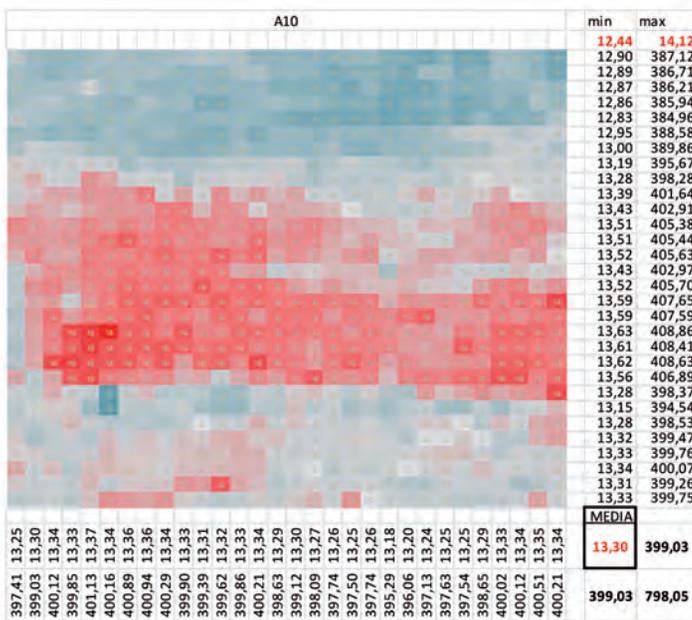


Fig. 5: Análisis detallado de un puente térmico en el cerramiento exterior de la ETSI Caminos, Canales y Puertos

| | TEMPERATURAS APARENTES (°C) | | | | DESVIACIÓN STANDARD |
|-----|-----------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------------|---------------------|
| | Temperatura media | Temperatura máxima | Temperatura mínima | Máxima diferencia entre temperaturas | |
| A10 | 13,30 | 14,12 | 12,44 | 1,68 | 0,29 |
| A9 | 12,70 | 13,37 | 11,99 | 1,38 | 0,25 |
| A8 | 12,89 | 13,38 | 12,31 | 1,07 | 0,16 |
| A7 | 12,89 | 13,43 | 12,27 | 1,16 | 0,17 |
| A6 | 12,89 | 13,43 | 12,27 | 1,16 | 0,17 |
| A5 | 12,81 | 13,51 | 12,02 | 1,49 | 0,21 |
| A4 | 12,71 | 13,36 | 12,08 | 1,28 | 0,24 |
| A3 | 12,82 | 13,34 | 12,17 | 1,17 | 0,19 |
| A2 | 12,87 | 13,28 | 12,38 | 0,90 | 0,14 |
| A1 | 12,88 | 13,41 | 12,46 | 0,95 | 0,16 |

Tabla 1: Temperatura media y desviación típica calculados con ventana móvil 50x50cm sobre la imagen calibrada FLIR de la ETSI Caminos, Canales y Puertos (UPM)

- [4] Taylor I. "How near is nearly zero?" CIBSE Journal. Mayo 2013. Londres. <http://www.cibsejournal.com/archive/PDFs/CIBSE-Journal-2013-05.pdf> [en línea] [ref. de 11 de enero de 2016]
- [5] IDAE. Análisis del consumo energético del sector residencial en España. Informe final del Proyecto SECH-SPAHOUSEC. IDAE. Madrid, España: 2011. 76 p.
- [6] Folgueras MB, Díaz-Fernández RM. "Contribución de la calidad energética de los edificios al desarrollo sostenible". En: Congreso Ibérico de aislamiento térmico y acústico-CIATEA, Universidad de Oviedo, Dpto. de Energía, Gijón, 2004.
- [7] García-Navarro J, González-Díaz M, Valdivieso M. "Estudio Precost&e: evaluación de los costes constructivos y consumos energéticos derivados de la calificación energética en un edificio de viviendas situado en Madrid". Informes de la Construcción. 2014. Vol. 66(535) e026. doi: 10.3989/ic.13.052
- [9] Sobrino JA, Oltra-Carrió R, Sòria G, et al. "Evaluation of the surface urban heat island effect in the city of Madrid by thermal remote sensing" International Journal of Remote Sensing. 2013. Vol. 34 (9-10) p. 3177 – 3192. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2012.716548>
- [10] EnergyCity. Remote Sensing Study. Output Report 3.1.2. EnergyCity:Reducing energy consumption and CO2 emissions in cities across Central Europe. Budapest University of Technology and Economics. European Regional Development Fund. 2013. <http://www.energycity2013.eu/> [en línea] [ref. de 11 de enero de 2016]
- [11] Wang C, Peng Y, Cho Y et al. "As-built residential building information collection and modeling methods for energy analysis". En: Proceedings of the 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC), Seoul, Korea, June 2011, p. 226–231.
- [12] González-Aguilera D, Lagüela S, Rodríguez-González P, et al. "Image-based thermographic modeling for assessing energy efficiency of buildings façades". Energy and Buildings. 2013, Vol. 65 (2013), p. 29–36. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.040>
- [13] Rejas JG, Martínez Marin R, Malpica JA. "Hyperspectral Remote Sensing Application for Semi-Urban Areas Monitoring". En: Electrical and Electronics Engineers, Inc (IEEE), Vol. XXII, nº 127, 2007. ISBN-1-4244-0711-7 catalog number 07EX1577.
- [14] Cuerno-Rejado C, García-Hernandez L, Sanchez-Carmona A, et al. "Evolution of the Unmanned Aerial Vehicles until present". DYNA Mayo 2015. Vol. 90 nº 3. Pag.281–288. doi: <http://dx.doi.org/10.6036/7781>
- [15] Eschmann C, Kuo CM, Kuo CH, et al. "High-resolution multisensor infrastructure inspection with unmanned aircraft systems". ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 1(2):125–129, 4 – 6 de septiembre de 2013, Rostock, Alemania.
- [16] Rogalski, A. "History of infrared detectors". Opto–Electron. Rev. 2012. Vol. 20:3 p. 279–308. doi: <http://dx.doi.org/10.2478/s11772-012-0037-7>
- [17] AENOR. EN-13187- Thermal performance of buildings. Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes. Infrared method ISO 6781:1983 modified, 2000.
- [18] Vollmer M, Möllmann KP. Infrared Thermal Imaging, Wiley-VCH, Weinheim: 2010. 594 P. ISBN 978-3527407170
- [19] Grinzato E, Vavilov V, Kauppinen T. "Quantitative infrared thermography in buildings". Energy and Buildings. 1998. Vol. 29 p. 1–9. Doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00039-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00039-X)
- [20] Balaras C, Argiriou A. "Infrared thermography for building diagnostics". Energy and Buildings. 2002. Vol. 34 (2) p. 171–183. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00105-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00105-0)
- [21] Rosina E, Spodek J. "Using infrared thermography to detect moisture in historic masonry: a case study in Indiana". APT Bulletin. 2003. Vol. 34(1) p. 11–16. doi: <http://dx.doi.org/10.2307/1504847>
- [22] Rodríguez Martín M, Lagüela S, González Aguilera D, et al. "Termografía Activa. Parte 1: Enfoque teórico de la captación infrarroja. Procesamiento de datos y clasificación". DYNA. 2015. Vol. 90(4) p. 456–460. doi: <http://dx.doi.org/10.6036/7556>
- [23] Fox, M, Coley D, Goodhew S, et al. "Thermography methodologies for detecting energy related building defects". Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 40 (2014) p. 296–310. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.188>
- [24] Martínez-De-Dios JR, Ollero A. "Automatic detection of windows thermal heat losses in buildings using UAVs". En: Automation Congress, 2006-WAC'06. IEEE, p. 1–6, 2006.
- [25] Iwaszczuk D, Hoegner L, Stilla U. "Matching of 3D building models with IR images for texture extraction". En: Urban Remote Sensing Event (JURSE), IEEE, p. 25–28. 2011.
- [26] Yahyanejad S, Rinner B. "A fast and mobile system for registration of low-altitude visual and thermal aerial images using multiple small-scale UAVs". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2014. doi <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.07.015>
- [27] Lagüela S, Díaz-Vilariño L, Roca D, et al. "Aerial oblique thermographic imagery for the generation of building 3D models to complement Geographic Information Systems". En: 12th International Conference on Quantitative Infrared Thermography, 7–11 Julio de 2014, Burdeos, Francia.
- [28] Rumpler M, Irschara A, Wendel A, et al. "Rapid 3d city model approximation from publicly available geographic data sources and georeferenced aerial images". En: Computer vision winter workshop (CVWW), 2012.
- [29] Maurer M, Rumpler M, Wendel A, et al. "Geo-referenced 3d reconstruction: Fusing public geographic data and aerial imagery". En: IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, p. 3557–3558. 2012.
- [30] Rumpler M, Daftryab S, Tscharf A, et al. "Automated end-to-end workflow for precise and geo-accurate reconstructions using fiducial markers". ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2014. Vol. 1 p. 135–142. doi <http://dx.doi.org/10.5194/isprannals-II-3-135-2014>
- [31] Cereijo J, Lagüela S, Roca D, et al. "Automatic detection of thermal bridges in thermographic building inspections". En: 40th IAHS World Congress on Housing, 16–19 Diciembre de 2014, Funchal, Portugal.
- [32] Thermoteknix. MicroCAM. <http://www.thermoteknix.com> [en línea] [ref. de 11 de enero de 2016]
- [33] FLIR. FLIR B-335. <http://www.flir.es/> [en línea] [ref. de 11 de enero de 2016]
- [34] Ascending Technologies. AscTec Pelikan. <http://www.ascotec.de/en/> [en línea] [ref. de 11 de enero de 2016]
- [35] Quigley M, Conley K, Gerkey B, et al. "ROS: an open-source Robot Operating System". En: ICRA workshop on open source software, Vol. 3, no. 3.2, p. 5, 2009.
- [36] Reed IS, Xiaoli Y "Adaptive multiple-band CFAR detection of an optical pattern with unknown spectral distribution. Acoustics, Speech and Signal Processing". IEEE Transactions. 1990. Vol.38:10 p. 1760 – 1770.
- [37] Green AA, Berman M, Switzer P, et al. "A Transform for Ordering Multispectral Data in terms of Image Quality with Implications for Noise Removal" IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1988. Vol. 26:1 p. 65–74.
- [38] Testo AG. Teoría y práctica de la medición termográfica. <https://www.testo.com.ar/> [en línea] [ref. de 11 de enero de 2016]
- [39] Martín-Consuegra F, Oteiza I, Alonso C, et al. "Análisis y propuesta de mejoras para la eficiencia energética del edificio principal del Instituto C.C. Eduardo Torroja-CSIC". Informes de la Construcción. 2014. Vol. 66(536):e043. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.14.125>
- [40] Rubio del Val J. "Rehabilitación Urbana en España (1989–2010). Barreras actuales y sugerencias para su eliminación". Informes de la Construcción. 2011. Vol. 63: Nº Extra (2011) p. 5–20. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.2011.v63.iExtra>.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) de España por las becas JAE-Predocctoral de dos de los autores, al Ministerio de Ciencia español por la financiación de los proyectos DPI2010-20751-C02-01 y DPI2014-60139-R, así como al Ministerio Educación español por financiar la estancia de investigación internacional de uno de los autores. La colaboración de la Universidad de Costa Rica ha sido posible gracias a la financiación del programa PCI de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) y del Vicerrectorado de Relaciones Internacionales de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

MATERIAL SUPLEMENTARIO

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/7899-1.pdf



Cálculo de distancias de seguridad en la repotenciación de líneas de corriente alterna con tecnología HVDC

Calculation of safety clearances in AC power line repowering using HVDC technology



Dunix Marene Larruskain-Escobal, Inmaculada Zamora-Belver, Víctor Valverde-Santiago, Garikoitz Buigues-Beraza, Oihane Abarrategui-Ranero y Aritz Iturregi-Aio

Universidad del País Vasco (UPV/EHU). Alameda de Urquijo, s/n - 48013 Bilbao. Tfno: +34 946 014970

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7894> | Recibido: 20/11/2015 • Aceptado: 03/03/2016

ABSTRACT

- During the last decades, the combination of several factors (rapid growth of electricity consumption, deregulation of the electricity market and increase of distributed generation) has led to important changes in power flows in the Spanish Electricity System, overloading power lines that were not initially designed to withstand those levels of energy transmission. Considering the inherent difficulties related to building new power lines, repowering the existing lines emerges as a necessary solution. At the same time, the important development of power electronics based on new semiconductors has boosted the appearance of new technologies applicable to transmission and distribution systems, such as HVDC (High Voltage Direct Current). The technical and economic benefits associated to this technology represent an attractive alternative to AC power line repowering. However, AC-to-DC power line conversion requires converter stations at its ends, as well as adapting the insulation system to the new working conditions. In this regard, the lack of a specific regulation for DC lines and the last change of the existing regulation for AC lines have caused a regulatory gap, whose consequences are analyzed in this paper. Special emphasis is laid on the different criteria to calculate safety clearances, when converting AC power lines into DC lines.
- **Keywords:** HVDC, Repowering, Insulators, Safe clearance distances, DC lines.

RESUMEN

El incremento de la demanda eléctrica, la liberalización del sector eléctrico y el aumento de la generación distribuida han propiciado durante las últimas décadas cambios en el flujo de potencia del sistema eléctrico español, saturando líneas que en su origen no fueron diseñadas para soportar dicha carga. Ante las dificultades asociadas a la construcción de nuevas líneas eléctricas, la repotenciación de las líneas existentes emerge como una solución necesaria. El rápido desarrollo de los dispositivos de electrónica de potencia basados en nuevos semiconductores ha permitido la aparición de nuevas tecnologías aplicables a sistemas de transporte y distribución, como es el caso de la tecnología HVDC (High Voltage Direct Current), cuyos beneficios técnicos y económicos representan una alternativa atractiva en la repotenciación de líneas eléctricas de corriente alterna. Sin embargo, la conversión de una línea de corriente alterna en corriente continua requiere de la construcción de estaciones convertidoras en sus extremos y la

adaptación del sistema de aislamiento a las nuevas condiciones de funcionamiento. En este sentido, la falta de un reglamento específico para líneas de corriente continua y el cambio acaecido a nivel nacional en la reglamentación existente para líneas de corriente alterna generan un vacío reglamentario, cuyas consecuencias se tratan en este artículo. Se hace especial hincapié en los criterios a adoptar a la hora de abordar el cálculo de las distancias de seguridad en el aire, durante la reconversión de líneas de corriente alterna en líneas de corriente continua.

Palabras clave: HVDC, Repotenciación, Aisladores, Distancias de seguridad, Líneas de corriente continua.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de energía eléctrica evolucionan al ritmo que impone el crecimiento y el desarrollo social, adaptándose a las necesidades de demanda eléctrica existentes. En la actualidad, el flujo de potencia en las líneas eléctricas aéreas está aumentando considerablemente debido principalmente al desarrollo tecnológico y al aumento de la calidad de vida, mientras que la liberalización del sector eléctrico y la proliferación de la generación distribuida han generado cambios en la dirección de dicho flujo de potencia. Como consecuencia, existen líneas que en su día no se diseñaron para cubrir las necesidades actuales, convirtiéndose hoy en día en cuellos de botella para el sistema.

Una opción para aliviar esta saturación y mejorar la operación del sistema eléctrico es construir nuevas líneas eléctricas. Sin embargo, éste es un proceso largo y complejo. La gran densidad de población, el uso intensivo del suelo y el amplio número de condicionantes, principalmente medioambientales, establecidos por la legislación vigente reducen el espacio disponible y prolongan en el tiempo el periodo de construcción. Es por ello que en los últimos años ha aumentado el interés en analizar nuevas alternativas que permitan optimizar las infraestructuras existentes. En este sentido, el aprovechamiento de los derechos de paso y la repotenciación de las líneas aéreas existentes representan una alternativa necesaria y atractiva para el adecuado comportamiento del sistema eléctrico.

Existen diferentes alternativas en la repotenciación de líneas eléctricas [1], tal y como se muestra en la figura 1. La elección de la opción adecuada es una labor ardua y varía en función del proyecto en cuestión. Hay multitud de factores que influyen en la decisión final, como las características de las instalaciones a repotenciar, el grado de repotenciación, las restricciones presupuesta-

rias, las restricciones de tiempo y las dificultades asociadas a los descargos. En la mayoría de los casos, la repotenciación implica cambios en el diseño y configuración de la línea, modificando los esfuerzos que deben soportar los apoyos y condicionando los sistemas de aislamiento y las distancias de seguridad, aspectos que deberán adecuarse a las nuevas condiciones de funcionamiento.

Entre las diferentes alternativas existentes en la repotenciación de líneas aéreas, la conversión de líneas de corriente alterna (c.a.) por líneas de corriente continua (c.c.) es una de las técnicas que proporciona mayor grado de repotenciación. Los avances en el campo de la electrónica de potencia, con el desarrollo de nuevos y potentes dispositivos semiconductores, han posibilitado que esta técnica de repotenciación, basada en la tecnología HVDC (*High Voltage Direct Current*), sea aplicable en sistemas de transporte y distribución de energía eléctrica. Aunque requiere al menos de la sustitución de los aisladores y la construcción de estaciones convertidoras a ambos lados de la línea, proporciona un plus de estabilidad y controlabilidad, y sus costes son cada vez más asequibles, por lo que sus ventajas técnicas y económicas convierten a la tecnología HVDC en una de las líneas de investigación con mayor auge en este campo.

En este artículo se analizan los criterios que afectan a los sistemas de aislamiento y a las distancias de seguridad en la conversión de líneas de c.a. en líneas de c.c., poniendo de manifiesto las implicaciones que conlleva el cambio reglamentario que tuvo lugar a nivel nacional en el año 2008, ya que muchas de las líneas que actualmente están en funcionamiento se diseñaron siguiendo

las directrices de un reglamento diferente al vigente en la actualidad.

2. CONVERSIÓN DE LÍNEAS DE C.A. EN LÍNEAS DE C.C.

El criterio general adoptado al realizar una conversión de una línea de c.a. en c.c. consiste en mantener la estructura general de los apoyos existentes y realizar únicamente los cambios necesarios para adaptarlos a la línea de c.c. De esta forma, se aprovechan los apoyos existentes, provistos de tres fases, adaptándolos para ubicar los dos polos de c.c. (ver Tabla I [2-8]). Las diferentes alternativas para realizar este cambio se pueden clasificar en dos grupos:

- **Conversiones en las que se sustituye la cabeza del apoyo** (Fig. 2): los cambios implicados no son excesivos, ya que se mantiene la estructura general del apoyo. Esta alternativa reduce las restricciones que limitan el incremento de potencia y permite mantener el servicio durante las tareas de reconversión [2].
- **Conversiones en las que se mantiene la estructura original del apoyo:** esta alternativa, aunque presenta la problemática de tener que adaptar las tres fases de los circuitos de c.a. a dos polos de c.c., requiere una inversión menor que la alternativa anterior, por lo que suele ser más atractiva.

Este tipo de conversión puede dar lugar a sistemas de c.c. monopoles o bipolares. La conversión a líneas de c.c. monopoles suele ser problemática ya que se le atribuyen interferencias y efectos de corrosión, especialmente cuando las líneas cruzan conductos de gas y cables de telecomunicación. Además, la existencia de una buena conductividad en el terreno es un requisito indispensable para el correcto funcionamiento del sistema monopolar, requisito que no siempre se cumple [4]. Por esta razón se suele optar por la utilización de sistemas bipolares. En este sentido, las líneas de c.a. de doble circuito presentan un número par de conductores, por lo que resulta más sencilla su adaptación a las necesidades de las líneas de c.c.

En cuanto a los conductores existentes, estos pueden trabajar con c.c., por lo que se suelen mantener al realizar la conversión. Hay que tener en cuenta que la resistencia del

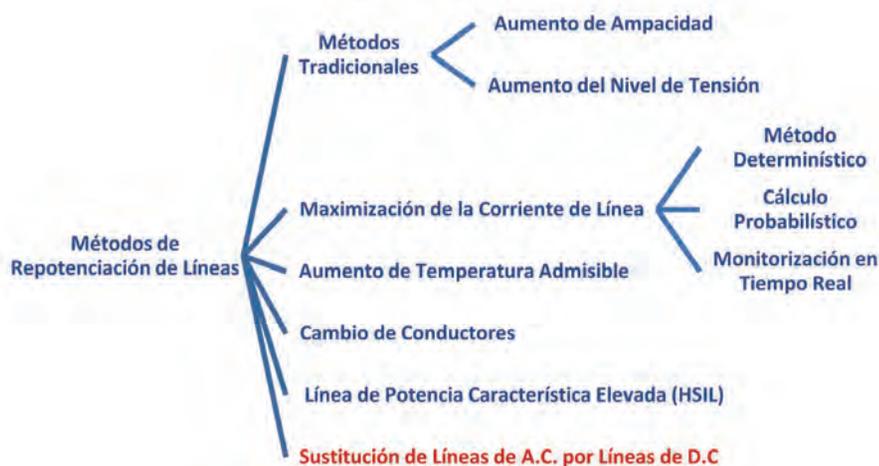


Fig. 1: Alternativas en la repotenciación de líneas eléctricas

| Referencia | Línea original c.a. | Línea convertida c.c. | Incremento potencia | Características |
|------------|---|--|---------------------|---|
| [2] | 145 – 420 kV Simple y Doble Circuito | 290 – 840 kV Monopolar y Bipolar | 250% | Cambio apoyo |
| [3] | 400 kV | 500 kV Monopolar | 256% | Mantiene apoyo |
| [4] | 220 kV, SC 203 km 150 MW | 200 kV, 200 MW Monopolar, retorno metálico/tierra | 133% | Mantiene apoyo Sustitución aislador |
| [5] | 400 kV Doble Circuito 2 haces | 120 kV c.a. 160 kV c.c. | 84% | Mantiene estructura, conductor y aisladores |
| [6] | 220 kV Doble Circuito | 400 kV Bipolar 3 haces | 215% | Mantiene apoyo Cambio Apoyo Conductor HTLS |
| [7] | 400 kV Doble Circuito | 500 kV c.c. Bipolar y 400 kV c.a. | 122% | Modificación apoyo Línea híbrida |

Tabla I: Ejemplos de conversiones de corriente alterna a corriente continua

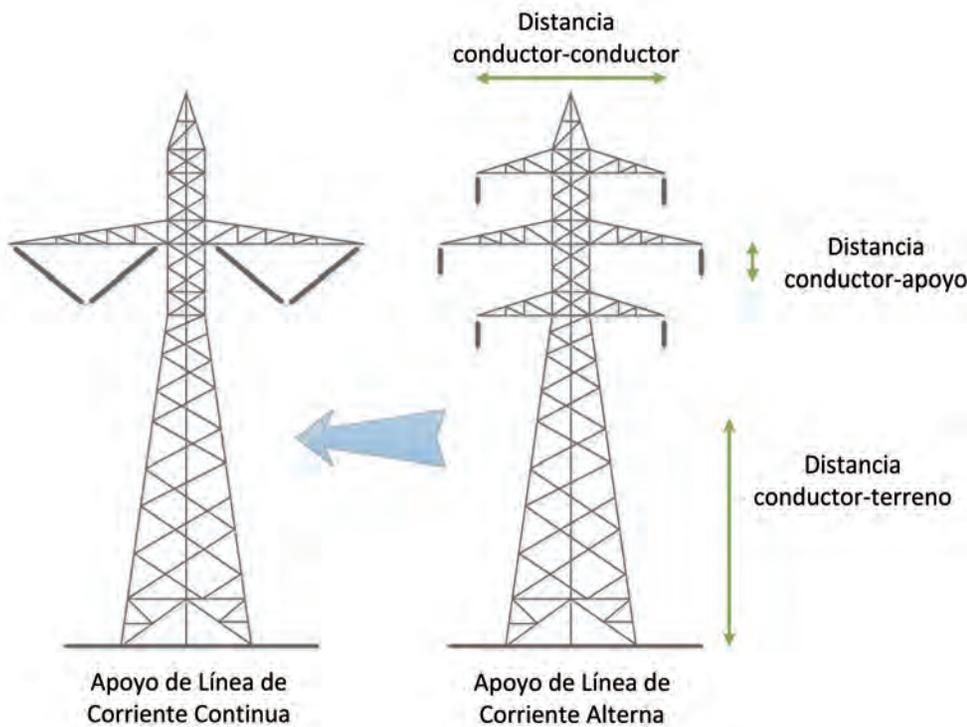


Fig. 2: Conversión mediante la sustitución de la cabeza del apoyo [2]

conductor en c.a. es mayor que en c.c., por lo que en función del tipo y número de capas del conductor, la intensidad de c.c. puede ser similar o aumentar hasta un 15% aproximadamente [9]. En caso de ser necesaria una repotenciación mayor, se pueden sustituir los conductores y utilizar conductores de mayor densidad de corriente o conductores de altas prestaciones térmicas y baja flecha [6,10].

También se puede alcanzar un incremento significativo de la potencia transportada aumentando la tensión asignada. En este sentido, para un mismo aislamiento, la tensión soportada en c.c. puede ser mayor que la tensión de c.a. [11]. Sin embargo, el comportamiento de los aisladores de c.c. es diferente al comportamiento de los aisladores de c.a. y las condiciones medioambientales pueden ser más críticas en los sistemas de c.c. que en los de c.a. Además, la elección de la tensión de c.c. también condiciona el gradiente de tensión en la superficie del conductor y las distancias de seguridad. Es por esta razón que el estudio y análisis de los aisladores y de las distancias de seguridad es uno de los aspectos más relevantes que se deben considerar en este tipo de transformaciones.

En este sentido, los aisladores de c.c. son más proclives a acumular contaminación. Las partículas suspendidas en el aire que rodea la cadena de aisladores se mueven bajo la influencia de un campo eléctrico unidireccional no uniforme y son atraídas por el final de la cadena, donde el campo eléctrico es mayor, generando depósitos irregulares de contaminación que provocan una distribución de tensión no lineal. Para mejorar la distribución del depósito y reducir su tamaño, se suelen colocar anillos colectores en la parte superior e inferior del aislador.

Además, en las aplicaciones de c.c. la corriente unidireccional origina problemas de corrosión. Para evitar estos problemas se coloca un manguito de cinc, de una pureza mínima de 99,8%, sobre el vástago del aislador. El manguito actúa como un electrodo de sacrificio protegiendo el aislador. Si se requiere mayor protección, en lugar del manguito se puede utilizar un collar de cinc sobre la caperuza [UNE 61325].

Como consecuencia, los aisladores de c.c. se diseñan específicamente con una línea de fuga mayor por unidad de longitud que los de c.a. En este sentido se debe tener en cuenta que los datos sobre aisladores y los mapeos del nivel de contaminación se

3. COMPORTAMIENTO DE LOS AISLADORES EN CORRIENTE CONTINUA

Los aisladores de c.c. deben soportar continuamente la tensión asignada entre polo y tierra y ocasionalmente sobretensiones de conmutación provocadas por faltas o por descargas atmosféricas. En este sentido, la tensión asignada de c.c. determina la línea de fuga de los aisladores, mientras que la amplitud de las sobretensiones determina las distancias de seguridad en el aire.

3.1. LÍNEA DE FUGA

La característica más importante de los aisladores, desde un punto de vista operacional, es su comportamiento en ambientes contaminados. Por este motivo, los aisladores se suelen elegir en función de la línea de fuga necesaria para soportar las condiciones de contaminación bajo la tensión del

| | Cálculo numérico | | | Cálculo experimental | |
|-------------------|---------------------|----------------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| | C.A. ⁽¹⁾ | Coef. ⁽²⁾ | C.C. ⁽³⁾ | C.C. ⁽⁴⁾ | C.C. ⁽⁵⁾ |
| | mm/kV _{FT} | U _{FT} /U _{PT} | mm/kV _{PT} | mm/kV _{PT} | mm/kV _{PT} |
| Polución leve | 28 | 1,1 | 30 | 30 | 30 |
| Polución media | 35 | 1,2 | 42 | 45 | 40 |
| Polución alta | 44 | 1,4 | 61 | 55 | 50 |
| Polución muy alta | 55 | 1,6 | 86 | 70 | 70 |

(1) Línea de fuga específica unificada (USCD). Fracción entre la línea de fuga mínima medida entre fase y tierra y la tensión eficaz fase-tierra [IEC 60815].

(2) Coeficiente corrector. Fracción entre la tensión eficaz fase-tierra de c.a. y la tensión polo-tierra de c.c. [6].

(3) Fracción entre la línea de fuga mínima medida entre polo y tierra y la tensión polo-tierra: producto de las columnas (1) y (2).

(4) Fracción entre la línea de fuga mínima medida entre polo y tierra y la tensión polo-tierra eficaz [6].

(5) Fracción entre la línea de fuga mínima medida entre polo y tierra y la tensión polo-tierra eficaz [12].

Tabla II: Valores para la línea de fuga en las cadenas de aisladores de c.c. [6]

suelen definir para situaciones de c.a. [IEC 60815], por lo que es necesario acondicionarlos a la situación de c.c. La Tabla II presenta diferentes valores para la línea de fuga de las cadenas de aisladores de c.c., medidos por unidad de tensión, para diferentes niveles de contaminación ambiental. Estos valores se han obtenido tanto de forma experimental, como de forma numérica a partir de los valores para c.a., aplicando en este caso un coeficiente corrector creciente con el nivel de contaminación [6,12]. Se observa cómo, a medida que el nivel de contaminación aumenta, la línea de fuga de c.c. debe ser mayor que la de c.a.

3.2. DISTANCIAS DE SEGURIDAD

Habitualmente, las distancias de seguridad de una línea de c.a. son suficientes para una línea de c.c. que tenga el mismo valor de tensión polo a tierra. Además, los diseños de los circuitos de c.a. de niveles medio-bajos de tensión suelen estar sobredimensionados. Sin embargo, en las líneas de c.c. las distancias requeridas para soportar las sobretensiones son mayores que las necesarias para soportar la tensión permanente.

Existen diferentes expresiones que permiten definir las distancias de seguridad en el aire para c.c. En este sentido, el Instituto de Investigación de Energía Eléctrica (EPRI) propone la expresión (1), donde U_{LL} es la tensión equivalente de c.a., que se puede obtener en función de la tensión polo-tierra U_{PT} de la línea de c.c. (2), mientras que el NESC (National Electric Safety Code) propone la expresión (3) [2].

$$d = 0,08 + (U_{LL} - 8,7) \cdot 0,0051 \quad (1)$$

$$U_{LL} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} U_{PT} \quad (2)$$

$$d = \left(\frac{U \cdot PU \cdot a}{500K} \right)^{1,667} \quad (3)$$

Donde U es la tensión asignada en kV, PU es el valor de pico de la sobretensión de conmutación (1,75), a es una constante de valor 1,25 y K es una constante de valor 1,15 para líneas monopolares y 1,25 para líneas bipolares.

A nivel nacional, las disposiciones del reglamento español de líneas de alta tensión [13] definen únicamente las distancias de seguridad correspondientes a líneas eléctricas de c.a. trifásica (50 Hz) (Fig. 2). Por lo tanto, en ausencia de un reglamento específico para líneas de c.c., es necesario adaptar las prescripciones y principios básicos del reglamento existente a las características de los sistemas de c.c. Además, se debe tener en cuenta que en el año 2008 hubo un cambio en la legislación española sobre líneas eléctricas, generándose claras diferencias entre el reglamento anterior (RD 3151/1968) y el actual (RD 223/2008). En este sentido, es más que probable que las líneas de c.a. que se encuentren más próximas a la saturación y que, por lo tanto, sean susceptibles de ser consideradas para su repotenciación, fueran diseñadas siguiendo las directrices del reglamento derogado. Es por esta razón que a continuación se analizan las diferencias más significativas generadas por el cambio de reglamentación, y cómo estas diferencias afectan al cálculo de distancias de seguridad en la reconversión de líneas de c.a. en c.c.

4. DIFERENCIAS ENTRE EL RD 3151/1968 Y EL RD 223/2008

El reglamento de líneas aéreas de alta tensión de 2008, en el apartado 5 del ITC-LAT 07, impone unas distancias mínimas de

seguridad con el fin de reducir la posibilidad de accidentes, observándose diferencias significativas con el reglamento anterior:

- En el RD 223/2008 las distancias de seguridad se definen en función de la tensión más elevada de la línea, mientras que en el RD 3151/1968 se definían por la tensión nominal de la línea.
- En el RD 223/2008 se separan distancias internas y externas, y se consideran tres tipos de distancias eléctricas que no se definían en el reglamento anterior (ver Tabla III):
 - D_{el} : distancia de aislamiento mínima especificada en el aire, para prevenir una descarga disruptiva entre conductores de fase y objetos a potencial tierra en sobretensiones de frente lento o rápido.
 - D_{pp} : distancia de aislamiento mínima especificada en el aire, para prevenir una descarga disruptiva entre conductores de fase durante sobretensiones de frente lento o rápido.
 - a_{som} : valor mínimo de la distancia de descarga de la cadena de aisladores, definida como la distancia más corta en línea recta entre las partes en tensión y las partes puestas a tierra.
- Las ecuaciones utilizadas para el cálculo de las distancias de seguridad son diferentes en ambos decretos (ver expresiones (4) a (8)).

4.1. CÁLCULO DE LA DISTANCIA CONDUCTOR-TERRENO

El RD 223/2008 establece de forma genérica que la altura de los apoyos será la necesaria para que los conductores queden situados por encima de cualquier punto del terreno a una altura mínima dada por (4), mientras que en el RD 3151/1968 se proponía la expresión (5). En ambos casos, se establece una altura mínima de 6 metros.

$$h_{\min_2008} = 5,3 + D_{el} \quad (4)$$

$$h_{\min_1968} = 5,3 + \frac{U_n}{150} \quad (5)$$

4.2. CÁLCULO DE LA DISTANCIA CONDUCTOR-APOYO

Para el cálculo de la distancia conductor-apoyo, el RD 223/2008 establece que la separación mínima entre los conductores y sus accesorios en tensión y los apoyos no sea inferior a D_{el} , con una separación mínima de 0,2 m. Sin embargo, el RD 3151/1968 proponía el cálculo de dicha distancia de seguridad según (6), manteniendo un mínimo de 0,2 metros.

$$D_{\text{conductor-apoyo}} = 0,1 + \frac{U_n}{150} \quad (6)$$

4.3. CÁLCULO DE LA DISTANCIA CONDUCTOR-CONDUCTOR

El RD 223/2008 establece que la separación mínima entre conductores se determinará según (7), mientras que en el RD 3151/1968 se proponía la expresión (8).

$$D = K \cdot \sqrt{F + L} + K' \cdot D_{pp} \quad (7)$$

$$D = K \cdot \sqrt{F + L} + \frac{U_n}{150} \quad (8)$$

| Tensión nominal U_n (kV) | Tensión más elevada de la red U_s (kV) | D_{el} (m) | D_{pp} (m) | Conductor | Flecha (m) | Longitud cadena (m) |
|----------------------------|--|--------------|--------------|-----------------|------------|---------------------|
| 3 | 3,6 | 0,08 | 0,10 | 47-AL1/8-ST1A | 5 | 0,40 |
| 6 | 7,2 | 0,09 | 0,10 | 47-AL1/8-ST1A | 5 | 0,40 |
| 10 | 12 | 0,12 | 0,15 | 47-AL1/8-ST1A | 5 | 0,40 |
| 15 | 17,5 | 0,16 | 0,20 | 47-AL1/8-ST1A | 5 | 0,40 |
| 20 | 24 | 0,22 | 0,25 | 47-AL1/8-ST1A | 6 | 0,40 |
| 25 | 30 | 0,27 | 0,33 | 94-AL1/22-ST1A | 7 | 0,45 |
| 30 | 36 | 0,35 | 0,40 | 94-AL1/22-ST1A | 7 | 0,45 |
| 45 | 52 | 0,60 | 0,70 | 94-AL1/22-ST1A | 8 | 0,50 |
| 66 | 72,5 | 0,70 | 0,80 | 147-AL1/34-ST1A | 10 | 0,89 |
| 90 | 100 | 0,90 | 1,05 | 147-AL1/34-ST1A | 10 | 0,89 |
| 110 | 123 | 1,00 | 1,15 | 242-AL1/39-ST1A | 10 | 1,20 |
| 132 | 145 | 1,20 | 1,40 | 242-AL1/39-ST1A | 12 | 1,50 |
| 150 | 170 | 1,30 | 1,50 | 242-AL1/39-ST1A | 12 | 1,50 |
| 220 | 245 | 1,70 | 2,00 | 337-AL1/44-ST1A | 17 | 2,20 |
| 400 | 420 | 2,80 | 3,20 | 402-AL1/52-ST1A | 22 | 3,50 |

Tabla III: Parámetros utilizados en el cálculo de la distancia entre conductores

| U_n (kV) | U_s (kV) | Conductor-Terreno (m) | | Conductor-Conductor (m) | | Conductor-Apoyo (m) | |
|------------|------------|-----------------------|------|-------------------------|------|---------------------|------|
| | | 1968 | 2008 | 1968 | 2008 | 1968 | 2008 |
| 3 | 3,6 | 6 | 6 | 1,53 | 1,59 | 0,2 | 0,2 |
| 6 | 7,2 | 6 | 6 | 1,55 | 1,59 | 0,2 | 0,2 |
| 10 | 12 | 6 | 6 | 1,58 | 1,62 | 0,2 | 0,2 |
| 15 | 17,5 | 6 | 6 | 1,61 | 1,66 | 0,2 | 0,2 |
| 20 | 24 | 6 | 6 | 1,78 | 1,83 | 0,23 | 0,22 |
| 25 | 30 | 6 | 6 | 1,94 | 2,02 | 0,27 | 0,27 |
| 30 | 36 | 6 | 6 | 1,97 | 2,07 | 0,3 | 0,35 |
| 45 | 52 | 6 | 6 | 2,34 | 2,57 | 0,4 | 0,6 |
| 66 | 72,5 | 6 | 6 | 2,75 | 2,91 | 0,54 | 0,7 |
| 90 | 100 | 6 | 6,2 | 2,91 | 3,1 | 0,7 | 0,9 |
| 110 | 123 | 6,033 | 6,3 | 3,08 | 3,21 | 0,83 | 1 |
| 132 | 145 | 6,18 | 6,5 | 3,45 | 3,62 | 0,98 | 1,2 |
| 150 | 170 | 6,3 | 6,6 | 3,57 | 3,7 | 1,1 | 1,3 |
| 220 | 245 | 6,77 | 7 | 4,53 | 4,77 | 1,57 | 1,7 |
| 400 | 420 | 7,97 | 8,1 | 6,20 | 6,25 | 2,77 | 2,8 |

Tabla IV: Distancias de seguridad calculadas según ambos reglamentos

Donde D es la separación entre conductores (m), K es un coeficiente que depende de la oscilación de los conductores con el viento (ITC-LAT 07), K' es un coeficiente que depende de la tensión nominal de la línea, siendo 0,85 para líneas de categoría especial (220 kV o superior) y 0,75 para el resto de líneas, F es la flecha máxima (m), según las hipótesis de viento, temperatura y hielo (ITC-LAT 07), L es la longitud de la cadena de suspensión (m) y U_n es la tensión nominal de la línea (kV).

4.4. ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CÁLCULO DE DISTANCIAS

Con el objetivo de realizar un análisis comparativo que permita valorar los cambios necesarios en los apoyos durante el proceso de reconversión, se han calculado las distancias de seguridad conductor-terreno, conductor-conductor y conductor-apoyo para los diferentes niveles de tensión normalizados, según las especifica-

ciones de ambos reglamentos. Tal y como se puede observar según (7) y (8), a diferencia de las otras distancias de seguridad que dependen únicamente de la tensión, la distancia entre conductores depende también de otros parámetros como la oscilación de los conductores con el viento, la categoría de la línea, la flecha máxima o la longitud de la cadena de aisladores, por lo que es necesario recalcular cada caso concreto. Para realizar una comparativa más rigurosa se ha definido una flecha y una longitud de cadena para cada caso analizado (Tabla III) [14]. Igualmente, en lo que a la oscilación de los conductores con el viento se

refiere, se ha considerado el caso más crítico, suponiendo ángulos de oscilación superiores a 65° (ITCLAT 07).

En base a estas consideraciones, la Tabla IV muestra las distancias de seguridad calculadas. Así mismo, las figuras 3, 4 y 5 analizan las diferencias que introduce en el cálculo de dichas distancias el reglamento del año 2008 frente al reglamento derogado.



Fig. 3: Distancias de seguridad conductor-terreno según ambos reglamentos



Fig. 4: Distancias de seguridad entre conductores según ambos reglamentos

Se puede observar cómo la distancia conductor-apoyo es la que presenta mayores variaciones (Figura 5). La variación es especialmente significativa para tensiones entre 30 y 150 kV, llegando a alcanzar el 50 % para líneas de 45 kV. Igualmente se observa

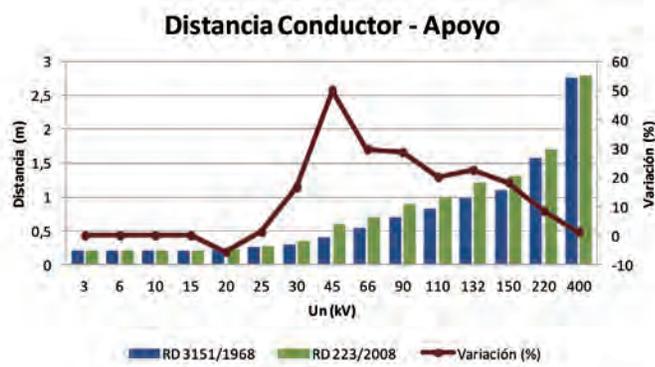


Fig. 5: Distancias de seguridad conductor-apoyo según ambos reglamentos

como la distancia conductor-terreno no sufre variaciones para líneas de tensión igual o inferior a 66 kV, mientras que la distancia se incrementa ligeramente para tensiones superiores (Figura 3). En cuanto a la distancia entre conductores, se observan incrementos de hasta el 10%, alcanzándose las máximas diferencias en torno a los 45 kV (Figura 4).

De manera general, se puede concluir que las distancias de seguridad han aumentado con el nuevo reglamento. En el caso de líneas cuya tensión asignada es inferior a 25 kV, prácticamente se mantienen las distancias de seguridad, con incrementos inferiores al 4%, mientras que las variaciones más importantes se observan

en líneas con tensiones entre 30 y 150 kV, siendo el caso más destacado el de las líneas de 45 kV. Para el caso de líneas de muy alta tensión las distancias requeridas por el nuevo reglamento son ligeramente superiores, con incrementos de hasta un 10%. Este hecho implica que muchos de los apoyos proyectados según el antiguo reglamento no cumplirían las distancias de seguridad requeridas por el reglamento vigente. Por lo tanto, si se pretende realizar una conversión en una línea que no tiene sobredimensionadas las distancias de seguridad, es probable que sea necesario realizar cambios en los apoyos.

5. CRITERIOS DE CÁLCULO EN LA RECONVERSIÓN DE LÍNEAS DE C.A. A C.C.

Tal y como se ha comentado anteriormente, en ausencia en la legislación española de un reglamento específico para líneas de c.c., los cálculos asociados a las distancias de seguridad en la reconversión de una línea de c.a. en c.c. deben apoyarse en la reglamentación vigente, adoptando una serie de criterios que permitan adaptar las prescripciones y principios básicos del reglamento existente a las características de los sistemas de c.c. En este sentido, y teniendo en cuenta que las líneas bipolares de c.c. tienen dos polos, uno con tensión positiva a tierra y otro con tensión negativa, se propone la adopción de los siguientes criterios a la hora de cuantificar las distancias de seguridad:

| Línea Original de C.A. (RD 1968) | NIVEL DE TENSIÓN | | DISTANCIAS DE SEGURIDAD | | |
|----------------------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------|
| | | | Conductor - Terreno (m) | Conductor - Conductor (m) | Conductor - Apoyo (m) |
| 30 KV | Tensión línea c.a. original | 30 kV (RD 1968) | 6,00 | 1,97 | 0,3 |
| | Tensión línea c.c. convertida | ±22,5 kV (RD 2008) | 6,00 | 2,56 | 0,27 |
| | | ±33 kV (RD 2008) | 6,00 | 2,91 | 0,35 |
| 45 KV | Tensión línea c.a. original | 45 kV (RD 1968) | 6,00 | 2,34 | 0,4 |
| | Tensión línea c.c. convertida | ±33 kV (RD 2008) | 6,00 | 2,91 | 0,35 |
| | | ±45 kV (RD 2008) | 6,00 | 3,1 | 0,6 |
| 66 KV | Tensión línea c.a. original | 66 kV (RD 1968) | 6,00 | 2,75 | 0,54 |
| | Tensión línea c.c. convertida | ±45 kV (RD 2008) | 6,00 | 3,1 | 0,6 |
| | | ±55 kV (RD 2008) | 6,00 | 3,2 | 0,7 |
| | | ±66 kV (RD 2008) | 6,00 | 3,62 | 0,7 |

Tabla V: Distancias de seguridad para la conversión de líneas de 30 kV, 45 kV y 66 kV

| Tensión línea c.a. original (kV) | 30 kV | | 45 kV | | 66 kV | | |
|---|---------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Tensión línea c.c. convertida (kV) | ±22,5kV | ±33kV | ±33 kV | ±45 kV | ±45 kV | ±55 kV | ±66 kV |
| Incr. distancia Conductor - Tierra (m) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Incr. distancia Conductor - Conductor (m) | 0,59 | 0,94 | 0,57 | 0,76 | 0,35 | 0,45 | 0,87 |
| Incr. distancia Conductor - Apoyo (m) | -0,03 | 0,05 | -0,05 | 0,20 | 0,06 | 0,16 | 0,16 |

Tabla VI: Incremento previsto en distancias de seguridad tras las reconversiones

- Las distancias conductor a tierra y conductor-apoyo se calcularán en función de la diferencia de potencial entre polo y tierra.
- Para el cálculo de la distancia entre conductores se tomará como referencia la diferencia de potencial entre polos.

En base a estos criterios, y teniendo en cuenta los datos de la Tabla IV, a continuación se calculan y analizan las distancias de seguridad eléctrica de tres líneas originales de 30, 45 y 66 kV de c.a. diseñadas según el RD 3151/1968 y las distancias de seguridad de las líneas de c.c. que podrían proyectarse según el RD 223/2008 con un objetivo de repotenciación.

En el caso de la línea de 30 kV se analizan dos posibles repotenciaciones a líneas de 22,5 y 33 kV de c.c., para la línea de 45 kV se analizan igualmente dos posibles repotenciaciones a líneas de 33 kV y 45 kV de c.c., mientras que para la línea de 66 kV, se analizan tres posibles repotenciaciones a líneas de 45, 55 y 66 kV de c.c. (ver Tabla V).

La Tabla VI muestra el incremento requerido en las distancias de seguridad tras la reconversión. Es decir, representa el cambio que deberían sufrir los apoyos para cumplir con las distancias de seguridad del reglamento vigente, suponiendo que los apoyos originales estuvieran diseñados sin sobredimensionamiento en base a las especificaciones del reglamento derogado. Se observa cómo mientras el incremento de distancia conductor-terreno es nulo en todos los casos analizados, la distancia entre conductores sufre un aumento considerable tras la reconversión. Sin embargo, se debe tener en cuenta que en las líneas de c.c. bipolares los polos se agrupan en cada circuito de c.a., por lo que la distancia existente real será mayor que la de la línea original de c.a. En cuanto a la distancia conductor – apoyo, aunque también se reduce en algunos casos, presenta la tendencia general a aumentar, acentuándose esta tendencia a medida que aumenta la tensión de c.c. asignada.

6. CONCLUSIONES

Aunque el criterio general adoptado al realizar una conversión de una línea de c.a. en c.c. consiste en mantener la estructura general de los apoyos, en algunos casos puede ser necesaria la sustitución de la cabeza del apoyo para cumplir con las distancias de seguridad en el aire. En este sentido, ante la ausencia de un reglamento específico para líneas de c.c., se han establecido los criterios necesarios para calcular las distancias de seguridad en base al reglamento vigente de líneas de c.a. Además se han analizado las implicaciones asociadas al cambio de reglamentación sufrido en el año 2008, concluyéndose que las distancias de seguridad aumentan con el reglamento vigente frente al reglamento derogado.

Del análisis realizado se concluye que, tras la conversión de una línea de c.a. en c.c., las distancias entre conductores aumentan considerablemente, mientras que la distancia conductor-apoyo sufre un aumento moderado que se acentúa con el nivel de tensión asignada y la distancia de los conductores al terreno no se ve afectada. Sin embargo, el diseño generalmente sobredimensionado de las líneas existentes y la configuración de las líneas bipolares hace que en muchos casos estas variaciones no sean significativas y se puedan solventar con cambios mínimos en los apoyos. En cualquier caso, los cambios dependerán del nivel de tensión de c.c. asignado y será necesario realizar un estudio exhaustivo en cada reconversión proyectada.

Por lo tanto, la repotenciación de líneas de c.a. con tecnología HVDC es una alternativa viable ante la saturación de líneas exis-

tentes ya que, aunque requiere la construcción de estaciones de convertidor a ambos lados de la línea, cuyo coste es elevado, no exige grandes cambios en los apoyos y proporciona un importante incremento de capacidad de transporte aportando ventajas técnicas como la controlabilidad y la estabilidad del sistema.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Albizu I, Mazon AJ, Zamora I, "Methods for increasing the rating of overhead lines". IEEE Power Tech 2005 Rusia, June 2005, p. 1-6. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/PTC.2005.4524481>
- [2] Clerici A., Paris L, Danfors P., "HVDC conversion of HVAC lines to provide substantial power upgrading", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6-1, p. 324-333, January 1991. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/61.103755>.
- [3] Naidoo P, Estment RD, Muftic D, et al. "Progress report on the investigations into the recycling of existing HVAC power transmission circuits for higher power transfers using HVDC technology". The 8th IEE international Conference on AC and DC Power transmission, 28-31 March 2006, p. 172-176.
- [4] Khan M.I., Agrawal R.C., "Conversión de AC line into HVDC", Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa, 2005 IEEE, Durban, South Africa, 11-15, July 2005, p. 51-56. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/PESAFR.2005.1611784>
- [5] Raman H. "Upgradation of existing EHVAC line by composite AC-DC transmission", Internacional Conference on Communication, Computer and Power (ICCCP'09), Muscat, February 2009.
- [6] Colla L, Rebolini M, Malgarotti S., et al. "Analysis on the possible conversion of overhead lines from AC to DC". CIGRE 2010, Paris, August 2010.
- [7] Straumann U, Franck CM. "Discussion of converting a double-circuit AC overhead line to an AC/DC hybrid line with regard to audible noise", 2011 Bologna Symposium CIGRE, Bologna, September 2011.
- [8] Larruskain DM, Zamora I, Abarrategui O, et al. "Conversion of AC distribution lines into DC lines to upgrade transmission capacity", Electric Power Systems Research, Vol. 81-7, p. 1341-1348. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2011.01.020>
- [9] Barthold LO, Clark HK, Woodford D. "Principles and applications of current-modulated HVDC transmission systems", IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Dallas, May 2006, p. 1429-1435, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TDC.2006.1668729>.
- [10] Albizu I, Mazon AJ, Valverde V, et al. "Aspects to take into account in the application of mechanical calculation to high-temperature low-sag conductors". IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 4 (5) p.631-640. DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/iet-gtd.2009.0543>.
- [11] Arrillaga J, *High voltage direct current transmission*, London: Peter Peregrinus Ltd., 1983. 245p. ISBN: 978-0-906-04897-9
- [12] Kiessling F, Nefzger P, Nolasco JF, et al., *Overhead power lines. Planning, design, construction*. Germany: Ed. Springer-Verlag, 2003. 759p. ISBN: 978-3-642-97879-1
- [13] "Reglamento de líneas de alta tensión", RD 223/2008, Ministerio de Industria Turismo y Comercio, Febrero 2008.
- [14] Fernández de Bordóns R, "Consideraciones en el diseño de líneas de alta tensión con el nuevo reglamento", VII Jornada Técnica de Líneas Aéreas CIGRÉ, Madrid, Junio 2009.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado en este artículo ha sido financiado por el Gobierno Vasco (proyectos ETORTEK IE14-389 y ELKARTEK HVDC LINK) y la Universidad del País Vasco - UPV/EHU (proyecto EHUA15/25).

- Los artículos deberán ser originales e inéditos y no deben de haber sido enviados simultáneamente a otros medios de comunicación.
- Tendrán siempre preferencia los que versen sobre temas relacionados con el objetivo, cobertura temática y/o lectores a los que se dirige la revista.
- Todos los trabajos serán redactados en castellano o inglés y deberán cumplir los siguientes requisitos:
 - Título en castellano e inglés de 150 caracteres máximo
 - Un breve resumen (Abstract), de unas 300 palabras, en castellano e inglés.
 - Entre tres y cinco palabras clave (Key words) en castellano e inglés, que permitan identificar la temática del artículo
 - No deberían de tener más de aproximadamente 5.500 palabras, o 17 páginas formato A4 en fuente Arial 10 con interlineado simple (Consultar con DYNA extensiones superiores).
 - Bibliografía relacionada o referencias según normas DYNA en www.revistadyna.com
- Con el objeto de facilitar la "revisión entre pares", el autor deberá asignar el código DYNA de 6 dígitos correspondiente a la temática del artículo, seleccionándolo de entre los códigos disponibles en la dirección de Internet: www.revistadyna.com
- Los originales se remitirán mediante nuestra página web (envío artículos), en formatos .DOC (msword), .RTF, o .TXT. Se recomienda una calidad mínima de 300ppp para las fotografías que se adjunten con el artículo. Se harán constar: título del artículo, nombre del autor, título académico, empresa o institución a la que pertenece, dirección electrónica, dirección postal y teléfono.
- Se someterán al Consejo de Redacción cuantos artículos se reciban, realizándose la "revisión entre pares" por los expertos del Consejo o los que éste decida. El resultado de la evaluación será comunicado directamente a los autores. En caso de discrepancia, el editor someterá el trabajo a un revisor externo a la revista cuya decisión será trasladada nuevamente al autor.
- Los autores aceptan la corrección de textos y la revisión de estilo para mantener criterios de uniformidad de la revista.
- La revista se reserva el derecho de no acusar recibo de los trabajos que no se ajusten a estas normas.
- Para mayor detalle sobre estas normas, por favor visite nuestra web <http://www.revistadyna.com> (en el apartado de "autores y evaluadores").
- Paper will be original and unpublished and it must not be concurrently submitted for publication elsewhere.
- Preference will be given to articles on the main subject areas of the Journal.
- Papers should be written in Spanish or English and should fulfil the following requirements:
 - Title in both English and Spanish with a maximum length of 150 characters.
 - Brief Summary or Abstract, about 300 words, in Spanish and English.
 - Between three and five keywords in English and Spanish, that identify the paper theme.
 - Written text should not exceed 5.500 words, or 17 A4 format pages in 10 size arial font single-spaced (For longer lengths consult with DYNA)
 - Bibliographical references according to DYNA norms at www.revistadyna.com
- To facilitate the "peer review" process, the author will assign the six digits DYNA code corresponding to the paper thematic, selecting it between the codes available at the Internet address: www.revistadyna.com
- Papers should be sent by our web page (envío artículos), in .DOC (MSWord), .RTF, or .TXT format. It is recommended a minimum quality of 3000 ppp for the pictures enclosed in the article. These papers will include: Article title, author name, academic title, company or institution, email, correspondence address and telephone.
- All papers must pass the Editorial Board (EB) evaluation process. The "peer review" will be made by the Editorial experts or those that the EB decides. The evaluation result will be directly communicated to the author. In case of discrepancy, the publisher will refer the work to an external reviewer whose decision will again be transferred to the author.
- The authors accept the text correction and the style revision to maintain uniformity criteria for the magazine.
- The journal reserves the right not to accept articles which do not comply with said instructions.
- To find more details about these instructions, please visit our web page <http://www.revistadyna.com> (authors and referees section).

DYNA

Ingeniería e Industria



PROMOCIÓN: Suscripción a DYNA por 29,85 €/año

Reciba la revista dyna impresa en su domicilio por solo 29,85 €/año

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

Promoción válida para los Ingenieros Industriales colegiados en: Araba, Bizkaia y Galicia.

Si está interesado, envíe un email a dyna@revistadyna.com mencionando que se acoge a la promoción e indicando su nº de colegiado y el nombre de su Colegio de Ingenieros Industriales.

 imagePROGRAF

INGENIERÍAS, NO HAY
~~HAY~~

**QUE SER UN
EXPERTO EN
IMPRESIÓN**

Las soluciones de Impresión de Gran Formato de Canon han sido diseñadas para facilitar la impresión interna de planos y documentación técnica para entornos de ingeniería y arquitectura.

Más información en infoppg@canon.es o visite nuestra página web www.canon.es/lfp

Canon