

ingeniería #3 e industria

www.revistadyna.com

DYNA



Revista Bimestral de Ingeniería Multidisciplinar

Año 89 | N°3 | Mayo - Junio 2014

MEDIO AMBIENTE

Planta de desulfuración

TRATAMIENTO TÉRMICO

Hornos de atmósfera de nitrógeno

ÓPTICA GEOMÉTRICA

Estudio batimétrico

VALORIZACIÓN DE RESIDUOS

Planta mixta

INSTALACIONES GEOTÉRMICAS

Test de respuesta térmica del terreno

MECANIZACIÓN

Taladro láser

VISIÓN ARTIFICIAL

Aprendizaje automático y categorización de defectos

MANTENIMIENTO

RCM adaptado

Determinación de deformaciones en estructura mediante láser

ABBAS IBN FIRNAS y su ciencia de las máquinas



9 770012 736006

03

MANTÉNTE INFORMADO

con **DYNA**

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

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

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

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

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

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

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

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

<http://www.revistadyna.com>

dyna@revistadyna.com

CONSEJO DE ADMINISTRACIÓN

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

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

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

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

Vocales:

José Antonio Arvide Cambra (Asociación de Andalucía Oriental - Granada), Germán Ayora López (Asociación de Andalucía Occidental - Sevilla), Joan Torres i Carol (Asociación de Catalunya - Barcelona), Miguel Ángel Martínez Lucio (Asociación de Madrid - Madrid), José María Ruiz - Tapiador Trallero (Asociación Aragón - Zaragoza), Manuel Lara Coira (Asociación de Galicia - Santiago), Martín Vega Uribarri (Asociación de Cantabria - Santander).

OTROS SOCIOS

Ramón Larrinoa Barreda (Colegio de Alava), Gabriel Egaña Uranga (Colegio de Gipuzkoa), Carlos Izkie Montejo (Colegio de Navarra), Francisco J. Marrodán Eparza (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), Antonio Adsuar Benavides (Conselleria de Industria Comercio e Innovación - Valencia) - Eduardo Valle Peña (Asociación de Cantabria - Santander), Blas Hermoso Alameda (Universidad Pública de Navarra - Pamplona), Franck Giroit (Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers - Paris, Francia), Fernando Guijarro Merelles (Universidad de Extremadura - Cáceres), Fernando López Rodríguez (Agencia Extremeña de la Energía - Cáceres), Angel Mena Nieto (Universidad de Huelva - Palos de la Frontera), Ferrán Puerta Sales (Universidad Politécnica de Cataluña - Barcelona), Ignacio Fernández de Aguirre Guantes (Instituto de Fundición Tabira - Durango), Javier Barrondo Apodaca (Asociación Bizkaia - Bilbao), José Manuel Palomar Carnicero (EPS Jaén - Jaén), José María Bueno Lidón (Green Power Tech - Sevilla), José Rafael Castrejón Pita (University of Cambridge - Cambridge, UK), Juan M. Gers (Gers USA LLC - Weston, Florida, USA), Manuel Lara Coira (Escuela Politécnica Superior de Ferrol - Ferrol), Néstor Goicoechea Larracochea (Universidad de País Vasco - Bilbao), Nicolás Gaminde Alix (Asociación Bizkaia - Bilbao), Joan L. Serarols Font (Universidad de Girona - Girona), Pedro J. Otaduy (ETICG - Oak Ridge, Tennessee, USA), Pere Alavedra Ribot (Universidad Internacional de Catalunya - Barcelona), Raimundo Martínez Giménez (Euroconseil - Sevilla).

CONSEJO ASESOR

Allan Joseph Wailoo (Universidad de Sheffield - Sheffield, UK), Carlos García Crespo (Universidad de Mondragón - Mondragón), Eva Martínez Caro (Universidad Politécnica de Cartagena - Cartagena), Javier Santos García (Universidad de Navarra - San Sebastián), Jorge Arturo Del Ángel Ramos (Universidad Veracruzana - Veracruz, México), Ricardo Rodríguez Jorge (Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez - Juárez, México), Erik Ocaranza Sánchez (Instituto Politécnico Nacional - Tlascala, México), Joshué Manuel Pérez Rastelli (INRIA - Paris, Francia).

© 2014. Publicaciones DYNA S.L.

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

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

ENTIDAD EDITORA: Federación de Asociaciones de Ingenieros Industriales de España

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

Publicaciones DYNA S.L.,
www.dynapubli.com
Alameda de Mazarredo, 69 - 48009 BILBAO.
Tel. +34 944 237566 - Fax +34 944 234461
email: dyna@revistadyna.com
Instrucciones detalladas para los autores en la web: www.revistadyna.com

IMPRESOR: MCCGRAPHICS

C/ Larrondo Behoko Etorbidea, edif. 4 Nave 1 - 48180 LOIU (Vizcaya)
- Tel.: +34 944 535 205. e-mail: elkar@mccgraphics.com
Formato: 21 x 29,7 cm (A4)
D.L. BI-6-1958
ISSN 0012-7361
ISSN electrónico 1989-1490
SICI: 0012-7361(20140501)89:3<>1.0.TX;2-2
CODEN: DYNAAU
DOI: 10.6036/DYNAII

Tirada de este número: 3.925 (papel) y 48.575 (digital)
Ejemplares vendidos: 3.756 (papel) y 48.575 (digital)

UNIVERSIDADES COLABORADORAS

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

ORGANIZACIONES COLABORADORAS

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

ORGANIZACIONES AMIGAS DE DYNA

Bodegas Muriel, Amic y Structuralia

DIRECCIÓN

José María Hernández Álava

Miembro de:

- Council of Science Editors
- Asociación Española de Comunicación Científica

Suscripción anual Institucional

(Estos precios no incluyen el 4% de IVA)

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

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

Forma de pago: Contado previo al envío de la revista

Medio de pago preferente: Domiciliación.

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

Existe un formulario de suscripción en nuestra página web:

<http://www.revistadyna.com>

Tarifas publicitarias

(Estos precios no incluyen el 21% de IVA)

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

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

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

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

Banner Web superior de 660x60 pixels (mín. 7 días)
 Inserción en Boletín electrónico.....
 Páginas visitadas al mes: 30.000 (Google Analytics)

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

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

BOLETIN DE SUSCRIPCIÓN:

*Nombre y 2 apellidos..... Empresa

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

*CP *Población *Provincia

*Teléfono..... Móvil..... Fax

E-mail..... Web.....

Fecha Fecha Firma y Sello

FORMA DE PAGO SELECCIONADA:

☐ Transferencia ☐ Cheque nominativo ☐ Domiciliación bancaria

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

Entidad				Agencia				D.C.		Oficina							

Domicilio Sucursal Cod.Postal Población Titular

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

Remitir este boletín de suscripción o sus datos por:

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

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

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

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

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

contenido

Mayo - Junio 2014

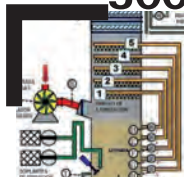
291



VALIDACIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA EL ESTUDIO BATIMÉTRICO DE LA ZONA INTERMAREAL DE GIPUZKOA

VALIDATING TECHNOLOGY BASED ON BATHYMETRIC SURVEY IN THE INTERTIDAL ZONE OF GIPUZKOA

300



NUEVA HERRAMIENTA PARA LA OPERACIÓN ECONÓMICA EN UNA PLANTA DE DESULFURACIÓN HÚMEDA DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN

NEW TOOL TO REDUCE OPERATING COSTS IN A WET FLUE GAS DESULFURIZATION PLANT

309



SISTEMA INTEGRAL Y SOSTENIBLE PARA EL RECICLADO Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS MÚLTIPLES - PROYECTO REVAWASTE

INTEGRAL AND SUSTAINABLE SYSTEM FOR MULTI-WASTE RECYCLING AND VALORISATION - REVAWASTE PROJECT

316



DESARROLLO DE EQUIPO PARA LA REALIZACIÓN DE TEST DE RESPUESTA TÉRMICA DEL TERRENO (TRT) EN INSTALACIONES GEOTÉRMICAS

DEVELOPMENT OF DEVICE FOR GROUND THERMAL RESPONSE TESTS (TRT) IN GEOTHERMAL INSTALLATIONS

325



VISIÓN ARTIFICIAL BASADA EN APRENDIZAJE AUTOMÁTICO PARA LA CATEGORIZACIÓN DE DEFECTOS SUPERFICIALES EN FUNDICIÓN

MACHINE VISION FOR SURFACE DEFECTS CATEGORISATION IN FOUNDRIES BASED ON MACHINE LEARNING

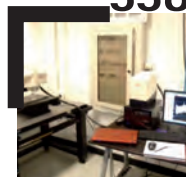
333



TRATAMIENTO TÉRMICO EN HORNOS DE ATMÓSFERA DE NITRÓGENO PARA PIEZAS DE EQUIPOS DE RADIOFRECUENCIA

HEAT TREATMENT IN NITROGEN ATMOSPHERE FURNACES FOR RADIOFREQUENCY EQUIPMENT PARTS

338



TALADRADO LÁSER MEDIANTE UN LÁSER CONVENCIONAL

LASER PERCUSSION DRILLING USING A CONVENTIONAL LASER

347



APLICACIÓN DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO BASADO EN UN RCM ADAPTADO

APPLICATION OF A MAINTENANCE MANAGEMENT SYSTEM BASED ON A TAILORED RCM

246

DYNA hace 80 años

248

AULA DYNA: AMENAZAS Y OPORTUNIDADES DE LA INNOVACIÓN INVERSA PARA LAS PYMES

252

Actualidad

256

Guía de buenas prácticas que garantizan la continuidad de suministro eléctrico en centros hospitalarios

258

El gestor eficaz: Clave para salir de la crisis

260

Modelo multidimensional para medir el desarrollo y éxito de la gestión de las relaciones con clientes en las empresas industriales

263

Definición de la identidad del diseño industrial español

265

Muchas marcas, un único software ¿Qué es PLC-PROG

267

Centrales nucleares: Una visión histórica. 2ª parte

272

Aplicación de la metodología "diseño para la variedad" (DFV) en el desarrollo de una plataforma de productos

276

Uso de escáner laser para determinar las deformaciones en la geometría de una armadura mudéjar

281

La robótica en la rehabilitación de cadera

287

IBN FIRNAS: Una figura olvidada en la historia de la ciencia de las máquinas, los mecanismos y la fabricación

NANOTECNOLOGÍA AL SERVICIO DEL PROGRESO

Cuando el premio Nobel **Richard Feynman** pronunció sus famosas charlas divulgativas sobre nanotecnología, nadie imaginó que sus ideas visionarias fueran a provocar una auténtica revolución en el conocimiento y en el desarrollo tecnológico.

La evolución de la humanidad ha estado siempre marcada por los materiales que ha tenido a su alcance. Antes teníamos los materiales que nos brinda la naturaleza, pero ahora la nanotecnología nos brinda un abanico de materiales y estructuras mucho más amplio. Los nanomateriales pueden ser cruciales para resolver muchos de los problemas de la humanidad, como los relativos a la enfermedad, el desarrollo sostenible del planeta o las tecnologías de la información.

La nanotecnología ha dejado de ser la eterna promesa. El impacto en nuestra sociedad es más que evidente, con variados e interesantes desarrollos en la industria, la sostenibilidad del medio ambiente, la búsqueda de nuevas fuentes de energía o la llegada de la nanobiotechnología.

La sociedad en la que vivimos se mueve gracias a los combustibles fósiles. La dependencia del petróleo marca la economía mundial. Tarde o temprano se acabará y el mundo esperamos que siga en funcionamiento. Para el desarrollo sostenible del planeta, hacen falta fuentes de energía limpias, como la energía solar. Una sola hora de sol es suficiente para satisfacer las demandas energéticas de la Humanidad durante todo un año.

Hasta ahora uno de los problemas de la célula solar fotovoltaica era su baja eficiencia en la conversión de energía (entre el 15 y el 25%). Con ayuda de la nanotecnología se están empezando a desarrollar nuevos materiales, que capturen la radiación solar en todo su espectro lumínico, al tiempo que abaratan los costes.

Existen diferentes proyectos que utilizan estos nuevos materiales. Un ejemplo es la búsqueda de la mejora de la autonomía de los dispositivos móviles cuyo cuello de botella es la duración de la batería. Para ello han desarrollado un sistema de captura de luz (natural y artificial) y de reciclaje de energía a través de las pantallas que permitirá la recarga automática sin necesidad de conectar el dispositivo a la red eléctrica tan a menudo pudiendo multiplicar la duración de las baterías por 10 o por 15.

Basándose en la misma tecnología también se busca convertir las ventanas de los hogares en pequeñas centrales fotoeléctricas. Ventanas capaces de atrapar la luz del sol, redirigirla a los marcos y convertirla en electricidad mediante el uso de pinturas luminiscentes depositadas sobre la superficie del cristal. Si tecnologías como esta llegan al mercado tal vez nos permitirá tener casas autónomas energéticamente.

Proyectos como estos no saldrían adelante sin empresas que se interesen en su desarrollo. La falta de inversión privada es uno de los problemas al que se enfrentan en España los proyectos de I+D, el paso del prototipo al mercado.

No basta con captar capital, hacer I+D y disponer de productos valiosos. El siguiente paso es garantizar su acceso al mercado. Las raíces están en la universidad pero el canal de comercialización debe ser a través de las empresas. Tiene que haber una empresa que crea en el proyecto e inversores. Debe buscarse el trinomio Ciencia-Tecnología-Empresa.

La ciencia trata de entender el mundo que nos rodea, la tecnología a partir del conocimiento básico intenta generar aplicaciones primarias y la empresa es el vehículo para mover el prototipo del laboratorio al mercado.

No debemos olvidar tampoco que muchos avances revolucionarios son confinados al olvido por intereses empresariales, políticos o administrativos lo que resulta más triste si se trata de proyectos de eficiencia energética.

Ante esta situación es necesario que las universidades y empresas se esfuercen en hablar el mismo idioma buscando la sinergia que ya existe en otros países como Alemania o EEUU, involucrando a docentes, investigadores y empresarios. Debemos buscar el equilibrio entre la alta calidad científica y el conocimiento del mercado, única vía para alcanzar una posición competitiva, apoyándose en gente que conoce los problemas reales del mercado y que tiene canales para que el valor añadido llegue a revertir en el bienestar general.

editorial

AMENAZAS Y OPORTUNIDADES DE LA INNOVACIÓN INVERSA PARA LAS PYMES

Iván García-Miranda de la Universidad Carlos III de Madrid

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7096>

1. INTRODUCCIÓN

El fenómeno de la innovación inversa fue descrito por primera vez en Octubre del 2009 en el artículo “*How GE is disrupting itself*”. Habitualmente, las innovaciones se desarrollan en países de economías pujantes para posteriormente adaptarlas a los países de economías en desarrollo. Una innovación inversa es “cualquier innovación que se adopta primero en países de economías en vías de desarrollo para que, *a posteriori*, pueda introducirse en los mercados de los países de economías desarrolladas”. También se las conoce como innovaciones frugales.

Jeffrey Immelt, presidente de *General Electric*, manifestó: “Si no conseguimos innovaciones en países en desarrollo y hacerlas globales, los nuevos competidores de estos países lo harán”. En estos mercados se requieren productos asequibles y que puedan ser fabricados y distribuidos con pocos recursos con el fin de llegar a la mayor parte de la población de estos países cuyo poder adquisitivo es inferior al de la mayoría de la población en las economías desarrolladas. Sin embargo, en vez de simplemente reducir los costes y ofrecer modelos de baja gama con características inferiores, se necesita implementar innovaciones en cuestiones tecnológicas y de procesos para desarrollar estos productos innovadores que los clientes de países de economías en desarrollo demandan. Es necesario aprender a hacer nuevos productos de más valor con menos recursos. Las compañías con éxito de estos entornos dominan a menudo este proceso, conocido como *innovación frugal*. Muchas multinacionales establecen los centros de I+D en países emergentes, proporcionando la capacidad de desarrollo de productos que posteriormente introducen en el resto de los mercados. A estos nuevos productos, se añaden los productos provenientes de empresas originarias de países con bajos costes laborales y cuya estrategia habitual de negocio es el liderazgo en costes. Las PYMES europeas se tienen que enfrentar además de a la competencia existente, a este nuevo escenario con productos que pueden competir en los segmentos de mercado donde ellas operan.

2. AMENAZAS Y OPORTUNIDADES

2.1. AMENAZAS

La globalización se entiende como un estado en el cual las operaciones de la empresa son gestionadas en una escala global, no solamente en unos pocos países seleccionados. Se caracteri-

za por una integración mundial de los mercados competitivos y por una competencia global a la que las compañías se enfrentan. Las principales fuerzas que conducen a la globalización son:

1. Abaratamiento e incremento en el acceso y uso de las tecnologías de comunicación y gestión de la información.
2. Desmantelamiento creciente de las barreras de comercio y regulación financiera.
3. Reestructuración económica y liberalización de economías en Rusia, Europa central/oriental y China.

El impacto de la globalización en las PYMES es más profundo que en el sector de las corporaciones altamente internacionalizadas y multinacionales. Este impacto se traduce en un incremento de la presión competitiva a través de las importaciones, así como de las condiciones de producción y marketing. Además de la necesidad de responder a cambios del mercado con un mayor ritmo, se produce una integración de distintas actividades económicas anteriormente dispersas geográficamente, lo que implica impactos en los suministros, en el ámbito e intensidad de las relaciones entre empresas y en la participación del capital y de los directivos.

La primera respuesta a la globalización por parte de las multinacionales ha sido desarrollar una estrategia de “*glocalización*”, desarrollando productos en sus bases de desarrollo para los crecientes mercados emergentes con ciertas adaptaciones a las condiciones locales, buscando el compromiso entre la escala global necesaria para minimizar costes y la maximización de la cuota de mercado. La estrategia de glocalización funcionó bien en una situación previa en la que las multinacionales establecidas en países ricos contaban con la mayoría del mercado y las empresas de los países emergentes no disponían de la capacidad de responder con sus propios productos. Sin embargo, el rápido desarrollo de las economías emergentes (especialmente Brasil, Rusia, India, China) ha posibilitado a las empresas de estos países a abordar sus mercados locales y competir con las multinacionales. Estas empresas, conocidas como gigantes emergentes (empresas basadas en economías emergentes) quieren además expandir sus productos y servicios en los mercados locales globales, tanto con productos con características similares y precios más bajos como con nuevas propuestas de precio-prestaciones. Una de las respuestas de las multinacionales ante este nuevo reto competitivo es la *innovación inversa*. La estrategia seguida en la innovación inversa tiene como objetivo obtener la mejor solución para el cliente del mercado emergente y posteriormente introducirla en los mercados locales. Sin embargo, esta estrategia llevada a cabo por multinacionales requiere recursos internos y competencias, de las que a menudo las PYMES carecen.

2.2. OPORTUNIDADES

No hay muchos directivos de PYMES que se hayan planteado las cuestiones clave necesarias para evaluar los riesgos en este contexto de globalización. ¿Cómo son las presiones

competitivas en nuestro sector? ¿Cómo se puede transferir internacionalmente la ventaja competitiva de nuestra compañía? ¿Mis clientes estarían dispuestos a cambiar a un producto con una nueva relación precio-prestaciones? Respondiendo a estas cuestiones, los gerentes pueden determinar de mejor forma los riesgos actuales.

El desarrollo de productos innovadores podría ayudar a las PYMES a fortalecer su posición competitiva tanto en sus mercados locales como en los mercados internacionales. Para poder adaptar esta estrategia de innovación inversa, hay que conocer cómo se lleva a cabo en las multinacionales y cuáles son sus elementos clave.

La innovación inversa no implica únicamente una innovación de producto, sino que es una innovación en el modelo de negocio ya que requiere nuevos procesos, nuevas alianzas e incluso una cadena de valor reinventada. Las multinacionales poseen ventajas considerables al adoptar esta estrategia: tecnología, una marca global, redes de suministro y capacidad de fabricación. Las multinacionales poseen estructuras y recursos muy superiores a las PYMES, que además se encuentran con barreras habituales a la innovación.

El objetivo al desarrollar una estrategia de innovación inversa para las PYMES debería de ser ganar cuota de mercado en los mercados locales y poder afrontar la llegada de los nuevos productos procedentes de los gigantes emergentes y de las multinacionales que desarrollan innovaciones inversas. Aquellas PYMES con perspectivas internacionales se pueden beneficiar del conocimiento de estos mercados así como del acceso a los mismos para ofrecer los nuevos productos desarrollados en mercados internacionales.

Los factores clave determinantes para una actitud innovadora de las PYMES son:

- a) Factores Internos: comunicación interna rápida y efectiva, vigilancia tecnológica y comercial, métodos de control y planificación y reaccionar a las nuevas demandas del mercado.
- b) Factores Estructurales: compromiso de la dirección, dinámica abierta, estrategia innovadora y una estructura organizativa flexible y dinámica.
- c) Factores del Entorno: redes de cooperación con centros tecnológicos y universidades, políticas de apoyo y acceso a fuentes de financiación externas.

Si se consideran los factores del entorno como comunes en un determinado país, habría que considerar los factores internos y estructurales como posibles ámbitos de actuación para los responsables de las PYMES que deseen implementar una estrategia de innovación. Como la innovación inversa pasa por el desarrollo de productos para los mercados de países emergentes, la comprensión de dichos mercados es fundamental si se quiere implementar un desarrollo de producto basándose en las características de estos países.

2.3. COMPRENSIÓN DE LOS MERCADOS EMERGENTES

En países como China e India está emergiendo una nueva clase media de consumidores compuesta por cientos de millones de personas. Cuando se analizan estos mercados, se aprecia una estructura muy característica. Si se considera la pirámide de mercado, en la cima de la pirámide están un número relativamente pequeño de consumidores que demandan marcas inter-

nacionales y que tienen el poder adquisitivo para permitírselo. A continuación, un grupo mucho mayor de personas con menor poder adquisitivo y menos propensos a dichas marcas internacionales. Finalmente, en la base de la pirámide está un grupo sólido de consumidores que son leales a las preferencias locales, hábitos y a menudo a sus marcas locales. Por debajo de ellos, está un grupo enorme con pocas posibilidades de convertirse a corto plazo en consumidores activos. El patrón de crecimiento económico en estas economías obliga a las multinacionales a centrarse en satisfacer la demanda de esta nueva clase media emergente, compitiendo con gigantes locales en auge así como con emprendedores o empresas que crean más productos con menos recursos. Todos estos nuevos competidores pueden extender sus productos a nuestros mercados locales, particularmente con el objetivo de ciertos segmentos de consumidores de clase media atraídos por una nueva proposición de precio-prestaciones.

Existen cinco diferencias enormes que separan los mercados emergentes y los países ricos: la diferencia en las prestaciones, la diferencia en infraestructuras, la diferencia en sostenibilidad, la diferencia regulatoria y la diferencia en las preferencias.

En los mercados emergentes los consumidores son bombardeados con estándares globales, pero a menudo no están dispuestos a pagar los precios globales, estando más preocupados por la proposición de precio-prestaciones de los productos. Incluso cuando los consumidores desean adquirir los mismos productos vendidos en otro lugar del mundo, es necesario adaptarlos a las diferencias de uso, distribución o venta. Esta adecuación es la primera respuesta de las multinacionales a la estrategia de expansión hacia mercados emergentes.

En los países desarrollados se han desplegado amplias infraestructuras pero en los países emergentes no. Estas restricciones en las infraestructuras pueden ayudar a desarrollar productos y servicios creativos. La mayoría de estos nuevos productos y servicios están basados en soluciones verdes porque pueden adoptar dicha solución sin incurrir en un cambio de coste. Además, la innovación en los países emergentes disfruta de la ventaja de una menor fricción debido a la diferencia regulatoria con países desarrollados.

Estas diferencias se convierten en la clave de la dinámica de la innovación inversa, por lo que su entendimiento es crucial para que las PYMES afronten la entrada de nuevos competidores y desarrollen productos y servicios con el fin de evitar la competencia en sus mercados locales. Si se considera que el mercado al que inicialmente las PYMES pretenden abordar es el local, se debería de descartar la diferencia regulatoria como un elemento a la hora del desarrollo de nuevos productos. Sin embargo, la diferencia de prestaciones, infraestructuras, sostenibilidad y preferencias son aspectos a tener en cuenta a la hora de implementar una innovación inversa por parte de las PYMES.

3. IMPLEMENTACIÓN DE LA INNOVACIÓN INVERSA

La creación de la disposición a la innovación inversa en PYMES tiene que empezar con la eliminación de los miedos acerca de la pérdida de posicionamiento de las marcas o la canibalización de los productos actuales. El desarrollo de nue-

vos productos y servicios basándose en innovación inversa puede canibalizar parcialmente los productos actuales, pero si un nuevo competidor introduce en el mercado una nueva proposición de precio-prestaciones lo hará de todas formas.

Si se considera que el proceso de innovación puede simplificarse en tres fases: conceptualización, implementación y marketing. La conceptualización incluye un análisis de los requisitos y la generación de la idea. La implementación incluye el desarrollo (prototipo, construcción) y pruebas. La última fase aún la producción y el lanzamiento al mercado así como la penetración en el mismo. En este artículo se proponen los elementos diferenciales que la metodología para desarrollar innovación inversa presenta en las dos primeras fases.

En la primera fase, la conceptualización, las PYMES deberían de crear una innovación a partir de una “hoja en blanco” “desaprendiendo” la curva de precio-prestaciones de sus productos actuales e intentando determinar una nueva proposición tal y como las multinacionales desarrollan sus productos mediante innovación inversa. Las PYMES tienen que estimar las necesidades de los clientes en sus mercados y considerar las necesidades básicas de los clientes en mercados emergentes. Esta referencia de necesidades básicas es la que sirve a las multinacionales y a los gigantes emergentes a desarrollar sus productos. Habitualmente, las PYMES se dejan guiar por sus clientes actuales sobre sus productos actuales, proponiendo mejoras incrementales con una influencia de empuje de las nuevas tecnologías. Sin olvidar los clientes actuales, las PYMES deberían de innovar para alcanzar nuevas penetraciones fuera de sus clientes actuales o aquellos dispuestos a adquirir productos o servicios que surgieran de un nuevo competidor y que les ofreciera una nueva proposición precio-prestaciones donde cubran sus necesidades básicas y que les sea de utilidad para no pagar una cantidad superior por un producto o servicio con características superiores pero que apenas utilizan. Por ejemplo, en la India, el 95% de los clientes de servicios de telefonía móvil tienen un plan prepago de bajo precio en vez de los caros contratos de altas prestaciones y que son infrautilizadas. Cada vez más usuarios en EEUU están cancelando estos contratos de largo plazo y cambiándose a planes prepago con requerimientos mínimos de uso.

Dentro de la fase de conceptualización se encuentra la labor de generación de ideas. Considerando que una de las barreras internas a la innovación en las PYMES es la dificultad para el desarrollo de nuevos productos, las PYMES podrían alcanzar el doble objetivo de ofrecer una nueva proposición de precio-prestaciones y una nueva idea mediante el uso de redes de innovación abierta. La innovación abierta es un paradigma que establece que las empresas pueden y deben utilizar ideas externas así como internas y medios internos y externos para llegar al mercado mientras intentan avanzar en su tecnología. La cooperación con estas redes podría tener lugar en cualquier fase del proceso de innovación como un revulsivo a la falta de recursos internos por parte de las PYMES.

En la segunda fase, la implementación, las PYMES deberían desarrollar una nueva proposición de precio-prestaciones teniendo en cuenta las diferencias expuestas con anterioridad con respecto a los mercados emergentes, con especial atención a las restricciones de infraestructura y la sostenibilidad en el producto. Consideraciones como el acceso a elementos básicos (electricidad, agua corriente, redes de comunicaciones),

infraestructuras de transporte son elementos que sirven a las multinacionales y a los gigantes emergentes para desarrollar sus productos. GE desarrolló una máquina de ultrasonidos para el mercado de los países emergentes teniendo en cuenta las limitaciones mencionadas. Así la máquina se desarrolló para que fuera compacta, portátil y autónoma para poder acceder con ella a zonas rurales o bajo condiciones con suministro eléctrico no constante, algo impensable en los mercados de los países ricos, cuyo uso se realiza en hospitales y clínicas.

El objetivo principal, si una PYME desea aplicar las prácticas de innovación inversa en su proceso de innovación, es ofrecer una proposición atractiva de precio-prestaciones. Esta nueva proposición de precio-prestaciones deberá de considerar los 12 principios para la innovación en los mercados de la base de la pirámide y adaptarlos al mercado objetivo:

- **Comportamiento de precios:** hay que enfocarse en un mercado objetivo que sea sensible al precio. En la base de la pirámide no es suficiente reducir los precios en un 5 a 10 por ciento. Se necesita una reducción superior al 30 por ciento. Y es justificable sólo si el mercado objetivo es muy grande y global.
- **Soluciones híbridas:** se necesita dedicar una mayor atención a las necesidades básicas del elemento a desarrollar, utilizando la tecnología más avanzada, combinada de una manera creativa e innovadora con la infraestructura ya existente.
- **Operaciones a escala:** si el mercado objetivo es muy grande y global, es necesaria la economía de escala en las operaciones para que exista rentabilidad.
- **Desarrollo sostenible:** es necesario encontrar soluciones sostenibles y ecológicas con capacidad de escalabilidad a nuevos mercados.
- **Funcionalidad:** al desarrollar un producto mediante innovación inversa, hay que pensar en la funcionalidad específica para el nuevo tipo de mercado, que es diferente a la requerida en los mercados desarrollados.
- **Innovación de procesos:** es necesario redefinir procesos, para adaptar los productos a la infraestructura muchas veces “hostil” y para hacer los productos accesibles a las personas de bajos ingresos.
- **Tener en cuenta las habilidades de las personas:** los productos deben de orientarse a que puedan ser utilizados por cualquier persona, independientemente de su preparación, pero proporcionando una plataforma sólida que proporcione formación y soporte.
- **Educación a los consumidores:** la innovación inversa requiere una inversión significativa en educación para asegurar un uso adecuado de los productos y servicios, y comprensión de los beneficios ofrecidos.
- **Es crucial el diseño para una infraestructura “hostil”:** los barrios y pueblos de la base de la pirámide generalmente carecen de servicio eléctrico estable, entre otras características que se deben tener en cuenta (agua corriente, infraestructuras de acceso, etc.).
- **Estos diseños deben permitir aprender con rapidez cómo utilizar el servicio o producto:** puede que haya una parte de los consumidores que prueben estos productos por primera vez, por lo que la curva de aprendizaje debe ser rápida y eficiente.

- **Distribución:** La innovación en la distribución a un bajo coste es casi tan crítica como la innovación de productos y procesos.
- **Productos y sistemas** diseñados de modo que puedan ser fácilmente adaptados, según las condiciones, y pensando constantemente soluciones innovadoras que rompan paradigmas existentes.

Dentro de los ejemplos de *start-ups* y emprendedores que reinventan la idea de una nueva ecuación de precio-prestaciones disruptiva en el mercado actual está la empresa *Diagnostics for All* (<http://www.dfa.org>). DFA es una organización que fusiona la biotecnología y el desarrollo, dedicándose a la creación de elementos de diagnóstico de bajo coste y de fácil aplicación diseñados de forma específica para países en desarrollo y con la idea de comercializar su idea en las economías desarrolladas. DFA se ha basado en alianzas estratégicas para alcanzar el éxito utilizando tecnología basada en el papel para crear dispositivos de diagnóstico. Otro ejemplo es el de *Igloo Vision*, una pequeña compañía británica que ha logrado irrumpir en el sector de las instalaciones para eventos y soluciones de proyección. Emplean tecnología de videojuegos y proyectores de bajo coste para proyectar videos en 360° y software de simulación. Siguen dispuestos a establecer alianzas con otras compañías para el desarrollo de nuevos usos o aplicaciones.

En un sector tan puntero como el de las telecomunicaciones, también se puede realizar innovación inversa, como es el caso de *Movirtu*, es un proveedor de soluciones innovadoras de SIM Virtual para los operadores móviles, desconectando la identidad móvil de la tarjeta SIM y permitiendo múltiples números en tarjetas SIM estándar. Su galardonado software en la nube *Cloud Phone* ya permite a los operadores móviles dar servicio a más de mil millones personas que ganan menos de 2 dólares al día que viven en comunidades rurales en el África subsahariana y Asia meridional. Las soluciones de *Movirtu* permiten también servicios de banca móvil y servicios de información personalizada a aquellos sin un terminal, tarjeta SIM o cuenta bancaria. La demanda de las aplicaciones *Cloud Phone* se extiende a las 3 mil millones personas que poseen más de dos tarjetas SIM viviendo en los mercados desarrollados. La oferta puede implementarse en cualquier red GSM estándar y utiliza una aplicación para *smartphone*, para cambiar sin problemas entre perfiles corporativos y personales en el terminal. *Movirtu* es una empresa privada, con sede en Londres, Reino Unido y oficinas en Centurion, Sudáfrica.

4. CONCLUSIONES

Las PYMES deben de destacar la criticidad de la entrada de nuevos competidores provenientes de mercados emergentes y de productos desarrollados por multinacionales a través de innovación inversa. Deberían conocer las necesidades básicas de los consumidores y plantear una nueva proposición de precio-prestaciones para adaptar el proceso de innovación de sus nuevos productos a las 5 diferencias fundamentales que presentan los mercados emergentes.

En lo que se refiere al proceso de innovación y a la aplicación de las mejores prácticas de innovación inversa, se pro-

pone que las PYMES adapten sus primeras dos fases como se muestra en la Tabla 1.

Fase	PYMES
Conceptualización	Extraer ideas basándose en los mercados locales y eliminando todas características innecesarias. Cuestionarse cada paso y simular la existencia de las diferencias existentes en los países emergentes.
Implementación	Realizar pruebas con clientes potenciales para tener retroalimentación. Utilizar redes globales de innovación para el desarrollo y testeo.

Tabla 1: Aplicación de innovación inversa en las fases del proceso de innovación. Fuente: Elaboración propia.

Se ha propuesto la adaptación de las mejores prácticas llevadas a cabo por las multinacionales en su estrategia de innovación inversa al entorno y limitaciones de las PYMES así como la exposición de varios ejemplos de PYMES que desarrollaron productos con nuevas proposiciones precio-prestaciones, objetivo clave en la innovación inversa. En este aspecto, se establece la adaptación para las PYMES de los 12 principios para la innovación en la base de la pirámide como líneas maestras a seguir por los responsables de innovación de PYMES que deseen seguir una estrategia de innovación inversa.

PARA SABER MÁS:

- [1] Govindarajan V, Trimble C, Nooyi I K. "Reverse innovation: Create far from home, win everywhere". *Harvard Business Review Press* 2012. ISBN 978-1-4221-5764-0
- [2] Hart S, Prahalad C K. "The fortune at the bottom of the pyramid". *Strategy+Business* Vol. 26. Enero 2002, p. 54-67.
- [3] Immelt J R, Govindarajan V, Trimble C. "How GE is Disrupting Itself". *Harvard Business Review*. October 2009, p. 56-65.
- [4] Knight G. "Entrepreneurship and Marketing Strategy: The SME under Globalization". *Journal of International Marketing* 2000, Vol. 8, No. 2, p. 12-32. <http://www.jstor.org/stable/25048805>
- [5] Prahalad C K, Mashelkar R A. "Innovation's Holy Grail". *Harvard Business Review* July-August 2010, p. 132-141.
- [6] Ruzzier M, Hisrich R D, Antoncic B. "SME internationalization research: past, present, and future", *Journal of Small Business and Enterprise Development*, 2006, Vol. 13 Iss: 4, pp.476 – 497
- [7] Sehgal V, Dehoff K, Panneer G. "The Importance of Frugal Engineering". *Economic Times Mumbai*. 25 may 2010 Vol. 59
- [8] The economist Schumpeter business and management blog: Frugal innovation – Battle igloo <http://www.economist.com/blogs/schumpeter/2012/05/frugal-innovation> (visitado por última vez 3 Febrero, 2014)

Una encuesta de la Escuela Politécnica Federal de Lausana (Suiza)



Nuevo edificio para el Instituto de la Ingeniería y Ciencias Químicas en la EPFL

valentes a poco más de 100.000 euros. Esta información era voluntaria y se recibieron 2.909 respuestas. La variación era considerable, no sólo por razón de la edad de los comunicantes, sino por la rama de graduación. Entre las más altas se sitúa la ingeniería mecánica, sistemas de comunicación y electricidad, mejorando más aún si se dispone del posgrado en gestión de tecnologías.

- ¿Ganan lo que esperaban a su edad?

Un 35% de las respuestas se declara incapaz de estimarlo. Están satisfechos un

28%, ganan menos de lo esperado un 27% y sorprendentemente, perciben más de lo que esperaban un 10%.

La EPFL mantiene una Asociación de Antiguos Alumnos (A³) que en julio del pasado año lanzó una encuesta a las 13.686 direcciones e-mail válidas de los 24.324 diplomados hasta la fecha. Las respuestas fueron 3.512, es decir un 25,66% de las consultas emitidas, lo que representa un elevado índice de cohesión con el centro educativo. Tomada de la revista de la *Association des diplômés de l'EPFL*, damos alguna información de interés basada en las respuestas recibidas, que pueden servirnos de pauta comparativa con nuestra situación profesional.

- ¿Dónde trabajan los diplomados de la EPFL?

Un 75,8% en Suiza; el 6,3% en Francia; el 3,8% en los Estados Unidos; el 1,9% en Alemania; otro 1,9% en el Reino Unido; el 0,9% en España y el resto, un 9,4% en diversos países. Dada la multinacional composición del alumnado, es normal que una vez graduados se propongan en muchos casos regresar a los países de origen, aunque se aprecia

una elevada posibilidad y decisión de continuar ejerciendo profesionalmente en Suiza.

- ¿Qué proporción de mujeres se da entre los diplomados?

Aunque a juzgar por las respuestas recibidas, el porcentaje es solamente del 16,8%, se aprecia una evolución clara. Entre los 50 y 60 años del colectivo que ha contestado, es del 8,7%, entre los 40 y 50 del 13,9%, entre los 30 y 40 del 17,7% y de menos de 30 años del 28,2%.

- ¿Qué puestos ocupan?

En prácticas está contratado el 1%, como empleo joven el 2%, doctorandos el 6%, como titulado el 16%, en alguna jefatura básica el 22%, en direcciones medias el 38% y un 15% en alta dirección.

- ¿Cuáles son sus ingresos?

Los ingresos anuales medios de todo el conjunto de las respuestas es de 123.500 CHF (francos suizos) equi-

- ¿Están satisfechos con su carrera?

Entre las respuestas recibidas de los diplomados que están en activo, un 80% se declara satisfecho de la carrera profesional realizada y un 86% del acierto en la elección de la especialidad cursada.

Resulta digno de estima el apreciar cómo una institución educativa como la EPFL es capaz de mantener una asociación de antiguos alumnos con 13.686 posibilidades de comunicación abiertas, un 56% de todos sus diplomados históricos. Suiza se situó en 2013 en el primer puesto del Índice Global de Innovación, seguida de Suecia y el Reino Unido, con España ocupando el puesto 26°.

El sistema eléctrico español en 2013

Según el informe avance del sistema eléctrico español de R.E.E. en 2013, el pasado año fue el tercero consecutivo de reducción de la demanda de energía eléctrica en España, con algo más del 2% de caída.

La cobertura de la demanda de energía en el sistema peninsular, que ha ascendido a 246.166 GWh, se ha distribuido de la siguiente forma:

- Hidráulica, un 14,4%, incrementada en 2013 por la alta hidraulicidad del año.
- Eólica, un 21,1%, constituyendo la mayor aportación histórica al sistema.
- Térmica de carbón, un 14,6%, con un apreciable descenso respecto a 2012.
- Térmica de ciclo combinado, un 9,6%, también con reducción significativa.
- Nuclear, un 21%, con una pequeña reducción.
- Solar, un 4,9%.
- Térmica renovable, cogeneración y otras fuentes, 14,4%.

Esa distribución ha supuesto una mejora en el factor de emisión por MWh que se ha reducido en más de un 20%.

La potencia instalada en el sistema peninsular para la generación eléctrica sigue las proporciones siguientes:

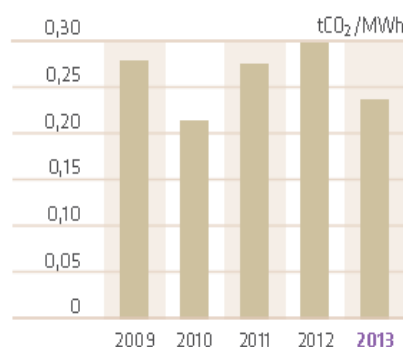
- Hidráulica, un 19,4%.
- Eólica, un 22,2%.
- Térmica de carbón, un 10,9%.
- Térmica de ciclo combinado, un

24,8%.

- Nuclear, un 7,7%.
- Solar, un 6,5%.
- Térmica renovable, cogeneración y otras fuentes, un 8,5%.

Ello muestra una elevada infrautilización de las centrales de ciclo combinado. El total de potencia instalada de generación solo ha tenido variaciones insignificantes.

Evolución del factor de emisión asociado a la generación de energía eléctrica



En el sistema extrapeninsular, la demanda, que también tiene una reducción de casi el 3% sobre 2012, ha sido de 14.704 GWh, de los que 1.266 han sido aportados por el enlace de cable Península-Baleares. La potencia generadora en este sistema asciende a 5.828 MW.

ANÁLISIS DAFO DEL SISTEMA ELÉCTRICO ESPAÑOL (INFORME FUNCIVA)

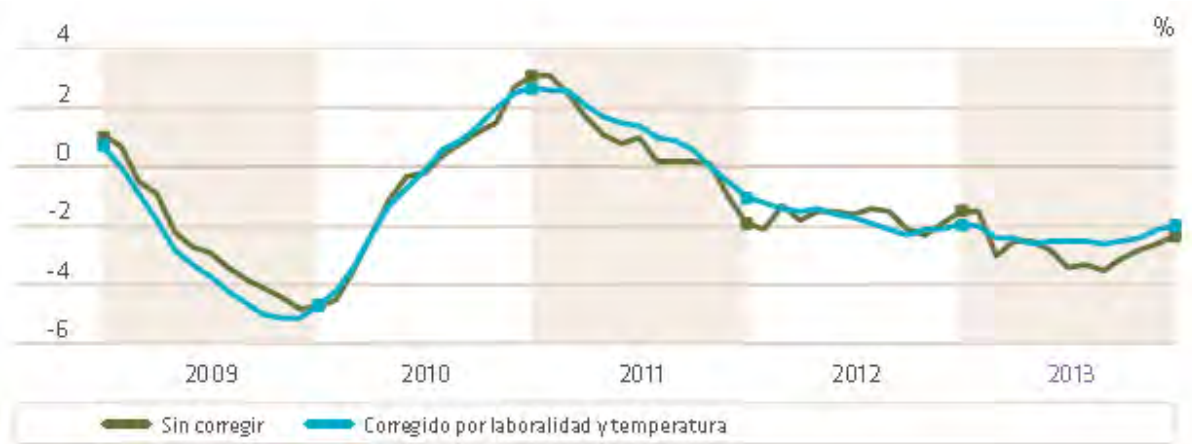
Por otra parte, la Fundación Ciudadanía y Valores (FUNCIVA) ha emitido el informe **Seis prioridades para el mercado español de la energía**, en el que tras analizar su situación a través de un extenso DAFO, propone las que, a su juicio, deberían ser las medidas más urgentes a aplicar, junto con los objetivos, justificación y materialización de las mismas. Damos a continuación los cuadros de dicho DAFO.



www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/funciva.pdf

Las seis prioridades anunciadas que deberían resolverse son, según el informe:

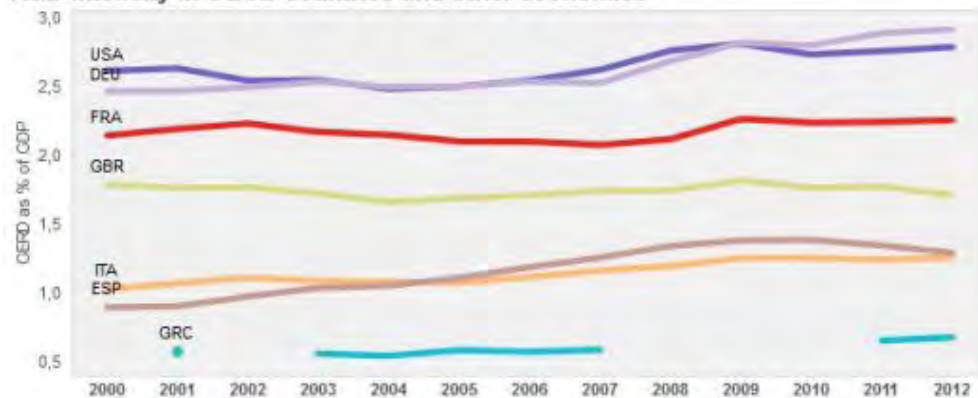
- Resolución del déficit de tarifa del sector eléctrico
- Seguridad jurídica y estabilidad regulatoria
- Mercado energético eficiente
- Planificación estratégica en el sector energético en España
- Innovación y Penetración planificada de Tecnologías Energéticas
- Eficiencia energética: presente y futuro.



Evolución de la demanda de energía eléctrica

I + D para salir de la crisis

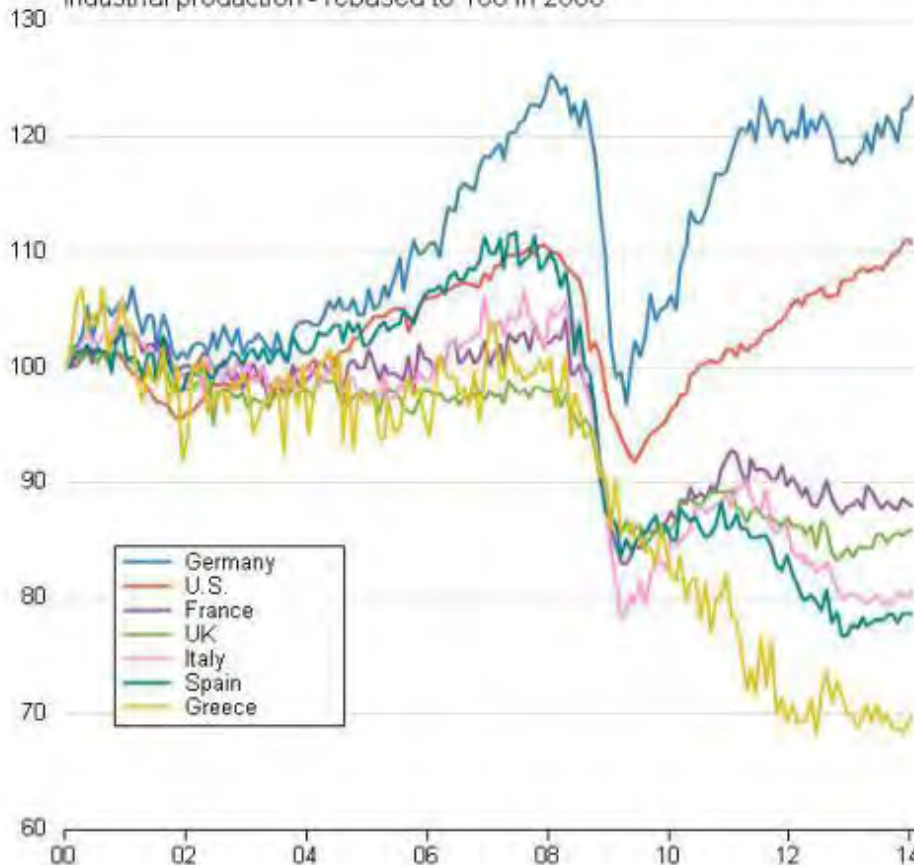
R&D Intensity in OECD countries and other economies



Evolución del GERD (Gasto en I + D) como % del PIB

Industrial production since 2000

Industrial production - rebased to 100 in 2000



Fonte: Thomson Reuters Datastream

@ReutersGraphics/Vincent Flasseur

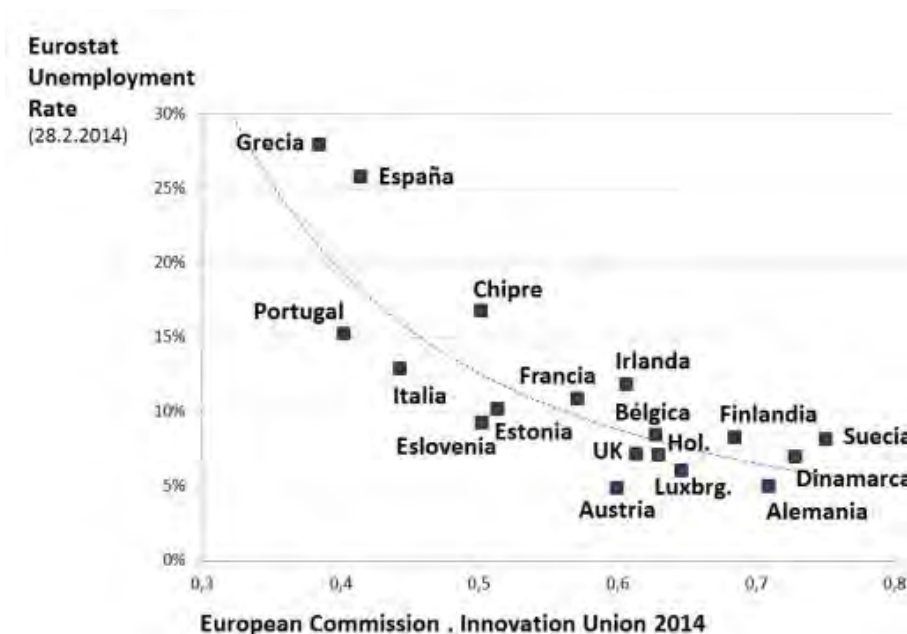
Índice de producción industrial con base 100 en el año 2000

Nuestro compañero, Guillermo Dorronsoro, Decano de la Deusto Business School, ha elaborado, con datos de la OCDE y de Eurostat, unos gráficos que comparan el esfuerzo en I + D con la evolución industrial y económica de los últimos años de crisis en algunos de sus países. En el primero se aprecia cómo el GERD español, aunque inferior a países punteros, se había acercado al 1,5% del PIB, pero iniciaba un descenso a partir de 2010. Si ahora vemos la situación de los Índices de producción industrial, después de la drástica reducción tenida por todos los países en la crisis entre 2008 y 2009, son precisamente los líderes en I + D, Alemania y EE.UU. quienes mejor la remontan.

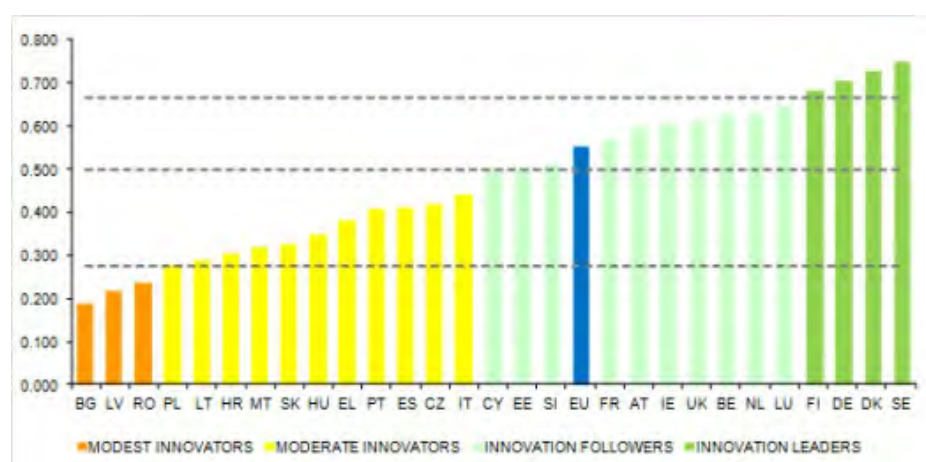
Como es sabido, España ocupa uno de los peores lugares en el ranking del desempleo en Europa. No solamente originado por la caída en la producción industrial, pero con escasas posibilidades de mejorarlo si no se implementan planes decisivos de reindustrialización en sectores de fabricación avanzada, como los que otra vez Alemania, junto con el Reino Unido, Francia e, incluso, EE.UU., ponen en



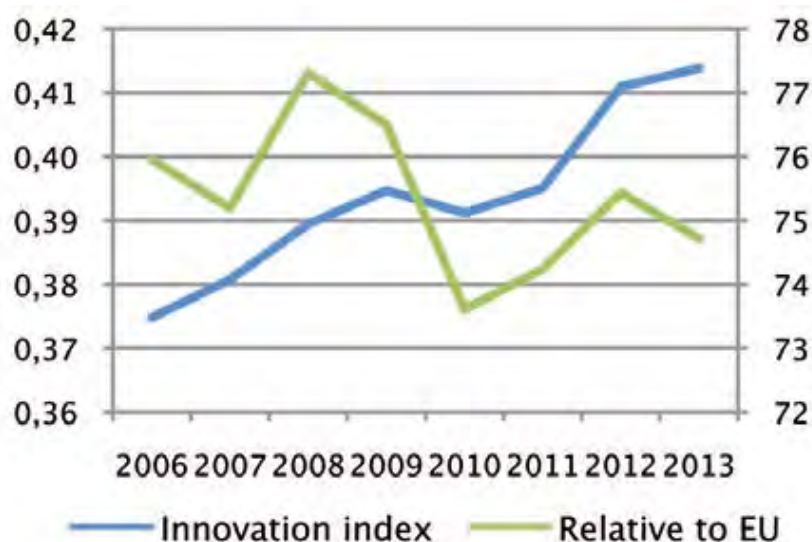
http://www.manufacturing-ket.com/wp-content/uploads/2014/03/20140319-Advancing-Manufacturing-Advancing-Europe_Report-of-the-Task-Force-on-Advanced-Manufacturing.pdf



Desempleo en los países de la UE respecto a su índice de innovación



Clasificación de los países de la UE según su resultado innovativo (innovation performance)



Evolución en España del índice de innovación (azul-izquierda) y de la diferencia con la media de la UE

marcha con cuantiosos fondos. La Unión Europea se propone el reto de recuperar esa actividad en la forma que denomina “fabricación avanzada”, tal como se ha expuesto el pasado marzo en el documento.

También la UE ha publicado su anual estudio sobre la situación de la I + D en un reciente informe, dando a España el puesto 17º (ver *Innovation Union Scoreboard 2014* en la web http://ec.europa.eu/enterprise/policies/innovation/files/ius/ius-2014_en.pdf), en la parte alta del grupo “innovadores moderados”, considerando una serie de conceptos indicados en el informe.

El texto que dedica a España, señala que es un país *innovador moderado*. Sus resultados han mejorado entre 2006 y 2013, pero la diferencia con la media de la UE ha pasado del 77% al 75%. La mayoría de sus indicadores están por debajo de esa media y presenta relativa debilidad en los ingresos del exterior por licencias y patentes y en la exportación de servicios del conocimiento. Tiene relativa fortaleza y crecimiento en las publicaciones científicas internacionales, así como en la participación de ingresos por comercialización de innovaciones o aplicaciones de patentes. La mayor reducción está en las inversiones en “venture capital”, en la innovación de las PYMEs y en los proyectos Comunitarios.

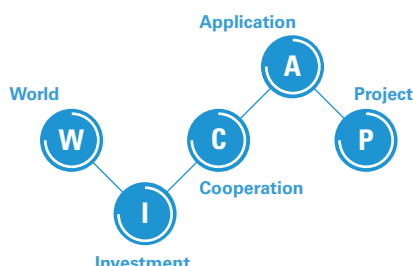
LIDERE EL FUTURO DE LA INDUSTRIA QUÍMICA



- La zona expositiva se transforma en un **área de transferencia tecnológica** para crear **nuevos modelos de negocio**.
- Los mayores expertos expondrán nuevos avances y soluciones que marcarán el futuro del sector:** Jornadas de Análisis Instrumental y Congreso de Ingeniería Química del Mediterráneo entre muchos más.
- Toda la **oferta y demanda internacional concentradas** en 4 días para optimizar resultados:
 - 2.150** expositores.
 - 37.825** visitantes profesionales.
 - 196** actividades paralelas.
 - 60** países de todo el mundo.

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

Venga y descubra todas las actividades potenciadoras.



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

ACREDÍTESE DE FORMA GRATUITA EN
EXPOQUIMIA.COM CON ESTE CÓDIGO

SNMTZKM4

EXPOQUIMIA
Encuentro Internacional de la Química

#Expoquimia YouTube LinkedIn Facebook Twitter

EXPOQUIMIA EUROSURFAS EQUIPLAST
Encuentro Internacional de la Química Aplicada del Mediterráneo

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

Fira Barcelona

Global partners:

Endress+Hauser



Guía de buenas prácticas que garanticen la continuidad de suministro eléctrico en centros hospitalarios

Manuel-Vicente Riesco-Sanz, Oscar Duque-Pérez, Angel-Luis Zorita-Lamadrid, Daniel Morínigo-Sotelo, Manuel Muñoz-Cano, Miguel-Alejandro Fernández-Temprano, Luis-Angel García-Escudero y Álvaro Guijarro-Rubio
Universidad de Valladolid

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7119>

La continuidad de suministro es uno de los criterios determinantes en el diseño de las instalaciones eléctricas de distribución, en especial, en centros hospitalarios.

Aunque existe una normativa genérica aplicable, las dimensiones de estos centros así como el número de instalaciones que conllevan, pueden hacer que se opte por soluciones diferentes a criterio de la ingeniería responsable. Se trata de clarificar algunos aspectos, homogeneizar criterios y servir de referencia, presentando una propuesta de los esquemas de suministro, la tipificación de cargas y la estructura de distribución interior en BT que proporcionen a las instalaciones hospitalarias unas garantías de fiabilidad y calidad del suministro eléctrico. Los requisitos propuestos superan los requerimientos del *Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión* (REBT) [1] y se han recogido en forma de directriz [2] en el ámbito de la *Gerencia Regional de Salud de Castilla y León*.

TIPOS DE SUMINISTRO ELÉCTRICO

Según la ITC-BT-28, los hospitales deberán contar, al menos, con dos tipos de suministro: Normal (SN) y Complementario (SC). Además de la ITC-BT-38 establece la necesidad de un suministro Especial Complementario (SEC) para ciertas cargas con requerimientos establecidos de conmutación y autonomía.

Se recomienda que el SN se realice desde la red pública en AT/MT, mediante un diseño redundante utilizando dos líneas externas (principal y de reserva), alimentadas desde subestaciones y/o transformadores y trazados independientes, preferiblemente dedicadas para uso exclusivo del hospital y con garantía total de potencia. Si la línea de reserva no tiene asegurada garantía de potencia, la instalación de un telemando para la conmutación de líneas reduce los tiempos de indisponibilidad de suministro [3].

Si la línea es compartida, la transferencia automática deberá contar con teleseñalización de las posiciones del interruptor. Si la transferencia automática se realiza mediante autómatas programables, debe preverse que dispongan de una alimentación segura a través de un SAI con alarma remota de desconexión de red.

En cualquier caso, deben preverse los mecanismos que permitan la vuelta al esquema de explotación normal sin cor-

te de tensión, siempre que sea posible el acoplamiento de ambas líneas.

Dada la imposibilidad de asegurar una independencia estocástica entre las dos alimentaciones externas y el bajo nivel de fiabilidad de la estructura que quedaría aguas abajo [4], el SC se realizará mediante grupos electrógenos, en paralelo, con conmutación única en MT.

La conexión/desconexión de cada uno de los grupos a la red debe poder realizarse de forma independiente y en función de la carga conectada. El control debe incorporar un equipo que garantice el sincronismo e impida el acoplamiento si el sincronismo no se ha realizado; además, de la posibilidad de realizar maniobras de transferencia de carga sin corte.

El SEC estará proporcionado por sistemas de baterías acumuladoras y/o por SAIs en configuración distribuida y/o centralizada.

Por razones de seguridad en situaciones de máxima emergencia deberá preverse la infraestructura que permita la utilización de una o varias fuentes exteriores de socorro móvil tales como grupos electrógenos carrozados.

TIPIFICACIÓN DE CARGAS

Siguiendo los requerimientos del REBT y las recomendaciones de otras guías y normas internacionales [5], se propone una clasificación genérica de las cargas en dos grandes bloques:

1. Cargas Esenciales

Requerirán una garantía adicional de suministro por motivos asistenciales, de seguridad y de operación efectiva del hospital. Esta garantía será proporcionada por los grupos electrógenos para cargas sin necesidades específicas de conmutación e, inicialmente, por las baterías/SAIs en los casos que se requiera una conmutación sin corte o corte breve. Dentro del grupo de cargas esenciales distinguiremos:

a) **Cargas Esenciales Críticas** requieren conmutación sin corte o una alimentación alternativa suplementaria automática disponible como máximo en 0,5 segundos. Dentro de este grupo se incluirán cargas con autonomía no inferior a 2 horas o a 1 hora, equipos autónomos y cargas sin autonomía predefinida.

b) **Cargas Esenciales NO Críticas** por el servicio que prestan, pueden soportar interrupciones de corta o media duración; es decir, al menos, el tiempo necesario para el arranque y conexión de los grupos electrógenos, evitando conmutaciones innecesarias frente a situaciones transitorias en la red.

2. Cargas No Esenciales

Requerirán una garantía adicional de suministro por el servicio que prestan. Ante un fallo en la alimentación de red, quedarán sin servicio, y sólo lo recuperarán tras la subsanación del defecto.

Deberá preverse que algunas de estas cargas, puedan ser transferidas, secuencialmente, a la alimentación alternativa de forma manual o automática retardada en función de la demanda.

DISTRIBUCIÓN INTERIOR EN BT

Con el objeto de prever y minimizar, en lo posible, el efecto que grandes cargas y cargas no lineales puedan tener sobre otras más sensibles y, con la intención de reducir al mínimo el efecto de un corte de suministro con origen en BT, se propone dividir los sistemas de distribución interior en dos categorías desde su origen en los Cuadros Generales de Distribución de los edificios:

1. el Sistema Eléctrico No Esencial

estará compuesto por los equipos y circuitos que proveen energía eléctrica desde la fuente de suministro normal a las cargas tipificadas como No Esenciales.

2. el Sistema Eléctrico Esencial

deberá ser diseñado para asegurar un determinado nivel de continuidad de servicio eléctrico a ciertas cargas juzgadas como esenciales tanto desde el punto de vista de seguridad, como del cuidado de pacientes y de la operación efectiva del hospital. Por motivos de fiabilidad, es aconsejable desagregar el Sistema Eléctrico Esencial en tres ramales independientes desde su origen en los Cuadros Generales de Distribución. Estos ramales son el de seguridad, limitado a los circuitos esenciales que garanticen la seguridad de las personas en situación de emergencia

y que incluyen los establecidos como tales en la ITC-BT-28; el crítico, que debe incluir los circuitos esenciales que garanticen la atención crítica a los pacientes y el de equipos, para alimentar el conjunto de cargas consideradas como esenciales para la operación básica del hospital y para el cuidado general de los pacientes.

El presente trabajo se ha realizado al amparo del convenio de colaboración entre la Gerencia Regional de Salud de la Comunidad Autónoma de Castilla y León y la Fundación General de la Universidad de Valladolid, en materia de ingeniería clínica y hospitalaria.

PARA SABER MÁS

- [1] Ministerio de Ciencia y Tecnología. "Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión e Instrucciones Técnicas Complementarias". Madrid, 2002
- [2] Servicio de Infraestructura y Patrimonio. "Directriz sobre esquemas de suministro y distribución de energía eléctrica a centros hospitalarios". Gerencia Regional de Salud, Junta de Castilla y León. Noviembre 2010
- [3] Iberdrola. "Propuesta de acciones para la mejora del suministro eléctrico en hospitales". Julio 2009, octubre 2010.
- [4] Duque O., Riesco M.V. y Moriñigo D. "Comparison from a reliability point of view of different options for the electrical supply of a hospital". Capítulo del libro: Safety and Reliability for Managing Risk - vol-2, Páginas: 1021-1028. Editorial: Taylor & Francis. Londres, Reino Unido. 2006.
- [5] NFPA 70. "National Electrical Code", 2008. Office Statewide Health Planning and Development. "Electrical Requirements for health care facilities. Guide for hospitals". Los Angeles, California (USA). 2003 IEEE Std-602. "Recommended Practice for Electric Systems in Health Care Facilities". New York. 1996 MHRA - "Healthcare interpretation of IEE Guidance Note 7 and IEC 60364-7-710". U. K. June 2005 Gallostra Isern, Juan y otros. "El diseño de la continuidad eléctrica en sistemas hospitalarios". Grupo JG. 2005 Schneider Electric. "Guía de soluciones del sector hospitalario". 2007
- [6] Riesco-sanz m, duque-perez o, zorita-lamadrid a et al. "continuidad de suministro eléctrico en centros hospitalarios: esquemas de suministro, tipificación de cargas y distribución interior" *dyna energía y sostenibilidad*. enero 2014. vol. 3-1. doi: <http://dx.doi.org/10.6036/es6944>

El gestor eficaz: Clave para salir de la crisis

Jose Manuel-Muriel

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5873>

1. INTRODUCCIÓN

Las crisis son cíclicas e inevitables, pero no tienen por qué ser mortales. Es difícil que una empresa no tenga que hacer frente en su trayectoria, a una o varias crisis.

Las causas de una crisis son muy diversas, pero podemos agruparlas en cuatro grandes conceptos:

- Problemas de mercado
- Problemas de producto
- Problemas financieros
- Problemas de gestión

La crisis que estamos pasando actualmente, es una mezcla de problemas financieros y de gestión.

Lo primero que tenemos que acometer para hacer frente a una crisis, es reconocer su existencia. En una empresa hay que prestar atención a los primeros síntomas: la pérdida de algunos clientes, un deterioro o estancamiento de los resultados, etc.

Las crisis son como la enfermedad en el ser humano, cuanto antes se detecte, más fácil será solucionarlo. Al igual que en la enfermedad, es importante acudir a un especialista que nos ayude con el diagnóstico, y establezca un tratamiento adecuado. Aquí el problema, es que no existe todavía un título que acredite como “gestor de crisis”, y eso unido al fenómeno de la auto-justificación, hace que se pierda un tiempo precioso desde la aparición de los primeros síntomas.

De una crisis se sale con medidas de ahorro, pero también con un plan comercial para incrementar los ingresos, ambas acciones son necesarias. Todas

las crisis terminan por pasar y las empresas que sobreviven lo hacen mucho más fuertes. El problema está en todas las que caen por el camino.

Ésta es sin duda la más fuerte de los últimos cincuenta años, y si alguien se pregunta ¿por qué está siendo tan dura? La respuesta es bien fácil, porque no estábamos preparados para hacerle frente. Hemos olvidado uno de los puntos más importantes de la gestión de crisis, cuando una crisis termina, hay que prepararse para la siguiente.

En los últimos años en España, tanto en el mundo empresarial como en el público, los gestores han actuado como si el futuro se presentase como “*días de vino y rosas*” y ahora estamos pagando esta falta de diligencia.

Debo reconocer que la actual crisis económica es diferente de las anteriores, ya que como comentaba al principio, una de las causas principales son los problemas financieros, cuando hasta ahora barajaba solo tres categorías: problemas de pérdida de mercado, de falta





de atractivo del producto o de gestión deficiente.

Mi padre compró su primera casa cuando llevaba dos décadas trabajando. En cambio en los últimos años hemos vivido un “boom inmobiliario”, basado en el endeudamiento, lo que hacía que el circulante fluyera con enorme facilidad. Y esto ha provocado que las familias y empresas deban mucho más de lo que pueden pagar. Pero también tengo claro que de esta crisis se saldrá, porque la peor crisis que hay es una guerra, y se han superado muchas a lo largo de la historia.

Aun así, la salida de la crisis se producirá en un periodo de tiempo muy largo y dará lugar a un cambio, ya que el modelo de financiación externa ha quedado muy tocado. Las empresas solo crecerán en la medida en que se lo permitan sus recursos, y el Estado solo prestará los servicios que pueda pagar.

Ahora que nos encontramos en medio de la crisis, sólo queda tomar medidas para minimizar sus efectos, y si es posible, conseguir ayuda de personas con experiencia en este tipo de situaciones.

De las crisis se sale con medidas de reducción de gasto e incremento de ingresos, con una gestión eficaz y con tranquilidad (que no debemos confundir con pasividad).

Debemos observar que la crisis no ha afectado por igual a todas las empresas españolas y, en ese sentido, hay tres factores claves que han permitido a algunas compañías resistir: poco en-

deudamiento, buenos niveles de exportación y la introducción de algún tipo de innovación continua en sus productos.

Para mí, uno de los modelos a seguir es *Inditex*: una firma relativamente poco endeudada, que tiene la mayor parte de su negocio fuera de España y que renueva constantemente su mercancía.

Otra de las causas más frecuentes de las crisis es, sin lugar a dudas, un problema de gestión. Se ha producido una dilución de los valores que deben presidir toda gestión para que sea eficaz, y ahora estamos pagando las consecuencias.

Cada empresa es distinta y por tanto no valen las recetas estándar. Desafortunadamente tampoco existen las recetas milagrosas. Hace falta un equipo potente, bien asesorado y con un plan de acción claro y conocido, que dé respuesta a las dos necesidades básicas: reducción del gasto pero unido a un plan comercial que permita un incremento en los ingresos.

En nuestra administración, además de la crisis general, le está afectando un gasto adicional, y es el del poco traspase de gestores del sector privado al público.

Posiblemente sean dos las razones principales: una retribución desfasada en la administración en relación a la empresa privada, y la mala imagen que los políticos han creado de ellos mismos ante la opinión pública.

En un momento en que sería necesario disponer de los mejores gestores para sacar las diferentes administracio-

nes de esta crisis, no se produce incorporación alguna de los mejores gestores que siguen en el sector privado. Si comparamos con lo que ocurre en un país líder como es EEUU en este tema, vemos que algo debemos cambiar en España.

Las crisis nunca son deseables, pero al menos saquemos algo positivo de esta experiencia y ello es que al día siguiente de terminar, debemos empezar a prepararnos para afrontar la siguiente, que sin duda alguna vendrá.

Y no olvidemos que un gestor tiene que serlo por vocación, no por necesidad, para poder soportar los sacrificios que una gestión eficaz demanda.

Se debe estar pendiente de los síntomas, la falta de crecimiento, un endeudamiento alto, falta de tensión en la contención del gasto, son síntomas que nos deben hacer tomar medidas.

Cuando tienes un problema de salud, acudes a un especialista, ¿por qué no lo haces cuando es tu empresa la que enferma?

Pero tranquilos, porque todo esto pasará, y por desgracia cuando se presente la siguiente, volverá a coger a mucha gente despreocupada y desprotegida. Porque las crisis pasan el problema, es como el de un tornado, las consecuencias que dejan en su camino hasta su desaparición.

PARA SABER MÁS:

- Manuel-Muriel JM. “Secretos de la gestión de una crisis”. Editorial ESIC. ISBN: 9788473568616.



- Manuel-Muriel JM. “Habilidades Directivas”. Editorial ESIC. ISBN: 9788473568944.



Modelo multidimensional para medir el desarrollo y éxito de la gestión de las relaciones con clientes en las empresas industriales

Juan Manuel Ramón-Jerónimo y
Raquel Flórez-López
Universidad Pablo de Olavide

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/6933>

La Gestión de las Relaciones con Clientes (*Customer Relationship Management* o CRM) constituye una filosofía empresarial que se ha desarrollado intensamente en los últimos años, basada en la combinación de estrategia y tecnología para establecer, desarrollar y mejorar las relaciones con los clientes, con el objetivo de maximizar el valor generado, la confianza y la cooperación de los mismos. Si bien el CRM permite hacer frente a retos como el incremento de la competencia y la heterogeneidad de la demanda, no siempre genera resultados positivos, pudiendo erosionar las relaciones con los clientes y la rentabilidad empresarial. Entre las causas del fracaso del CRM destaca el excesivo énfasis en el desarrollo de soluciones tecnológicas, y la concepción del CRM como una iniciativa puramente de mar-

keting, obviando su integración con la estrategia empresarial en aspectos como la cultura organizativa, los procesos y las personas. Como resultado, no existe aún un marco integral de medición de los beneficios asociados a las distintas dimensiones que integran el CRM, lo que dificulta su implementación y la oportuna toma de decisiones.

En este trabajo se propone un modelo multidimensional para medir el nivel de desarrollo y el éxito de la estrategia CRM, que considera de forma integrada cinco grupos de generadores de beneficios: (i) el compromiso de la alta dirección, vinculado al establecimiento de una estructura organizativa orientada hacia el cliente y la disponibilidad de los recursos necesarios para el desarrollo del CRM; (ii) la gestión de los recursos humanos, mediante su formación y entrenamiento especializados, así como el establecimiento de sistemas de remuneración basados en los objetivos CRM; (iii) la orientación hacia el cliente, basada en el diseño de programas de marketing y ofertas personalizadas, y canales de comunicación bidireccionales que incrementen el va-

lor añadido que se le proporciona; (iv) los factores tecnológicos, relacionados con el desarrollo de tecnologías integradas para almacenar, analizar y distribuir información que facilite la respuesta a las necesidades de los clientes con la máxima calidad y el mínimo coste; y (v) los factores de gestión del conocimiento, relacionados con la generación y diseminación de información a lo largo de la organización, que facilite un aprendizaje permanente sobre el cliente y el diseño de políticas de marketing-mix adaptadas a sus necesidades.

Estas cinco dimensiones del CRM han sido validadas para una muestra de 110 empresas industriales españolas, caracterizadas por la existencia de mercados '*business-to-business*' (B2B) donde el establecimiento de relaciones cercanas y a largo plazo con los clientes constituye una fuente básica de ventajas competitivas. A partir de la revisión de la literatura y de una fase inicial de entrevistas, se diseñó un cuestionario *on-line* dirigido a directores comerciales, a los que se preguntaban aspectos relacionados con las dimensiones claves de éxito del CRM, los resultados financieros de la empresa (beneficios, rentabilidad) y los resultados de marketing o de valoración del producto (calidad, precio, servicio).

El estudio empírico se estructuró en tres fases. En primer lugar, se analizó el grado de desarrollo del CRM aplicando un análisis factorial exploratorio que proporciona un valor agregado para cada dimensión. Los resultados obtenidos para el conjunto de la industria pusieron de manifiesto que, a pesar de la elevada inversión de recursos en la implementación del CRM (tecnología, adaptación de procesos para la personalización de la oferta), existen dificultades en su gestión organizativa, particularmente respecto a la definición y control de los objetivos CRM y la formación y remuneración de los empleados.

En segundo lugar, la realización de un análisis cluster permitió identificar cuatro grupos de empresas con distinto niveles de desarrollo del CRM, no observándose una asociación directa res-



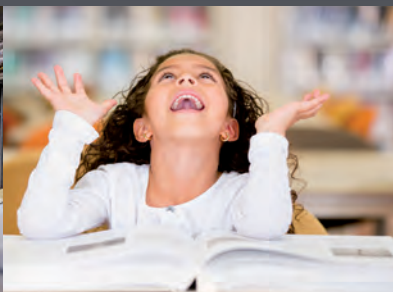
Fresco es mejor que Frío



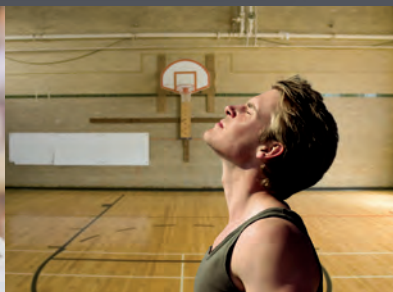
Descubre la bioclimatización, tan fresca como la brisa del mar y casi tan económica
Eficacia y ahorro energético en todo tipo de proyectos



Industrias



Colegios



Pabellones deportivos



Residencias

- Avanzada tecnología europea en climatización evaporativa.
- **Máximo ahorro energético** y de instalación.
- **Aplicación industrial y residencial**, especialmente indicado en colegios, centros comerciales, instalaciones deportivas, almacenes y naves.
- **Saludable.** Mantiene un grado de humedad ideal que podemos controlar.

- El aire generado es de óptima calidad, **se renueva constantemente** del exterior purificando el ambiente.
- **Sostenible y ecológico:** No utiliza gases refrigerantes, no daña la capa de ozono y su consumo energético es mínimo.
- **Refresca** sin necesidad de cerrar puertas ni ventanas.



pecto al mismo y el tamaño de la organización. El primer grupo, integrado por el 34,5% de las empresas, presenta una estrategia CRM avanzada, que ha permitido obtener valores máximos en los resultados de marketing y financieros. Estas empresas constituyen el referente del resto, al haber integrado la estrategia CRM a lo largo de la organización, optimizando el uso de las inversiones realizadas. El segundo y tercer grupo (33,7% y 20% de la muestra, respectivamente) presentan un nivel de desarrollo del CRM poco equilibrado entre dimensiones, lo que incide en la menor generación de resultados, observándose ineficiencias en la formación de precios (segundo grupo), pero ciertas ventajas competitivas en el nivel de servicio (tercer grupo). El cuarto grupo (11,8%) presenta un nivel mínimo de desarrollo del CRM, lo que incide en su estrategia competitiva, basada exclusivamente en precios bajos, con niveles mínimos de calidad y servicio, y resultados financieros muy reducidos; la escasa implicación de la dirección resulta particularmente relevante, sugiriendo que el CRM no se percibe como una fuente estratégica de ventajas competitivas.

En tercer lugar, se analizaron de forma comparada los resultados financieros y de valoración del producto de los grupos detectados, relacionándose con

el nivel de desarrollo de las dimensiones CRM previas. Mediante la realización de test no paramétricos de igualdad de medias, se pusieron de manifiesto las relaciones existentes entre las dimensiones CRM y los resultados de la empresa. Así, el incremento de calidad requiere, como base inicial, el desarrollo de dimensiones no organizativas (orientación hacia el cliente, tecnología y gestión del conocimiento), si bien una vez consolidadas son los factores organizativos lo que ejercen un efecto multiplicador sobre la calidad ofertada. El nivel de servicio se ve potenciado por todas las dimensiones del CRM pero, particularmente, por la combinación de una elevada orientación al cliente y de una óptima gestión del conocimiento. Por su parte, las inversiones en CRM inciden directamente en un incremento del precio, destacando el efecto de las inversiones en tecnología, formación y remuneración de recursos humanos y alineación organizativa. Entre los resultados más importantes cabe destacar que, si bien el desarrollo de las dimensiones no organizativas del CRM constituye una condición necesaria para su éxito financiero, son los factores organizativos (gestión de recursos humanos y compromiso de la alta dirección) los que permiten explotar, en términos de beneficios y rentabilidad, los recursos

invertidos en CRM. Adicionalmente a estos resultados, la escala de medida propuesta resulta de utilidad para las empresas como instrumento de diagnóstico y medida del CRM, permitiendo calcular de forma sencilla el valor de cada dimensión y los resultados asociados; de esta forma, puede identificarse la posición relativa de cada empresa respecto a sus principales competidores (benchmarking), facilitando la adopción de políticas de mejora futuras.

Esta investigación ha sido desarrollada al amparo de la ayuda de investigación concedida por la Asociación Española de Contabilidad y Administración de Empresas (AECA), y los proyectos de investigación SEJ-1933, SEJ-5061 y SEJ-111 de la Junta de Andalucía.

REFERENCIA

- RAMON-JERONIMO J, FLOREZ-LOPEZ R. "LA GESTIÓN DE LAS RELACIONES CON CLIENTES (CRM) EN EMPRESAS INDUSTRIALES. NIVEL DE DESARROLLO Y GENERACIÓN DE BENEFICIOS" *DYNA Management*. ENERO 2013. Vol. 1-1. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/MN5839>



Definición de la identidad del diseño industrial español

Rodrigo Martínez-Rodríguez, Alberto
López-Rosado y Sergio Cataño-Rado de la
Universidad Antonio de Nebrija

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7052>

Dyna Management ha publicado recientemente un estudio sobre la identidad del diseño industrial español. El objetivo de este trabajo es tratar de descifrar y aportar nuevos conocimientos sobre la identidad del diseño español, a través del estudio del sector del hábitat. Para ello, el artículo presenta un exhaustivo estudio bibliográfico que permite obtener una caracterización previa, y recoger de este modo las pautas que rigen el diseño en España. Además de la realización de un estado del arte, este trabajo aclara como es el diseño español en la actualidad, por lo que en la segunda parte del documento se caracteriza el diseño español a través del análisis del sector del hábitat, concretamente analizando empresas, diseñadores y productos.

La motivación del artículo se basa en que la definición de la identidad del diseño español puede ser un importante activo en el sector, como agente o mo-

tivo de consumo en la industria del diseño. Por otro lado, la obtención de un discurso y una identidad propia será de interés para investigadores y docentes, así como para empresas y diseñadores.

Con la revisión bibliográfica o estado del arte se ha puesto de manifiesto la dificultad de encontrar una línea argumental común que permita definir el diseño industrial español de forma clara y concisa, a diferencia de lo que ocurre en otros países. Por otro lado, se menciona la importancia que ha tenido en esos países la obtención de un discurso propio para el diseño industrial, esto es, la importancia de obtener unos rasgos que lo definan: una identidad.

La revisión bibliográfica incide en el desarrollo histórico de la disciplina, así como en la sucesión de etapas que han marcado la historia de España como claves para la ausencia de un discurso propio y como explicación al desconocimiento o la visión de esta actividad como superficial y carente de sentido. Por lo tanto, la desconexión histórica y social con respecto a otros países es clave para entender las características y peculiaridades del diseño español.

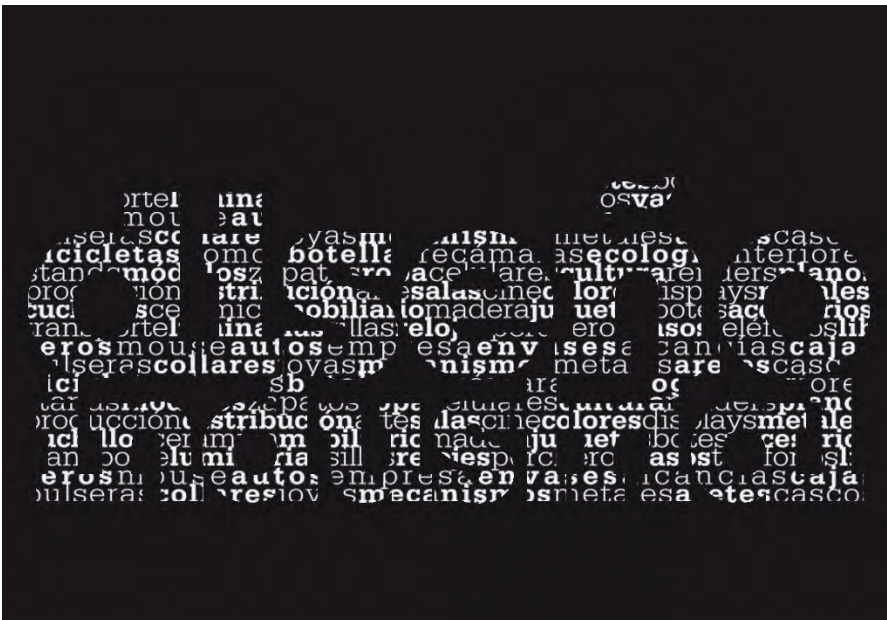
Este trabajo propone un análisis cuantitativo, en el que se han seleccio-

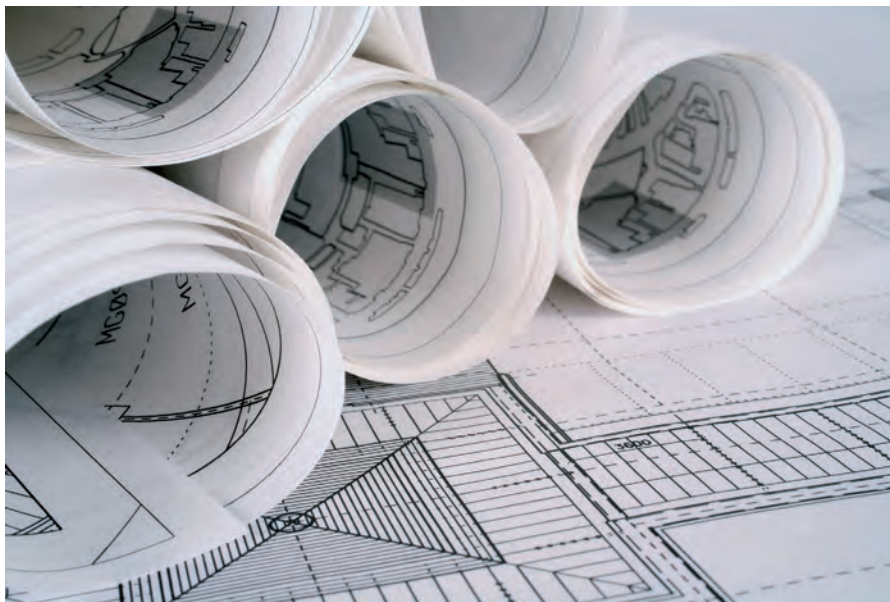
nado un conjunto de 44 empresas relacionadas con la industria del diseño, 32 estudios y diseñadores relevantes y una muestra de 106 productos seleccionados por su pertenencia al sector del hábitat.

Los resultados sobre el ámbito de actuación de los diferentes agentes implicados en la actividad del diseño industrial muestran la multidisciplinaridad de los agentes analizados; tanto las empresas como los diseñadores diversifican su actividad, destacando los ámbitos de mobiliario, iluminación y producto, coincidiendo con las opiniones de los principales autores, siendo el hábitat el sector que caracteriza el diseño español. Del mismo modo, los datos coinciden con los extraídos del informe sobre el diseño español realizado por FEEPD (*Federación Española de Entidades de Promoción de Diseño*).

Por otro lado, se observa como existe una notable diferencia entre las empresas y diseñadores dedicados al ámbito del diseño de producto. Si bien es uno de los ámbitos con mayor dedicación por parte de los diseñadores, con un 90%, apenas un 12% de las empresas analizadas se dedican a ello. El estudio destaca que la miscelánea de esta categoría puede englobar productos para el hábitat y para el hogar, aunque desde otro punto de vista, esto puede indicar que son por lo tanto empresas extranjeras las encargadas de producir gran parte de los productos realizados por los diseñadores y estudios españoles, por lo que pueden presentar características propias de otros países, o ser considerados productos globales. Este aspecto, relacionado directamente con la globalización, puede ser una de las razones por las que el diseño industrial español carezca de identidad así como de una serie de características singulares, ya que el objetivo es un mercado global e internacional.

En cuanto a las características y visión del diseño por parte de las empresas y autores el trabajo resalta la preeminencia de aspectos como la funcionalidad, la creatividad y la sencillez; a priori aspectos comunes para lo categorizado como buen diseño. Por lo tanto, los agentes partícipes en el sector del diseño español se alejan de las ideas banales pretendidas durante los años 80, y más que visibilidad, apuestan por la fiabilidad, la diferenciación y la innova-





ción en sus creaciones, de algún modo recuperando el sentido común.

Tanto empresas como estudios y diseñadores coinciden en la importancia, en un segundo plano, de la búsqueda de la emoción (29%) y la transmisión de valores culturales (22%). Por otro lado, tan solo el 13% de las empresas analizadas destaca sus capacidades tecnológicas, dando mayor peso a aspectos como la innovación (38%) y la calidad (34%). Por último, a diferencia de los estudios y los diseñadores, algunas empresas apuestan por la sostenibilidad y el respeto al medio ambiente (13%), aunque este no es uno de sus rasgos fundamentales.

El análisis de productos muestra en primer lugar la preferencia material de los diseños españoles y, por lo tanto, incide de nuevo en las capacidades tecnológicas de las empresas. La distribución global de los principales materiales empleados en el diseño español destaca la utilización de plásticos (19%) así como la realización de productos multi-material (20%) (productos que destacan por la utilización de varios materiales). Sin embargo, la selección de productos fabricados en el territorio español muestra que la madera es el material más utilizado (20%), siendo destacable la predilección por la cerámica (11%). En cuanto a los productos diseñados en España y producidos en el extranjero tan solo un 4% son en madera, frente a un 33% realizados en plástico.

El estudio incide en el hecho de que los productos realizados en plástico se asocien a la fabricación extranjera, re-

marca que el diseño español recurre a este tipo de producción para aquellos productos cuya fabricación, a priori, tiene una fuerte componente tecnológica. Por otro lado, coincidiendo con las opiniones recogidas en el análisis bibliográfico, esto explica la sencillez de las propuestas españolas.

A la hora de valorar las características principales de las piezas analizadas, en el trabajo surgen paralelismos con el análisis de empresas y autores sobre su visión del diseño. Así, los aspectos más importantes son de nuevo la funcionalidad (55%) y la innovación (41%), siendo importante en un segundo plano la sencillez (44%) y la transmisión de emociones (35%) a través del diseño. Por lo tanto, obviando la funcionalidad y la innovación (características no son exclusivas del diseño español), son la sencillez y la emoción los aspectos más diferenciales.

En un segundo orden, de forma destacable, el estudio menciona la versatilidad (29%) y la apuesta por las líneas suaves (29%), así como el carácter decorativo (20%) de las propuestas. La cercanía de los porcentajes obtenidos del resto de características extraídas del análisis de productos remarcan el eclecticismo del diseño español.

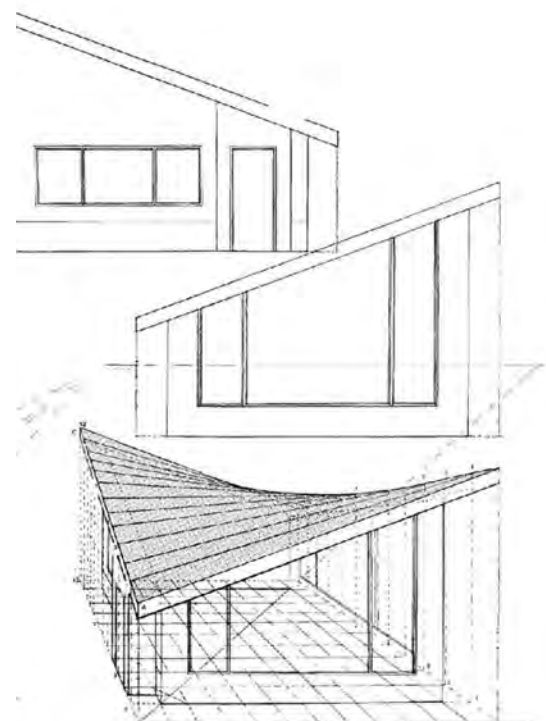
Es interesante la reflexión del estudio, destacando como algunos de los aspectos a priori reseñables del diseño industrial español no han sido encontrados en este análisis de productos, o no han obtenido gran relevancia en los resultados finales. De este modo, aspectos como la importancia de la artesanía

(10%) o la inspiración en la naturaleza (12%) no son características clave en la concepción del diseño industrial español.

Como conclusión, el trabajo realizado en la Universidad Nebrija incide en que la obtención de un discurso propio, de una identidad hasta ahora no planteada puede ser una estrategia clave a la hora de establecer diferentes políticas de actuación por parte de los integrantes del sector. Continuar con esta línea de acción puede suponer la obtención de una identidad propia, inexistente desde hace décadas, en las que se han copiado estilos o corrientes estéticas implantadas en otros ámbitos, generados por otras circunstancias, en ocasiones adoptando identidades que no se corresponden con los valores del diseño nacional. A pesar de la globalización, es necesario entender la influencia de lo local en la concepción del diseño y aplicarla como ventaja competitiva.

REFERENCIA

MARTÍNEZ-RODRÍGUEZ R, LOPEZ-ROSADO A, CATÁÑO-RADO S et al. "CARACTERIZACIÓN DEL DISEÑO INDUSTRIAL ESPAÑOL CON BASE EN EL ESTUDIO CUANTITATIVO DEL SECTOR DEL HABITAT" DYNA Management. ENERO 2013. Vol. 1-1 p.[No Consta]. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/MN6979>



Muchas marcas, un único software ¿Qué es PLC-PROG?

Begoña Benito-Barajas y Itziar Vidorreta-
Herrán de GAIA

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5851>

1. INTRODUCCIÓN

El lenguaje de contactos (*Ladder Logic*) sigue siendo hoy en día el lenguaje de programación elegido por la mayoría de los programadores de autómatas programables (PLCs). Sin embargo, es un lenguaje con más de tres décadas, y se sigue utilizando de manera “tradicional”, sin tener en cuenta las nuevas capacidades “orientadas a objetos” que establece la norma IEC-61131-3.

Un problema creciente en el desarrollo del software de control para PLCs es que los paradigmas comunes (*Ladder*, *Grafset*, etc) actualmente han alcanzado sus límites, ya que la industria moderna requiere programas de PLC cada vez más ágiles y complejos. En la actualidad, los PLCs no sólo deben controlar la instalación (que puede incluir varios procesos que se ejecutan en paralelo), sino que además deben de mantener un diálogo interactivo con los paneles de control, y un intercambio

de datos continuo con otros equipos de control y tratamiento de la información, incluso a través de Internet. Por otra parte, programas complejos desarrollados en el lenguaje de contactos tienden a ser muy extensos, dadas las limitaciones del propio lenguaje (en ocasiones miles de páginas), lo que dificulta de modo extraordinario su mantenimiento.

El lenguaje de programación basado en diagramas de contactos no fue desarrollado para hacer frente a los requisitos complejos de la industria actual, lo que está provocando importantes problemas a la hora de desarrollar un programa de control de autómatas: programas poco estructurados, con bajos niveles de reutilización, y un muy escaso soporte para el tratamiento de datos, el control de flujo, el desarrollo de programas secuenciales, o incluso para el desarrollo de operaciones aritméticas complejas. Además, este lenguaje no cuenta con un soporte nativo para el desarrollo y control de visualizaciones externas y comunicaciones, desconocidas en el momento de su concepción.

Estos aspectos traen consigo tres inconvenientes, principalmente:

- 1) Elevados costes de programación, tanto en términos de tiempo

como, sobre todo, de su mantenimiento.

- 2) Dificultad de garantizar la fiabilidad exigible en un control de procesos industriales, debido a las dificultades en la verificación de los programas basados en la lógica de contactos.
- 3) Práctica imposibilidad de la portabilidad de un programa entre distintas marcas de autómatas (a veces incluso entre modelos diferentes de la misma marca).

Para resolver todas estas limitaciones, un consorcio europeo está desarrollando una herramienta de programación nueva e innovadora bajo una marca independiente denominada PLC-PROG. Esta herramienta define un nuevo paradigma para la programación de PLCs basado en una interfaz amigable, donde el usuario sólo tiene que arrastrar y soltar objetos gráficos para construir programas complejos de control de PLCs, siguiendo un proceso análogo al empleado para definir la configuración hardware del mismo PLC.

Puesto que el proyecto resuelve una necesidad de la industria en general, ha sido concebido como un “proyecto colectivo”, donde serán las propias asociaciones industriales quienes ofrecerán el servicio como fruto de la evolución del proyecto, así como la formación en PLC-PROG. Entre estas asociaciones, destaca el papel que en el proyecto está jugando el Clúster de Electrónica, Informática y Telecomunicaciones de Euskadi (GAIA-Cluster TEIC).

Las principales innovaciones que incorpora el software PLC-PROG son:

- Un entorno de programación unificado válido para diferentes marcas de PLC: PLC-PROG se integra plenamente con todos los autómatas programables que cumplan la norma Europea IEC-61131, independientemente de su marca. Un programa de control se desarrolla una sola vez, y un post-procesado





genera el código final adaptado a cada marca de PLC que se desee de forma automatizada, sin esfuerzo adicional.

- Fiabilidad y seguridad: es fundamental que los programas de autómatas programables sean fiables y fácilmente entendibles tanto por usuarios no expertos como por programadores. Como se basa en la tecnología orientada a objetos, una vez que un módulo se desarrolla y se prueba se puede reutilizar, de tal forma que se reducen los errores de programación y aumenta la fiabilidad del sistema.
- PLC-PROG mejora diversos niveles de eficiencia en el desarrollo y mantenimiento: se disminuye un 45% en el tiempo de mantenimiento (incluyendo las interacciones SCADA, PLC); se prevé asimismo una disminución del 40% en el tiempo de desarrollo, y un incremento del 40% en la reutilización de código (en comparación con los sistemas actuales de programación de PLCs).

- El sistema es capaz de generar automáticamente una vista gráfica del programa que se ejecuta en el PLC, independientemente de su marca, en la cual se pueden visualizar la estructura del programa, los valores de las variables de proceso, y se pueden ajustar los valores de consigna del mismo.

En relación a los principales objetivos del proyecto, desde el punto de vista técnico, y con base en el estudio del software actual de las diferentes marcas, el sistema PLC-PROG presenta las siguientes características diferenciales:

- Plataforma de programación de autómatas basado en una nueva filosofía, ya empleada en la configuración asistida del propio hardware del PLC, que aprovecha todas las ventajas de la programación orientada a objetos. El usuario final, de una forma intuitiva, podrá realizar los programas de control mediante un proceso de ensamblaje y configuración de módulos de software, al igual que se hace actualmente

con el ensamblaje y configuración de módulos de hardware.

- Independencia de marcas: el programa se realiza una única vez, y se puede utilizar con todas las marcas compatibles (Actualmente: Siemens, ABB, Schneider. En un futuro muy cercano: Phoenix, Festo y B&R).
- Optimización del uso de la memoria de datos del PLC, liberando al programador de la tarea de su asignación y gestión.
- Visualización, Monitorización y Parametrización del programa mediante un depurador gráfico integrado en la aplicación.
- Fácil conexión con SCADAS comerciales, mediante la creación automática de objetos insertable en dichos SCADAS.

Para más información: vidorreta@gaia.es

Centrales nucleares: Una visión histórica

2ª parte

Antonio González-Jiménez
Director Técnico del Foro Nuclear

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

6. EL REACTOR NUCLEAR DE AGUA EN EBULLICIÓN BWR

El sistema nuclear de un reactor de agua en ebullición de ciclo directo es un sistema de generación de vapor que consiste en un núcleo y una estructura interna, encerrados dentro de una vasija de presión, unos sistemas auxiliares de operación y de seguridad del reactor nuclear y la instrumentación y control necesarios.

Los reactores de agua en ebullición tienen como fundamento el obtener vapor en la propia vasija del reactor así como aprovechar las mejores condiciones de transmisión de calor que pueden lograrse cuando hay ebullición en el líquido que actúa como moderador y refrigerante.

El agua que circula a través del núcleo del reactor, mantenida a una presión de unas 70 atmósferas, entra a una temperatura de aproximadamente 215°C y se transforma en vapor saturado “separado” del circuito de recirculación, secado en la parte superior de la vasija y mandado directamente a la

turbina, saliendo a una temperatura de aproximadamente 280°C.

6.1. LA VASIJA DEL REACTOR

La vasija del reactor tiene forma cilíndrica rematada por dos casquetes semiesféricos, de los cuales el superior es desmontable, estando unido a la parte inferior de la vasija mediante una brida con pernos. El material del que se construye es acero al carbono, estando recubierto su interior por una capa de acero inoxidable. Se apoya sobre un pedestal de hormigón y acero que se construye solidario a la cimentación del edificio.

Las barras de control y la totalidad de la instrumentación interior del núcleo penetran por la parte inferior de la vasija, debido a la existencia en su parte superior de los separadores y secadores de vapor. La tobera de salida del vapor se encuentra en la parte superior de la zona cilíndrica, mientras que en la parte inferior están alojadas las toberas de entrada y salida del agua de recirculación.

Entre los componentes internos de la vasija del reactor hay que destacar los elementos combustibles que forman el núcleo y en los cuales se genera la energía, las barras de control que nos permiten controlar y parar el reactor, el barrilete o envuelta que rodea al núcleo separando la zona en donde se produce la ebullición de la zona que aloja

las bombas de chorro, los separadores de vapor situados sobre el núcleo y los secadores de vapor colocados a su vez sobre los anteriores y que permiten obtener vapor saturado sin agua de arrastre.

En la vasija de un reactor BWR existe una recirculación de agua líquida (no evaporada) hacia la parte anular de la misma, alrededor del reactor, donde se mezcla con la proveniente del condensado. Esta mezcla es succionada por una corriente formada con el agua de la parte inferior de dicho espacio anular, entrando todo ello en el colector inferior, desde el cual penetra ascendiendo en el núcleo del reactor, lamiendo verticalmente las vainas de combustible y entrando en ebullición. La ebullición no es total: aproximadamente el 13% se convierte en vapor, recirculándose como agua líquida el 87% restante, hacia el espacio anular exterior. Lógicamente, el 13% evaporado, tras su expansión en la turbina, se condensa y se restituye de nuevo a la vasija en las condiciones antes citadas.

6.2. LOS ELEMENTOS DE COMBUSTIBLE

El combustible es dióxido de uranio (UO_2) enriquecido entre un 3% y un 4,5% conformado en pastillas cilíndricas sinterizadas que se introducen en varillas de aleaciones especiales, como

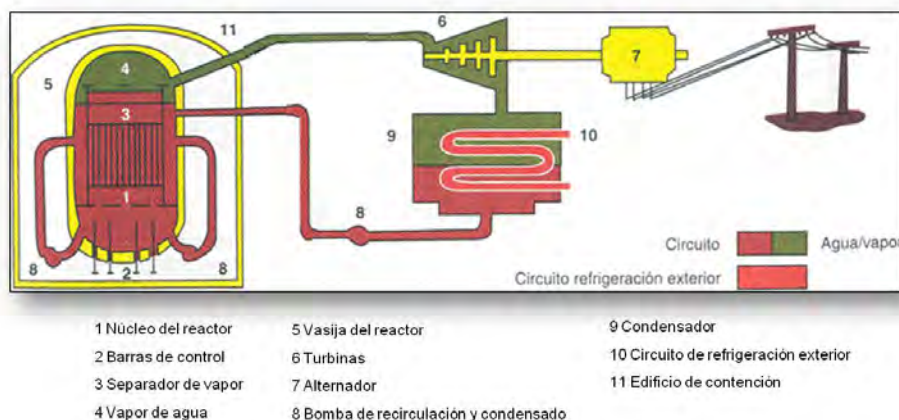


Fig. 6: Esquema general de un reactor BWR

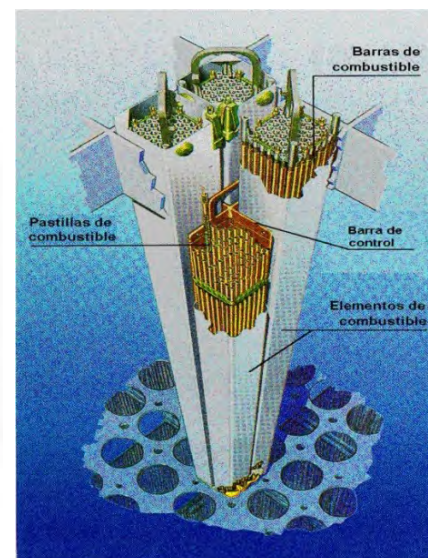


Fig. 7: Elemento de combustible de un reactor BWR

por ejemplo el *zircaloy*. Estas varillas, una vez producido el vacío en su interior se rellenan de helio y se sueldan herméticamente. Se agrupan en disposiciones rectangulares de 8x8 o 10x10 varillas, en función del diseño, con un canal paralelepípedo fabricado de la misma aleación, que las envuelve. El conjunto de elementos combustibles forman el núcleo del reactor y su número depende de la potencia instalada del reactor. Típicamente, para una central de 1000 MWe de potencia instalada es de unos 600.

6.3. LAS BARRAS DE CONTROL

Tienen sección cruciforme, con un material absorbente de carburo de boro compactado en el interior de tubos de acero inoxidable (18 en cada brazo de la cruz). Estas barras de control se introducen en el núcleo por la parte inferior del reactor, lo que impide que puedan introducirse simplemente por gravedad, con lo cual se tiene que diseñar un sistema electrohidráulico, maniobrado desde del exterior, que asegure la inserción instantánea de las barras en el núcleo con una gran fiabilidad cuando ello sea necesario.

6.4. SEPARADORES Y SECADORES DE VAPOR

Los separadores de vapor tienen una estructura en forma de cúpula a la cual van soldadas una serie de tubos en cuya parte superior se encuentran los separadores de vapor que actúan en tres etapas. Consisten en láminas helicoidales que obligan al vapor a realizar una trayectoria helicoidal, depositándose las gotas de agua sobre la pared del separador a la que llegan por la fuerza centrífuga que se les comunica.

El vapor que abandona los separadores entra en el conjunto de secadores de vapor, el cual se dirige a la tobera de salida para ser utilizado en la turbina. El agua depositada en los secadores desliza por las paredes de los mismos descargando después de pasar por una serie de tuberías en la zona anular desde donde se recircula.

6.5. SISTEMA DE RECIRCULACIÓN

La misión de este sistema es la de aumentar el caudal de recirculación en el núcleo del reactor. Consiste en dos lazos situados en el exterior de la vasija del reactor, pero en el interior de la con-

tención, formado cada uno de ellos por una bomba de recirculación, una válvula de cierre, una válvula de regulación, una válvula de aspiración, una válvula de descarga y un paso en derivación.

Formando parte de este sistema, en el interior de la vasija se encuentran las bombas de chorro situadas en la región anular entre la envuelta y la vasija. Cada dos bombas están servidas por una única tubería de alimentación que atraviesa la vasija, para conectar a una tubería de distribución unida a la descarga de la bomba.

El agua que fluye a través del núcleo del reactor se transforma en vapor en aproximadamente un 50% y vuelve a la vasija a través de la tobera de agua de alimentación después de haberse condensado en el condensador. Aproximadamente una tercera parte se extrae de la vasija (plenum inferior) y se recircula de nuevo a través de las bombas de chorro al núcleo del reactor, de donde pasa a través de los separadores de vapor y secadores al plenum superior. El resto del agua es absorbida por las bombas de chorro del anillo e inyectado a la cámara de aspiración volviendo al plenum inferior por el mismo camino señalado anteriormente.

El sistema de recirculación puede controlar la potencia generada en el núcleo entre amplios márgenes, para ello basta modificar el flujo de refrigerante a través del reactor, lo cual se consigue modificando la apertura de la válvula de control. Encontrándose el reactor en estado estacionario, aumentando en un instante determinado el caudal del sistema de recirculación abriendo la válvula de regulación, el caudal que circula a través del núcleo aumentará también disminuyendo la cantidad de burbujas en el mismo, lo cual equivale a un incremento positivo de reactividad que hará aumentar la temperatura del núcleo hasta que el correspondiente aumento de burbujas suponga una reactividad negativa que compense la anterior, estabilizándose la potencia a un nivel más alto. Un razonamiento análogo se puede utilizar para demostrar que una disminución en el caudal de recirculación originaría una disminución en la potencia generada en el núcleo.

Este procedimiento es muy favorable para el seguimiento de la carga, ya que con ello se permiten pequeños cambios de potencia mediante el control de

flujo de recirculación, sin alterar la posición de las barras de control. El efecto de las burbujas tiene además la ventaja de que tiende a igualar la densidad de potencia en todo el volumen del núcleo, ya que si en algún punto por cualquier circunstancia aumenta la temperatura, aumenta también el coeficiente de burbujas y por tanto, disminuirá en ese punto el número de fisiones, tendiendo a disminuir la temperatura. Esto favorece la homogeneidad en el quemado del combustible en todo el reactor y dificulta el que se produzcan daños en el núcleo por aumentos locales de temperatura.

Formando parte del sistema primario se encuentran las tuberías de vapor principal hasta las válvulas de aislamiento exteriores. Dichas tuberías arrancan desde la parte superior de la vasija y se dirigen separadamente a la alimentación de la turbina. Después de abandonar la vasija, las tuberías salen de la contención. En el interior de la contención se encuentran las válvulas de alivio, las de seguridad y las de aislamiento interior. En el exterior de la contención se encuentran las válvulas de aislamiento exterior. Las de alivio y seguridad tienen por misión proteger automáticamente de sobrepresiones en el sistema primario del reactor y la descarga de vapor se realiza bajo agua en la piscina de supresión, donde se condensa el vapor.

6.6. LA CONTENCIÓN

En el desarrollo histórico de los reactores de agua en ebullición, se han diseñado tres tipos principales de contenciones: los diseños *Mark I*, *Mark II* y *Mark III*. A diferencia del *Mark III*, que consiste de una contención primaria y un pozo seco, los diseños *Mark I* y *Mark II* consisten en un pozo seco y en un pozo húmedo o piscina de supresión. Los tres diseños se basan en el principio de la supresión de presión para la mitigación de los accidentes con pérdida de refrigerante. La contención primaria se diseña para condensar el vapor y para confinar los productos de fisión que pudieran liberarse en un accidente por pérdida de refrigerante, de tal manera que no se exceda la dosis de radiación en el exterior del emplazamiento limitada en la normativa, y para disponer de un sumidero de calor y de una fuente de alimentación de agua para ciertos equi-

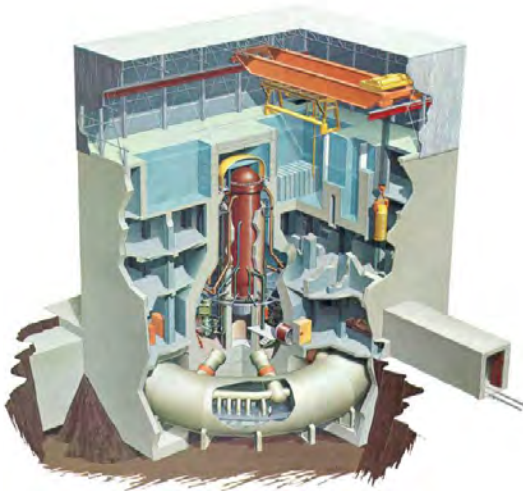


Fig. 8: Contención tipo Mark I de un reactor BWR

pos relacionados con la seguridad.

El *diseño Mark I* está formado por varios componentes principales, incluyendo el pozo seco, que circunda la vasija del reactor y los lazos de recirculación; la cámara de supresión, donde se almacena un gran volumen de agua (piscina de supresión); la interconexión para el venteo entre el pozo seco y la cámara de supresión; y la contención secundaria, que circunda la contención primaria y alberga la piscina de combustible usado y los sistemas de refrigeración de emergencia del núcleo.

El *diseño Mark II* está formado por una cúpula de acero y un muro de hormigón post-tensado o un muro de hormigón armado apoyado sobre una losa soporte de hormigón armado. La superficie interna de la contención está forrada con un revestimiento de acero que funciona como membrana hermética. El muro de la contención también sirve como soporte de las planchas del suelo del edificio del reactor (la contención secundaria) y de las piscinas de recarga. El pozo seco, que tiene forma de tronco de cono, se sitúa encima de la piscina de supresión. La cámara de supresión tiene forma de cilindro y está separada del pozo seco mediante una losa de hormigón armado. El pozo seco está cerrado en la parte superior mediante una cúpula de acero elíptica denominada tapa del pozo seco. La atmósfera inertizada del pozo seco se ventea a la cámara de supresión mediante varias tuberías bajantes que penetran y están apoyadas en el suelo del pozo seco.

El *diseño Mark III* está formado por varios componentes principales,

incluyendo el pozo seco, una estructura cilíndrica de hormigón armado con una tapa desmontable. El pozo seco se diseña para soportar y confinar el vapor que se produce en el caso de una rotura de tuberías dentro de la contención y para canalizar el vapor liberado en una piscina de supresión mediante un aliviadero y los venteos horizontales. La piscina de supresión alberga un gran volumen de agua para la condensación del vapor que se vierte en ella. Una vasija hermética cilíndrica de acero circunda el pozo seco y la piscina de supresión para evitar la liberación al exterior de los productos y los gases de fisión en el caso de que se produjese una rotura de tuberías en el interior de la contención.

6.7. OTROS SISTEMAS

Además de los sistemas descritos en los apartados anteriores, una central nuclear consta de otros muchos sistemas necesarios para su funcionamiento. En el caso de un reactor BWR pueden destacarse el sistema de refrigeración de emergencia del núcleo, el sistema de evacuación de calor residual, el sistema de refrigeración del núcleo aislado, el sistema de purificación del agua del reactor, el sistema de control líquido de reserva y el sistema de purificación y refrigeración de las piscinas de combustible y de contención.

7. CENTRALES NUCLEARES AVANZADAS

En 1985, a requerimiento de algunas empresas eléctricas estadounidenses se solicitó al *Electric Power Research Institute* (EPRI) un documento que contuviera los requisitos que debían tener las nuevas centrales nucleares, basándose en la experiencia acumulada y que incorporase nuevas tecnologías. Como consecuencia, en 1990 se publicó el primer informe de la industria eléctrica sobre los requisitos de los nuevos reactores de agua ligera avanzados, el *Utility Requirement Document* (URD). De igual manera, aunque con un cierto retraso, las empresas eléctricas euro-

peas decidieron redactar un documento (*European Utility Requirement - EUR*) en el cual se reflejaran las necesidades en Europa. En dicho documento se contemplan las realidades del mercado europeo de electricidad, las realidades y posibilidades tecnológicas, la posibilidad de licenciamiento en toda Europa, y la experiencia acumulada.

7.1. CENTRALES NUCLEARES DE GENERACIÓN III Y III+

Son reactores con una mejora evolutiva de los diseños de la generación II, incluyendo sistemas de seguridad pasivos, cuya acción se debe a fenómenos físicos, tales como la convección natural y la gravedad, que actúan por sí mismos cuando la central se desvía de su modo normal de operación sin que nada los tenga que activar y no necesitan ningún tipo de energía eléctrica externa.

Los reactores de esta generación se pueden subdividir en dos grupos:

- Reactores evolutivos de agua a ebullición, incluyendo el ABWR (*Advanced Boiling Water Reactor*) de Toshiba y GE, además del BWR 90+ de Westinghouse, el reactor pasivo ESBWR de GE y el reactor simplificado SWR-1000 de Areva.
- Reactores avanzados de agua a presión, incluyendo el AP-600, y el AP-1000 de Westinghouse, los evolutivos PWR System 80+ de Westinghouse, el APWR de Mitsubishi y el EPR en Europa por Areva.

Las características principales de estos reactores son las siguientes:

- EPR, *European Pressurized Reactor*. Es un reactor de agua a presión PWR que emplea agua ligera a presión como refrigerante y moderador, y su origen se debe a la experiencia francesa de Areva y alemana de Siemens-KWU (KONVOI). Es un reactor de 1600 MWe, cuyo rendimiento total puede oscilar entre el 36% y 37%, lo que le permite utilizar más eficientemente el combustible y generar menos residuos. Consta de cuatro lazos, cada uno de ellos con su propio sistema de seguridad, capaz cada uno de ellos por sí solo de mitigar un hipotético accidente, lo que se denomina redundancia de sistemas

con funciones de seguridad.

- AP1000, de Westinghouse. Es un reactor de agua a presión PWR de dos lazos y 1117 MWe, con características de seguridad pasiva y extensas simplificaciones para mejorar la construcción, la operación y el mantenimiento. Sus sistemas de seguridad aplican protecciones pasivas, que alcanzan un alto grado de seguridad, que hacen innecesarias las fuentes de energía de emergencia. Estos sistemas requieren muy poca intervención por parte de los operadores, lo que reduce el riesgo de error humano. Por otra parte, la probabilidad de fallos es muy reducida, como resultado de la aplicación del concepto de diversidad, en el que para una misma función de seguridad se aplican varios y diferentes tipo de sistemas fundamentados en diferentes principios físicos. Su construcción supone, por simplificación de su diseño, una importante reducción en el número de tuberías, válvulas, bombas y otros componentes.
- ABWR, *Advanced Boiling Water Reactor*. Es un reactor de agua en ebullición BWR de General Electric. Basado en la construcción modular, este reactor tiene una potencia nominal de 1356 MWe, con un rendimiento superior al 34%. Entre sus ventajas, está una respuesta completamente automática ante accidentes de pérdida de refrigeración (sin necesidad de operadores durante 3 días), un mejor control de potencia y un diseño de la vasija y de sus componentes muchísimo más sencillo.
- ESBWR, *Economic Simplified Boiling Water Reactor*. Es un reactor de agua en ebullición BWR de General Electric. Este reactor incorpora sistemas de seguridad pa-

sivos y está diseñado a partir de los avances tecnológicos del ABWR. Es un reactor de 1560 MWe, con un rendimiento del 34,7%. El ESBWR ha evolucionado respecto a sus antecesores, beneficiándose de las economías de escala y de las mejoras de la circulación natural del núcleo, manteniendo los originarios sistemas pasivos de seguridad y añadiendo los conceptos de seguridad avanzada y competitividad económica. En el caso de accidentes severos, una nueva estructura de tuberías situada debajo de la vasija refrigeraría con agua el reactor en caso de fusión de éste.

7.2. CENTRALES NUCLEARES DE GENERACIÓN IV

Constituyen una serie de diseños genéricos, que se espera puedan estar en operación comercial en los próximos 30-40 años. Suponen un gran avance debido a que pretende desarrollar nuevos diseños sin olvidar las lecciones aprendidas de la experiencia acumulada. Los diseños de Generación IV no parten de reactores existentes, sino del establecimiento de unos nuevos principios:

- Sostenibilidad: los diseños deben promover la disponibilidad de sistemas a largo plazo y el aprovechamiento de combustible para la producción de energía en todo el mundo, minimizando el volumen y el periodo de gestión de los residuos radiactivos.
- Economía: los diseños deben ofrecer más ventajas económicas que otras fuentes de energía durante el ciclo de vida útil y equiparar su nivel de riesgo financiero con el de otros proyectos energéticos.
- Seguridad y fiabilidad: los diseños deben reducir al mínimo la probabilidad de daños en el núcleo del reactor y su magnitud y eliminar la necesidad de adoptar medidas de emergencia fuera del emplazamiento.
- Resistencia a la proliferación y protección física: los diseños deben constituir la vía menos deseable y atractiva para la utilización de los materiales para usos no pacíficos de la energía nuclear.

Incluyen la novedad de que los diseños pueden no estar exclusivamente

orientados a la generación de energía eléctrica en las centrales, sino que algunos pueden ser aplicables a otros campos como la generación de hidrógeno, desalación de agua de mar, grandes sistemas de transporte o generación de calor.

Existen dos iniciativas internacionales para desarrollar estos diseños avanzados que puedan funcionar hacia el año 2030 y que cumplan con los principios establecidos:

- El GIF (*Generation IV International Forum*), en el que participan Estados Unidos y Francia, además de otros países occidentales y de Extremo Oriente, y que coordina la OCDE. Este grupo ha seleccionado para su estudio dos reactores refrigerados por gas a alta temperatura (uno térmico y otro rápido), otros dos reactores rápidos (uno refrigerado por sodio y otro por plomo), un reactor refrigerado por agua supercrítica y uno de sales fundidas.
- El INPRO (*International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles*), promovido por el OIEA, y en el que participan la Unión Europea, Rusia y otros países, incluida España.

Los principales diseños de reactores que se están estudiando en este contexto y que cumplen con los objetivos descritos son los siguientes:

- Reactor rápido refrigerado por gas (GFR), reactor de espectro de neutrones rápidos capaz de utilizar como combustible gran parte de los residuos actuales, refrigerado por helio y con ciclo de combustible cerrado.
- Reactor de muy alta temperatura (VHTR), reactor refrigerado por helio y moderado por grafito con un ciclo de combustible abierto de uranio. Se puede adaptar a la producción de hidrógeno. Actualmente, es el único reactor de Generación IV que tiene dos modelos muy avanzados: el PMBR y el GT-MHR.
- Reactor supercrítico refrigerado por agua (SCWR), reactor refrigerado por agua a alta presión y alta temperatura que funciona por encima del punto crítico termodinámico del agua.



Fig. 9: Esquema general de un reactor EPR

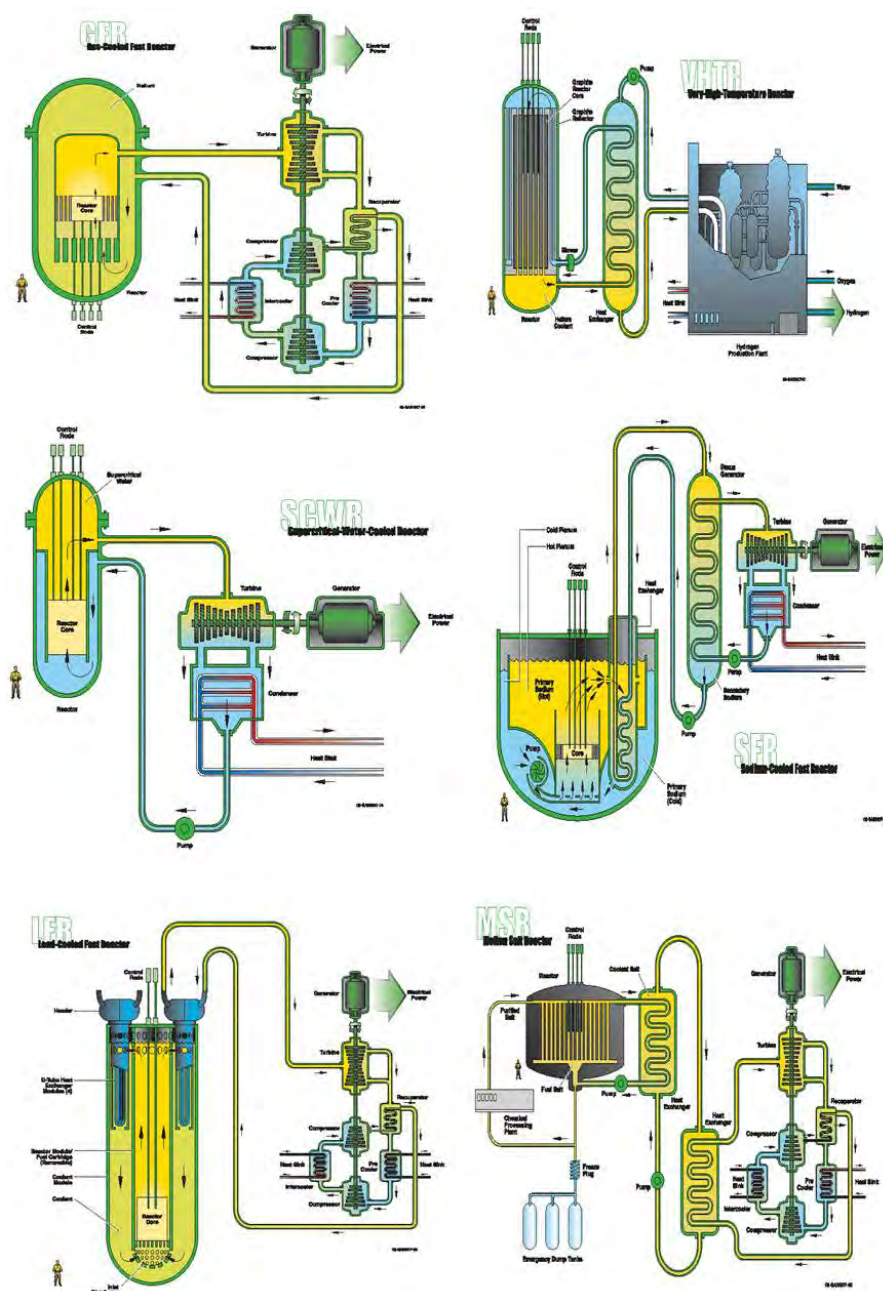


Fig. 10: Esquemas de los reactores de Generación IV

- Reactor rápido refrigerado por sodio (SFR), reactor de espectro rápido, puede consumir como combustible residuos radiactivos actuales, refrigerado por sodio y el ciclo del combustible es cerrado para la gestión eficiente de los actínidos y la conversión del uranio fértil.
- Reactor rápido refrigerado por aleación de plomo (LFR), reactor de espectro rápido refrigerado por metal líquido de bismuto-plomo con ciclo de combustible cerrado para la conversión eficiente de uranio fértil y la gestión de los ac-

tinidos.

- Reactor de sales fundidas (MSR), produce energía de fisión en una mezcla de combustible de sales fundidas en circulación con un ciclo de combustible de reciclaje completo de actínidos.

Existen iniciativas europeas para incorporar los reactores rápidos o de Generación IV al Plan Estratégico europeo. Las Iniciativas Industriales Europeas constituyen un elemento básico del Plan Estratégico en Tecnologías Energéticas de Europa (Strategic Energy Technology Plan o SET-Plan), propuesto en 2007

por la Comisión Europea y refrendado después por los Estados miembros y el Parlamento Europeo.

Las Iniciativas Industriales se refieren al desarrollo y despliegue de una cartera de tecnologías energéticas eficientes, económicas y con bajas emisiones de dióxido de carbono.

La Iniciativa Industrial Sostenible Nuclear Europea (ESNII) se aprobó durante la Conferencia del SET Plan en 2010, con el objetivo de desarrollar una nueva generación de reactores nucleares que responda a la creciente necesidad energética de Europa de forma sostenible y cumpliendo los requisitos de no emisión de gases de efecto invernadero. Aunque los recursos de uranio son suficientes con el actual parque mundial para más de 100 años, el gran despliegue nuclear que se anticipa a largo plazo lleva a reconsiderar los reactores rápidos, capaces de utilizar las reservas durante siglos y, por otra parte, contribuir a una óptima gestión de los residuos radiactivos de alta actividad.

PARA SABER MÁS:

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

Aplicación de la metodología "diseño para la variedad" (DFV) en el desarrollo de una plataforma de productos

Álvaro Guarín-Grisales, Oliver Rubio-Maya y Pablo Carrizosa-Isaza de la Universidad EAFIT (Colombia)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5847>

1. INTRODUCCIÓN

La plataforma de productos se define como "un esquema en el cual la función del producto es asignada a componentes físicos" (Ulrich, 1995). La característica principal es la relación que existe entre: la disposición de elementos funcionales, la asignación de elementos funcionales en los componentes físicos y la especificación de las interfaces entre la interacción de los componentes físicos.

El método expuesto en este artículo presenta un enfoque estructurado que ayuda al desarrollo de la disposición de elementos funcionales, la asignación de la relación función-estructura y las especificaciones de la interfaz para una familia de productos en la creación de una plataforma. Esto se expresa en el método diseño para la variedad (Martin & Ishii, 1997). Este especifica los deta-

lles operativos del concepto de arquitectura de productos expuesto por Ulrich.

Una arquitectura se desarrolla para una línea de productos con el fin de maximizar el potencial de ganancias para la empresa, el objetivo es lograr arquitecturas que requieren cambios mínimos para cumplir las necesidades del mercado futuro y que satisfaga las necesidades de rentabilidad de la empresa. Este artículo presenta las herramientas necesarias para ser aplicadas en el desarrollo de un diseño que puede ser fácilmente aplicado a los productos futuros (variedad generacional). Sin embargo, los conceptos también se pueden considerar a productos con variedad espacial.

2. INDICE DE VARIABILIDAD GENERACIONAL (GVI)

Es un indicador de la cantidad de rediseño requerido por un componente para satisfacer las necesidades futuras del mercado. Este realiza una estimación de los cambios necesarios en un componente a partir de factores externos (necesidades del entorno, exigencias del mercado entre otras). Los facto-

res externos se miden en la forma de la métrica de ingeniería (EM).

La Fig. 1 muestra el proceso para calcular el GVI.

Paso 1

Determinar el mercado y la vida útil del producto. Se determina el tiempo de duración de la plataforma de productos. Los métodos para trazar los planes de productos futuros fueron discutidos por (Wheelwright & Sasser, 1989) y (Wheelwright & Clark, 1992).

Paso 2

Crear la matriz QFD, crear una fase simplificada I y fase II QFD.

Uso de la función de calidad como indicativo

Para generar el GVI se estiman qué factores externos afectan el producto con el tiempo. El período de tiempo considerado se basa en el tiempo que el equipo desea que la arquitectura dure. Para generar el GVI se utiliza una función modificada de calidad (Hauser & Clausing, 1988) estructural.

Fase I del QFD

Se enumeran las necesidades del cliente (Tabla 1) y su relación con las medidas de ingeniería. Las medidas métricas de ingeniería para las diversas necesidades son elementos medibles, se trata de una traducción de los requerimientos subjetivos del cliente en ingeniería cuantificable.

Fase II del QFD

Se asignan los parámetros de ingeniería a los componentes. Una "X" indica que el componente afecta la medida de ingeniería métrica.

Paso 3

Lista de cambios esperados en los requerimientos del cliente. Se debe agregar una columna a la Fase I, y realizar una estimación cualitativa (Alta/Media/Baja) del rango de variación para el requisito del cliente. Este paso demuestra cómo las necesidades de los clientes son cambiantes. "Alta" indica que es una rápida evolución a la necesidad del cliente y que grandes cambios son requeridos.

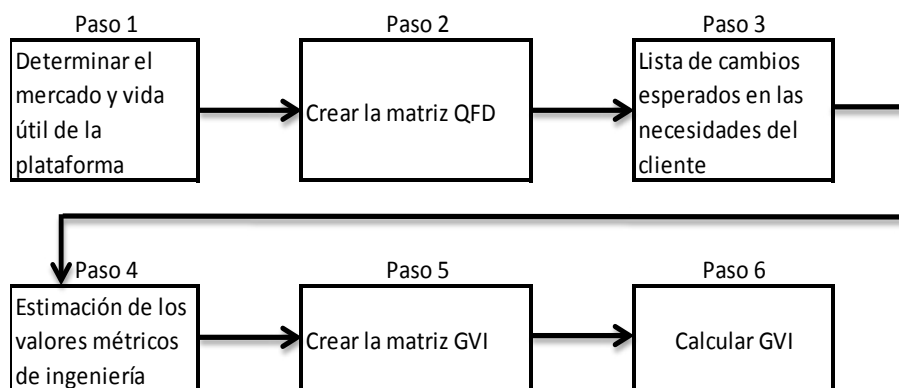


Fig. 1: Diagrama de flujo del GVI

REQUISITOS DEL CLIENTE
- Cambios en las necesidades de desempeño (incluyendo el tamaño, el estilo, el peso, etc)
- Nuevas restricciones ambientales (temperatura, humedad, etc)
- Nuevas funciones (debido a nuevos mercados o nuevas tecnologías)
- Mejoras en la confiabilidad
- Reducción de precios (reducción de costos)
- Reducción la cantidad de material
- Retiro de los componentes redundantes
- Reducción de los el tiempo de montaje
- Utilización de tecnología de menor costo
- Reducción de los requisitos de capacidad de servicio
- Reducción del tiempo de servicio
- Mejoras en el proceso de fabricación de componentes
- Reglamentos, normas y demás
- Cambios de gobierno / reglamentos industriales o normas
- Introducción de producto mejorado por parte del competidor (mejor calidad o bajo precio)
- Obsolescencia de partes

Tabla 1: Conductores externos de cambio

Paso 4

Estimar los Valores de Medidas Ingenieriles (EMTV¹). Los valores son determinados por el período en el que la plataforma de productos se está desarrollando. El valor objetivo podría basarse en información de análisis conjunto, análisis de tendencias, o la entrada de productos por parte de la competencia.

Paso 5

Crear la matriz GVI. La matriz se basa en la Fase II del QFD. Para determinar la matriz GVI se debe utilizar la experiencia en ingeniería y el juicio para estimar el costo de cambiar el componente para cumplir con los valores objetivos de las medidas ingenieriles. La matriz GVI utiliza un sistema 9/6/3/1 de calificación (Tabla 2). Para cada una de las medidas ingenieriles del componente en la matriz, se estima los costos de rediseño de componentes (incluido las tareas de diseño, herramientas, y las

pruebas) necesarios para cumplir con el futuro EMTV. Estos costos se expresan como un porcentaje del costo original de diseño. De la Fase II del QFD el equipo sabe qué componentes afectan las medidas ingenieriles.

Paso 6

Calcular El GVI. Se obtiene sumando cada una de las columnas de la matriz GVI. La aplicación de los conceptos de la teoría de medición (Krantz & Suppes, 1971) demuestra que el GVI mantiene una relación ordinal y proporcional.

3. INDICE DE ACOPLAMIENTO (CI)

El índice evalúa los cambios internos que sufre el diseño del producto a partir de los factores externos pedidos. Dichos cambios son creados por la interacción o acoplamiento dentro del diseño. Esto hace que el acoplamiento dentro de un diseño sea crucial para el desarrollo de arquitecturas sólidas en los futuros cambios requeridos por el cliente. La Figura 2 muestra el proceso

para calcular el Índice de Acoplamiento (CI).

CI Paso 1

Desarrollar la distribución física para el producto

Para generar la CI de un producto, la tecnología a utilizar y el diseño general del producto deben ser conocidas. El CI evolucionará a medida que nuevos vínculos entre los componentes se agreguen o eliminen.

CI Paso 2

Plan de control de volumen alrededor de los componentes

El volumen de control (CV) es el límite del sistema que indica los flujos de entrada y salida de dicho sistema. Para el DFV, los volúmenes de control se “dibujan” alrededor de cada uno de los componentes.

CI Paso 3

Lista de flujo de especificaciones entre los componentes.

Por cada volumen de control, se tiene la lista de las especificaciones que

SISTEMA DE RANQUEO DE LA MAREIZ GVI	
Rating	Descripción
9	Requiere un importe rediseño en el componente (>50% de los costos iniciales de rediseño)
6	Requiere un rediseño parcial del componente (>50% de los costos iniciales de rediseño)
3	Requiere simples pero numerosos cambios (>30%)
1	Requiere pocos cambios (>15%)
0	No requiere cambios

Tabla 2: Sistema de ranking de la matriz GVI

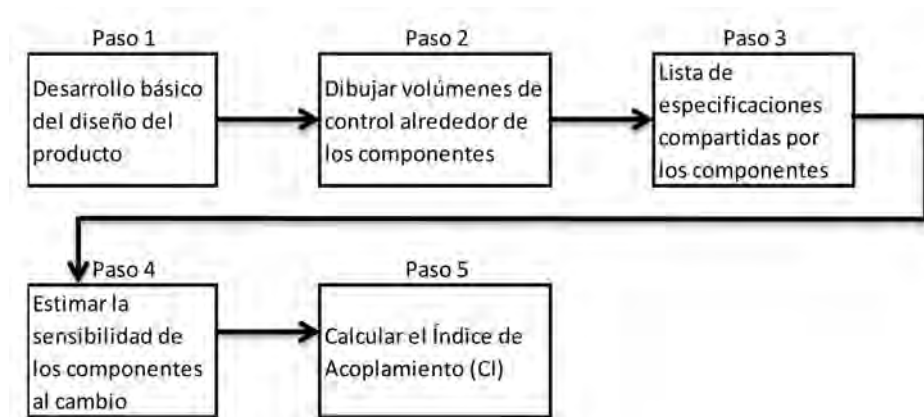


Fig. 2: Diagrama de flujo del Índice de Acoplamiento (CI)

¹ EMTV por su nombre en Inglés (Engineering Metrics Target Value)

necesitan recibir de cada uno de los otros volúmenes de control. Igualmente la lista de especificaciones que se espera suministrar a cada uno de los otros volúmenes de control. Para su ejecución se utiliza una matriz, en la fila superior se enumeran los componentes que suministran la información; la columna de la izquierda muestra los componentes que reciben la información.

CI Paso 4

Estimación de la sensibilidad de los componentes antes del cambio

A partir de un sistema de ranqueo (Tabla 3) se determina la sensibilidad del componente. Si un pequeño cambio en la especificación requiere un cambio en el componente, entonces el componente tiene un alto sensibilidad. Si la especificación requiere un gran cambio en el componente receptor, entonces tiene una baja sensibilidad.

CI Paso 5

Calcular el índice de acoplamiento
De la matriz se derivan dos índices. La suma de una columna indica la fuerza de la información facilitada por ese índice de acoplamiento de alimentación (CI-S). La suma de una fila es la información que se recibe por cada componente y se denomina como el índice de acoplamiento-recibir (CI-R).

Estos índices se definen como:

- índice de acoplamiento de recepción (CI-R) indica la fuerza de las especificaciones que un componente recibe de otros componentes.
- índice de suministro de acoplamiento (CI-S) indica la fuerza de las especificaciones que un componente suministra a otros componentes.

Un alto CI-S indica que el componente suministra una gran cantidad de información necesaria para otros componentes. Si ese componente se cambia, tiene una mayor probabilidad de causar cambios en otros componentes. Un alta CI-R para un componente indica una mayor probabilidad de que se requieren cambios porque los otros componentes se han modificado.

4. MÉTODO PARA EL DISEÑO DE LA VARIEDAD

La generación de GVI y CI y su aplicación a la arquitectura desarrollan el método DFV. El método utiliza los índices para centrarse en las áreas más críticas en el desarrollo de la arquitectura.

4.1. ETAPAS DEL MÉTODO DFV

DFV Paso 1

Generar el GVI y CI para el diseño

DFV Paso 2

Ordenar los componentes; ordenar el GVI, basado en el GVI, clasificar los componentes de mayor a menor. Estos son los componentes más propensos a que cambien en el tiempo debido a factores externos. Incluir el Índice de acoplamiento: adicionar el valor del Índice de acoplamiento para cada uno de los componentes.

DFV Paso 3

Determinar dónde estandarizar y / o modularizar

Después de determinar la generación de GVI y el CI, se comienzan a hacer cambios a la arquitectura del producto con el fin de desarrollar una plataforma de productos que pueda ser más

fácil de aplicar a futuras generaciones de productos. Con el fin de facilitar la clasificación visual de los componentes en los que debemos centrarnos, los componentes se clasifican en altas / bajas categorías.

La búsqueda de la normalización consiste en reducir el GVI y CI-R a cero. Esto significa que ningún acoplamiento externo (GVI) o interno (CI-R) será requerido por el componente para cambiar en el futuro, asegurando así la estandarización. Para la estandarización, los componentes que tienen un alto costo de diseño y alto GVI debe ubicarse en primer lugar, ya que estos son los componentes que son más propensos a requerir cambios costosos, debido los requisitos de los clientes. Otra consideración es estandarizar los componentes con alto CI-S, ya que tienen un alto potencial de causar cambios en otros componentes. Los componentes que no pueden ser estandarizados y necesitan ser cambiados se deben modular. Esta modularización se refiere a cambios geométricos, así como en los materiales y los flujos de energía del componente. La modularización de los componentes requiere reducir el CI-S a cero. Los métodos utilizados para reducir el GVI y CI-R se utiliza también para reducir la CI-S.

DFV Paso 4

Desarrollar una arquitectura de plataforma de producto

Este paso se aplica para mejorar la arquitectura del producto y así mismo tomar decisiones tanto en la forma de reorganizar la asignación entre los componentes físicos y funciones, y cómo definir interfaces.

4.2. ESTANDARIZACIÓN Y MODULARIZACIÓN

El objetivo es diseñar la plataforma de un producto de modo que sea estandarizada a través de las generaciones. Para las partes del diseño que no pueden ser estandarizadas, se busca darles un enfoque modular.

1. Estandarizar (GVI y CI-R relacionados)

- Totalmente estandarizado: el componente no va a cambiar a través de las generaciones. El GVI y CI-R son iguales a cero
- Parcialmente estandarizado: el componente se espera que requie-

SISTEMA DE RANQUEO CI BASADO EN LA SENSIBILIDAD DE LAS ESPECIFICACIONES	
Ranking	Descripción
9	Pequeños cambios en las especificaciones impactan el componente que las recibe (Alta sensibilidad)
6	Media-alta sensibilidad
3	Media-baja sensibilidad
1	Grandes cambios en las especificaciones impactan el componente que las recibe (Baja sensibilidad)
0	No hay especificaciones que afecten el componente

Tabla 3: Sistema de ranking del CI

ra cambios menores a través de las generaciones. Cuanto mayor sea el GVI y CI-R, menor estandarizado estará el componente.

2. Modularizado (CI-S relacionada)

- Completamente modularizado: la geometría, energía, materiales o señal (GEMS²) del componente se puede cambiar para satisfacer las necesidades de los clientes sin necesidad de cambio en otros componentes. Esto implica que el CI-S es cero.
- Parcialmente modularizado: cambios en las GEMS del componente puede requerir cambios en otros componentes. Cuanto mayor sea el CI-S, los cambios más esperados y así, el componente se considera menos modular.

En el método de DFV, la estandarización y modularización se centra en los componentes con más probabilidad de causar un gran impacto de rediseño. Esta clasificación de los componentes se llevó a cabo en el paso 3 del DFV.

Como Se Puede Reducir El GVI

El GVI se determina con base en estimaciones de costo de rediseño hechas para satisfacer las necesidades futuras de los clientes. Subyacente a cada número en la matriz GVI están las especificaciones que vinculan el componente con la métrica ingenieril. Hay dos enfoques principales para reducir el GVI

- Enfoque 1: quitar EM / Especificaciones de los componentes
 - 1A. Reorganizar la asignación de funcionalidad de los componentes: un método para reducir el GVI es cambiar la arquitectura del producto con el fin de eliminar EM / Especificaciones de los componentes. Reorganizar el diagrama de funcionalidad de los componentes puede lograr esto.
 - 1B. "Congelar" la especificación: Por congelación de la especificación, el equipo dicta que no se modificará. Se debe tener en cuenta que será difícil "congelar" una especificación

vinculada estrechamente con las necesidades del cliente, ya que limita la capacidad para satisfacer las necesidades futuras. También, existe incertidumbre en este método, ya que siempre hay una posibilidad de que la especificación cambie. Antes de "congelar" una especificación, se debe entender la relación entre la especificación y las necesidades del cliente, así como la forma en que está acoplada internamente.

- Enfoque 2: reducir la sensibilidad de los componentes a los cambios en las especificaciones
 - 2A. Reducir el acoplamiento interno (dentro del componente CV): Una pequeña modificación a un componente puede recorrer todo ese componente si las partes individuales o características que lo componen están muy acopladas.
 - 2B. Aumente el espacio de holgura de la especificación: El componente puede absorber un gran cambio en la especificación antes que se requiera el rediseño.

4.3. CÓMO SE PUEDEN REDUCIR LOS ÍNDICES DE ACOPLAMIENTO

El equipo se centra en la eliminación de Componente / Especificación del componente, o en la reducción de su sensibilidad. Los métodos se describen a continuación.

- Enfoque 1: Quitar componente / Especificaciones del componente
 - 1A. Reorganizar la asignación de funciones a los componentes: Algunas especificaciones se pueden quitar para ayudar a reducir el acoplamiento y reducir así la propagación de los cambios.
 - 1B. "Congelar" la especificación: Se elimina el componente / especificación del componente. En el caso de la dimensión del marco, tamaños específicos tanto para los productos actuales como futuros.
- Enfoque 2: Reducir la sensibilidad de los componentes en los cambios de las especificaciones

- 2A. Reducir el acoplamiento interno (dentro del componente CV): Ayudan a reducir la sensibilidad de dicho componente a los cambios en las especificaciones, al igual que con el GVI.
- 2B. Aumentar el espacio de holgura de la especificación: una especificación de componentes que podrían beneficiarse de espacio libre adicional es el tenedor. Ya que permitiría su adaptación por medio de abrazaderas a diferentes tamaños de marco tanto en el tiempo actual como futuro.

5. CONCLUSIONES

Un desarrollo más rápido del producto sigue siendo un objetivo importante para muchas empresas y la arquitectura se está convirtiendo crucial para lograr esto. Aquí se describe una metodología que incorpora estandarización y modularización para reducir futuras tareas y costos de diseño.

La plataforma de producto se desarrolla con el fin de reducir la cantidad de trabajo en el rediseño que se puedan presentar en las generaciones futuras del producto. El método DFV ofrece un enfoque estructurado para lograr este objetivo. Este consiste una parte descriptiva (GVI y CI) y un enfoque preceptivo para ayudar a normalizar y modularizar la arquitectura. Con el desarrollo del GVI y CI, y el conocimiento de la aplicación de estos.

PARA SABER MÁS

- Hauser, J., & Clausing, D. (1988). The House Of Quality. *Harvard Business Review*, 63-73.
- Krantz, D. H., & Suppes, P. (1971). *Foundations of measurement*. New York, NY, Academic Press. New York: Academic Press.
- Martin, M., & Ishii, K. (1997). Design for variety: development of complexity indices and design charts. . *ASME Design Engineering Technical Conference*. Sacramento, USA: ASME.
- Ulrich, K. (1995). the Role of Product Architecture in The Manufacturing Firm. *Research Policy* 24, 419-440.
- Wheelwright, S., & Clark, K. (1992). *Creating Project Plans to Focus product Development*. *Harvard Business Review*, 3-14.
- Wheelwright, S., & Sasser, W. (1989). The new product development map. *Harvard Business Review*, 112-125.

² GEMS por su nombre en Inglés (Geometry, Energy, Material or Signal)

Uso de escáner laser para determinar las deformaciones en la geometría de una armadura mudéjar.

Aplicación en la iglesia del Convento de Madre de Dios de Sevilla

Miguel Angel Lopez-Lopez¹ y Francisco de Paula Montes-Tubío²

¹ Universidad de Sevilla

² Universidad de Córdoba

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7048>

INTRODUCCIÓN

La Iglesia del *Convento de Madre de Dios* se concluye en 1572; aunque se desconozca el autor de las trazas, se sabe que en las primitivas fases estuvieron **Juan de Simancas** y **Pedro Díaz de Palacios**. Se trata de una única nave de planta rectangular, del tipo cajón puro sin capillas laterales y Capilla Mayor cuadrada separada de la nave principal por un gran arco toral.

La nave de la iglesia se cubre con una gran armadura mudéjar de ocho paños, cuadrada por arriba y ochavada por el centro y por abajo, igual que el presbiterio, que además cuenta con unas pechinas de magnífica laceria ataujorada de perímetro hexagonal. Las armaduras fueron ejecutadas por los carpinteros **Alonso Ruiz**, **Francisco Ramírez** y **Alonso del Castillo**. (Duclos 1992).

La gran altura de la nave y los empujes de la armadura han llevado al muro principal a grandes deformaciones hasta conseguir la posición de equilibrio en la que ahora se encuentra. El presente trabajo pretende definir de forma precisa esas deformaciones.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El láser escáner es un sistema de medición que, al igual que la fotogrametría, no necesita contacto directo con el modelo a levantar. El sensor está compuesto por un elemento que genera un haz de luz láser, caracterizado por su baja dispersión, y un sistema de barrido, horizontal y vertical, de modo que efectuando una serie de perfiles paralelos se consigue cubrir toda la superficie

a levantar, en forma de rejilla de paso impuesto por el operador (Nuñez, Buill y de Mesa 2013).

Antes de comenzar con la toma de datos se ha de realizar un estudio previo del edificio a levantar, prestando atención, sobre todo a los siguientes aspectos:

- Número de estacionamiento y posición de los mismos
- Densidad de puntos requerida
- Sistemas de coordenadas a emplear.

2.1. NÚMERO DE ESTACIONAMIENTOS DEL ESCÁNER LÁSER Y SU SITUACIÓN

Es aparato utilizado es el modelo C-5 de *Leica*, propiedad de la Universidad de Córdoba, tiene un diseño compacto con una plataforma todo en uno. Incluye escáner, auto-nivelación con sensor de inclinación, controlador, almacenamiento de datos, auto-exposímetro de cámara y plomada láser.

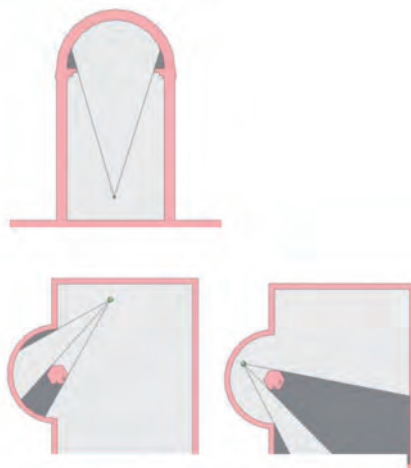


Fig. 1: Espacios en sombra según la posición del escáner láser, plantas y sección

Al basarse en la emisión de un haz de luz láser, el escáner no podrá registrar aquellas zonas no visibles desde su posición, o que queden ocultas detrás de una columna, mueble, muro, etc.

Para completar el levantamiento ha sido necesario, por tanto, realizar varios estacionamientos de forma que no queden zonas ocultas. Es importante tener en cuenta situaciones como la de la Fig. 1.

Esta contrariedad es fácil de resolver para los elementos que quedan en sombra desde la proyección radial horizontal en planta del posicionamiento. Pero el problema se plantea en altura ante la dificultad que se tiene de suspender el aparato y tomar los datos de los elementos que se encuentran en sombra desde los radiales verticales del alzado. Esto llevara a tomar determinadas decisiones sobre el uso de medios auxiliares, y representa el gran problema de la toma de datos con escáner láser para el patrimonio.

Otro aspecto a tener en cuenta es la oblicuidad de los rayos del haz con la superficie a registrar. Puesto que el escáner gira con incrementos de ángulo constantes, la densidad de los puntos registrados será mayor cuanto más se aproxime a 90 el ángulo de los rayos con la superficie. En un estacionamiento se tienen diferencias significativas de densidad de puntos registrados en una misma superficie plana, por lo que han sido precisos nuevos estacionamientos para mejorar la uniformidad de los resultados.

Ha sido necesario, por tanto, planificar previamente la ubicación de los estacionamientos del escáner, determinando el menor número de posiciones compatible con el registro completo del elemento.

En este sentido, un elemento diáfano, de planta convexa y con escasos obstáculos puede registrarse con un reducido número de estacionamientos. Por el contrario, en caso de elementos con numerosos quiebros, pasillos, estancias, escaleras, etc.; o con muchos obstáculos como mobiliario, columnas, vegetación, vehículos, etc. puede llegar a ser necesario un gran número de esta-

cionamientos (Mañara, Blanco y Rodríguez 2009)

Por otro lado, es conveniente establecer un cierto recubrimiento entre barridos, para evitar zonas huecas o sin datos. El porcentaje final dependerá de la complejidad del objeto y de la orientación del mismo con respecto al punto de estación, de manera que en superficies continuas el recubrimiento puede reducirse considerablemente.

2.2. DENSIDAD DE PUNTOS REQUERIDA

La resolución se ha determinado, en función de la distancia entre el escáner y el área a registrar, su oblicuidad, la densidad de puntos requerida y el tiempo disponible para la captura.

Se ha tratado de ajustar la densidad, puesto que una densidad muy alta multiplica el tiempo necesario para su captura, además de aumentar innecesariamente el volumen de la nube de puntos y, consecuentemente, el tiempo requerido para su procesamiento.

Debido al carácter de la investigación a realizar, ha sido trascendente determinar aquellas zonas en las que se necesita de una mayor información para conseguir el propósito de este estudio, esta ha sido una de las labores más delicadas, porque una falta de información o de precisión en la misma puede tener que obligar a una nueva visita al edificio.

En el presente trabajo se han discriminado las resoluciones, de forma que en un mismo estacionamiento se han realizado dos escaneos, uno con resolución menor para definición geométrica general y otro, en zonas localizadas, con resolución máxima, para el estudio detallado que desarrolla los puntos concretos del análisis.

En cualquier caso se debe tener en cuenta que, el uso de la tecnología 3D debe estar supeditado a un análisis crítico de las necesidades y objetivos reales de cada investigación (Olmo, Castro y Lopez 2012).

2.3. SISTEMA DE COORDENADAS A EMPLEAR

El escáner láser determina las coordenadas de los puntos registrados referidas a un sistema de referencia del propio aparato (sistema de referencia instrumental). Este sistema de coordenadas es diferente en cada estacionamiento, por lo que cada barrido debe

referenciarse a un sistema global para el conjunto de ellos.

Para tal fin se emplean diversas señales de puntería diseñadas específicamente para enlazar, registrar o referenciar distintos sistemas de coordenadas, en este estudio se han utilizado dianas giratorias.

El control del escáner se efectúa a través del software mediante el cual se define qué partes del objeto a levantar se escanean y con qué resolución. Durante la toma de datos en campo es muy conveniente disponer de información fiable sobre el progreso y la integridad del levantamiento. Ello puede resultar muy complicado en caso de áreas complejas con muchas zonas ocultas, por lo que se debe disponer de una aplicación que permita registrar las nubes de puntos de los diferentes barridos y visualizar la nube completa. Para el registro y limpieza de la nube de puntos se ha utilizado el *software* del fabricante, el programa *Cyclon*.

En este trabajo no se ha considerado importante la georreferenciación del monumento a estudiar, por lo que se ha ido al registro de las nubes de puntos por dianas, siendo las coordenadas las globales del fichero BIM que se ha creado.

2.4. PROCESADO DE LOS DATOS

La fase de procesamiento de la información se desarrolla en general de acuerdo con los pasos siguientes:

- Preparación de cada toma. Si la toma es demasiado densa se puede proceder a una simplificación antes de su registro. También es preferible proceder, antes del registro, a la eliminación de puntos no deseados o erróneos correspondientes a vegetación, transeúntes, mobiliario, vehículos, etc.
- Registro de cada barrido al sistema de referencia elegido, ya sea local o global.
- Eliminación, mediante filtrado, de la información duplicada en áreas de solape.

A continuación se describen los aspectos fundamentales de cada uno de estos pasos.

2.4.1. Eliminación de puntos no deseados

La eliminación de puntos no deseados puede efectuarse por dos sistemas:

Manual. Localizando y eliminando los puntos de la nube correspondientes a elementos no deseados, como: mobiliario, personas, automóviles, etc. Ante la gran variedad de elementos no deseados que pueden presentarse parece complicado implementar un proceso automático capaz de identificar estos puntos y eliminarlos.

Automático. Los puntos erróneos (ruido de la nube de puntos) pueden ser identificados mediante un algoritmo que determina los puntos que cumplen unas determinadas condiciones de distancia mínima, cantidad, etc. (Nallig et al. 2009). Hoy en día hay gran variedad de *plugins* para esta labor (Martínez et al. 2012)

Para este trabajo no se ha utilizado la eliminación automática, dado que los datos que se necesitan pueden ser considerados ruido y consecuentemente ser eliminados por los *plugins* de limpieza.

Este método se ha utilizado para simplificación y homogeneización del registro de nubes en zonas de solape, de forma que se obtenga una distribución de puntos uniforme.

2.4.2. Registro de los barridos

La operación de registro tiene la finalidad de combinar las nubes de puntos obtenidas en los sucesivos barridos desde diferentes estacionamientos, así como, en su caso, la referenciación de la nube de puntos al sistema de coordenadas elegido.

El registro se ha realizado de forma indirecta mediante puntos de control. Se fijan una serie de puntos de referencia que se materializan en unas dianas, estas se detectan con el escáner después de cada estacionamiento y sirven para el registro de las distintas nubes de puntos. Para conseguir un registro preciso es conveniente que se compartan, al menos, tres dianas, sin embargo, para un registro automático realizado por el software utilizado, solo es necesario que existan entre cada escaneo dos dianas comunes y que estas no se encuentren próximas en la vertical. En cualquier caso el software utilizado, una vez realizado el registro, permite listar la precisión del mismo. En este trabajo se han encontrado errores inferiores a 0.001 metros, que es una muy buena precisión para el objetivo que se persigue. Esta precisión se ha obtenido porque se han realizado los solapes siempre con, al menos, tres dianas comunes.

2.4.3. Filtrado de información duplicada en las zonas de solape

Los solapes entre barridos suponen una duplicidad de datos que es conveniente filtrar para no sobrecargar la nube con puntos que no proporcionan información adicional. En esas zonas pueden encontrarse también puntos erróneos debidos a la deficiente incidencia de los rayos o a elevadas distancias entre el escáner y la superficie escaneada.

También, a través de software puede realizarse una reducción del volumen de la nube de puntos basada en el hecho de que las superficies lisas pueden quedar definidas con menos puntos que las zonas con más aristas.

Para la definición de las deformaciones se ha utilizado un programa de modelado BIM, debido a la facilidad de gestión y visualización de los modelos 3D que ofrecen.

3. RESULTADOS

Mediante el uso de la nube de puntos obtenida con el escáner laser, se pueden determinar las deformaciones que han sufrido los elementos constructivos, hasta adaptarse en el proceso de acción reacción que se ha ido produciendo a lo largo de la historia de la edificación, esto lo podemos ver de una forma simple con el estudio de una sección de la nave de la iglesia de Convento de Madre de Dios.

Para facilitar las conclusiones de este trabajo, se ha decidido estudiar las geometrías de la sección en una porción transversal de la nave de la iglesia definida por dos planos paralelos normales al eje longitudinal, las conclusiones se pueden hacer extensivas al conjunto del espacio, pero con determinadas reservas. En el coro alto de Madre de Dios, justo en la vertical de la reja que lo separa de la parte abierta al público, se realiza una doble sección de la nube de puntos, de esta forma se aísla un sector diferencial transversal de 20 cm. Sobre el que se realiza el estudio. Esto permite analizar la geometría con cierta seguridad.

Como ya se comentó en la introducción, la cubierta de la iglesia se resuelve con el artesonado mudéjar de cinco paños, cuadrado en el almizate y ochavado por el medio y por la base, siendo la luz teórica de este artesonado de 10.00

MILÍMETROS	MEDIDA REAL	MEDIDA EN EL MODELO	DIFERENCIA
Luz en cimentación	10.057,93	10.057,93	0,00
Luz arranque de cubierta	10.057,93	10.607,67	-549,74
Altura de apoyo de armadura	23.972,40	23.972,40	0,00
Ancho peinazo A	3.215,72	3.151,98	63,74
Ancho peinazo B	2.929,78	2.927,69	2,09
Ancho almizate	2.859,32	2.859,32	0,00
Ancho peinazo C	2.925,60	2.927,69	-2,09
Ancho peinazo D	3.151,98	3.151,98	0,00
Ta			

COTAS INICIAL Y DEFORMADA DE LOS PUNTOS DE INTERSECCION DE LA CUBIERTA (MILIMETROS)						
Punto	X INICIAL	X DEFORMADA	Δ(X)	Y INICIAL	Y DEFORMADA	Δ(Y)
1	-105,95	0,00	-105,95	0,00	-4,30	4,30
2	1.529,11	1.405,73	123,38	2.756,23	2.770,70	-14,47
3	3.599,30	3.772,60	-173,30	4.823,42	4.489,75	333,67
4	6.458,62	6.630,97	-172,35	4.823,42	4.462,07	361,35
5	8.528,81	9.012,95	-484,14	2.756,23	2.756,23	0,00
6	10.057,92	10.501,72	-443,80	0,00	-94,49	94,49

Tabla 1: Costa Inicial y Deformada de los puntos de intersección de la cubierta²

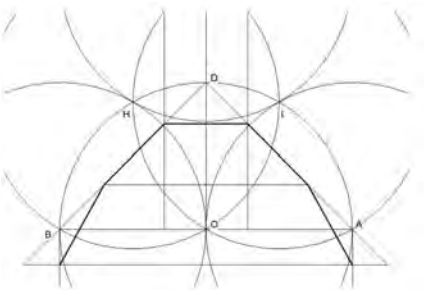


Fig. 2: Trazado geométrico de la cubierta mudéjar de cinco paños

metros que son muy aproximadamente los 37,00 pies que se definen en el manuscrito del contrato de ejecución, la luz real de la armadura es de 10.60 metros y la altura real de la nave hasta el almizate es de 18.43. Todas estas medidas se refieren a la sección diferencial de 20 cm que se ha estudiado, justo en la posición de la reja del coro alto, próximo al centro de la nave.

Se comienza con la reconstrucción de la sección ideal, partiendo de una serie de premisas que son las siguientes:

1. Se supone que el plano de arranque de los muros, en el plano de asiento sobre la cimentación no ha sufrido variación desde su construcción.
2. Como se demostrará más adelante, todo el movimiento de los

muros con respecto a la vertical se considera que se ha producido con la estructura completamente terminada.

3. El trazado original considerado, es el que se define en la tratadística de la época.

Ateniéndose a los procedimientos geométricos que describen los tratadistas de carpintería de lo blanco se obtiene la sección transversal ideal de la cubierta. Aplicando a esta sección ideal, la luz real de la nave, se puede comprobar que la medida real de los peinazos coincide con gran exactitud en todos los paños, excepto en el peinazo D¹.

¹ Esta no coincide a consecuencia de la deformación del arrocabe, puesto que el peinazo ha deslizado, en mayor medida, del muro que se acerca al convento y ha acompañado más en el movimiento al muro que separa de la calle San Jose y que no se encuentra contrarresto; esto ha ocasionado una deformación del arrocabe, que puede aparentar una extensión del peinazo, por eso se toma como inicial el valor de la anchura del peinazo A, que se utiliza también para el peinazo D

² INICIAL hace referencia a la coordenada de construcción del edificio y DEFORMADA a la coordenada hoy Los puntos se identifican en la Fig. 4

Para obtener con mayor claridad la deformación de este elemento se plantea una tabla con las coordenadas de los puntos de quiebro de la sección y sobre ella se concluye.

Se parte de las siguientes medidas como originales, obtenidas directamente de la sección de la nube de puntos.

El tazado de la geometría inicial se realiza partiendo de las luces y medidas anteriores de los elementos. Se observa que la concordancia es prácticamente total, las diferencias entre el trazado y las medidas reales no supera los 15 mm, por tanto es un error admisible que garantiza la calidad del resultado y ratifica que la decisión de tomar la medida del peinazo A ha sido acertada.

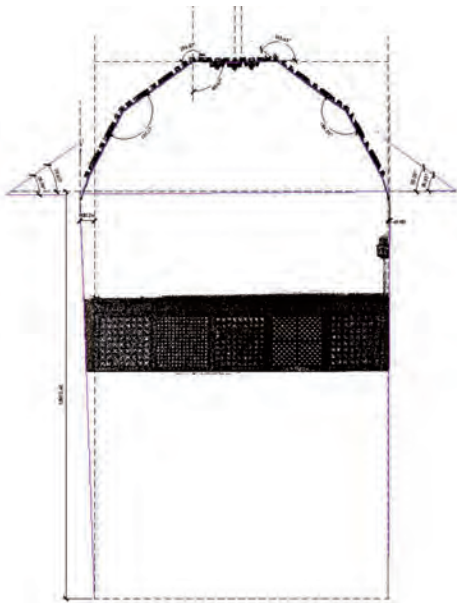


Fig. 3: Sección de la nave de Madre de Dios por la Reja del coro, desplomes

En la Fig.4 se grafia en azul el estado en el momento de la construcción y en magenta el estado deformado de la armadura a día de hoy.

A la vista de la sección y con los datos obtenidos se pueden realizar las siguientes afirmaciones:

1. La deformación es perfectamente compatible con la rigidez de la estructura. Hay que tener en cuenta que el cuchillo resistente principal es una cubierta de par e hilera, que la conforman el tirante y los pares de los peinazos B y C y también que los nudillos del almizate con los pares de los peinazos A y D, acompañan al desplazamiento pero no giran porque la rigidez del cuchillo principal no se lo permite.
2. La deformación, manteniendo la horizontalidad del almizate, es compatible con el desplazamiento general, baja 170 mm. Pero lo hace paralelo a su ubicación.
3. Por último, se ve claramente el efecto de que los pares de la estructura principal asumen en mayor medida el giro de la sección. Este punto lleva a meditar sobre la actuación de los tirantes, puesto que estos son los que han elongado, y además han producido una fenda en la solera de apoyo, ya que ha cedido la posición de sus apoyos iniciales la cantidad de 538,29 mm ($443.80+94.49$). Esta medida no se debe, solo, a la deformación del tirante por la

tracción, sino que la fijación de este ha cedido para permitir el desplazamiento, y después de esta cesión ha encontrado una nueva posición de equilibrio que garantiza su estabilidad.

4. También se puede concluir sin dudas que estas deformaciones se han producido desde que se terminó la construcción en el siglo XVI, además queda corroborado por la geometría de los elementos, como se puede comprobar con la reja del coro alto.



Fig. 5: Parcial de la nube, reja del coro alto de Madre de Dios

La Fig.5 corresponde con la nube de puntos de la reja del coro alto de la iglesia, que separa la zona de clausura de la nave de la iglesia y se colocó con la construcción inicial y la Fig. 6 tiene la misma orientación que el resto de secciones de la iglesia, es decir, a la izquierda está el mayor desplome por la calle de San José, donde no hay contrarresto, puesto que no está acodalado por edificaciones y por la derecha el resto de la fábrica del convento, por lo que ya se ha observado que no tiene tanto desplome.

Las imágenes parciales que siguen en la Fig.6 dan una imagen clara de los rellenos que han debido de hacerse para

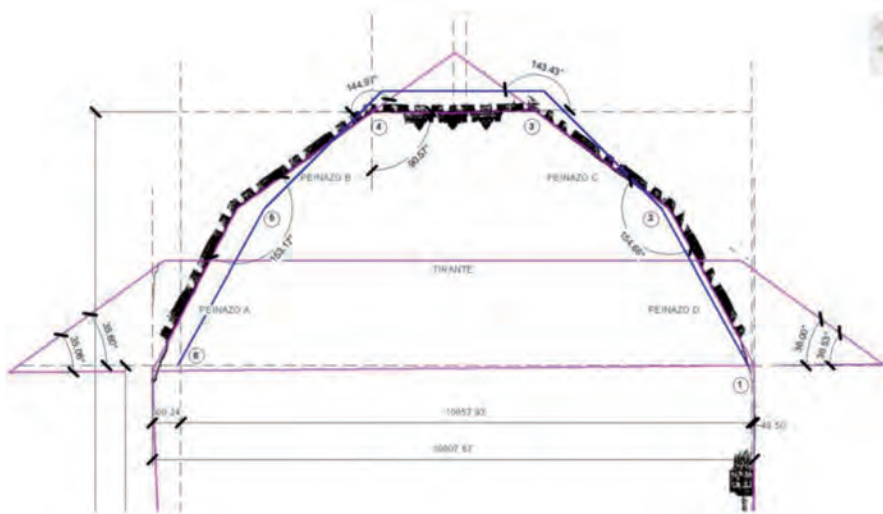


Fig. 4: Superposición de la geometría inicial (azul), con la real (magenta)



Fig. 6: Parciales de los extremos de la reja del coro de Madre de Dios

ir completando el espacio vacío que dejaba el desplome entre la reja y el muro de la calle San José, sin embargo se aprecia que la conexión con el muro que separa del convento prácticamente mantiene su geometría original. Estos rellenos se definen entre la línea verde de trazo y la línea magenta.

4. DISCUSIÓN

El escáner láser permite obtener un gran número de datos en un breve periodo de tiempo.

La metodología adoptada aprovecha esta ventaja y optimiza de manera significativa la toma de datos con respecto a otros sistemas como la fotogrametría, que necesita de una iluminación adecuada y una distancia libre al objeto de estudio, requisitos complicados de obtener en los casos de rehabilitación de patrimonio.

Los datos obtenidos tienen una precisión óptima lo que permiten, el análisis de deformaciones en elementos complejos como en este caso de una cubierta mudéjar.

El tiempo del registro en post proceso se optimiza; realizándose la mayor parte del trabajo a través de programas de diseño asistido tipo BIM, generando orto imágenes de nubes de puntos densas, evitando el proceso de generación de polígonos y superficies, que complicaría el trabajo y aportaría imprecisiones por la interpolación con la que se construyen.

El *software* de registro permite en

todo momento conocer el error con el que se trabaja, garantizando la calidad del resultado.

La generación de orto imágenes (plantas, secciones, alzados) a partir de un único modelo global de puntos, evita los errores comúnmente generados por la topografía tradicional en la generación de planos de inmuebles complejos. La aplicación de esta tecnología en el levantamiento de inmuebles arquitectónicos y su precisión, supone una herramienta preciosa para la determinación de las pequeñas medidas de deformación y distorsión en procesos de readaptación de las edificaciones, como se ha demostrado en el presente trabajo.

La técnica del láser escáner está llamada a complementar o sustituir a otras técnicas de captura de datos.

El número de sistemas láser escáner terrestres existentes en el mercado hoy en día, permite obtener gran cantidad de puntos con una calidad elevada en las mediciones sobre el objeto; pudiéndose trabajar desde muy corta distancia, a pocos decímetros y a distancias que pueden alcanzar kilómetros.

Se observa en esta herramienta un potencial muy importante para el control del patrimonio construido por la superposición de las nubes de puntos de diferentes fechas. Esto permitirá detectar movimientos en las edificaciones y, por tanto, diagnosticar a tiempo las posibles patologías que puedan sufrir. También aplicable a la definición geométrica de los elementos estructurales durante la construcción. (Walsh y Borello 2013).

PARA SABER MÁS

- (1) Duclos, Guillermo. Carpintería de lo blanco en la arquitectura religiosa de Sevilla. Sevilla: Diputación Provincial de Sevilla, 1992.
- (2) Mañara, Patricia, Rebeca Blanco, y Anxo Rodríguez. «La documentación geométrica de elementos patrimoniales con láser escáner terrestre. La experiencia del Lapa en Galicia.» Cuadernos de Estudios Gallegos LVI (122): 33-65 (2009), 2009: 33-65.
- (3) Nallig, E., I. Leal, A. Esmeride, y J. Branch. «Simplificación robusta de nubes de puntos usando análisis de componente principal y algoritmos genéricos.» Avances de sistemas e informática, 2009: 45-50. ISSN 1657-7663
- (4) Martínez, Joaquín, Alex Soria-Medina, Pedro Arias, y Alzir Felipe Buffara-Antunes. «Automatic processing of Terrestrial Laser Scanning data of building façades.» Automation in Construction, 2012: 298-305.
- (5) Nuñez, M.A., F. Buill, y A. de Mesa. «Levantamiento arquitectónico de la Puerta de Antioquía (Alepo).» Informes de la Construcción, 2013: 487-496. DOI 10.3986/ic.11.090
- (6) Olmo, Manuel, Manuel Castro, y Miguel Lopez. «La utilización del Láser Scanner en el registro arqueológico: La experiencia de la Universidad de Alcalá.» Virtual Archaeology Review, 2012: 93-97. ISSN:1989-9947.
- (7) Walsh, Sara B., y Daniel J. Borello. «Data Processing of Point Clouds for Object Detection for Structural Engineering Applications.» Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2013: 495-508.

BREVE GLOSARIO DE TERMINOS Y EXPRESIONES ARQUITECTONICAS

Almizate: Paño horizontal plano formado por el conjunto de los nudillos.

Armadura mudéjar: Conjunto formado por elementos de madera unidos entre sí para cubrir o techar una estancia resuelta mediante laceria basada en ruedas (estrelladas).

Arrocabe: Pieza de madera generalmente decorada que cubre el encuentro de la armadura mudéjar y el muro por el interior

Artesonado: Techo que se resuelve con artesones. (Recuerda la forma de artesa)

Carpintería de lo blanco: Oficio de carpintero dedicado a realización de estructuras de edificación e ingenios de guerra.

Contrarresto: Elementos arquitectónicos (muros, contrafuertes, arbotantes, etc.) utilizados para compensar los empujes horizontales de las estructuras de fábrica.

Hilera: Viga de madera que se coloca en el punto más alto de la armadura, que la recorre longitudinalmente y sobre ella ensamblan los pares (justo debajo de la cumbrera)

Laceria: Adorno formado por bandas entrelazadas rectas o angulosas dispuestas de un modo particular, formando ruedas estrelladas.

Nudillo: Pieza horizontal que conecta los pares en las cubiertas de par y nudillo, todos definen un plano llamado almizate.

Par: Cada una de las maderas que forman los faldones.

Peinazo: Conjunto de pares ensamblados, o cada una de las piezas que ensamblan los pares.

Tratadística: Conjunto de tratados que tienen relación con un determinado ámbito cultural o que pertenecen a un período histórico específico.

La robótica en la rehabilitación de cadera

César Humberto Guzmán-Valdivia**,
Andrés Blanco-Ortega*, Marco Antonio Oliver-
Salazar*, José Luis Carrera-Escobedo** y Héctor
Ramón Azcaray-Rivera*

* Centro Nacional de Investigación y Desarrollo
Tecnológico (México)

** Universidad Politécnica de Zacatecas (México)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/6924>

1. INTRODUCCIÓN

La robótica en la rehabilitación de cadera es hoy en día una tecnología prometedora llena de retos por resolver. En este artículo, se presenta una revisión bibliográfica de los diferentes robots comercializados y en desarrollo para ayudar a la rehabilitación de cadera. Una fractura, un accidente automovilístico, las lesiones en deportes extremos, los accidentes cerebro-vasculares, la lesión de médula espinal y las enfermedades degenerativas son solo unos cuantos ejemplos bien conocidos que pueden causar una discapacidad motriz en la cadera.

El conocimiento de las técnicas de rehabilitación de cadera en forma de ejercicios es esencial para reincorporar a una persona a sus múltiples actividades de la vida cotidiana. Las terapias de rehabilitación de cadera se asocian a menudo con la idea de recuperar el movimiento perdido mediante ejercicios terapéuticos pasivos y activos.

La diferencia entre ambos radica, por una parte, en el hecho de que el terapeuta ayude al paciente a realizar los

ejercicios, (por lo tanto presenta una rehabilitación de primera mano más especializada) y, por otra parte, en el hecho que el paciente pueda realizar los ejercicios por sí solo (como ha sido el caso de rehabilitarse en un gimnasio).

Sin embargo, la práctica en la rehabilitación de cadera revela que - por muy especializado que sea el personal médico - no deja de ser una labor manual intensa, que consume tiempo y esfuerzo físico. Por esta razón, la duración de las terapias de cadera son acortadas y en la mayoría de los casos mal administradas en los centros de rehabilitación.

Los trabajos desarrollados en los últimos años en robótica han llevado a replantear la morfología de ciertos tipos de robots destinados a resolver las necesidades de la sociedad. Este cuestionamiento partió esencialmente de dos líneas de análisis: desde una perspectiva industrial, los robots manipuladores en las líneas de ensamble, y desde una perspectiva más servicial, los robots destinados para la interacción con el ser humano. Pérez-Turiel et al., consideran que un robot de servicios es un dispositivo mecatrónico, sensorizado y reprogramable cuya participación es beneficiosa en las actividades humanas cotidianas. Desde esta perspectiva, Ángulo-Usategui et al., plantean lo siguiente: *“los dominios más avanzados de la ingeniería se están empleando en aspectos tan destacados como el diagnóstico, la monitorización, la cirugía y la actuación terapéutica, sin olvidar los sistemas de ayuda para personas disca-*

pacitadas”. Así pues, la robótica médica, y en particular la especializada en la rehabilitación, han pasado a formar parte de un nuevo campo de aplicación.

Hoy en día, el concepto de *“robot para rehabilitación”* abarca un amplio rango de dispositivos mecatrónicos, que van desde las prótesis inteligentes hasta los robots para ayudar en el proceso de rehabilitación. Estos robots no solo han podido reemplazar el esfuerzo físico de la terapia, sino que, además, aceleran la pronta recuperación del paciente. Estos hechos han llevado a muchos investigadores a entrar directamente en materia para desarrollar nuevos robots para rehabilitación. Desde este planteamiento, es necesario contar con revisiones bibliográficas donde se analicen y comparen las capacidades de dichos sistemas, con el objetivo que sea un punto de partida para futuras investigaciones. En la reciente literatura, existen revisiones relacionadas con los retos en el desarrollo de robots para rehabilitación de tobillo y pierna. Sin embargo, no se han abordado trabajos enfocados en la rehabilitación de cadera. Por tal motivo, en este artículo se comparan los robots en desarrollo y comerciales existentes con un enfoque a la cadera, señalando los retos actuales en este campo.

2. CLASIFICACIÓN DE LOS ROBOTS PARA REHABILITAR LA CADERA

Bajo la designación de *“robots para rehabilitar la cadera”* se agrupa una gama variada de robots con caracterís-

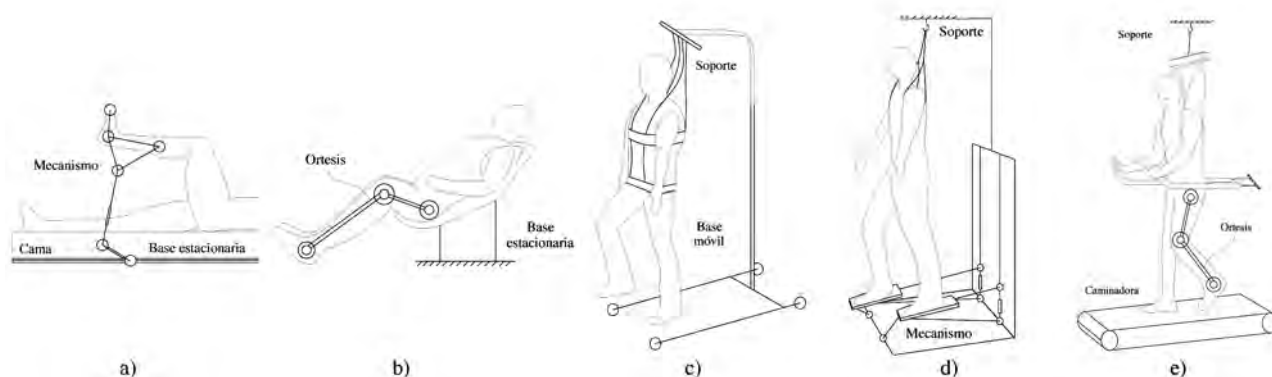


Fig. 1: Tipos de robots para rehabilitación de cadera: (a) basados en mecanismos externos, (b) basados en ortesis, (c) basados en el andar, (d) basados en mecanismos en los pies, (e) basados en ortesis y caminadora

ticas muy diferenciadas en cuanto a la morfología. En esta sección se estudia la situación actual de este campo, y de lo que ha llevado a dedicar un esfuerzo para mejorarla. Estos sistemas pueden ser agrupados de acuerdo a al principio de rehabilitación que ellos siguen, tal como se muestra en la Fig. (1).

2.1. ROBOTS BASADOS EN MECANISMOS EXTERNOS

Los robots basados en mecanismos externos han llevado a explorar nuevos tipos de diseños mecánicos destinados a transmitir movimiento a la cadera para alcanzar su máximo rango articular. En la Tabla 1 se presenta una revisión de dichos sistemas.

La principal ventaja de los mecanismos externos es su diseño simple y facilidad para manipular la cadera del paciente con movimientos controlados, flexionando la pierna del paciente lo máximo posible para alcanzar el completo rango de movimiento. Sin embargo, no están tan dotados como otros dispositivos en cuanto a actuadores y sensores. Desde esta perspectiva, se puede decir que estos dispositivos son los pioneros en la rehabilitación de cadera a bajo costo. Por ejemplo, un tipo de mecanismo externo utilizado es con cables paralelos, prueba de ello, los investigadores Surdilovic y Bernhardt desarrollaron el *String-Man* para la rehabilitación de la marcha con la particularidad

de corregir el balanceo de la postura y las funciones motrices del andar. De la misma manera Homma et al., muestran un similar diseño mecánico con cables paralelos pero con la diferencia de tener al paciente recostado sobre una cama.

Otro mecanismo externo popular de bajo costo es con actuadores lineales, prueba de ello, existe el prototipo llamado *Nexos* propuesto por Bradley et al. para asistir al terapeuta en la rehabilitación de cadera, tal como se muestra en la Fig. (2). Para Sun et al., el patrón de movimiento del sistema tiene que ser inspirado en la biomecánica de la pierna, desarrollando así un robot horizontal con actuadores lineales. Siguiendo la misma temática Wang et al., desarrollan un prototipo que sirve para movilizar ambas piernas de un paciente recostado sobre una cama de hospital. Por otra parte, existen propuestas de mecanismos para ser llevadas a cabo, tal es el

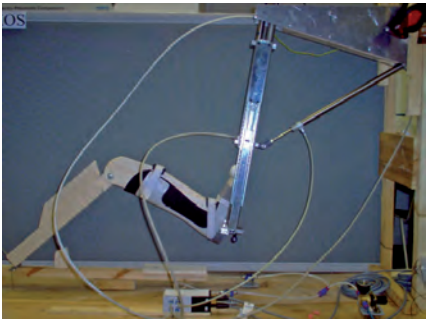


Fig. 2: Proyecto NeXOS (foto de cortesía del Dr. David Bradley)

caso de Wang et al., que proponen el diseño de un robot con actuadores lineales pero con un enfoque para ser instalado en una silla. También, Guzmán et al., proponen un mecanismo para aumentar el espacio de trabajo en los ejercicios de cadera. Asimismo, sugieren otro mecanismo con actuadores lineales para ser utilizado después de una fractura de fémur.

2.2. ROBOTS BASADOS EN ORTESIS

Los robots basados en ortesis son los mejores candidatos para desempeñar ejercicios terapéuticos a la cadera. El objetivo de estos dispositivos es el fortalecimiento de los músculos, así como mantener la movilidad y la coordinación del movimiento. En la Tabla 2 se presenta una revisión de dichos sistemas.

Los beneficios que ofrecen los robots basados en ortesis son múltiples: (1) pueden desempeñar el trabajo intenso de la terapia, (2) tienen un controlador de fuerza para regular la intensidad de los ejercicios, y (3) ofrecen una evaluación cuantitativa del progreso del paciente. Sin embargo, son dispositivos complejos que aún no son portátiles para ser llevados a la casa del paciente. Hay que subrayar que los robots basados en ortesis son considerados como dispositivos de imitación del movimiento, porque memorizan y reprodu-

Nombre del dispositivo	Compañía	Año de desarrollo	Tipo de trastorno	Situación actual	Pruebas	Grados de libertad	Tipo de accionamiento	Tipo de controlador
String-Man	-	2003	Discapacidad motriz	Prototipo	Experimentales	7	Motor de CD	ZMP
Universidad de Tsukuba	-	2002	Discapacidad motriz	Prototipo	Experimentales	4	Motor de CD	-
Nexos	-	2009	Lesión de médula espinal	Prototipo	Experimentales	2	Pistón neumático	-
Universidad de Harbin	-	2009	Enfermedad Cerebrovascular	Prototipo	Experimentales	1	Motor de CD	-
Universidad de Beijing	-	2011	Paraplejia Y Cuadriplejia	Prototipo	Experimentales	1	Motor de CD	-
Universidad de Yanshan	-	2009	Paraplejia	Propuesta	Simulaciones	3	-	-
Universidad Politécnica de Zacatecas	-	2013	Hemiplejia	Propuesta	Simulaciones	5	-	-
Universidad Politécnica de Zacatecas	-	2013	Fractura de fémur	Propuesta	Simulaciones	3	-	-

Tabla 1: Clasificación y comparación de los robots para rehabilitar cadera basados en mecanismos externos

Nombre del dispositivo	Compañía	Año de desarrollo	Tipo de trastorno	Situación actual	Pruebas	Grados de libertad	Tipo de accionamiento	Tipo de controlador
TEM XL2 type D	Yaskawa Electric	2005	Discapacidad motriz	Comercializado	Clínicas	2	Servomotor	Impedancia
LeHab	-	2012	Hemiplejia	Prototipo	Experimentales	2	Servomotor	PID
Universidad Tecnológica de Malasia	-	2010	Hemiplejia	Prototipo	Experimentales	1	Motor de CD	-
Physiotherabot	-	2011	Lesión de médula espinal	Prototipo	Experimentales	3	Servomotor	Impedancia e inteligente
Universidad de Mie	-	2009	Discapacidad motriz	Prototipo	Experimentales	3	Servomotor	Electromiografía
MotionMaker	Swortec SA	2006	Lesión de médula espinal	Comercializado	Clínicas	3	Servomotor	Electromiografía

Tabla 2: Clasificación y comparación de los robots para rehabilitar cadera basados en ortesis

cen los ejercicios enseñados por el terapeuta. El *TEM XL2 type D*, el *LeHab*, el prototipo desarrollado en la universidad Tecnológica de Malasia, y el *Physiotherabot* son ejemplos de robots basados en ortesis que imitan el movimiento, tal como se muestra en la Fig. (3).



Fig. 3: Physiotherabot (foto de cortesía del Dr. Erhan Akdogan)

Aunque mucho equipo para terapia física ha sido desarrollado, todavía el equipo de diagnóstico de la calidad

de los ejercicios de cadera es escaso. Frente a esta necesidad Komada et al., desarrollan un prototipo para diagnosticar la fuerza muscular en la articulación de la cadera. Por otro lado, el *MotionMaker* es un robot para monitoreo de la fuerza muscular y además cuenta con un sistema en tiempo real para fortalecer los músculos mediante electroestimulación, tal como se muestra en la Fig. (4). Estos robots basados en ortesis distinguen un uso especializado en el fortalecimiento muscular de la cadera, particularmente utilizando señales mioeléctricas de modo que, además de desempeñar ejercicios terapéuticos, la evaluación de los ejercicios parece facilitarse con el uso de un ordenador.

2.3. ROBOTS BASADOS EN EL ANDAR

Los robots basados en el andar son sistemas que siguen el caminado del paciente cuando ambula sobre una superficie, permitiéndole moverse bajo su



Fig. 4: MotionMaker (foto de cortesía de Swortec SA)

propio control. En la Tabla 3 se presenta una revisión de dichos sistemas.

En las terapias tradicionales para restaurar el movimiento de cadera, el terapeuta asiste y cuida al paciente de no sufrir una caída mientras camina durante largos periodos de tiempo. La ventaja de estos robots es la asistencia del paciente en todo momento para evitar que el paciente se caiga durante el caminado. Sin embargo, no todos los

Nombre del dispositivo	Compañía	Año de desarrollo	Tipo de trastorno	Situación actual	Pruebas	Grados de libertad	Tipo de accionamiento	Tipo de controlador
KineAssist	Kinea Design LLC	2005	Accidente cerebrovascular	Comercializado	Clínicas	1	Servomotor	Impedancia
WalkTrainer	Swortec SA	2006	Lesión de médula espinal	Comercializado	Clínicas	1	Servomotor	Impedancia
Universidad de Salford	-	2006	Hemiplejia	Prototipo	Experimentales	5	Músculo neumático	Inteligente
ReWalk	ARGO Medical	2006	Hemiplejia	Comercializado	Experimentales	2	Servomotor	Impedancia
BLEEX	DARPA	2006	Paraplejia	Comercializado	Clínicas	7	Servomotor	Híbrido
HAL	CYBERDYNE Inc.	2005	Paraplejia	Comercializado	Clínicas	7	Servomotor	Híbrido

Tabla 3: Clasificación y comparación de los robots para rehabilitar cadera basados en el andar

pacientes tienen la posibilidad de caminar libremente ó mover las piernas, lo que limita el uso de estos dispositivos. Hay que resaltar que, la mayoría de estos sistemas ya son comercializados y aceptados en varios centros de rehabilitación, tal es el caso del *KineAssist* ó el *WalkTrainer*, tal como se muestra en la Fig. (5).



Fig. 5: KineAssist (foto de cortesía de Kinea Design, LLC)

Aunque los sistemas basados en un robot móvil sujetando al paciente por medio de un arnés han tenido éxito, existen otros dispositivos basados en exoesqueleto que ayudan al caminar libre del paciente. Un exoesqueleto es una estructura para ser usada sobre el cuerpo humano a manera de prenda de vestir y tiene la ventaja de inducir ó aumentar la fuerza de alguna articulación. Estos “trajes robóticos” aunque fueron inicialmente creados para propósitos militares, han demostrado devolver el caminar a una persona con paraplejia, por lo que se vuelven atractivos de desarrollar en centros de investigación y el sector privado. Además, este tipo de sistemas también pueden ser usados en la rehabilitación de cadera para asistir en el caminar libre del paciente. Algunos exoesqueletos se encuentran en

desarrollo, tal es el caso de Costa et al., que propuso un traje con músculos artificiales de potencia. Por otro lado, existen exoesqueletos que se encuentran comercializados, entre los más populares a la fecha se encuentran el ReWalk, BLEEX y HAL.

2.4. ROBOTS BASADOS EN MECANISMOS EN LOS PIES

Los robots basados en mecanismos en los pies son aquellas máquinas que simulan diferentes patrones de caminar mediante dos plataformas programables. En la Tabla 4 se presenta una revisión de dichos sistemas.

La ventaja de estos robots es su sencillo diseño mecánico para inducir movimiento en los pies del paciente, por lo general, son sistemas con pocos actuadores que proporcionan un movimiento constante en el plano sagital. Sin embargo, los patrones de movimiento son preestablecidos y no es posible cambiar el tipo de caminar. Algunos ejemplos de este tipo son el LokoHelp, el GangTrainer GT I y el HapticWalker, tal como se muestra en las Figs. (6) y (7).



Fig. 6: LokoHelp (foto de cortesía de LokoHelp Group Germany)

Estos sistemas aunque son mecánicamente funcionales no tienen la capa-

cidad de cambiar el patrón de caminar. Bajo esta perspectiva, los investigadores Yoon et al., propusieron un mecanismo en los pies para variar la velocidad y el patrón de caminar. Además, los patrones de caminar fueron diseñados por terapeutas para desempeñar una marcha natural.



Fig. 7: GangTrainer GT I (foto de cortesía de Reha-Stim)

2.5. ROBOTS BASADOS EN EXOSQUELETO Y CAMINADORA

Los robots basados en exoesqueleto y caminadora son sistemas enfocados en el entrenamiento y mejora de la movilidad funcional de la marcha. Muchos sistemas han sido desarrollados con el objetivo de reducir el esfuerzo físico de la terapia. Usualmente estos sistemas están basados en un exoesqueleto combinado con una caminadora. En la Tabla 5 se presenta una revisión de dichos sistemas.

El beneficio de estos sistemas es un caminar natural aun cuando el paciente no tiene fuerza muscular en las

Nombre del dispositivo	Compañía	Año de desarrollo	Tipo de trastorno	Situación actual	Pruebas	Grados de libertad	Tipo de accionamiento	Tipo de controlador
LokoHelp	LokoHelp Group	2008	Lesión de médula espinal	Comercializado	Clínicas	1	Motor de CD	-
GangTrainer GT I	Reha-Stim	2000	Hemiparésis	Comercializado	Clínicas	1	Motor de CD	-
HapticWalker	-	2004	Discapacidad motriz	Prototipo	Clínicas	3	Motor de CD	-
Universidad Nacional de Gyeongsang	-	2010	Discapacidad motriz	Prototipo	Clínicas	6	Actuador lineal	PID

Tabla 4: Clasificación y comparación de los robots para rehabilitar cadera basados en mecanismos en los pies

Nombre del dispositivo	Compañía	Año de desarrollo	Tipo de trastorno	Situación actual	Pruebas	Grados de libertad	Tipo de accionamiento	Tipo de controlador
Lokomat	Hocoma	2000	Lesión de médula espinal	Comercializado	Clínicas	3	Servomotor	Híbrido
ReoAmbulator	Motorika	2004	Lesión de médula espinal	Comercializado	Clínicas	4	Servomotor	Híbrido
ARTHuR	-	2002	Lesión de médula espinal	Prototipo	Clínicas	3	Motor de CD	Impedancia
POGO and PAM	-	2006	Discapacidad motriz	Prototipo	Experimentales	3	Servomotor	Impedancia
LOPES	-	2007	Lesión de médula espinal	Prototipo	Clínicas	3	Servomotor	Impedancia
ALEX	-	2007	Discapacidad motriz	Prototipo	Clínicas	3	Motor de CD	Par calculado
ALEX II	-	2013	Discapacidad motriz	Prototipo	Experimentales	3	Motor de CD	Híbrido

Tabla 5: Clasificación y comparación de los robots para rehabilitar cadera basados en exoesqueleto y caminadora

piernas. Este tipo de terapia estimula al sistema nervioso central, mejora la circulación de la sangre, y mantiene las articulaciones flexibles. Sin embargo, todavía no son sistemas portátiles para ser utilizados en el hogar y requieren la supervisión de un experto. No obstante, estos sistemas ofrecen más ventajas que desventajas, prueba de ello existe el sistema Lokomat que hasta la fecha, es el más evaluado clínicamente y fue el primero de su clase en comercializarse, tal como se muestra en la Fig. (8). Otro sistema comercial es el ReoAmbulator que fue diseñado para asistir a pacientes con hemiplejía.



Fig. 8: Lokomat (foto de cortesía de Hocoma, Switzerland).

Aunque los sistemas comerciales ya son una realidad en los centros de rehabilitación, existen sistemas robóticos todavía en desarrollo para mejorar los patrones de caminado, el diseño mecánico del sistema, la comodidad del

paciente, aumentar la seguridad y hacer el sistema portable, los cuales son ARTHuR, POGO and PAM, LOPES, ALEX y ALEX-II, tal como se muestra en la Fig. (9).

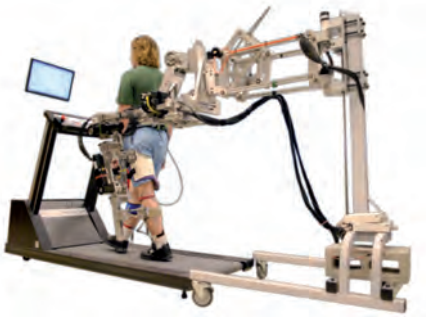


Fig. 9: ALEX-II (foto de cortesía del Dr. Sunil Agrawal).

3. RETOS ACTUALES

En este trabajo, se revisaron 31 sistemas robóticos para la rehabilitación de cadera, de los cuales más de la mitad no han sido comercializados. Además, estos robots disponibles en el mercado no han sido desarrollados aún para ser usados en el hogar. Tal vez, algunas de las principales razones son los costos, la falta de evidencias clínicas y la asistencia remota de un terapeuta para evaluar las terapias, así como la portabilidad de estos dispositivos. Por otro lado, los robots desarrollados para rehabilitar la cadera en los últimos años han llevado

a replantear nuevos retos en el diseño mecánico de ciertos aspectos que impactan directamente en el funcionamiento y la versatilidad del dispositivo. Este cuestionamiento parte esencialmente de cuatro líneas de análisis que son: la implementación mecánica, la interfaz clínica, los sensores y los algoritmos de control.

3.1. IMPLEMENTACIÓN MECÁNICA

El diseño mecánico completo de un robot para reproducir los movimientos del cuerpo humano es un reto. Replicar la complejidad del completo rango de movimiento de la articulación de la cadera es difícil debido al peso y a las dimensiones. Como diseñador, el reto es construir los prototipos con los actuales componentes en el mercado para reducir los costos. Otro de los grandes retos es la seguridad debido a la interacción entre robots y pacientes. Desde este planteamiento, se enfatiza el hecho que un robot como puede ser beneficioso también puede causar un daño. Así pues, es necesario contar con sistemas inteligentes de control que evalúen y supervisen los movimientos en tiempo real para aumentar la seguridad de las terapias de rehabilitación. Otros factores para aumentar la seguridad es utilizando mecanismos redundantes, limitar la velocidad, aumentar el número de sensores de fuerza e incluir un sistema a prueba de fallas.

3.2. INTERFAZ CLÍNICA

Las interfaces son otro reto clave para llegar a desarrollar nuevos dispositivos futuros. Desde la perspectiva de los dispositivos hápticos, un robot para rehabilitación de cadera debe estar dotado de interfaces que hagan su manejo más simple para los usuarios no expertos y sin ningún tipo de familiaridad con el sistema. Los terapeutas que describen el tratamiento terapéutico deben estar de acuerdo con las nuevas interfaces. En este sentido, nadie quiere construir un dispositivo para ser puesto en una oficina sin usar. Por otra parte, otro reto es la asistencia remota para desempeñar terapias de rehabilitación a distancia. Para esto, es necesario desarrollar protocolos de comunicación utilizando internet para asistir en tiempo real al paciente, con la opción de que el dispositivo sea utilizado por el propio paciente una vez programados por el terapeuta.

3.3. SENSORES

La tendencia actual en los robots para rehabilitación es de usar señales mioeléctricas. Hay una gran variedad de formas para obtener este tipo de señales, ya sea por métodos invasivos y no invasivos. Con el avance de la neurociencia es cada vez más fácil obtener señales directamente de los músculos. Por esta razón, los electrodos de superficie han sido una de las técnicas más populares para obtener estas señales de control. El tercer reto en los robots para rehabilitación de cadera es el de migrar de los sensores de fuerza a analizadores de señales mioeléctricas. Las principales ventajas es que proporcionan más información sobre el estado actual de los músculos para analizar más fácilmente el progreso del paciente.

3.4. ALGORITMOS DE CONTROL

El último reto es la implementación de nuevas técnicas de control. La mayoría de los dispositivos utilizan el control de impedancia que hasta la fecha es el método más aceptado en fisioterapia para proporcionar movimientos seguros al paciente. Sin embargo, es necesario proponer nuevas técnicas de control en las cuales se involucren señales mioeléctricas para el seguimiento de trayectorias. Por otra parte, es necesario aportar nuevas ventajas al proceso de rehabilitación activa mediante la implementación de nuevas técnicas de

control combinadas para obtener distintos beneficios en el mismo dispositivo.

4. CONCLUSIÓN

La robótica en la rehabilitación de cadera y más particularmente la que se dirige al desarrollo de robots, constituye un campo adecuado para el estudio de nuevos diseños mecatrónicos que son variados y corresponden a distintos tipos de padecimientos. Todos estos ejemplos de la literatura ilustran una pequeña parte de las potencialidades de los robots para la rehabilitación de cadera. Ya se traten de robots basados en ejercicios terapéuticos ó en la marcha, son un campo prometedor. Pero estos trabajos están en sus comienzos y, en un futuro inmediato, este sector hará posible que las terapias de rehabilitación para cadera sean desempeñadas en la comodidad del hogar bajo la asistencia remota de un terapeuta.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto es financiado por la Universidad Politécnica de Zacatecas a través de una beca doctoral para el primer autor. Los autores aprecian el apoyo por parte de la Universidad Politécnica de Zacatecas (UPZ) y el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (Cenidet). Además, agradecemos el apoyo brindado por la DGEST en el desarrollo del proyecto "Sistemas Biomecatrónicos para Rehabilitación de Extremidades Inferiores" con clave ProIFOEP 4534.12-P.

PARA SABER MÁS

1. Akdogan E, Adli M. "The Design and Control of a Therapeutic Exercise Robot for Lower Limb Rehabilitation: Physiotherobot". *Mechatronics*. Abril 2011. Vol.21-3. p.509-522. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2011.01.005>).
2. Banala K, Kim S, Agrawal S, et al. "Assisted Gait Training with Active Leg Exoskeleton (ALEX)". *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. Febrero 2009. Vol.17-1. p.2-8. ISBN: 978-1-4244-2882-3. (<http://dx.doi.org/10.1109/BIOROB.2008.4762885>).
3. Bouri M, Stauffer Y, Scmitt C, et

- al. "The WalkTrainer: A Robotic System for Walking Rehabilitation". En: *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics* December 17-20, Kunming, China. 2006. p.1616-1621. ISBN: 1-4244-0570-X. (<http://dx.doi.org/10.1109/ROBIO.2006.340186>).
4. Bradley D, Acosta C, Hawley M, et al. "NEXOS - The design, development and evaluation of a rehabilitation system for the lower limbs". *Mechatronics*. Marzo 2009. Vol.19-2. p.247-257. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2008.07.006>).
5. Homma K, Fukuda O, Nagata Y, et al. "Study of a Wire-driven Leg Rehabilitation System". En: *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (Japón 28 Septiembre al 2 de Octubre de 2004)*. 2004. p.1668-1673. ISBN: 0-7803-8463-6 (<http://dx.doi.org/10.1109/IROS.2004.1389635>).
6. Komada S, Hashimoto Y, Okuyama N, et al. "Development of a Biofeedback Therapeutic-Exercise-Supporting Manipulator". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Octubre 2009. Vol.56-10. p.3914-3920.
7. Metrailler P, Blanchard V, Perrin I, et al. "Improvement of rehabilitation possibilities with the MotionMaker TM". En: *The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (Pisa 20-22 February 2006)* BioRob2006. p.359-364. ISBN: 1-4244-0040-6. (<http://dx.doi.org/10.1109/BIOROB.2006.1639113>).
8. Schmidt H. "HapticWalker - A Novel Haptic Device for Walking Simulation". En: *Proceedings of EuroHaptics 2004, Munich Germany, June 5-7. 2004*. p.60-67.
9. Yoon J, Novandy B, Yoon C, et al. "A 6-DOF Gait Rehabilitation Robot With Upper and Lower Limb Connections That Allows Walking Velocity Updates on Various Terrains". *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. Abril 2010. Vol.15-2. p.201-215. (<http://dx.doi.org/10.1109/TMECH.2010.2040834>).
10. Zoss A, Kazerooni H, Chu A. "Biomechanical Design of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX)". *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. Abril 2006. Vol. 11-2. p. 128-138. (<http://dx.doi.org/10.1109/TMECH.2006.871087>).

IBN FIRNAS: Una figura olvidada en la historia de la ciencia de las máquinas, los mecanismos y la fabricación



Pablo Eduardo Romero-Carrillo, Rubén Dorado-Vicente, Francisco Alberto Díaz-Garrido y Rafael López-García
Universidad de Jaén

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/6937>

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años está adquiriendo gran relevancia una disciplina, conocida como Historia de la Ciencia de las Máquinas y los Mecanismos o MMS (del inglés, *Mechanism and Machine Science*), dedicada al análisis, mediante las técnicas y los conocimientos tecnológicos actuales, de máquinas y mecanismos que se han diseñado y fabricado a lo largo de la historia. Es obvio que la preservación y el estudio de la documentación histórica referente a ingenios mecánicos del pasado son necesarios e imprescindibles, y son muchos los investigadores que están demandando que el diseño de esos mecanismos sea considerado incluso como patrimonio cultural. Además, un examen técnico y científico de estas máquinas y mecanismos del pasado puede proporcionarnos datos de interés, no sólo para la propia enseñanza de la ingeniería mecánica, sino también para el desarrollo de nuevas soluciones a problemas y retos actuales o futuros.

España y los ingenieros españoles ocupan un lugar privilegiado en la historia de la MMS [1]. Una prueba de ello son *“Los veintitún libros de los ingenios y las máquinas”*, obra enciclopédica encargada por el rey Felipe II, que según **García Tapia** *“es el máximo exponente de la ingeniería renacentista en hidráulica desde los tratados de Leonardo Da Vinci”*. Este manuscrito del siglo XVI fue inicialmente atribuido al italiano **Juanelo Turriano**, aunque posteriores

estudios lo atribuyen al aragonés **Pedro Juan de Lastanosa**. En cualquier caso, hay que resaltar que en aquel momento histórico, España era la mayor potencia mundial y en la corte de Felipe II se encontraban los mejores ingenieros de Europa.

Pero no todos los grandes ingenieros vinieron de fuera de España. Al navarro **Jerónimo de Ayanz y Beaumont** (1553-1613) un privilegio de invención de 1606, firmado por Felipe III, le reconocía hasta 48 inventos. El tinerfeño **Agustín de Betancourt y Molina** (1758-1824) y el hispano-mexicano **José María Lanz y Zaldívar** (1764-1839) publicaron en 1808 un *“Ensayo sobre la composición de las máquinas”*, considerado el primer tratado moderno sobre máquinas y el primer libro que propone para la clasificación de las máquinas un criterio basado en la transformación del movimiento. Por todo lo dicho hasta ahora, parece que el diseño y fabricación de ingenios mecánicos en España se inició en el siglo XVI, aunque no fue así.

Durante la Edad Media, la península ibérica también capitaneó el avance técnico y científico en Europa y en el mundo [2]. El florecimiento de la ciencia y del conocimiento en Al-Ándalus se produjo fundamentalmente en su capital, Qurtuba (Córdoba). Allí destacó, por encima de otros, el humanista **Abbás Ibn Firnás**. Poeta, músico, astrólogo, alquimista, ingeniero..., éstas fueron algunas de sus ocupaciones durante su vida cortesana. Las facetas artísticas de Ibn Firnás han sido estudiadas y valoradas en gran medida [3,4]. Sin embargo, salvo alguna excepción [5], las facetas ingenieriles han pasado prácticamente inadvertidas para la historia de la MMS.

En el presente artículo se presenta una amplia visión ingenieril de los tra-

bajos de Ibn Firnás, junto a infografías de elaboración propia que servirán al lector para entender mejor la dimensión del personaje. El artículo tiene la siguiente estructura. En la sección 2 se aportarán unas breves notas biográficas. En la sección 3 se describirán algunas de las máquinas y mecanismos desarrollados por Ibn Firnás. En la sección 4 se mostrará la íntima relación entre Firnas y la fabricación. Finalmente, en la sección 5 se presentarán las conclusiones.

2. BREVES NOTAS BIOGRÁFICAS

La principal fuente de información de la figura de Ibn Firnás es el *Muqtabis*, una obra de varios tomos escrita por el cronista **Ibn Hayyán** y considerada por los entendidos como la crónica más valiosa de la que se dispone en la actualidad para conocer el periodo omeya de al-Andalus [6]. Referencias a Ibn Firnás aparecen tanto en el tomo II como en el tomo III del *Muqtabis*. Otra fuente de información la proporciona las crónicas de su rival, **Mu'min Ibn Sa'id**.

Se sabe que su nombre completo era Abú-l-Qásim ‘Abbás Ibn Firnás Ibn Wardás, y que fue *mawlá* omeya de alcurnia bereber. Ibn Firnás nació en Izn-Rand Onda, actual Ronda (Málaga), en el 810 d.C., pero vivió prácticamente toda su vida en Córdoba, que en aquel momento era la capital de al-Andalus. Allí murió en el 887 d.C. Según el *Muqtabis* trabajó al servicio de tres emires omeyas: al-Hákam I, que gobernó entre los años 796 y 821 d.C.; ‘Abd al-Rahmán II, que fue emir entre el 821 y el 852 d.C.; y Muhámmad I, que hizo lo propio entre los años 852 y 886 d.C [7].

Aunque Firnás aparece en algunas crónicas de la época de al-Hákam I, fue durante el emirato de ‘Abd al-Rahmán II cuando se ensalza como gran erudito de la corte. Su primera gran hazaña consistió en descifrar el complicado *Kitáb al-arúd*, tratado de retórica compuesto por un famoso filólogo oriental, que nadie en al-Andalus podía entender. Después de examinarlo detenidamente, Firnás llegó a la conclusión de que para comprenderlo correctamente era ne-

cesario leer otra obra previa, conocida como *“El libro de los tapices”*. A partir de ese momento, se ganó la confianza y el respeto del emir, que lo mantuvo en su séquito junto a otros intelectuales de la talla de **Marwan b. Gazwan, Ibn al-Samir o Yahya al Gazal** [2].

Aparece en las crónicas como astrólogo, filósofo, poeta, músico, presdigitador, alquimista e inventor. Estas capacidades le valieron el sobrenombre de *“hakim al-Andalus”* (el sabio de al-Andalus). Hasta el emir reconoció su valía, siendo el único sabio en la corte (junto a **Ibn al-Samir**) en tener asignada doble paga, una por poeta y otra por científico [8]. Los poemas que se conservan de Ibn Firnás están recogidos por Elias Terés en la referencia [3]. Por otro lado, era también notables su fortaleza y destreza física, que utilizaba en sus trucos de magia, hasta tal punto que su otro apodo era *“el hijo del león”*.

En su faceta científica, Abbás Ibn Firnás responde al prototipo de investigador pluridisciplinar tan común en la Edad Media, cuya excepción podría ser **Al-Jazari** (que se dedicó exclusivamente a diseñar y fabricar máquinas y mecanismos). Ibn Firnás trabajó en diversos campos: diseño y creó ingenios mecánicos, consiguió técnicas de mejora en procesos de obtención de vidrio y fabricó unas *“piedras de lectura”*. En las siguientes secciones, se presentan, una a una, sus principales aportaciones, tanto a la historia de la ciencia de las máquinas y mecanismos como a la historia de los procesos de fabricación.

3. MÁQUINAS Y MECANISMOS DE IBN FIRNÁS

En el campo de las máquinas y mecanismos, se sabe que diseñó y fabricó varios ingenios: un planetario, varios relojes y un astrolabio. Aunque sin lugar a dudas, su logro más conocido e importante es el del ingenio volador [9], que lo convierte seguramente en el primer humano en realizar un vuelo sin motor, mucho antes que **Eilmer de Malmesbury** o que los hermanos **Wright** [10].

3.1. PLANETARIO

Ibn Firnás construyó en una sala de su casa lo que puede pasar por ser el primer planetario de la historia. Las crónicas cuentan que no sólo era una máqui-

na gigante que mostraba el movimiento de los planetas (Figura 1), sino que los invitados quedaban atónitos con la aparición de nubes, relámpagos y truenos generados por mecanismos escondidos en el sótano de la habitación [7].



Fig. 1: Infografía del planetario que Ibn Firnás construyó en su residencia

3.2. CLEPSIDRA CON AUTÓMATAS

En la ciudad palacio de al-Zahra en Córdoba han aparecido recientemente restos de tres relojes de sol datados en el siglo X. Se han encontrado en el edificio ubicado por encima de la mezquita y todo hace entender que, por su situación, servirían para avisar de modo constante a los almuédanos del alminar para que llamasen a la oración durante el día. Pero, ¿cómo se sabía la hora de la oración durante la noche?

Se sabe que Ibn Firnás construyó varios relojes. Al menos uno de ellos era solar, y lo construyó para Abd al-Rahmán II. Otro, dedicado a Muhammad I, era una *clepsidra* [8]. La palabra *clepsidra* viene del griego, y significa *“ladrón de agua”*. Es un reloj de agua, con un fundamento similar al reloj de arena, que viene a solucionar el problema de la inoperancia de los relojes de sol durante la noche. En una *clepsidra* el tiempo se determina a partir de la velocidad con la que el agua cae de un depósito a otro (Figura 2). El nivel de agua en el depósito inferior indica la hora. El reloj de agua más antiguo que se conserva se encontró en el templo de **Amen-Ra**, en Karnak (Egipto) y data de 1417-1379 a.C.

La *clepsidra* que construyó Ibn Firnás era una *minqana* (máquina) con autómatas, que regaló al emir para que éste pudiera saber las horas de la oración en cualquier circunstancia, sin necesidad de observar directamente el firmamento. Así, **Al-Hasán b. Muhammad b. Mufarrich** refiere: *“este Abbás b. Firnás era un sabio, un poeta que no paraba en sus invenciones cien-*

tíficas: ideó objetos regios y aparatos admirables que tenían hermoso aspecto y movimientos prodigiosos que llenaban y vaciaban las albercas y otros lugares. Le auxilió en la construcción de sus autómatas y en la disposición de la maquinaria Asbag, alarife de los carpinteros de Palacio, a quién enseñó su funcionamiento [...]”. Cuando estuvo concluido y lo vio el emir Muhammad, quedó maravillado y se alegró. Y dijo: dad a Asbag tal cantidad y regalos y a Ibn Firnás se le dará el doble por habernos descuidado de él” [8].

Algo posterior a Ibn Firnás en el tiempo es el ingeniero **Azarquiel** (m.1100), quien fabricó en Toledo, junto a la puerta de los Tintoreros, un reloj anafórico de grandes dimensiones. Para su funcionamiento hubo de construir dos grandes estanques de agua a la orilla del Tajo que indicaban las horas del día y de la noche, sin posibilidad de error. Ambos estuvieron funcionando hasta que, en el año 1133, Alfonso VII autorizó a un astrónomo a que desmontara uno de ellos para ver cómo funcionaba y éste no supo averiguarlo ni reconstruirlo [8]. El dispositivo también era capaz de mostrar las fases de la luna, de gran importancia en el islam, y problema no baladí.

Firnás fue contemporáneo de los tres hermanos **Banu Musa**, famosos por su *“Tratado en sistemas e ingenios”*. Ellos trabajaron en la Casa de la Sabiduría de Bagdad, la otra ciudad del mundo con la que rivalizaba Córdoba en desarrollo científico y tecnológico. Por encargo del califa Al-Mamun, tradujeron y recopilaron obras grecolatinas que se conservaban, a las que añadieron invenciones propias. Las ideas establecidas por este tratado sirvieron de base para diseños realizados por ingenieros árabes posteriores. Quizás el más destacable durante el periodo que conocemos como Edad



Fig. 2: Infografía de una pequeña clepsidra o reloj de agua

Media sea el ingeniero Al-Jazari, autor del “*Libro del conocimiento de los ingenios y elementos mecánicos*”, que data de 1206 d.C [1].

3.3. ESFERA ARMILAR

Utilizando sus conocimientos de astrología, Ibn Firnás construyó una esfera armilar o astrolabio esférico que regaló al emir Abd al-Rahmán I. El astrolabio era un modelo celeste (todavía geocéntrico) que se utilizaba para mostrar el movimiento aparente de las estrellas alrededor de la Tierra. Los astrolabios se construían sobre un armazón de círculos graduados, cada uno de los cuales representaba el ecuador, la eclíptica, los meridianos y los paralelos astronómicos. En el caso del astrolabio de Firnás, estas esferas eran de vidrio.

En unos versos que Ibn Firnás dedicó al emir en el acto de entrega de su regalo y que han llegado a nuestros días, éste se compara con el propio **Ptolomeo**, al que considera superado tras la construcción de su instrumento [4]. Para construir el mismo, Ibn Firnás se valió de las tablas astronómicas del Sinhind, de origen indio, que se encontraban en la gran biblioteca de Palacio y, según cuentan las crónicas, solicitó en repetidas ocasiones al emir, hasta finalmente conseguir acceso a ellas [8].

Algo más tarde, en el siglo XI, se desarrolló en al-Andalus un nuevo mecanismo con la misma función del astrolabio, conocido como ecuatorio. Sus inventores fueron, a la sazón, **Ibn al-Samh**, **Arzarquiel** y **Abu Salt**. Los dos primeros se encuentran descritos en los “*Libros del saber de la astronomía*”, bajo el título de “*Libro de las láminas de los siete planetas*”.

3.4. MECANISMO VOLADOR

Muchos textos de aeronáutica, al hablar del primer hombre que consiguió volar, atribuyen dicha hazaña a un monje británico, de nombre **Eilmer**, que saltó en el año 1010 desde la torre de la abadía de Malmesbury. La torre tenía 80 metros de altura, y el monje logró volar cerca de 200 metros antes de perder el control y estrellarse contra el suelo. Sin embargo, alguien había realizado una prueba similar un par de siglos antes: Ibn Firnás [10].

Los cronistas **Ibn Sa'id** y **Maqqari** relatan como Ibn Firnás diseñó y construyó un mecanismo volador, después

de estudiar detenidamente la dinámica del vuelo de las aves. Montado en él se lanzó desde la Ruzafa de Córdoba (palacio construido por Abderramán I a imitación de su Siria natal), logrando planear durante 10 minutos y recorriendo una considerable distancia (Figura 3). Al tomar tierra tuvo ciertos problemas porque, según dice uno de los cronistas, “*no se había dado cuenta de que los pájaros, al posarse, se valen de su cola, y él no se había fabricado cola*” [9].

El inglés **Roger Bacon**, otro empirista redomado y gran estudioso de la ciencia árabe, describió en 1260 d.C. en su obra “*Admirable poder y potencia del arte y de la naturaleza*” dos maneras mediante las cuales el hombre podría volar. Una de ellas, conocida como “*ornithopter*”, consistía precisamente en imitar el vuelo de las aves. También destacaba en su estudio la importancia de la cola en la toma de tierra. Curiosamente, parece que Bacon realizó una estancia de investigación en Córdoba.



Fig. 3: Infografía del ingenio volador de Ibn Firnás

4. IBN FIRNÁS Y LA FABRICACIÓN

En el campo de los procesos de fabricación, se centró principalmente en la fabricación de vidrio transparente. Es cierto que el vidrio ya se obtenía en época romana, pero los cronistas destacan que Ibn Firnás consiguió un vidrio de una transparencia nunca antes alcanzada. También desarrolló una técnica para facetar y cortar el cristal de cuarzo, que hasta entonces era exportado hasta Egipto, uno de los pocos lugares que, en aquel momento, poseía dicha tecnología [7]. Quizás su pasión por el vidrio y el cristal estaba relacionada con su interés con la óptica: fabricó unas lentes ópticas de ampliación para facilitar la lectura.

4.1. FABRICACIÓN DEL VIDRIO

Son varios los poemas y las crónicas que hacen referencia a la gran relación

entre Ibn Firnás y el desarrollo de la industria del vidrio y el cristal de cuarzo en al-Ándalus.

Hubo un momento en la corte omeya de Córdoba, en que se empezó a extender la costumbre de emplear vajillas de vidrio en los banquetes oficiales, en lugar de las tradicionales vajillas de oro y plata, utilizadas hasta entonces. El causante de esta moda, según al-Maqqari, fue el poeta **Ziryab** que, desterrado de Bagdad, vino a Córdoba en busca de la protección de los Omeyas, trayéndose con él algunas de las costumbres de la corte abbasí. Esta misma fuente, al-Maqqari, hace referencia a Abbás Ibn Firnás, del que dice que descubrió los secretos del cristal y fundó numerosas fábricas en al-Ándalus.

Del poeta **al-Buhturi** nos han llegado versos en los que se glosa como el vidrio obtenido por Ibn Firnás era tan transparente que sólo se veía el contenido líquido y apenas se apreciaba el continente. Se entiende que lo que Ibn Firnás descubrió fue un método para eliminar impurezas de óxido de hierro en la sílice, principales causantes de la coloración verdosa del vidrio común, obteniendo así un vidrio transparente, como el que es usado en la actualidad.

Según **Ibn Hayyan**, fue “*el primer andalusí en desarrollar la industria del vidrio a partir de la piedra*”. Algunos autores actuales asocian la palabra “piedra” al uso de ciertos minerales, como el sodio y el potasio, que actuaban como fundentes y por tanto, reducían la temperatura de fusión del vidrio. De esta manera, efectivamente Ibn Firnás hubiera contribuido al desarrollo de la industria del vidrio local.

4.2. MECANIZACIÓN DEL CUARZO

A pesar de las grandes reservas de cristal de cuarzo en la península ibérica, Córdoba exportaba el cristal a Egipto, ya que no disponía de la tecnología necesaria para realizar el corte ella misma. Ibn Firnás introdujo en *al-Andalus* la técnica del corte del cristal de roca, la variedad más transparente del cuarzo [7].

4.3. INVENCIÓN ÓPTICA: “PIEDRAS DE LECTURA”

Sus profundos conocimientos de los procesos de elaboración del vidrio también le valieron para experimentar con las lentes, en busca de elementos

ópticos que sirvieran para amplificar la escritura.

Ibn Firnas es una de las pocas personas que se dedicó a estudiar la óptica durante el primer milenio de nuestra era y fue el primero en la España islámica [10]. Aunque hay alguna referencia histórica anterior a artilugios que servían para mejorar la visión, las lentes de Ibn Firnás son las primeras que tienen nombre propio: “*piedras de lectura*”. Eran piezas de vidrio muy transparente y pulido, con forma circular, que servían para facilitar la lectura de los manuscritos de la época (figura 4). La invención de las gafas, propiamente dichas, se atribuye a **Salvino D’Armato**, en 1284.



Fig. 4: Piedras de lectura en el Museo de Óptica Zeiss, en Oberkochen (Cortesía de Zeiss)

5. CONCLUSIÓN

El presente artículo es el primer trabajo que aborda la figura del ingeniero andalusí **Abbas Ibn Firnás** desde el prisma de la Historia de las Máquinas y los Mecanismos (HMM), y que intenta ponderar el calibre de sus innovaciones en relación a los avances introducidos por otros ingenieros de su época, tanto occidentales como orientales.

En una primera aproximación a la figura de Ibn Firnás, se intuye una figura de una gran relevancia científica y tecnológica. De hecho, algunos autores lo consideran como el más completo autodidacta en Europa anterior a Leonardo [7]. Ante esta afirmación, la pregunta

siguiente sería ¿por qué no se le da el peso y la importancia histórica que le corresponde? Quizás se deba a que no se han conservado documentos escritos en primera persona por el propio Ibn Firnás, al estilo de los hermanos Banu Musa o de Al-Jazari.

Sin embargo, gracias a que Ibn Firnás se convirtió en un personaje eminente en la corte de Qurtuba, han llegado a nuestros días números crónicas que describen distintos ingenios diseñados y fabricados por el ingeniero andalusí: planetarios, clepsidras y esferas armilares. También se tiene constancia fiel de los avances que introdujo en la industria del vidrio y en la mecanización del cuarzo, que supusieron un desarrollo tecnológico y económico para al-Andalus.

Quizás el artefacto más conocido de Ibn Firnás lo constituye su ingenio volador, que lo llevó a planear varios cientos de metros desde una torre de un palacio de Córdoba. Esta hazaña es conmemorada en la actualidad en varios lugares del mundo: en Bagdad (Irak), un aeropuerto lleva su nombre, y una estatua en su honor preside la rotonda de acceso al mismo; en Córdoba (España), un puente sobre el río Guadalquivir, que forma parte de la nueva ronda de acceso al aeropuerto de Córdoba fue bautizado por su proyectista, D. **José Luis Manzanares Japón** (ingeniero y catedrático de estructuras de la Universidad de Sevilla) como “*punto Ibn Firnás*” (figura 5). Para el Emirato de Abu-Dhabi, *Rolls-Royce* ha fabricado recientemente una serie limitada de 5 unidades de su modelo Ghost en honor a Firnás (Firnás Motif Edition). En la Figura 6 se puede observar el logotipo serigrafado en su salpicadero, diseñado por **Khadim Al Helli**.

Salvo las excepciones indicadas en el párrafo anterior, no deja de sorprender la poca relevancia actual de Ibn Firnás, tanto en occidente en general, como en España en particular. Sirva de

metáfora de ese desconocimiento el hecho de que la ciencia eligiera su nombre para bautizar un cráter en La Luna, aunque justo en la cara oculta del satélite: **Abbás Ibn Firnás** está allá arriba, girando en su planetario, con su ingenio volador, pero casi nadie puede verlo. Los autores esperan que el presente trabajo sirva para dar algo de luz a su figura.



Fig. 6: Salpicadero del Rolls Royce “Ghost Firnas”, automóvil del cual se han fabricado sólo 5 unidades para todo el mundo (Cortesía de Rolls-Royce).

PARA SABER MÁS

- [1] Bautista-Paz E, Echávarri-Otero J, Ceccarelli M et al. “A Brief Illustrated History of Machines and Mechanisms”. Springer. 2010. <http://dx.doi.org/10.1007/978-90-481-2512-8>
- [2] Samsó J. “Ciencia de los antiguos en Al-Ándalus”. Ed. Mapfre. Madrid, 1992.
- [3] Terés E. “Abbas Ibn Firnas”. Al-Andalus. 1960. Vol. 25-1. p. 239.
- [4] Rius M. “El sabio total: Ibn Firnás”. Revista Jábega. Centro de Publicaciones de la Diputación de Málaga. 2008. Vol. 97. p. 9-13.
- [5] Aginaga-García J, Petuya-Arcocha V, Pérez-Cerdán JC et al. “Recopilación de documentación histórica sobre ingeniería mecánica para el Proyecto Europeo thinkMOTION”. XIX Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. Castellón. Noviembre 2012.
- [6] Molina L. “Ibn Hayyán, Crónica de los emires Alhakam I y Abdarrahman II entre los años 796 y 847 (Almuqtabis II-1)”. Al-Qantara. 2003. Vol. 24-1. p. 223-238.
- [7] Dewey J. “Abbas Ibn Firnas”. Inventors and Inventions: Great Lives from History. Editor: Alvin K. Benson. Salem Press. 2010.
- [8] Vernet J. “Un par de notas sobre la ciencia y la técnica de la España musulmana”. Revista de Estudios Regionales. 1981. Extraordinario, volumen III. p. 94-106.
- [9] Terés E. “Sobre el vuelo de Abbas Ibn Firnas”. Al-Andalus (CSIC). 1964. Vol. 29-2. p.365.
- [10] Agutter PS, Wheatley DN. “Thinking about life”. Springer. 2008.

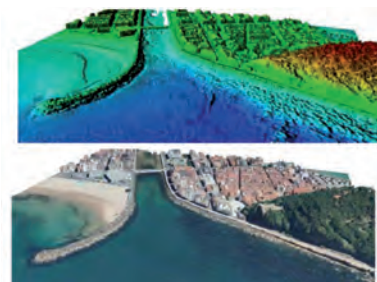


Fig. 5: Puente de Abbas Ibn Firnas (ronda de acceso al aeropuerto de Córdoba) diseñado por el ingeniero y catedrático de estructuras D. José Luis Manzanares Japón

Validación de tecnologías para el estudio batimétrico de la zona intermareal de Gipuzkoa

VALIDATING TECHNOLOGY BASED ON BATHYMETRIC SURVEY IN THE INTERTIDAL ZONE OF GIPUZKOA

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/6977> | Recibido: 03/10/2013 • Aceptado: 10/02/2014



■■■
Esther Bautista-Gil, Paz Morer-Camo

UNIVERSIDAD DE NAVARRA. TECNUN.
Escuela Superior de Ingenieros. Dpto. de Mecánica.
Paseo Manuel Lardizabal, 13 - 20018 San Sebastián.
Tfno: +34 943 219877.

ABSTRACT

• This project's goal was to carry out an Airborne LIDAR Hydrographic (ALH) survey of the intertidal zone of the Gipuzkoan coast, in order to cover the supralittoral and infralittoral zones to a depth of at least 8 m. under the astronomical low water mark. In turn, it would provide continuity to the existing bathymetric and altimetric models.

In the coastal strip there were data for the land area obtained with Terrestrial Airborne Laser Scanning (ALS), and there was also a bathymetric survey of the coastal platform carried out through a MultiBeam Echosounder (MBES). Given the difficulties of surveying in the coastline, the works were set so that the ALS survey was carried out during the low tide and the MBES survey was done during the high tide, thus reducing the safety margin under the keel to the minimum.

Both surveys were provided as control elements for the ALH to study the accuracy and reliability of ALH data, since they were obtained with verified technologies with an uncertainty of less than or equal. Although the first studies were carried out solely in the water area through the comparison of the data gathered by ALH and MBES, it soon became clear that a higher number of clearly defined elements was necessary. Therefore, the land study was added to the data collected through ALS technology.

The ALH technology has proven to be the best solution for obtaining coastline cartography, in addition to being the most efficient as well as the safest.

• **Keywords:** LIDAR (Ligh Detection And Ranging), ALB (Airborne LIDAR Batymetry), ALH (Airborne LIDAR Hydrographic), ALS(Airborne Laser Scanning),MBES (Multi Beam Echosounders), MDS (Digital Surface Model), MDT (Digital Terrain Model), TVU (Total Vertical Uncertainty), IHO (International Hydrographic Organization).

RESUMEN

El objetivo de este proyecto era levantar con ALH (*Airborne LIDAR Hydrographic*) la zona intermareal de la costa de Gipuzkoa, para cubrir los pisos supralitoral e infralitoral hasta una profundidad de, al menos, 8 m por debajo de la línea de bajamar astronómica, y que a su vez sirviera para dar continuidad a los modelos batimétricos y altimétricos existentes.

En la franja costera se disponía de datos para la zona de tierra obtenidos con tecnología LIDAR Aerotransportado Topográfico (*Airborne Laser Scanning, ALS*), y de un levantamiento batimétrico de la plataforma costera realizado mediante una Ecosonda Multihaz (*Multi Beam Echosounders, MBES*). Dadas las dificultades de levantamiento en la línea de costa, el levantamiento ALS se realizó en marea baja y el de MBES en marea alta reduciendo al máximo el margen de seguridad bajo la quilla.

Ambos levantamientos, se proporcionaron como elementos de control del levantamiento ALH, para investigar la exactitud y fiabilidad de dichos datos, por ser datos obtenidos con tecnologías contrastadas con igual o menor incertidumbre. Aunque los primeros estudios se realizaron únicamente en la zona de agua, contrastando los datos tomados con ALH en el agua con datos obtenidos mediante MBES, pronto se vio la necesidad de disponer de mayor número de elementos claramente definidos por lo que se incorporaron los chequeos en tierra con datos recogidos mediante tecnología ALS.

La tecnología ALH se ha manifestado como la mejor solución para obtener la cartografía de la costa, además de ser la más eficiente y segura.

Palabras clave: LIDAR¹ (Detección y medición de distancias por Luz), ALB² (LIDAR batimétrico Aerotransportado), ALH³ (LIDAR Hidrográfico Aerotransportado), ALS⁴(Láser escáner Aerotransportado),MBES⁵ (Ecosondas Multihaz), MDS⁶ (Modelo Digital de Superficie), MDT ⁷(Modelo Digital del terreno), TVU⁸ (Incertidumbre Total Vertical), IHO (Organización Hidrográfica Internacional).

1. INTRODUCCIÓN

En la costa de Gipuzkoa, a pesar de que se disponía de datos en tierra tomados con ALS, y datos para la zona de agua obtenidos con MBES, no se había podido completar en su totalidad el recubrimiento de una franja de la zona intermareal.

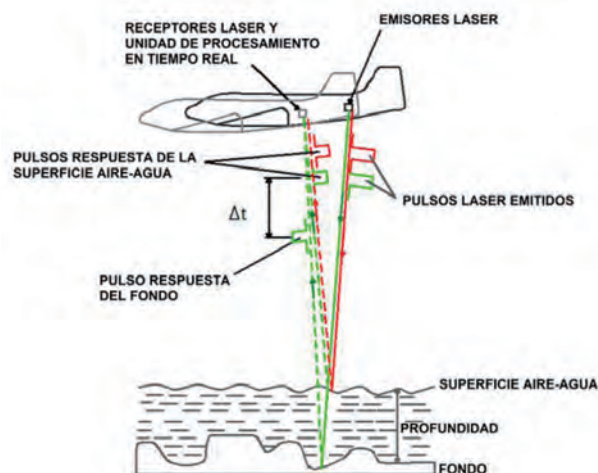


Fig. 1: Principio de funcionamiento del ALB

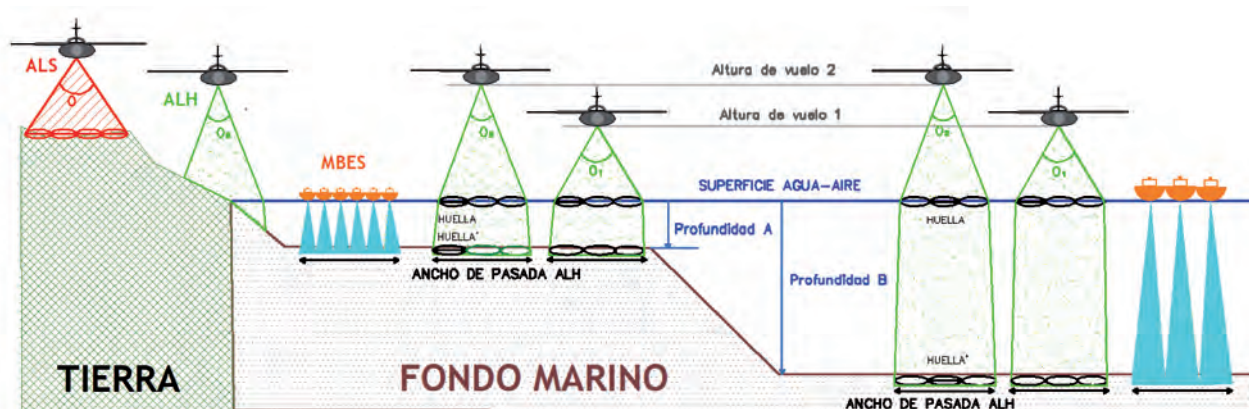


Fig. 2: Esquema de funcionamiento de las tecnologías ALS, ALH y MBES

- ¹ Tecnología que permite determinar la distancia desde un emisor láser a un objeto o superficie utilizando un haz láser.
- ² Tecnología LIDAR donde el emisor láser se desplaza aerotransportado y el objeto o superficie estudiado está sumergido.
- ³ Tecnología LIDAR con emisor aerotransportado que determina simultáneamente distancias a objetos y superficies dentro y fuera del agua.
- ⁴ Tecnología LIDAR con emisor aerotransportado y objetos y superficies estudiados no sumergidos.
- ⁵ Tecnología que permite determinar la distancia desde un emisor de sonido a un objeto o superficie sumergido utilizando más de un haz de sonido.
- ⁶ Representación de las elevaciones de la superficie terrestre y objetos que están sobre ella (vegetación, edificaciones,...)
- ⁷ Representación de las elevaciones de la superficie terrestre.
- ⁸ Dispersión de los valores atribuibles a la magnitud medida en el plano vertical, es decir, a la elevación del terreno.

El poder disponer de un modelo cartográfico¹ de alta resolución de la zona de aguas someras, además de proporcionar precisas cartas batimétricas para la navegación y la pesca, tiene distintas aplicaciones industriales, entre las que podemos destacar:

- Monitorización, construcción y seguimiento de obras costeras y portuarias, tales como diques, espigones o escolleras.
- Aplicaciones cartográficas submarinas para tendido de cables, fibra óptica y tuberías.
- Aplicaciones cartográficas para aprovechar nuevas fuentes de energía como la producida por las mareas, oleaje o corrientes, mediante la instalación de parques de hélices submarinas [1].
- Prospecciones.
- Optimización de rutas para transportes marítimos.
- Posicionamiento y seguimiento de embarcaciones y sumergibles, tripulados o no tripulados.
- Trabajos hidrográficos como dragados, y cubicaciones de material.

¹ Entendido como representación del relieve del terreno.

• Detección de emisarios, vertidos y pecios.
 E importantes aplicaciones en la caracterización de la costa como son:

- Simular y predecir los movimientos de aguas y sedimentos.
- Seguir la evolución de la costa: playas, deltas y acantilados.
- Gestionar el dominio Público Marítimo Terrestre.
- Modelos hidrodinámicos de oleaje y mareas.
- Estudio de hábitats.

El objetivo del presente estudio era por tanto, la obtención de datos de profundidad y relieve en la zona de aguas someras de la franja costera, imposible de obtener mediante técnicas tradicionales, por razones de seguridad y limitaciones para la navegación [2,3].



Fig. 3: Resolución espacial en función de la profundidad, para tecnologías ALB y ecosondas (monohaz y MBES)[10]

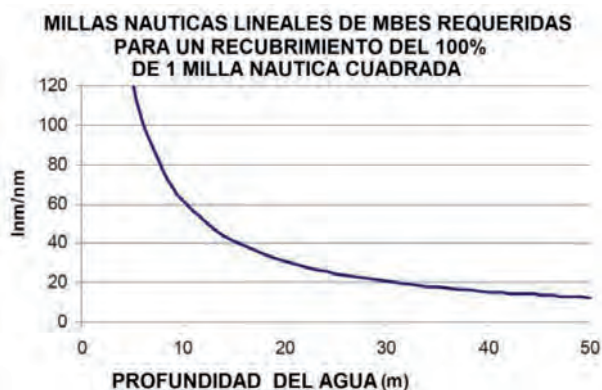


Fig. 4: Incremento cuantitativo del trabajo a realizar con MBES en función de la profundidad [11]

Por este motivo, se pensó en utilizar tecnología LIDAR (*Light Detection And Ranging*) aerotransportada. Estos sistemas determinan las coordenadas tridimensionales de nubes de puntos muy densas, que en el caso de estar tomando datos en tierra, se ha demostrado que son de gran utilidad en aplicaciones territoriales y medioambientales [4,5]. El principio de funcionamiento, se basa en la medición del tiempo transcurrido entre la transmisión y recepción de una señal de láser emitida por el sensor después de haber sido reflejada por la superficie objeto de estudio, lo que permite deducir la distancia entre ellos. Adicionalmente, mediante el análisis de las variaciones de la longitud de onda del rayo emitido, se obtiene información de las propiedades de los objetos atravesados o superficie de impacto.

En las aplicaciones de los ALS, las ondas emitidas por el láser en el infrarrojo (1064 nm), se reflejan al chocar con el agua. Para solventar este problema en los levantamientos batimétricos se utilizan dos láseres, que emite en dos longitudes de onda simultáneamente, verde- azul (532nm) e infrarrojo (1064 nm). El láser verde penetra en el agua llegando al fondo y el láser del infrarrojo choca con la superficie aire-agua detectándola (Fig. 1). La diferencia entre las distancias medidas por ambos láseres permite calcular la profundidad [6].

El uso de la tecnología ALB (*Airborne LIDAR Batymetry*) permite obtener datos en lugares donde la tipología de la zona presenta grandes dificultades o imposibilidad, para utilizar técnicas tradicionales con barcos [7]. Estos entornos comprenden áreas de estuarios y desembocaduras de ríos, zonas costeras de relieve muy accidentado, zonas de fuertes mareas, zonas de dunas y lagunas, o aguas poco profundas con vegetación y fondos fangosos. Otro motivo para la utilización del ALB radica en su inocuidad para la fauna, en contraste con las molestias que ocasiona los sensores acústicos [8].

Dado que el sensor ALB utilizado en este estudio, suministra además de los datos de la franja costera sumergida datos de la franja costera terrestre (Fig. 2), a partir de ahora hablaremos de ALH o levantamiento hidrográfico, en lugar de LIDAR Aerotransportado Batimétrico (ALB).

El ALB (y ALH), aporta una mayor densidad de datos del fondo, modelizando con mayor precisión el relieve del mismo (Fig. 3.). La tecnología ALH, es además, más rentable que la tecnología basada en los métodos acústicos, fundamentalmente en aguas someras (Fig. 4), reduciendo el coste por unidad de superficie, e incrementando el área que se puede inspeccionar por unidad de tiempo [9].

En la zona terrestre de la franja costera, se estudiarán el Modelo de relieve del suelo (MDT), y aunque de manera más



Fig. 5: Zona de Estudio. Estación GPS utilizada Gernika, y distancia al área de escaneo

somera, las aportaciones de la tecnología ALH respecto a infraestructuras costeras.

Los modelos obtenidos mediante tecnología ALH, se han evaluado y contrastado en la zona de solape con los existentes hasta el momento, ALS en tierra y MBES en el mar [12, 13, 14].

2. MODELOS DEL TERRENO DE LA COSTA DE GIPUZKOA

El área de estudio comprende la franja costera de la provincia de Gipuzkoa (Fig. 5).

El levantamiento realizado con ALH fue necesario clasificarlo como de alto riesgo, a pesar de cubrir un área pequeña, debido a diversos factores:

- Geografía costera compleja con diferencias altimétricas importantes, y con numerosos núcleos urbanos.
- Riesgo de turbidez alto, debido a la posibilidad de mal tiempo y la escorrentía de las montañas y los ríos.
- Restricciones en los permisos de vuelo por hallarse el aeropuerto de Hondarribia, al oeste del área de vuelo.

La Incertidumbre *Total Vertical* requerida era de ± 25 -30cm, correspondientes a las exigencias del Orden especial según las normas de la Organización Hidrográfica Internacional (*International Hydrographic Organization, IHO*) [15]. Al considerar el riesgo del proyecto finalmente se exigió que dicho vuelo fuera considerado como un vuelo que debía cumplir los requisitos de la IHO Orden 1b [IHO08], con excepción del requisito para determinar la medida de los rasgos cúbicos² detectados, por no ser objeto del trabajo contratado. Por lo tanto la TVU exigida fue de ± 50 cm correspondientes al Orden 1b del IHO [15].

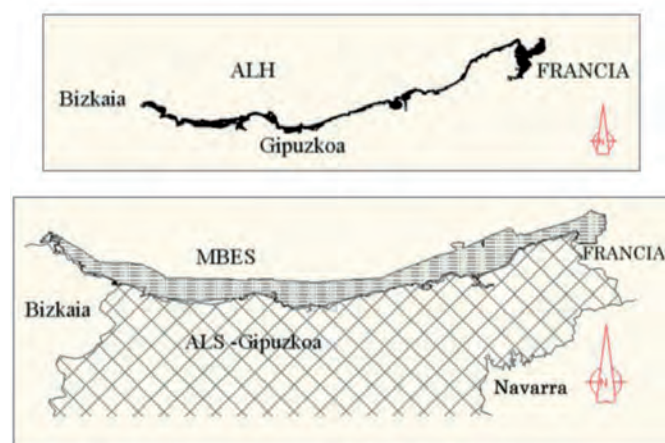


Fig. 6: Arriba: Franja de la línea de Costa de Gipuzkoa volada con ALH. Abajo: Datos existentes de la franja costera y tecnologías con las que han sido obtenidos

² Rasgo cúbico: Medida de cada lado de un cubo que tiene todos sus lados iguales. La dimensión de dicho cubo determina el objeto mínimo que debe detectarse, con el fin de que al conocerse, se eviten peligros para la navegación.

2.1 MODELOS OBTENIDOS MEDIANTE LAS TECNOLOGÍAS EXISTENTES

En la franja costera se disponía de dos levantamientos LIDAR topográfico (ALS) propiedad de la Diputación Foral de Gipuzkoa (el último realizado en 2008-9), y de un levantamiento batimétrico de la plataforma costera realizado mediante una Ecosonda Multihaz (*Multi Beam Echosounders, MBES*), propiedad de Azti Tecnalia (en el periodo 2005-2008). Los datos de la franja de agua fueron obtenidos por Azti Tecnalia, y los datos de la franja de tierra fueron capturados y procesados por el ICC (*Institut Cartogràfic de Catalunya*). En la Fig. 6 se muestran los datos proporcionados para el contraste en cada zona, así como la zona a volar con ALH.

2.1.1 Modelo obtenido con MBES

El levantamiento batimétrico se realizó con sondas multihaz de alta resolución SeaBat 7125 de Reson [16,17], que cumplen los estándares mínimos exigidos en el Orden 1a del IHO [15]. Con esta tecnología se obtuvo la información batimétrica de la que se ha dispuesto en el presente estudio, además de información de reflectividad y dispersión de la señal acústica recibida del fondo marino e imágenes digitales. El rango de profundidad barrido con ecosonda fue de 5 a 100 metros.



Fig. 7: MDT obtenido con MBES



Fig. 8: MDT obtenido con ALS

Para realizar el presente estudio, se proporcionó una franja de datos del Modelo Digital del Terreno (*Digital Terrain Model, DTM*), como se ve en la Fig. 7, de 1 m de resolución espacial en coordenadas ETRS89 y cota elipsoidal (UTM, huso 30).

2.1.2 Modelo obtenido con ALS

En la franja terrestre se dispuso de los datos capturados con el sensor ALS50-II de Leica (Fig. 8). Tras el procesado de la nube de puntos capturada, se generaron distintos modelos, MDT, MDS, y un mapa de intensidades de toda la provincia.

La densidad de puntos obtenida fue de 1 punto/m². El sistema de coordenadas para la entrega del producto fue UTM, huso 30 sobre ETRS89 y cota elipsoidal. La precisión del trabajo es de 9 cm en altimetría y de 23 cm en planimetría. Se tomaron cinco estaciones de referencia GPS, cuatro de la RED GPS de Euskadi y una de la red del IGN de Francia.

2.2 MODELO DEL TERRENO OBTENIDO MEDIANTE TECNOLOGÍA ALH

Para el área de estudio se realizó un vuelo ALH de la costa, que posteriormente se procesó para obtener el MDT. En el área de trabajo se han detectado puntos hasta a 26 m de profundidad, siendo la profundidad media de 7,5 m aproximadamente.

Previo a realizar el trabajo se disponía de registro de muestreos de turbidez, disco Secchi, y tipo de fondo en distintos puntos así como información sobre el estado de la mar, y el acceso a datos en tiempo real de oleaje y altura de marea.

Blom Aerofilms realizó el vuelo ALH [18], obteniendo simultáneamente, la nube de puntos de la franja costera utilizando el sensor laser escáner aerotransportado Hawk Eye Mk II, y fotografías de la costa con cámara digital uEye UCGA de 2 Mega píxel. Ambos sensores iban integrados con el sistema para la navegación y posicionamiento GPS/IMU Applanix POS AV 410 y el conjunto iba montado en un avión Rockwell Aero Commander 690.

Blom Aerofilms realizó el vuelo en 2008-9, cubriendo un área de aproximadamente 27 km². La altura de vuelo fue de 400 m, y la velocidad del vuelo de aproximadamente 290 km/h.

Los datos del ALH, con el sensor Hawk Eye II se tomaron con una frecuencia de 1 kHz para el láser verde (4 KHz efectivos) y 8 kHz para el infrarrojo (64 kHz efectivos) [19].

Para georreferenciar los datos LIDAR y las ortofotografías se utilizó únicamente la estación base GPS de Gernika de la Red GPS de Euskadi, en general, a más de 30 km del área de escaneo (Fig. 5). Hubiera sido recomendable disponer de

estaciones GPS en tierra a una distancia menor para asegurar la precisión exigida, aún en los casos de pérdida de señal por alguna circunstancia, como ocurrió en el caso de estudio. No obstante no se ha podido cuantificar la transcendencia de este hecho, por no disponer de datos brutos (obtenidos directamente del avión, sin haber sufrido ningún proceso de edición). Se utilizaron los archivos RINEX con datos tomados cada segundo, obteniendo los datos del vuelo y procesados posteriores, en coordenadas ETRS89, alturas elipsoidales y proyección UTM Huso 30.

El ángulo de escaneo fue de 25°, y el ancho de pasada de 180 m. El recubrimiento entre pasadas teórico del proyecto era del 20%.

2.2.1 Análisis del vuelo ALH

Se describen a continuación de forma somera las características del vuelo ALH, pudiendo encontrar información detallada del mismo, en otros artículos publicados [20]:

- **Recubrimiento** de la zona de estudio irregular. En algunas zonas el vuelo se ha extralimitado y en otras han quedado pequeñas zonas sin cubrir. Existen zonas de agua sin recubrimiento debido a:
 - Factores mejorables en el plan de vuelo.
 - Limitaciones de la tecnología. Las mayores zonas no cubiertas se dan donde existe oleaje, espuma, o turbidez (Fig. 9), debido a que la captura de puntos ALB/ALH, está limitada por la claridad del agua. Estas limitaciones, bajo ciertas condiciones, se podrían solventar con la utilización de la tecnología MBES.
- Los problemas del recubrimiento afectan a la **densidad** de los puntos obtenidos, disminuyéndola y haciendo que este irregularmente distribuida. Otro factor que influye en la densidad obtenida es la distinta altitud del vuelo sobre el suelo dentro de la misma pasada (llegando en algunas zonas a más de 150 metros). La solución a este problema estaría en proyectar alguna línea de vuelo, que aisle las zonas altas del terreno del resto.

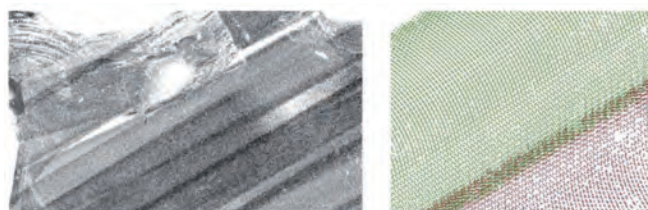


Fig. 10: Solape entre pasadas ALH

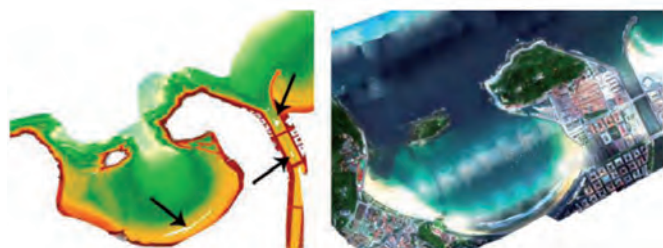


Fig. 9: Zonas sin datos por oleaje en la bahía y por turbidez en la desembocadura del río

Para solucionar el problema de la densidad en futuros trabajos, además de soluciones como aumento del solape entre pasadas, o vuelo de pasadas transversales, se recomienda volar las zonas intermareales en bajamar y pleamar, para evitar rompientes por oleajes y asegurar una captura de datos completa.

Como consecuencia de estos factores, la densidad media real de los datos obtenidos, ha permitido generar modelos de 1 pto/4m² para la zona batimétrica y de 1 pto/m² para la zona terrestre.

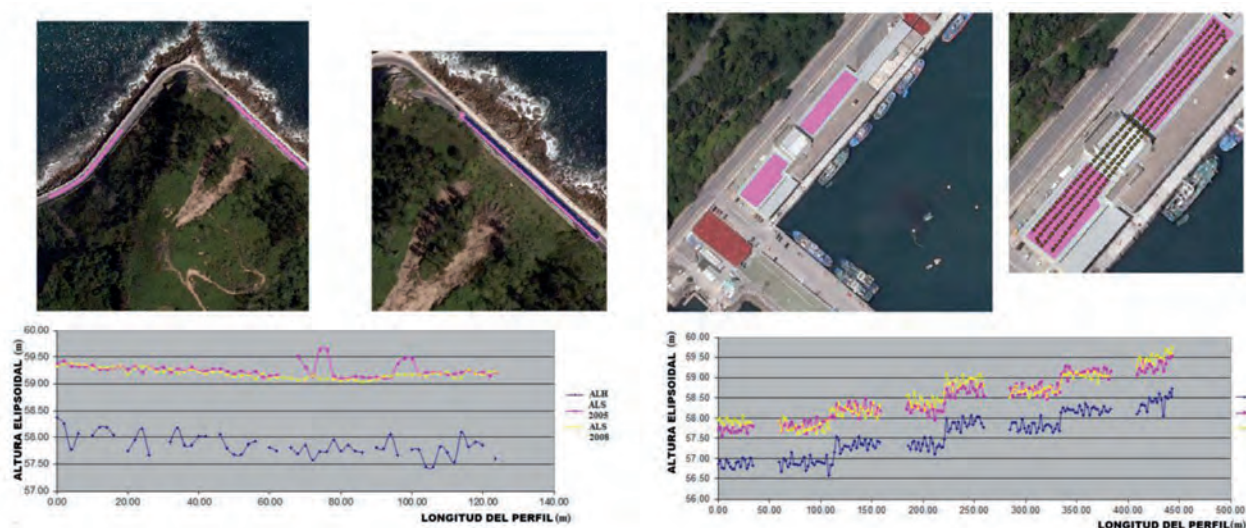


Fig. 11: Comparación de datos obtenidos con ALH, ALS en 2008 y ALS en 2005. Zonas ICZ2 y TCz2

- **Solape** entre pasadas en el área de vuelo muy irregular, existiendo zonas donde casi es del 100% y otras con un recubrimiento muy escaso o incluso pequeñas cuñas sin solape (Fig. 10). La solución a este problema consistiría en una buena planificación de las pasadas de vuelo.

Ajuste o diferencias entre pasadas del vuelo muy bueno, estando ligados los resultados al tipo de fondo, y no pudiendo determinar la relación con la profundidad.

3. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS ALH Y SU INTEGRACIÓN CON LOS MODELOS MBES Y ALS

3.1 CONTRASTE DE MODELOS

El estudio [20], consistió en determinar si existen diferencias relevantes en coordenadas –planimétricas y altimétricas– entre los datos obtenidos mediante ALH y los datos obtenidos para la misma zona con otras tecnologías. Se realizaron comparaciones en zonas concretas obtenidas con técnicas de alta resolución y/o precisión y contrastes con tecnologías rentables de captura masiva para todo el área de estudio. Además se han analizado si estas diferencias son o no uniformes en toda su extensión, y en cualquier dirección de estudio, o si varían y como lo hacen.

Aunque los primeros estudios de toda la franja costera se realizaron únicamente en la zona de agua, contrastando

los datos ALH procedentes del láser de 532 nm con los datos MBES, pronto se vio la necesidad de disponer de mayor número de elementos claramente definidos. Por ello se incorporaron los chequeos en tierra con datos ALS, chequeando elementos edificios, pistas de aeropuertos, carreteras, pistas deportivas, etc. (Fig. 11).

Tras los análisis efectuados se ha visto que:

1. No existen diferencias significativas en planimetría, coincidiendo con lo expuesto en documentos publicados [21]. Esto se explica porque la planimetría únicamente depende del modo de operación GPS utilizado y de las condiciones del propio sistema en el momento de la toma de datos. Precisión planimétrica (RMSE) < 2m.
2. Existen diferencias en altimetría. En la zona de agua la diferencia es de 0,92m siendo los valores del ALH más profundos que los obtenidos con MBES. Estudios realizados por otros autores [21, 22] llegan a la misma conclusión, cuantificando la diferencia en 0,967m.

En la zona de tierra la diferencia es de 0,968 m estando siempre los datos del ALH por debajo de los datos obtenidos con ALS. Estudios realizados por otros autores [23] llegan a otros valores de las diferencias entre ambos sistemas (media de 0,36 m), y en su caso el ALH está por encima del ALS.

Estas diferencias de cotas, se explican por la utilización de distintas formas de establecer el punto de referencia vertical [24], en función de la tecnología utilizada. En particular, en la

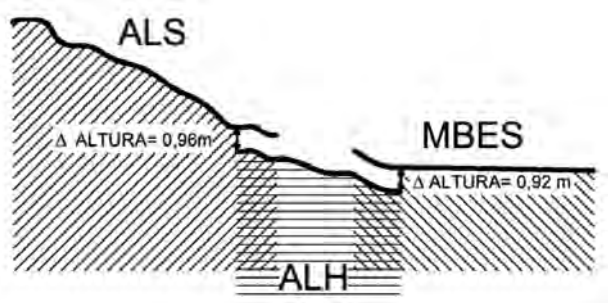


Fig. 12: Diferencias encontradas en altimetría



Fig. 13: Modelo MDT del agua y MDS de tierra, para la desembocadura del río Urumea

obtención de las alturas de los puntos ALH, se ha visto que se han utilizado dos referencias verticales distintas y que el paso de una a otra no se ha realizado correctamente.

La Fig. 12 resume las diferencias existentes en altimetría entre los datos tomados con las distintas tecnologías evaluadas.

3.2 AJUSTE DE LOS DATOS ALH

Existen distintas metodologías para realizar este ajuste [22,23] que han sido valoradas. Al iniciar el proceso de análisis de los conjuntos de datos ALS, MBES y ALH, para decidir cómo realizar el ajuste se detectaron varios problemas [23,25]:

1. Franja de solape entre conjuntos ALH y ALS o ALH y MBES muy estrecha de la que habrá que descontar áreas sin datos para alguno de los conjuntos o zonas donde la altura del terreno varíe con el tiempo (playas por ejemplo).
2. Distintas resoluciones de cada conjunto de datos. ALS 1pto/m², y MBES capturado 1pto/9m² (posteriormente promediados en procesado a 1pto/m²) y en el ALH puntos separados 1 m en tierra y 3m en agua, pero con una distribución menos regular [26].

Tras el estudio pormenorizado de los distintos métodos para realizar el ajuste, se decidió desplazar verticalmente una constante el conjunto de datos ALH, al que se ha incrementado su cota elipsoidal en 95 cm.

Una vez realizado el ajuste, se ha procedido a validar la continuidad del modelo ALH y se ha comprobado que el ajuste era correcto. Sin embargo en algunas zonas de características concretas, en las que había gran dispersión de valores entre los modelos comparados, el ajuste no es perfecto y no cumpliría la TVU del Orden 1b.

Los datos ALH ajustados están disponibles en la página web “Infraestructura de Datos Espaciales” de la Diputación Foral de Gipuzkoa [27], donde también se encuentran todos los datos ALS de la provincia de Gipuzkoa.

3.3 INTEGRACIÓN DE MODELOS, RESULTADO

En el presente estudio se han integrado los datos ALS y ALH, por no disponer nada más que de una franja de terreno del modelo de las MBES (Fig. 13).

Se han generado distintos modelos 3D: MDT y MDS. Los modelos obtenidos son coherentes con una posterior integración de los datos MBES, de forma que se extienda dicho modelo hasta la profundidad de los datos obtenidos con ecosondas (unos 100 m aproximadamente).

4. DISCUSIÓN

Tras el estudio y análisis de los tres conjuntos de datos, las condiciones de captura de los mismos (precisiones, tiempo para capturarlos, costes de cada uno de los levantamientos, ...), y del área concreta de trabajo (relieve, meteorología en el momento de captura de datos,...) [15, 16, 17, 18, 19], se observa que la metodología ALH tiene una serie de ventajas y desventajas respecto a las tecnologías MBES y ALS, que se exponen a continuación.

4.1 PUNTOS FUERTES DEL ALH

- Permite un recubrimiento del 100% de la franja costera, mientras que la tecnología MBES está limitada por la profundidad que hace accesible la toma de datos con

	ALS	ALH	MBES
TIERRA	GRAN DENSIDAD DE DATOS, DISTRIBUIDOS UNIFORMEMENTE	MENOR DENSIDAD DE DATOS, CON LAGUNAS O MENOR DENSIDAD EN ZONAS CONCRETAS (DE DISTRIBUCIÓN ES IRREGULAR)	NO TOMA DATOS
	GRAN EXACTITUD Poco afectado por el ruido (sol, albedo de objetos) y geometría	MENOR EXACTITUD Muy afectado por el ruido (sol, albedo de objetos) y geometría del terreno y objetos	
AGUA	NO TOMA DATOS	OPERA EN AGUAS SOMERAS	NO OPERA EN AGUAS SOMERAS
		ALTA RENTABILIDAD, POSIBILIDAD DE CARTOGRAFIAR GRANDES ZONAS INCLUSO EN CONDICIONES METEOROLÓGICAS ADVERSAS - Levantamientos de 70 a +200 km ² al día	MAYOR COSTE DE OPERACIÓN, LIMITADA A CONDICIONES METEOROLÓGICAS NO ADVERSAS
		MUY EFICIENTE [20] - Velocidad entre 70-100m/s - 2 minutos entre pasadas o líneas No obstante: el espacio aéreo es más restringido que el marítimo, los aviones tienen que repostar a diario y las operaciones de mantenimiento han de ser realizadas en tierra.	MAYOR DIFICULTAD DE OPERABILIDAD Y DESPLIEGUE MÁS LENTO [10] [12][20] - Velocidad operación 3-5m/s - Maniobras complejas de una a otra línea
		OPERA EN AGUAS DE RELIEVE ACCIDENTADO	POR SEGURIDAD PARA LA NAVEGACIÓN NO PUEDE OPERAR EN DETERMINADOS RELIEVES DEL FONDO Y PROFUNDIDADES
		PUEDEN TOMAR DATOS EN ZONAS SIN INFORMACIÓN PREVIA	NECESITA INFORMACIÓN PREVIA DE LOS FONDOS
		PROFUNDIDAD LIMITADA A 60-75 M [6][7]	TOMA DE DATOS EN AGUAS PROFUNDAS
		DIFICULTAD DETECCIÓN OBJETOS PEQUEÑOS, agravado si existen algas	MAYOR RESOLUCIÓN HORIZONTAL[9][11] (función de la densidad de datos necesaria)]
		COBERTURA 100% FONDO, CON GRAN DENSIDAD DE DATOS REGULARMENTE REPARTIDOS Con zonas sin datos o poco cubiertas debido al oleaje, espuma, turbidez, o con mucha materia en suspensión	DENSIDAD DE DATOS EN FUNCIÓN DE LAS NECESIDADES. [9][10][11] No rentable en coberturas totales de grandes áreas.
		DATOS ADICIONALES: • IMÁGENES GEORREFERENCIADAS • DATOS DE REFLECTIVIDAD INOCUO PARA LA FAUNA	
GEO-REFERENCIA	CON GPS, BUENA	NECESITA SER AJUSTADO ALTIMÉTRICAMENTE CON OTRA TECNOLOGÍA	MOLESTIAS A LA FAUNA • PIERDE SEÑAL GPS EN ACANTILADOS Y ZONAS CON VEGETACIÓN DENSA [10] • AFECTADO POR LAS MAREAS[9]

Tabla I: Comparación de las tecnologías

ecosonda y el relieve del fondo del mar que permite una navegación segura.

- Rentabiliza el proceso de toma de datos, puesto que permite estudiar grandes áreas en cortos periodos de tiempo, incluso en condiciones meteorológicas adversas.
- Proporciona imágenes digitales simultáneas, que facilitarán el análisis de los datos, fundamentalmente en la zona terrestre, pero también nos darán detalles sobre la posición del sol, oleaje, etc. en la zona marina.

4.2 PUNTOS DÉBILES DEL ALH

- Es necesario ajustar la altimetría de los datos ALH obtenidos con datos provenientes de otras tecnologías, bien MBES u otro tipo de ecosondas validadas altimétricamente, bien ALS u otras tecnologías topográficas clásicas.
- En la zona cubierta por agua, las condiciones físicas del agua en el momento de captura –partículas en suspensión fundamentalmente–, originan lagunas de datos. Igualmente las condiciones de turbulencias, oleaje, espuma, o reflejo del sol impiden obtener datos o falsean los valores obtenidos. Cuando en esas zonas sea necesario disponer de datos fiables, habrá que complementarlos con datos obtenidos por ecosondas.
- En la zona de tierra, las lagunas o escasez de datos ALH, sobretudo en ciertos elementos que se encuentran en determinadas geometrías del terreno, se pueden complementar con datos obtenidos con ALS.

La tecnología ALH es muy reciente, por lo que la evolución de los sensores, van solventando los puntos débiles. En el año 2012 apareció en el mercado el sensor Chiroptera de la casa AHAB [28], utilizándose en Alaska [29].

4.3 RESUMEN

Una de las formas más eficaces para obtener un modelo continuo de la costa, es mediante un levantamiento con tecnología ALH. Esta tecnología toma simultáneamente datos de la franja litoral tanto por encima como por debajo del agua, dándonos el relieve del área cubierta por agua y el de tierra seca, además de aportar información sobre edificaciones, infraestructuras costeras, vegetación etc. Es una tecnología de alto rendimiento, con gran facilidad de despliegue y capaz de obtener de forma muy eficaz levantamientos de gran escala de la costa, además de informar sobre la composición del fondo marino (*Tabla I*).

4.4 ACCIONES DE FUTURO

Existen varias líneas de investigación abiertas, que buscan mejorar el recubrimiento y calidad de los datos ALH:

- El desarrollo de nuevos algoritmos con el objeto de mejorar la clasificación de las nubes de puntos, y los modelos del terreno generados.
- Incrementar el número de clases que puede detectar el ALH, aumentando el número de las existentes actualmente: terreno desnudo, agua, línea costera y objeto
- Desarrollo de nuevos métodos de comparación y ajuste de datos ALH y métodos tradicionales en base a la combinación de imagen y datos LIDAR, y métodos de comparación entre los dos conjuntos de datos LIDAR, ALS y ALH, en base a la intensidad.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Mikel Elorza Espolosin, jefe de servicio del Departamento de Ordenación y Política Territorial de la Diputación Foral de Gipuzkoa, el suministro de toda la información de partida utilizada (ALH, ALS, MBES), así como el marco proporcionado dentro del proyecto de los “Servicios de mantenimientos de datos LIDAR. Ajuste de cota elipsoidal del levantamiento batiLIDAR”, financiado por el mismo departamento.

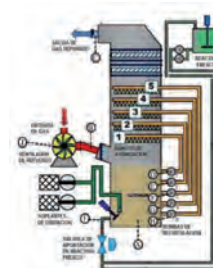
BIBLIOGRAFÍA

- [1] Honorubia A, Gómez E, Molina A et al. “Sistemas de evaluación del recurso eólico: Integración de nuevas soluciones basadas en tecnología láser”. En: DYNA. Septiembre 2012. Vol. 87-5. P. 540-548. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/4644>
- [2] Welker K E. “Determination of Tide Heights from Airborne Bathymetric Data”. Director: Hannah J A. [Master’s Thesis]. Estados Unidos [California]. U.S. Naval Postgraduate School Monterey CA. Defense Technical Information Center. 1989. 107p. [Accession Number : ADA220412, PDF Url : ADA220412]
- [3] Graham T, Smith K, Spittal J, et al. “Improving the efficiency, safety and economy of the New Zealand National Charting Programme through the integrated use of LIDAR in a multi-sensor surveys”. En: Proc. 1999 U.S. Hydrographic Conference, [Apr. 26 – 29, Mobile, Alabama, Estados Unidos, paper 9-5 on CD], 1999. P. 11
- [4] Ibáñez, E. (2008). “Validación de modelos digitales del terreno de precisión a partir de datos láser escáner aerotransportado; aplicación a la marisma del Parque Nacional de Doñana”. Director: Gili Ripoll, J A. [Phd Thesis]. España. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d’Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica. Copyright deposit: B.33020-2009, 2008. 187p. ISBN: 9788469238257
- [5] Olsen R C, Puetz, A M, Anderson, B. “Effects of LIDAR point density on bare earth extraction and DEM creation”. ASPRS 2009 [Annual Conference Baltimore, Maryland. March 9-13]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. Mayo 2009, Vol. 7323. P. 13. [doi 10.1117/12.818186]
- [6] Gordon M N. “Coastal Zone Mapping with Airborne LIDAR Bathymetry”. Director: Ivar Maalen-Johansen. [Master’s Thesis]. Norwegian University of Life Sciences. Departament of mathematical sciences and technology, 2010. 92 p.
- [7] Axelsson A. “Rapid topographic and bathymetric reconnaissance using airborne LIDAR”, Proc. SPIE 7835, Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications IV, 783503. Octubre 2008, 2010. 10 p. [doi:10.1117/12.865227; <http://dx.doi.org/10.1117/12.865227>]
- [8] Boyd I, Brownell B, Cato D, et al. “The effects of anthropogenic sound on marine mammals – a draft research strategy”, European Marine Board Position Paper, 13. European Science Foundation, Marine Board: Oostende. 2008. 82p. ISBN 2-912049-85-7
- [9] Guenther G C, Cunningham A G, LaRocque, P E et al.

- "Meeting the accuracy challenge in airborne LIDAR bathymetry". En proceedings 20th EARSeL [Symposium: Workshop on LIDAR Remote Sensing of Land and Sea, June 16-17, 2000. Dresden, Germany, European Association of Remote Sensing Laboratories, (paper #1 on CD)]. 2000. P 23.
- [10] Dierssen H M, Theberge A E. "Bathymetry: Assessing Methods. Encyclopedia of Natural Resources". Taylor & Francis Group. [New York]. In press. [Coastal Ocean Laboratory for Optics and Remote Sensing (COLORS). University of Connecticut]. Disponible en World Wide Web: http://www.colors.uconn.edu/pubs/DIERSEN-Bathymetry_Methods_LO.pdf [Consulta: 3 septiembre 2013]
- [11] Gianoutsos N, Greenaway S, Evans B K, et al. "Field Integration of LIDAR and Sonar Hydrographic Surveys". 2005. Disponible en World Wide Web: http://www.thsoa.org/hy07/05_05.pdf [Consulta: 15 marzo 2013]
- [12] Costa B M, Battista T A, Pittman S J. "Comparative evaluation of airborne LIDAR and ship-based multibeam Sonar bathymetry and intensity for mapping coral reef ecosystems". Remote Sensing of Environment. [Elsevier Inc]. 2009, Vol. 113, pp. 1082-1100. [Issue: 5]. ISSN: 00344257
- [13] Molina A, García C, González M B. "A comparative analysis of capabilities and limitations of acquisition systems of hydrographic marine data". FIG Working Week, 2011 [Bridging the Gap between Cultures, Marrakech, Morocco, 18-22 May 2011 TS08J - Marine/Coastal Modelling and Technology].
- [14] Valle M, Borja Á, Chust G, et al. "Modelling suitable estuarine habitats for *Zostera noltii*, using Ecological Niche Factor Analysis and Bathymetric LIDAR". Estuarine, Coastal and Shelf Science 2011. Vol. 94 p.144-154.
- [15] IHO (International Hydrographic Organization. Standards for Hydrographic Surveys. Special Publication No. 44 5th. Monaco: International Hydrographic Office, February 2008. 36p.
- [16] Chust G, Grande M, Moncho R et al. "Capacidades del LIDAR batimétrico Hawk Eye MKII". En: Teledetección. Agua y desarrollo sostenible. Proceedings XIII Congreso de la Asociación española de teledetección [Calatayud, 23-26 de septiembre de 2009], Ed. Salomón Montesinos Aranda y Lara Fernández Fornos, 2009. P. 493-496
- [17] Galparsoro I, Borja Á, Legorburu I, et al. "Morphological characteristics of the Basque continental shelf (Bay of Biscay, northern Spain): their implications for Integrated Coastal Zone Management". Geomorphology .2010, Vol.118, [Issues 3-4], p. 314-329
- [18] Blom Aerofilms. Report of survey bathymetric LIDAR survey, Guipuzkoa coast, Spain. Job No: HK/005/08. Informe inédito. Cheddar (The Astrolabe Business Park, Wedmore Road Cheddar Somerset BS27 3EB United Kingdom), 2009. 74 p. Informe técnico Blom Aerofilms.
- [19] Liu X, Axelsson A, Tulldahl H M. "LIDAR Seafloor Classification: New Application for HawkEye II Airborne LIDAR System". Hydro International. 2011, Vol. 15 [num 3]. Diponible en web: http://www.hydro-international.com/issues/articles/id1265-LIDAR_Seafloor_Classification.html [Consulta: 5 dec 2012]
- [20] Bautista E Morer P. Levantamiento Hidrográfico Aerotransportado: Necesidad de combinación de distintas tecnologías. [CD-Rom]. X TOPCART 2012 - I Congreso Iberoamericano de Geomática y Ciencias de la Tierra - III Jornadas Ibéricas de las Infraestructuras de Datos Espaciales. [Pabellón de La Pipa de la Casa de Campo] Madrid. 16-19 octubre 2012.
- [21] Operation Beachmed-e. Sous-projet OpTIMAL (mesure 2.1): Optimisation des techniques integrees de monitoring appliquees aux littoraux. Rapport de conclusion - phase a [2ème edition]. [s.n.], février 2007. P. 36-62
- [22] Intelmann S S. Comments on hydrographic and topographic LIDAR acquisition and merging with multibeam sounding data acquired in the Olympic Coast National Marine Sanctuary [NOAA Technical Memorandum NMS Conservation Series ONMS-06-05] [en línea]. [U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, Office of Ocean and Coastal Resource Management Coast, National Marine Sanctuary Program]. Agosto 2006, 27 p. Disponible en World Wide Web: <http://sanctuaries.noaa.gov/science/conservation/pdfs/Intelmann3_final.pdf>. [Consulta: 5 dec 2012]
- [23] Quadros N D, Collier P A, Fraser C S. "Integration of bathymetric and topographic LIDAR: a preliminary investigation". En: ISPRS Archives. Vol. XXXVII [Part B8, 2008. XXlst ISPRS Congress, Technical Commission VIII, July 3-11, 2008]. Beijing [China], 2008. P. 1299-1304. Disponible en World Wide Web: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/8_pdf/13_ThS-19/01.pdf>. [Consulta: 16 de enero de 2013]
- [24] Keyzers J H, Quadros N D, Collier P A. "Vertical datum transformations across the litoral zone". Informe inédito. The Commonwealth Government of Australia Department of Climate Change and Energy Efficiency CRC for Spatial Information [Australia], 2013. 110 p. Disponible en World Wide Web: <http://www.jcronline.org/doi/abs/10.2112/JCOASTRES-D-12-00228.1>. [Consulta: 10 junio de 2013]
- [25] Quadros N D, Collier P A. "Delineating the litoral zone using topographic and batymetric LIDAR". En Proceedings of the fifth Advisory Board on the Law Of the Sea (ABLOS) Conference. Publisher International Hydrographic Bureau, 2008. Disponible en World Wide Web <<http://www.gmat.unsw.edu.au/ablos/ABLOS08Folder/Session5-Paper3-Quadros.pdf>>. [Consulta: 10 de junio de 2013].
- [26] Naus T. "Unbiased LIDAR data measurement". En: Fugro Horizons, Inc. ASPRS 2008 .Annual Conference Portland [Oregon], 2008. Disponible en World Wide Web: <http://www.asprs.org/a/society/committees/LIDAR/Unbiased_measurement.pdf>. [Consulta: 10 de junio de 2008]
- [27] Infraestructura de Datos Espaciales de Gipuzkoa. Diputación Foral de Gipuzkoa. [en línea]. Disponible en World Wide Web <<http://b5m.gipuzkoa.net/web5000>> [Consulta 12 de septiembre de 2013].
- [28] Petrie G. "AHAB's Chiroptera". GEOInformatics. Marzo 2012. Vol. 15 [Issue 2]. p24 [accessión 78300891]
- [29] Paine J G, Andrews J R, Saylam K, et al. "Airborne LIDAR on the Alaskan North Slope: Wetlands mapping, lake volumes, and permafrost features". Bureau of Economic Geology [Special section in Hydrogeophysics]. Julio 2013. Vol. 32 - 7 p. 798-805. <http://dx.doi.org/10.1190/tle32070798.1>

Nueva herramienta para la operación económica en una planta de desulfuración húmeda de los gases de combustión

NEW TOOL TO REDUCE OPERATING COSTS IN A WET FLUE GAS DESULFURIZATION PLANT



DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/6986> | Recibido: 16/10/2013 • Aceptado: 10/02/2014

Jose Luis Aranda-Hidalgo¹, M^a Ángeles Martín-Santos² y Antonio Martín-Martín²

¹ Central Térmica Puente Nuevo. E. ON Generación, S. L. CT. Nacional 432, KM. 232. 14014 Espiel (Córdoba, Spain). Tlfno: +34 957 368100. jose.luis.aranda@eon.com

² UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA. Dpto Química Inorgánica e Ingeniería Química. Ctra. Madrid, km 396 - 14071 Córdoba. Tfn: +34 957 212273. iq2masam@uco.es.

ABSTRACT

- Large coal combustion plants must ensure that their emissions comply with the emission limit values set by the prevailing legislation. In this paper, we study flue gas desulphurisation at the Puente Nuevo Power Plant (330 MW, Spain). The objective is to optimise energy and reagent consumption. The results were obtained at industrial scale using the following variables: pH, liquid absorbent flow, flue gas flow, residence time in the absorber, and energy consumption associated with the process developing a new tool for use as an operation protocol that allows to economize the process in wet flue gas desulphurization plants of optimum and safety form. The study was carried out taking into account compliance with the current emission limit values established under Spain's National Emission Reduction Plan for Large Combustion Plants and with a view to stricter legislation in the future.
- **Key Words:** desulphurisation, flue gas, power plant, limestone, wet absorption, sulphur dioxide, air pollution, coal, LSFO, FGD.

RESUMEN

Las grandes instalaciones de combustión de carbón deben operar de forma que sus emisiones estén dentro de los valores límites de emisiones marcados por la legislación imperante. En este sentido, se ha estudiado la desulfuración de los gases de combustión de la Central Térmica de Puente Nuevo (330 MW, España), buscando como objetivo la optimización del consumo energético y de reactivo. Los resultados se han obtenido a escala industrial incluyendo en el estudio las variables pH, caudal de líquido absorbente, caudal de gases de combustión, tiempo de residencia en el absorbedor y consumo energético asociado al proceso, desarrollando una nueva herramienta que se puede utilizar como protocolo de funcionamiento para economizar el proceso de forma óptima y segura en las plantas de desulfuración húmeda de los gases de combustión. Todo ello desde la perspectiva del cumplimiento del valor límite de emisión actual establecido por el Plan Nacional de Reducción de Emisiones de la Grandes Instalaciones de Combustión y de su posible endurecimiento futuro.

Palabras Clave: desulfuración, gases de combustión, central térmica, caliza, absorción húmeda, dióxido de azufre, contaminación atmosférica, carbón, LSFO, FGD.

1. INTRODUCCIÓN

El uso del carbón como combustible se encuentra actualmente regulado, estableciéndose los límites de emisión de los distintos contaminantes atmosféricos (SO₂, NO_x y partículas). Así las instalaciones han modificado sus procesos de forma que se justifica la necesidad de optimización, sobre todo en el consumo energético, y la creación de protocolos de funcionamiento, basados en resultados experimentales.

[ver apartado 1 de pdf "para profundizar"]



Las tecnologías de desulfuración son muy diversas, aunque la desulfuración húmeda con lechada de caliza es la más empleada. La tecnología ha hecho grandes avances en este campo, recogiendo numerosos estudios a pequeña y gran escala sobre la modelización del proceso, señalando numerosas variables como importantes.

[ver apartado 2 de pdf "para profundizar"]
El objetivo de este trabajo es evaluar la influencia sobre la eliminación de SO2 de los gases de combustión, de las principales variables de operación de un absorbedor industrial, cuantificando los consumos energéticos y de reactivo asociados. Se pretende con ello, facilitar un modo de operación más económico y seguro con la intención de defender un punto de encuentro entre dos elementos históricamente enfrentados: gastos de consumo energético y reactivos en la explotación versus emisiones / imagen medioambiental de la empresa.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se ha realizado en la Planta de Desulfuración de Gases de la Central Térmica de Puente Nuevo durante su funcionamiento, siempre dentro de los valores máximos de emisiones que le asignó el PNRE-GIC (400 mg/Nm³) [2]. La planta desulfuradora está dimensionada para depurar un caudal de gases variables entre 350.000 y 1.200.000 Nm³/h,

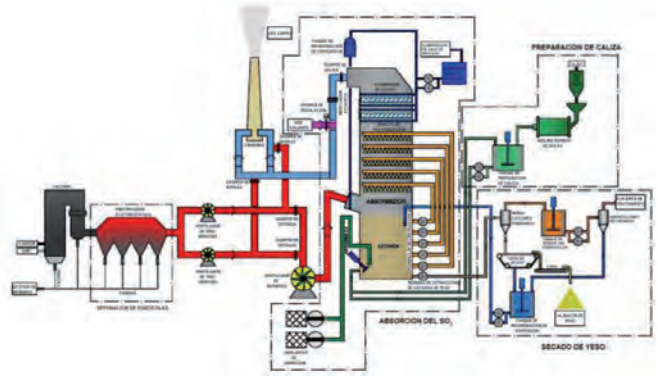


Fig. 1: Esquema del Sistema de Desulfuración de Gases de Combustión de la Central Térmica de Puente Nuevo

con un contenido en SO2 entre 800 y 6.500 mg/Nm³. Utiliza la tecnología no regenerable basada en la absorción húmeda, empleando como reactivo el carbonato cálcico y oxidando los sulfitos a sulfatos mediante aireación forzada, obteniendo como subproducto yeso; este método se conoce a nivel internacional como Wet Limestone Forced Oxidation Flue Gas Desulphurization (LSFO FGD). El volumen útil del absorbedor es de 1900 m³.
Las variables experimentales objeto de estudio han sido el caudal de lechada de caliza, el tiempo de contacto entre el líquido y el gas, el pH del tanque del absorbedor (cárter) y el caudal de gases (cuantificado a través de la potencia eléctrica de la Central Térmica), evaluando la repercusión que cada una de ellas individualmente o que en su conjunto ejercen sobre el consumo de potencia de la planta desulfuradora.

2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE DESULFURACIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN DE LA CENTRAL TERMICA DE PUENTE NUEVO

El sistema de desulfuración (Figura 1) se encuentra integrado en la Central Térmica con las correspondientes modificaciones del proceso y medidas para conducir los gases tratados a la chimenea sin que alcancen el punto de rocío.
[ver apartado 3 de pdf "para profundizar"]
El control de la desulfuración a escala real se lleva a cabo a través de las variables de operación, repercutiendo en la eficacia de la unidad. En la Figura 2 se recogen las variables relevantes en este estudio.
[ver apartado 4 de pdf "para profundizar"]
Los límites de operación están restringidos por el valor límite máximo de emisión de SO2 (400 mg/Nm³ de SO2 al 6% de O2 [2]) y el pH límite mínimo para evitar corrosión en el equipo (pH=4).
[ver apartado 5 de pdf "para profundizar"]

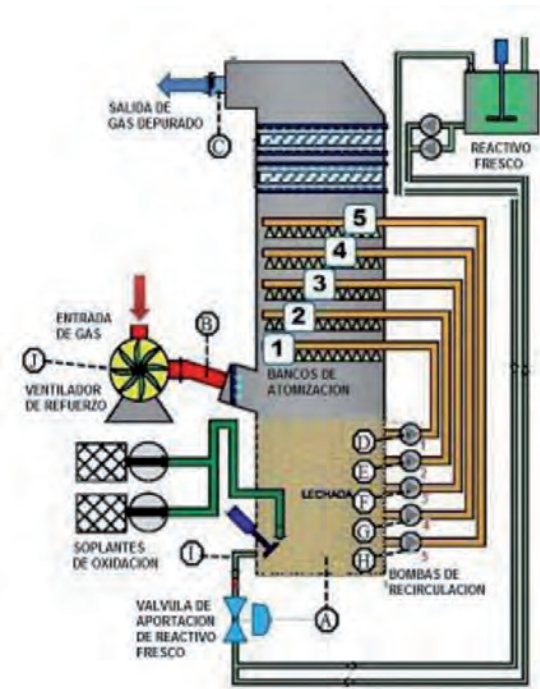


Fig. 2: Puntos de medida en el absorbedor de la Central Térmica de Puente Nuevo

PUNTOS DE MEDIDA		
Punto	Descripción	Unidad
A	pH del carter del absorbedor	pH
B	Concentración de SO2 de los gases de combustión a la entrada del absorbedor	mg/Nm³ normalización 6% de O2
C	Emisiones de SO2, concentración de SO2 a la salida del absorbedor.	mg/Nm³, normalización 6% de O2
D	Consumo eléctrico de la bomba de recirculación 1	kWh
E	Consumo eléctrico de la bomba de recirculación 2	kWh
F	Consumo eléctrico de la bomba de recirculación 3	kWh
G	Consumo eléctrico de la bomba de recirculación 4	kWh
H	Consumo eléctrico de la bomba de recirculación 5	kWh
I	Caudal másico de aportación de lechada fresca de caliza	Kg/h
J	Consumo eléctrico del ventilador de refuerzo	kWh

2.2. MATERIALES

	%Hum	%Cen s/s	%Mv s/s	PCS s/h kcal/kg	PCI s/s kcal/kg	%S s/s	%C s/s	%H s/s	%N s/s	%O s/s
Antracita	8,46	46,41	18,41	3660	3490	0,74	41,95	2,58	0,83	7,48
Hulla	8,58	38,97	23,37	4217	4017	0,73	47,45	3,11	1,00	8,73

Tabla 1: Características del carbón consumido en la Central Térmica de Puente Nuevo en 2012

Combustible

[ver apartado 6 de pdf "para profundizar"]

Donde PCS y PCI son el poder calorífico superior e inferior y % Hum, % Cen y % Mv los porcentajes de humedad, cenizas y materia volátil.

Reactivo

[ver apartado 7 de pdf "para profundizar"]

	% en peso sobre seco
Sólidos totales en suspensión	30 ± 5
CaCO ₃	96 ± 2
MgCO ₃	≤ 1
Inertes	≤ 6
Tamaño de grano (<44 µm)	90 ± 2

Tabla 2: Características de la lechada de caliza utilizada como reactivo

Bancos de atomización y bombas de recirculación

[Ver apartado 8 de pdf "para profundizar"]

Bomba	Potencia nominal motor especificaciones del fabricante (kW)	Potencia real del motor en los experimentos (kW)	Altura de descarga sobre la entrada de gas (m)
Nº1	600	541	5.8
Nº2	650	570	7.5
Nº3	700	602	9.3
Nº4	750	677	11.0
Nº5	800	632	12.8

Tabla 3: Características de las bombas centrífugas de recirculación

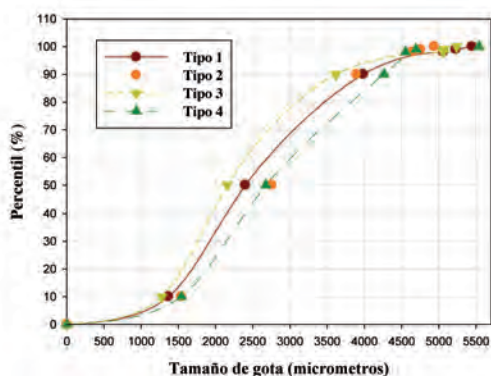


Fig. 3: Distribución acumulada del tamaño de gota de los rociadores de lechada de caliza

[ver apartado 9 de pdf "para profundizar"]

2.3. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Para evaluar el funcionamiento de la planta se han diseñado diversos conjuntos de experimentos (tabla 4), de forma que en primer lugar se evalúan la influencia de L, tiempo de contacto y pH independientemente en los experimentos 1 a 5. A continuación, en el conjunto de experimentos 6, se ha estudiado la influencia de la relación L/G, lo cual ha incluido una modificación de la potencia eléctrica generada en la planta para alterar el caudal de gases de combustión (G). Finalmente se ha procedido al estudio conjunto de la influencia de todas las variables seleccionadas sobre la eficacia de la planta y sobre la potencia eléctrica consumida en el absorbedor, lo cual es de gran interés ya que su optimización se orienta a seleccionar el adecuado modo de operación del proceso (conjunto de experimentos 7).

En todos los casos, para evaluar el efecto sobre la desulfuración de los gases de combustión se ha utilizado la eficacia definida como (eq 2):

$$\eta = \frac{SO_{2 \text{ entrada}} - SO_{2 \text{ salida}}}{SO_{2 \text{ entrada}}} \quad (\text{eq 2})$$

Donde η es la eficacia y $SO_{2 \text{ entrada}}$ y $SO_{2 \text{ salida}}$ son las concentraciones de dióxido de azufre en los gases de combustión y salida del desulfurador (mg SO_2 /Nm³).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. INFLUENCIA DEL CAUDAL DE LÍQUIDO

En un absorbedor de SO_2 , dentro de las variables más fácilmente manipulables se encuentra el caudal de líquido L [13]. Para evaluar la influencia del caudal de lechada de cal sobre la eliminación de SO_2 , en el sistema estudiado, se ha modificado el número de bombas puestas en funcionamiento simultáneamente, manteniendo tanto el pH del tanque del absorbedor como el caudal de gases a tratar. En este sentido un aumento de dos (1-2) a cuatro bombas (1-2-3-4), conduce a una inmediata reducción de la concentración de SO_2 , como se recoge en la figura 4A, donde se muestra la evolución de las variables de estudio. Y, como cabía esperar, una reducción en el caudal de líquido, concretamente el correspondiente al funcionamiento de una bomba (1-2-3 a 1-2), incrementa la concentración de este contaminante (figura 4B). Según Villanueva [20], la eficacia de estos sistemas es muy dependiente de la concentración de entrada de SO_2 y del pH del tanque

DENOMINACIÓN	OBJETIVO	pH	Número Bombas (L)	Combinación de bombas (Tiempo de contacto)	Caudal de gases de combustión (G)
Experimentos 1 y 2	Influencia del caudal de líquido recirculado sobre las emisiones de SO2 y el consumo de potencia eléctrica del sistema.	n.d.	Variable	Variable	Constante
Experimento 3	Influencia del tiempo de contacto sobre las emisiones de SO2 y el consumo de potencia eléctrica del sistema.	n.d.	Constante	Variable	Constante
Experimentos 4 y 5	Influencia del pH sobre la eficacia de desulfuración	Variable	Constante	Constante	Constante
Conjunto de experimentos 6	Influencia de la relación L/G sobre las emisiones de SO2	Constante	Constante	Constante	Variable
Conjunto de experimentos 7	Influencia del pH, relación L/G y tiempo de contacto sobre las emisiones de SO2 y consumo de potencia eléctrica del sistema	Variable	Variable	Variable	Constante

Tabla 4: Diseño de experimentos.

n.d.: no determinado

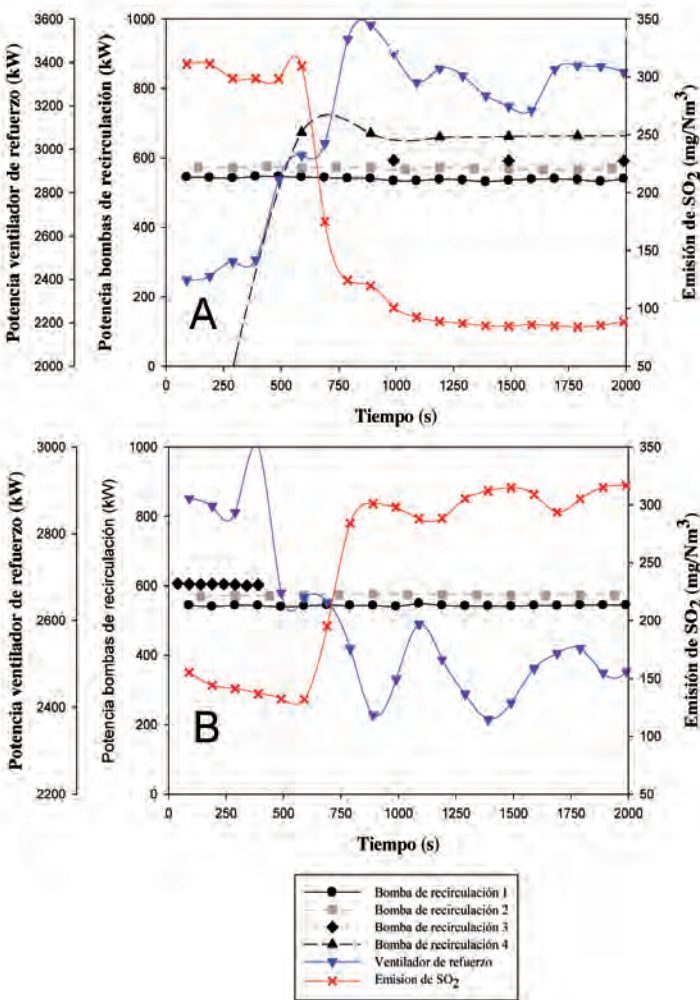


Fig. 4A: Influencia de la elevación del caudal de líquido sobre la concentración de emisión de SO2 y el consumo eléctrico.

Fig. 4B: Influencia de la disminución del caudal de líquido sobre la concentración de emisión de SO2 y el consumo eléctrico.

del absorbedor, siendo la verdadera limitación la disolución del SO2. Para ello, cuanto mayor caudal de lechada de caliza, mayor será la disolución del dióxido de azufre. Es importante utilizar una caliza muy reactiva para acelerar la dinámica del sistema, ya que cuando se trabaja a pH bajo, la baja relación Ca/S disminuye la capacidad de absorción de SO2.

Asociado al número de bombas puestas en funcionamiento existe un consumo de energía eléctrica, al que se le suma la energía consumida por el ventilador de refuerzo. Como es obvio, a mayor número de bombas activas, mayor consumo de energía. Debido a que el caudal de líquido puesto en contracorriente con el gas genera una pérdida de carga, el ventilador de refuerzo consume más energía cuanto mayor caudal de líquido se haga circular por el absorbedor.

De conformidad con los datos facilitados por el fabricante o determinados experimentalmente (M&M), en la tabla 5 se recogen cuantitativamente las variaciones en el caudal de líquido, concentración de SO2 y consumos de potencia en ambos experimentos, así como los porcentajes de variación, que aunque son muy ilustrativos no siempre son tan clarificantes, ofreciendo una primera visión cuantitativa del funcionamiento del absorbedor. Un aumento del 100% del caudal de lechada de caliza reduce las emisiones en un 72 %, mientras que una disminución del 33 % del caudal conduce a un aumento del 110 % en la concentración de SO2 en los gases de chimenea. A la luz de los resultados, cuando se pretende aumentar la eficacia de la absorción de SO2 se requiere una mayor variación del caudal de lechada para producir una misma variación en la concentración de SO2, o lo que es lo mismo, la eficacia marginal decrece con el aumento del caudal. Por ello, y dado que las bombas puestas en funcionamiento son más numerosas, se consume mayor potencia eléctrica.

3.2. INFLUENCIA DEL TIEMPO DE CONTACTO

En un absorbedor, incluso manteniendo constante el caudal de lechada de caliza, el pH del tanque y el caudal de gases

a tratar, se producen cambios en el rendimiento del mismo si el tiempo de contacto entre el gas y el líquido varía. Esta modificación se puede llevar a cabo con distintas combinaciones de bombas, ya que rocían la lechada a distinta altura. Así, la modificación de las bombas 1-3-4 por 1-2-3 reduce el consumo eléctrico (3%) pero incrementa las emisiones de SO₂ (19%) (Fig. 5).

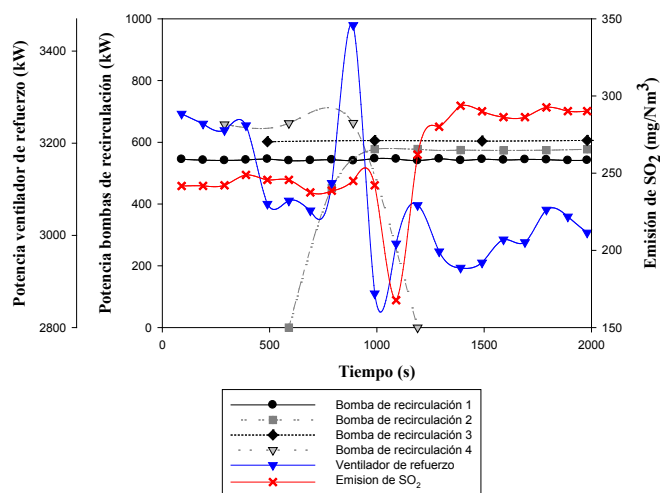


Fig. 5: Influencia de la elevación del tiempo de contacto líquido-gas sobre la concentración de emisión de SO₂ y el consumo eléctrico

Si se evalúa la modificación de la combinación de bombas, en este caso, una disminución promedio de 1,2 metros en la pulverización del líquido conlleva el incremento de 47 mg SO₂/Nm³ en la concentración de gases que abandona el absorbedor. Las gotas de niveles inferiores recorren menos longitud, disminuyendo la absorción química del SO₂ [16].

3.3. EFECTO DEL pH

El pH del líquido contenido en el cárter es la variable principal de control de las emisiones de SO₂ [6]. La alcalinidad favorece la retención de SO₂, mejorando el rendimiento de desulfuración.

El funcionamiento de mayor o menor número de bombas es independiente de que se fije el pH constante en el tanque del absorbedor. Como se ha detallado en el diseño del absorbedor, para modificar el pH el modo de operación incluye añadir al circuito de recirculación de reactivo, lechada de caliza fresca. Debido a que la regulación de la planta no tiene un control lo suficientemente preciso sobre la adición de caliza, y dado que normalmente opera al pH de 5,5 (pH recomendado por el fabricante), para la realización de este experimento la apertura de la válvula de adición se ha realizado manualmente.

Los datos que se presentan en la Tabla 6 corresponden con la generación a la máxima potencia, por lo cual el caudal de gases es el máximo, y se encuentran en funcionamiento las bombas de recirculación 1, 3 y 4.

	EXPERIMENTO 1			EXPERIMENTO 2			EXPERIMENTO 3		
	Inicio	Final	Δ (%)	Inicio	Final	Δ (%)	Inicio	Final	Δ (%)
Caudal de líquido recirculado según fabricante "L" (m ³ /h)	14.000	28.000	+ 100	21.000	14.000	- 33	21000	21000	0
Emisiones de SO ₂ (mg/Nm ³ , normalizado al 6% de O ₂)	303	84	- 72	145	304	+ 110	242	289	+ 19
Rendimiento del absorbedor (%)	84	96	+ 12	92	84	- 9	91	85	- 7
Sumatorio de consumo de potencias (kW)	3.570	5.718	+ 60	4.614	3.593	- 22	4954	4787	- 3
$\frac{\Delta L}{\Delta [SO_2]}$ (m ⁶ / h·mg SO ₂)	- 63,9			- 44,3			0		
$\frac{\Delta Potencia}{\Delta [SO_2]}$ (kW·Nm ³ gas / mg SO ₂)	- 9,81			- 6,46			- 3,55		

Tabla 5: Comparación entre los resultados de los experimentos 1,2 y 3

	EXPERIMENTO 4			EXPERIMENTO 5		
	Inicio	Final	Δ (%)	Inicio	Final	Δ (%)
Caudal másico de reactivo fresco al absorbedor (kg/h)	14.851	12.855	- 13	17.054	38.944	+ 128
pH del cárter del absorbedor (pH)	5,23	4,25	- 18	5,51	5,73	+ 3
Emisión de SO ₂ (mg/Nm ³ normalizado al 6% de O ₂)	168	395	+ 135	124	107	- 13
$\frac{\Delta pH}{\Delta [SO_2]}$ (Unidades pH·Nm ³ gas / mg SO ₂)	- 0,004			- 0,002		
$\frac{\Delta Q_{kcal/m^3}}{\Delta [SO_2]}$ (kg·Nm ³ gas / h·mg SO ₂)	- 9			- 1288		

Tabla 6: Influencia del pH sobre la absorción de SO₂

Analizando los resultados se observa que al disminuir el pH la variación en la concentración de SO₂ es el doble que el del proceso inverso. Este resultado es el esperado ya que, en la lechada recirculada, se agota en mayor medida la caliza en suspensión al reaccionar con el SO₂ cuando se reduce el aporte de reactivo fresco, modificando el valor de pH. Por ello, para elevar la eficacia del absorbedor aumentando el pH, el aporte de caliza por unidad de concentración de SO₂ es muy superior al del proceso inverso. En la bibliografía se recoge que la subida del pH no es lineal con la caliza fresca adicionada al sistema, inclusive menciona como el pH requiere de un largo tiempo para alcanzar un estado estacionario al elevar el aporte de reactivo [16].

Realmente existe un razonable compromiso entre el grado de desulfuración y la caliza residual presente en el yeso que abandona el tanque del absorbedor. Esta caliza eleva el coste del proceso ya que proviene de la adición de lechada fresca que eleva el pH [10].

3.4. EFECTO DE LA RELACIÓN L/G

En la central térmica objeto de estudio, el funcionamiento habitual del absorbedor incluye operar con tres bombas de recirculación, independientemente del caudal de gases a tratar. Obviamente, los resultados obtenidos en el rendimiento de desulfuración no son los mismos. Al operar la central a menos carga, al menos se modifican el caudal de gases, la relación líquido/gas, el tiempo de contacto y la potencia consumida por el ventilador de refuerzo, siempre que se mantenga en pH prefijado para el cárter del absorbedor. Debido a la demanda de Red Eléctrica Española (REE), en algunas ocasiones se opera a una potencia intermedia, por lo que, al quemar menos carbón, se genera menor caudal de gases de combustión. En la figura 6 se recogen los valores del caudal de gases (G, Nm³/h) para potencias eléctricas que oscilan entre 160 y 340 MW. Para este rango de operación, G se encuentra en el rango de 60.000 a 1.100.000 Nm³/h. Dado que la producción de gases es directamente proporcional a la potencia eléctrica generada se puede establecer como factor de proporcionalidad 2600 Nm³/h cada MW producido.

Si no se modifica en la operación la relación aire/combustible, el caudal de gas es proporcional a la potencia, pero la concentración de SO₂ en los gases no varía. Por lo tanto, sin variar el pH ni la combinación de bombas de recirculación, la diferencia de rendimientos del absorbedor radica en la modificación de la relación L/G cuyos valores se recogen en la Tabla 7.

	CONJUNTO DE EXPERIMENTOS 6			
Potencia eléctrica (MW)	325	248	196	160
Rendimiento del absorbedor (%)	85	91	92	93
Potencia eléctrica consumida por el ventilador de refuerzo (kW)	2.907	1.748	1.355	911
Potencia eléctrica total consumida en el absorbedor (kW)	5.464	3.456	3.063	2.619
Relación L/G (L/Nm ³)	20	26	30	34

Tabla 7: Influencia de la relación L/G

Como se puede observar, en el intervalo estudiado se produce una reducción del 52 % en el consumo de energía del absorbedor, debido a la reducción de trabajo ejercido en el ventilador de refuerzo, al mover un caudal de gases inferior. La relación L/G en este rango de trabajo oscila entre 20 y 34 consiguiendo un rendimiento en la desulfuración en el rango de 85 a 93 % aproximadamente (Figura 6). Diversos autores realizan estudios con relaciones L/G comprendidas entre 9 y 22 en sus estudios predictivos, coincidiendo todos ellos en el aumento de eficacia al aumentar la relación L/G [16, 17].

La modificación de la relación L/G no solo es posible actuando sobre el caudal de gases, sino que en la central de Puente Nuevo también se puede actuar sobre el caudal de lechada recirculada o ambos caudales simultáneamente. Los resultados que a continuación se muestran se han obtenido con la central operando a máxima potencia y a distintos valores de pH alterando el número y combinación de bombas puestas en funcionamiento (modificación de L, L/h y L/G, L/Nm³). Las distintas combinaciones de bombas de recirculación se encuentran recogidas en la Tabla 8.

Para la recopilación de estos resultados es necesario mencionar que, debido a las limitaciones establecidas en las emisiones de SO₂, los experimentos con 2 bombas de recirculación y los datos resultantes de baja aportación de lechada de caliza fresca son menos numerosos, simplemente por lo arriesgado de la operación a escala real. A bajo pH, se rebasa rápidamente el VLE y dada la inercia de la planta es prácticamente imposible recuperar este valor límite rápidamente con tan bajo caudal de caliza recirculada. Adicionalmente, existe la limitación en la operación con 4 o más bombas ya que el ventilador de refuerzo no tiene capacidad suficiente de aspiración.

De manera general se puede observar (Fig.7) que al aumentar el pH aumenta la eficacia en la desulfuración de los gases de combustión. La presencia de mayor concentración de

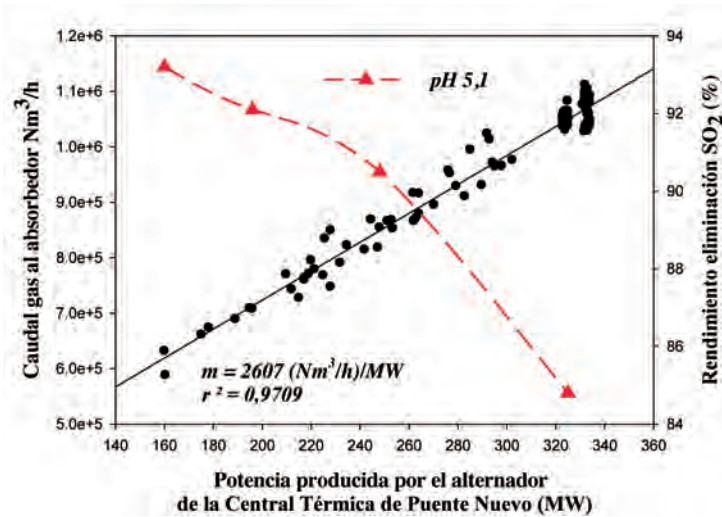


Fig. 6: Evolución del caudal de gases de combustión y rendimiento de la planta desulfuradora con la potencia eléctrica generada por la C. T. Puente Nuevo para un pH y caudal de lechada de caliza constante

CONJUNTO DE EXPERIMENTOS 7	A	B	C	D	E
Bomba de recirculación 1 / 1 ^{er} banco de atomización	+	+	+	+	+
Bomba de recirculación 2 / 2 ^o banco de atomización	+	+	-	-	+
Bomba de recirculación 3 / 3 ^{er} banco de atomización	-	+	+	+	+
Bomba de recirculación 4 / 4 ^o banco de atomización	-	-	+	-	+
Bomba de recirculación 5 / 5 ^o banco de atomización	-	-	-	+	-
Nota: + En operación; - fuera de operación					

Tabla 8: Combinaciones de las diferentes bombas de recirculación / niveles de atomización

¹ ² Bombas de recirculación / bancos de atomización en funcionamiento	1,2	1,2,3	1,3,4	1,3,5	1,2,3,4
Relación L/G (L/Nm ³)	13	20	20	20	26
Potencia total de bombas de recirculación (kW)	1.116	1.708	1.826	1.776	2.358
Potencia del ventilador de refuerzo (kW)	2.454	2.907	3.186	3.058	3.360
Potencia total consumida en el absorbedor (kW)	3570	4615	5012	4834	5718

Tabla 9: Conjunto de experimentos 7. Evolución del caudal L y tiempo de contacto a distintos valores de pH.

¹ La potencia máxima del alternador es 330 MW. Todos los ensayos fueron realizados en esta situación.

² Sólo se consideran las potencias de las bombas de recirculación y el ventilador de refuerzo.
Las potencias del resto de los equipos auxiliares no son tenidas en cuenta por no ser objeto de este estudio.

caliza aumenta la concentración de Ca²⁺ libre lo que favorece la formación de CaSO₃, el cual será posteriormente retirado como CaSO₄. En la eliminación del SO₂ en este tipo de sistemas, un valor de referencia para la relación molar Ca/S es 0,977 a 1,008 para un rango del pH entre 4,6 y 5,0 [11].

De conformidad con la tendencia en la evolución de la eficacia con el pH, para la operación con dos rociadores, la eficacia a pH 4 es de 71 %, lo que puede rebasar fácilmente el VLE

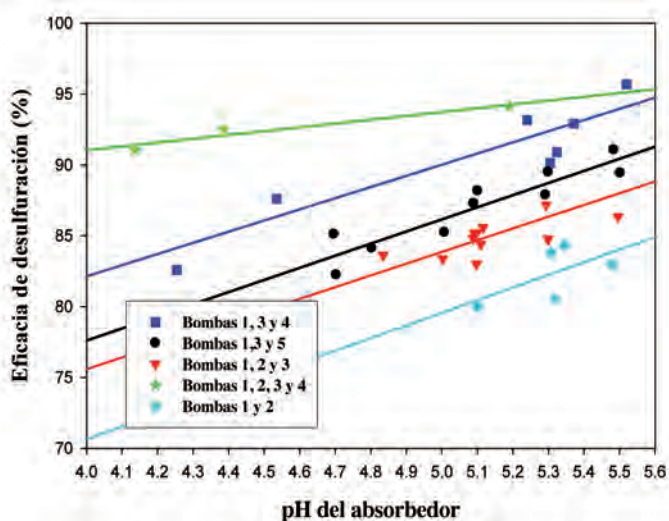


Fig. 7: Conjunto de experimentos 7. Influencia sobre la eficacia de desulfuración del caudal L y tiempo de contacto a distintos valores de pH

para la combustión de carbones españoles con porcentajes de azufre similares a los de la Tabla 1. Por el contrario, en el extremo opuesto se encuentran los resultados con cuatro bombas donde, para las mismas condiciones la eficacia es superior al 90%.

El coste de operación puede reducirse incrementando el pH y reduciendo la relación L/G [11] lo cual se puede alcanzar reduciendo el número de bombas e incrementando la aportación de lechada de caliza fresca al tanque del absorbedor. Trabajar a pH superior a 5,5 supone un coste de reactivo fresco innecesario ya que la planta actualmente tiene margen de actuación modificando cualquier otra de

las variables. Véase en la figura 7 como la eficacia oscila de 84 y 96 %, operando con dos y cuatro bombas. Además, para elevar la eficacia del absorbedor es necesario aportar mucha más lechada de caliza fresca que para bajarlo como ya se puso de manifiesto en el apartado 3.3.

Los experimentos con el mismo número de bombas, pero distinta combinación, tienen evoluciones prácticamente paralelas para la eficacia de la eliminación de SO₂, debido a que la única modificación es el tiempo de contacto líquido-gas, de forma que a mayor altura promedio de la atomización de la lechada mayor eficacia. Por ello, para obtener una misma eficacia con idéntico caudal de líquido se puede operar o a menor pH, con mayor tiempo de contacto, o a menor altura y mayor aportación de lechada de caliza fresca que eleve el pH. Nuevamente hay que resaltar que la eficacia en las combinaciones de bombas 1-3-4 y 1-3-5 están invertidas debido a que existe la modificación de otra variable: el tamaño de gota. La menor superficie específica de la combinación 1-3-5 hace que la desulfuración sea menos eficaz en este caso, de conformidad con lo establecido en la bibliografía [8, 21].

Finalmente, para un pH constante, al aumentar el número de bombas (ascenso vertical en la grafica), aumenta el caudal de líquido y por lo tanto la relación L/G generando un aumento de la eficacia de la desulfuración. El inconveniente radica, como anteriormente se ha mencionado, en el aumento de consumo de potencia en la unidad de desulfuración.

Basándose en los resultados obtenidos en el conjunto de experimentos realizados, se puede seleccionar el modo de operación más adecuado para no rebasar las limitaciones de

concentración límite de SO₂ y pH limitante para la evitar la corrosión. El problema fundamental, a escala real y en la planta estudiada, es la imposibilidad de medición del caudal real de líquido dosificado por las bombas y niveles de rociado. El caudal de líquido recirculado, además es un valor poco operativo de medir en este caso, debido a que los caudalímetros en tuberías de gran tamaño y con líquidos corrosivos con multitud de partículas en suspensión son caros y requieren mucho mantenimiento.

A efectos de controlar un proceso por parte de un operador, observar el consumo eléctrico de los motores de las bombas de recirculación es suficiente y mucho más económico que controlar L. Además y dado que se dispone de medidores de potencia consumida en todos los equipos, se propone modificar la gráfica anterior sustituyendo la denominación de cada línea (actualmente en función del número de bombas) por la relación entre los consumos de potencia asociados a la impulsión del líquido y aspiración del gas y la potencia eléctrica generada en la planta correspondiente con un caudal proporcional de gases (Figura 6). En consecuencia con lo anterior, se propone en este trabajo expresar L/G (L/Nm³) como el cociente P_L/P_G (kW/MW) obtenido de conformidad con la Ecuación 3.

Donde P_{Bi} es la potencia eléctrica consumida por cada una de las bombas de recirculación, P_{VR} la del ventilador de refuerzo y P_G la potencia generada por la planta.

$$\frac{P_L}{P_G} = \frac{\sum_{i=1}^5 P_{Bi} + P_{VR}}{P_G}$$

Una de las ventajas radica en que el ventilador de refuerzo no se suele tener en cuenta en los estudios de desulfuración de gases, los cuales siempre utilizan la variable L referida únicamente al caudal de las bombas de recirculación; sin embargo, más de la mitad de la energía consumida en variar L, la asume el ventilador de refuerzo para vencer la variación de la presión

de la columna del líquido recirculado (Tabla 9). También en el caso de tener un mismo número de bombas, la variable L no discrimina entre las que descargan en otros niveles de bancos.

Para cada planta es necesario determinar las líneas de variación de eficacia de desulfuración en función del pH para cada una de las combinaciones de bombas y potencia eléctrica generada en la planta. De esa forma se dispone de una herramienta simple para determinar el modo de operación más económico en función del consumo de potencia y potencia eléctrica producida en cada momento en la planta. En la figura 8 se muestran los distintos valores de P_L/P_G en los casos estudiados, que coinciden con la operación a pleno rendimiento de la Central Térmica de Puente Nuevo.

De conformidad con la Ecuación 2, para un valor límite de concentración de emisión de SO₂ de 400 mg/Nm³ y cuantificada a través de los sensores de SO₂, se puede determinar la eficacia mínima para cumplir con la normativa vigente. Por ejemplo, para una concentración de 2000 mg/Nm³, concentración habitual en la C.T. de Puente Nuevo e incluida dentro del rango descrito por otros autores [11], el rendimiento mínimo, por debajo del cual se sobrepasa el límite legal de emisiones (VLE), será del 80%. Este valor corresponde con la línea horizontal de la Figura 8 y se desplazará hacia arriba si la concentración de entrada de SO₂ es mayor o hacia abajo si es menor.

Por otro lado, sea cual sea la concentración de SO₂ en los gases de combustión, el pH mínimo (VLpH) es pH=4 por debajo del cual los materiales metálicos de la planta de desulfuración pueden sufrir corrosión.

En la figura 8, al desplazarse desde el punto 1 al 10 por la línea punteada se produce un aumento de costes tanto de reactivos en cada una de las líneas correspondientes a un conjunto de bombas determinado, como en consumo de potencia al saltar de una línea a otra. A este gráfico de operación se le podría denominar “Escalera de Costes del Desulfurador” y puede ser una herramienta de gran interés para los operadores de la planta.

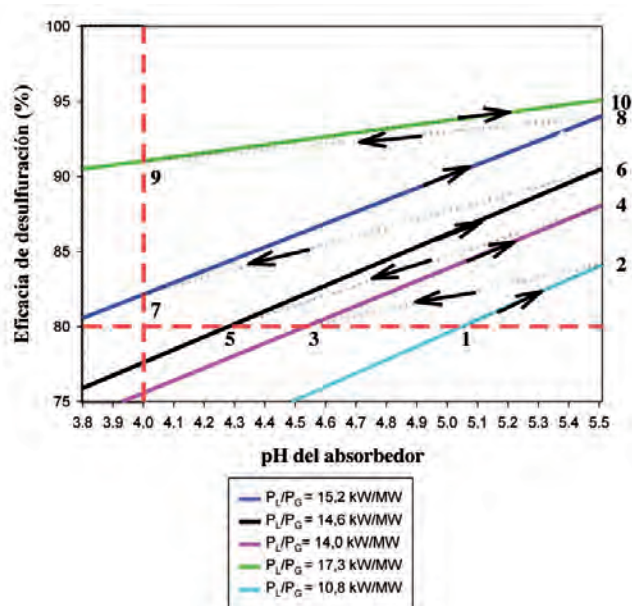


Fig. 8: “Escalera de costes de operación en la desulfuración de los gases de combustión de la Central Térmica de Puente Nuevo”

4. CONCLUSIONES

El incremento del pH en el cárter del absorbedor en el rango estudiado (4,1-5,5) lleva apareado una mejora de la eficacia del sistema cualquiera que sea el caudal de lechada recirculada y el tiempo de residencia.

El caudal de líquido absorbente tiene un marcado efecto sobre la concentración de las emisiones de SO₂, siendo más acusada la variación al elevar el caudal de este que al disminuirlo.

Manteniendo el caudal, la variación del tiempo de contacto tiene una respuesta inversa a la modificación sobre las emisiones de SO₂.

En términos de consumo energético total, la situación de menor consumo energético viene asociada a la variación del tiempo de residencia.

La eficacia obtenida en función del pH y del cociente P_L/P_G es una interesante herramienta para la operación rutinaria de un absorbedor a escala real ya que permite seleccionar los consumos energéticos asociados a la desulfuración de los gases de combustión. Para generar dicha herramienta, a la que se ha denominado “Escalera de Costes del Desulfurador”, en

cada planta es necesario determinar las líneas de variación de eficacia de desulfuración en función del pH para cada una de las combinaciones de bombas y potencia eléctrica generada en la planta. En la planta objeto de estudio, para trabajar de un modo eficaz y seguro, siempre que se cumpla el límite actual de 400 mg/Nm³, es conveniente operar con el menor número de bombas posibles y pH bajo para economizar energía y reactivo. Concretamente a pH superior a 5,0 con dos bombas y 4,5 en el caso de operar con tres.

AGRADECIMENTOS

Los autores agradecen la colaboración de E. ON Generación, S. L., especialmente a la Central Térmica de Puente Nuevo, Córdoba, España, donde se ha desarrollado el estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] España. Real Decreto 134/2010, de 12 de febrero. Boletín Oficial del Estado, 27 de febrero de 2010, num. 51, p. 19123.
- [2] España. Orden Pre/77/2008, de 17 de enero. Boletín Oficial del Estado, 28 de enero de 2008, num. 24, p. 5061.
- [3] Europa. Directiva 2001/80/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2001. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 27 de noviembre de 2001, L309/1.
- [4] Miller B. "Emissions Control Strategies for Power Plants". Clean Coal Engineering Technology. 2011. P 375-481. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-185617-710-8.00009-1>)
- [5] Srivastava R, Jozewicz W. "Flue Gas Desulfurization: The State of the Art". J. Air & Waste Manage. Assoc. December 2001. Vol.51 p.1676-1688
- [6] Srivastava R, Jozewicz W, Singer C. "SO₂ Scrubbing Technologies: A Review". Environmental Progress & Sustainable Energy. December 2001. Vol. 20-4 p 219-228. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/ep.670200410>).
- [7] Takeshita, M, Soud, H. "FGD performance and experience on coalfired plants". IEA Coal Research. IEACR/58. London 1993.
- [8] Neveux T, Le Moullec Y. "Wet Industrial Flue Gas Desulfurization Unit: Model Development and Validation on Industrial Data". Industrial & Engineering Chemistry Research. 2011. Vol 50 p 7579-759. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/ie102239q>).
- [9] Gage C L. "Limestone Dissolution in Modelling of Slurry Scrubbing for Flue Gas Desulfurization". Ph.D. Dissertation, University of Texas, Austin, TX, 1989.
- [10] Kiil S, Michelsen M, Dam-Johansen K. "Experimental Investigation and Modeling of a Wet Flue Gas Desulfurization Pilot Plant". Industrial & Engineering Chemistry Research. 1998. Vol 37 p 2792-2806. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/ie9709446>)
- [11] Gutierrez F, Vidal F, Ollero P et al. "Pilot-Plant Technical Assessment of Wet Flue Gas Desulfurization Using Limestone". Industrial & Engineering Chemistry Research. 2006. Vol 45 p 1466-1477. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/ie051316o>).
- [12] Olausson S, Wallin M, Bjerle, I. "A Model for the Absorption of Sulphur Dioxide into a Limestone Slurry". Chem. Eng. J. 1993, Vol 51, 99. (DOI: 10.1016/0300-9467(93)80016-H).
- [13] Gerbec M, Stergarsek A, Kocjancic R. "Simulation Model of Wet Flue Gas Desulphurization Plant". Comput. Chem. Eng. 1995, 19, Suppl., S283. (DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0098-1354\(95\)00086-H](http://dx.doi.org/10.1016/0098-1354(95)00086-H)).
- [14] Brogren C, Karlsson H T. "Modelling the Absorption of SO₂ in a Spray Scrubber using the Penetration Theory". Chem. Eng. Sci. 1997b, 52, 3085. (DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2509\(97\)00126-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2509(97)00126-7)).
- [15] Nygaard H G, Kiil S, Johnsson J E et al. "Full-scale measurements of SO₂ gas phase concentrations and slurry compositions in a wet flue gas desulphurisation spray absorber". Fuel. 2004. Vol83, p 1151-1164. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2003.12.007>).
- [16] Zhong Y, Gao X, Huo W et al. "A model for performance optimization of wet flue gas desulfurization systems of power plants". Fuel Processing Technology. 2008. Vol 89, p 1025-1032. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.04.004>).
- [17] Zhao J, Jin B, Zhong Z. "The Degree of Desulfurization of a Limestone/Gypsum Wet FGD Spray Tower using Response Surface Methodology" Chem. Eng. Technol. 2007. Vol 30-4, p 517-522. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/ceat.200600347>).
- [18] Kohl A, Nielsen R. "Gas Purification". 5th ed. Houston: Gulf Pub, 1997. 669p.
- [19] Villanueva A, Ollero P, Gutierrez F J et al. "Model Predictive Control of a Wet Limestone Flue Gas Desulfurization Pilot Plant". Industrial & Engineering Chemistry Research. 2009. Vol 48 p 5399-5405. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/ie801530x>).
- [20] Villanueva A, Ollero P, Gutierrez F J et al. "Dynamic Analysis and Identification of a Wet Limestone Flue Gas Desulfurization Pilot Plant". Industrial & Engineering Chemistry Research. 2008. Vol 47 p 8263-8272. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/ie071582x>).
- [21] Dou B, Pan W, Jin Q et al. "Prediction of SO₂ removal efficiency for wet Flue Gas Desulfurization". Energy Conversion and Management. 2009. Vol. 50 p 2547-2553. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2009.06.012>).

Sistema integral y sostenible para el reciclado y valorización de residuos múltiples – proyecto REVAWASTE

INTEGRAL AND SUSTAINABLE SYSTEM FOR MULTI-WASTE RECYCLING AND VALORISATION – REVAWASTE PROJECT

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/6975> | Recibido: 01/10/2013 • Aceptado: 10/02/2013



Dolores Hidalgo Barrio^{1,2}, Jesús M^a Martín Marroquín^{1,2},
Marta Gómez Rincón¹, Alicia Aguado Pesquera^{1,2} y
Gregorio Antolín Giraldo^{1,2,3}

¹ CARTIF Centro Tecnológico. Parque Tecnológico de Boecillo, 205 -
47151 Boecillo (Valladolid). Tfno: +34 983 546504. dolhid@cartif.es

² ITAP. Universidad de Valladolid. Paseo del Cauce, 59 - 47011 Valladolid.

³ UNIVERSIDAD DE VALLADOLID. Dpto. de Ingeniería Química y
Tecnología del Medio Ambiente. Paseo del Cauce, 59 - 47011 Valladolid.

ABSTRACT

- The general aim of the REVAWASTE Project (LIFE12 ENV/ES/000727) is the sustainable management of a broad spectrum of wastes (industrial waste, non-recyclable fraction proceeding from waste treatment plants and agro-food waste) in an integrated plant. This objective is reached by means of the technological development and practical application of the "Mixed Plant" concept. This development will support a new waste management strategy, based on the separation, pre-treatment, recycling and valorisation steps. In order to valorise in a joint form all the above-mentioned categories of waste, two different processes have been integrated. The first one is an anaerobic digestion system for the transformation of easily biodegradable organic waste into biogas. The second one is a low-temperature pyrolysis (chemical) treatment for the valorisation of the non-recyclable plastic waste fraction. Biogas together with pyrolysis gases (syngas) will be used as fuel in an adapted co-generation engine. As an added value, and in order to close the recycling cycle with a minimum environmental impact, the digestate generated in the anaerobic reactor will be valorised as a slow-release fertiliser (struvite), the solid fraction obtained in the pyrolysis process (ashes) will be transformed into carbon pellets (biofuel) and the liquid fraction obtained during the pyrolysis gas distillation process will be valorise as second generation biofuels.
- **Keywords:** anaerobic digestion, pyrolysis, energy optimisation, integrated system, mixed plant, waste valorisation.

RESUMEN

El objetivo general del proyecto REVAWASTE (LIFE12 ENV/ES/000727) es la gestión sostenible de un amplio espectro de residuos (residuos industriales, la fracción no reciclable procedente de los Centros de Tratamiento de Residuos (CTR) y residuos agro-ganaderos) en una planta integrada. Este objetivo se logra mediante el desarrollo tecnológico y la aplicación práctica del concepto de "Planta Mixta". Tal desarrollo ayudará a llevar a cabo una nueva estrategia de gestión de los residuos, basada en la separación, pre-tratamiento, reciclado y valorización de los mismos. Para la valorización de los residuos se ha integrado un sistema de digestión anaerobia mediante el cual se transforman los residuos orgánicos en biogás, con un sistema de tratamiento termoquímico de la fracción de residuos plásticos no reciclable mediante pirólisis a baja temperatura, obteniéndose syngas. El biogás producido junto con el syngas del proceso de pirólisis, se utilizarán como combustibles en un motor de cogeneración alternativo adaptado. Como valor añadido y para completar el cierre de ciclo con el mínimo impacto ambiental, el digestato producido en la fermentación anaerobia se valorizará como fertilizante de liberación lenta (estruvita), la fracción sólida obtenida en el proceso de pirólisis a baja temperatura (cenizas) se adicionará a pelets de carbón y la fracción líquida procedente de la destilación del gas obtenido en el proceso de pirólisis se valorizará en forma de bio-hidrocarburos de segunda generación.

Palabras clave: digestión anaerobia, pirólisis, optimización energética, sistema integrado, planta mixta, valorización de residuos.

1. INTRODUCCIÓN

El ritmo de vida de la sociedad actual ha aumentado el consumo de recursos, especialmente de aquellos que tienen un corto periodo de vida, lo que ha supuesto un aumento exponencial de la cantidad de residuos en vertedero.

De 2010 a 2011, la producción mundial de plásticos aumentó de 265 a casi 280 Mt, volviendo a la tendencia de crecimiento de la que había gozado el sector desde 1950, que se sitúa en torno a un 9% anual (*Plastics Europe*, 2012). En 2011, Europa consumió 58 Mt, 21% de la producción mundial. Ese mismo año, los residuos post-consumo fueron de 25,1 Mt (con un aumento del 2,4% respecto a 2010), de las cuales, 10,3 Mt millones no se recuperaron y, 14,9 Mt se recuperaron en forma de energía.

En la actualidad la fracción de residuos plásticos que llega a los CTR se somete inicialmente a una etapa de separación, ya que se encuentra mezclada con el resto de residuos. El rechazo de esta etapa es habitualmente enviado a vertedero como destino final, lo que en términos de volumen representa en torno al 65% del volumen total de residuos plásticos de entrada en la planta de tratamiento. Es por su elevado volumen y baja biodegradabilidad por lo que la deposición de los residuos plásticos en vertederos es una práctica que se intenta reducir.

Otra de las vías de salida que se da en la actualidad a estos residuos es la incineración para su eliminación como cenizas (reducción de volumen e inertización), intentando justificar posteriormente un aprovechamiento térmico que compense en parte el alto calor necesario para el proceso, como si de energía “sobrante” se tratara (definiéndolo como una pseudo-valorización energética). Este proceso genera, entre otros efectos nocivos o de sostenibilidad mal interpretada, emisiones de CO₂ que contribuyen al efecto invernadero.

Por otro lado, la intensificación de las explotaciones ganaderas también ha supuesto un incremento de la cantidad de residuos ganaderos generados, los cuales presentan graves problemas ambientales si no se gestionan adecuadamente. Solo en España existen aproximadamente 48 millones de cabezas de ganado (entre porcino y bovino) que representan el 14% de la cabaña de la UE y llegan a generar cerca de 76 Mt de estiércol (IAEST, 2013). La gestión convencional de los residuos ganaderos es la utilización de los mismos como fertilizante en aplicación directa al suelo agrícola. Sin embargo, debido a la concentración y a la situación de las explotaciones, aproximadamente un 30% de los estiércoles generados no disponen de terreno agrícola para su aplicación.

Es por ello habitual la aplicación de los estiércoles de forma inadecuada al suelo agrícola, lo que constituye una fuente de contaminación en las zonas de concentración de explotaciones ganaderas. Por una parte, se producen emisiones a la atmósfera, tanto en forma de óxidos de nitrógeno (NO_x) como de amoníaco. Por otra parte, y más importante, en zonas de concentración de purines, se produce contaminación por nitratos, lo que ha llevado a la declaración de zonas vulnerables a aquellas zonas donde, debido a la elevada concentración de nitratos en aguas subterráneas, se debe limitar la aplicación de productos nitrogenados al suelo.

Para dar solución a los problemas ambientales causados por la inadecuada gestión de los residuos ganaderos y la disposición en vertedero o incineración de los residuos plásticos procedentes de la fracción no reciclable de los CTR, así como de otros residuos industriales no reciclables, se propone la gestión sostenible de los mismos en una planta integrada mediante el desarrollo tecnológico y la aplicación práctica del concepto de “Planta Mixta”. Dicha estrategia de gestión se basa en la separación, pre-tratamiento, reciclado y valorización de estos residuos, de acuerdo con la Directiva 2008/98/CE.

Actualmente, en función del tipo de residuo que se considere (ganaderos, urbanos, industriales, etc.), éstos son gestionados y tratados en centros o plantas específicas para cada caso desaprovechando sinergias entre tratamientos. En este sentido, el aspecto más innovador que plantea este trabajo es la gestión sostenible de un amplio espectro de residuos en una

misma instalación, una “Planta Mixta”, que incluye en su diseño la identificación de fuentes y sumideros de energía, con objeto de cubrir las necesidades energéticas de unas etapas con la energía generada en otras, y así conseguir un equilibrio energético óptimo del sistema global. Esto último no se consigue cuando los diferentes residuos son tratados en plantas independientes, como viene ocurriendo habitualmente.

Mediante el proyecto REVAWASTE se ha buscado dar solución a los problemas ambientales que generan la eliminación de residuos en vertedero y la inadecuada gestión de los residuos ganaderos, valorizándolos mediante procesos amigables con el medio ambiente.

2. MATERIALES Y METODOS

Se ha planteado el desarrollo tecnológico del concepto de “Planta Mixta”, que propone el tratamiento y valorización de residuos agro-ganaderos, industriales y la fracción no reciclable de los residuos urbanos en la misma instalación. Para la valorización de los residuos se ha propuesto la integración de un sistema de digestión anaerobia mediante el cual se transforman los residuos orgánicos fácilmente biodegradables en biogás, y un sistema de tratamiento termoquímico de la fracción no reciclable de los residuos mediante pirólisis a baja temperatura. El biogás producido junto con el *syngas* del proceso de pirólisis se utilizan como combustibles en un motor de cogeneración alternativo adaptado, generando energía eléctrica y térmica (cogeneración) que será utilizada en el proceso global, haciendo que este necesite un menor aporte energético.

Además, para completar el ciclo cerrado con el mínimo impacto ambiental, se incluye la valorización de los residuos generados en el proceso de digestión y pirólisis como productos de alto valor añadido amigables con el medio ambiente. Dichos productos son: fertilizantes de liberación lenta, biohidrocarburos de segunda generación y pelets de carbón. El aprovechamiento de estos sub-productos y su uso directo va, además, a permitir preservar otros recursos naturales. Finalmente, se buscará la reutilización del agua/fracción líquida generada en el proceso para consumos viables en la planta y sus alrededores (limpieza de granjas, riego de cultivos, etc.).

2.1. PLANTA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA EN DOS FASES

En una primera etapa, y con objeto de estudiar las características operacionales y las ventajas de la digestión anaerobia en dos fases (2F) frente a la digestión anaerobia tradicional (1F) se construyeron dos reactores a escala de laboratorio (Figura 1).

Cada sistema consistió en un reactor de vidrio con puntos de toma de muestra en los laterales y una abertura superior para introducir la alimentación y realizar la recogida del biogás en una bolsa *Tedlar*. El volumen efectivo fue de 5,0 L en el sistema 1F y de 1,0 y 4,5 L respectivamente, para las etapas de acidogénesis y metanogénesis en el sistema 2F. Típicamente, en un sistema 2F el reactor acidogénico es mucho menor en tamaño que el metanogénico, dado que el tiempo hidráulico de residencia (THR) para la acidogénesis es menor que para la metanogénesis (Wust, 2003). La temperatura fue controlada a 35± 1 °C en una cámara termostataada y los reactores fueron agitados de forma continua en una mesa agitadora.

Como se observa en la Fig.1 en el caso del sistema 2F la alimentación entra al reactor acidogénico y el efluente de ese primer reactor es el que alimenta el segundo reactor o reactor metanogénico.

Los sistemas 1F y 2F empleados en este estudio fueron alimentados con el mismo influente (una mezcla de residuos alimentarios y purín porcino) y operaron en paralelo para analizar cuantitativamente el efecto de la separación de fases en el tratamiento anaerobio.

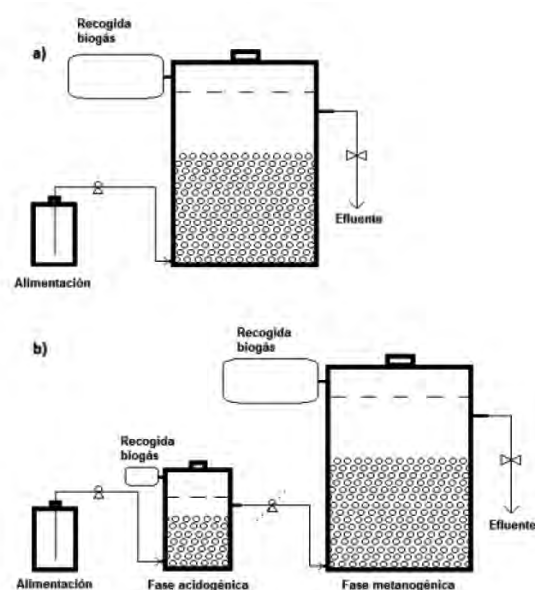


Fig. 1: Instalación experimental de digestión anaerobia: a) sistema 1F; b) sistema 2F

Posteriormente se construyó una instalación piloto de digestión anaerobia en dos fases (Figura 2). Dicha planta se compone de una unidad de trituración, un tanque de homogeneización (0,5 m³), un reactor de acidificación con agitación de velocidad variable (450 mm diámetro interno y 700 mm altura, fabricado en acero inoxidable con un volumen de trabajo de 0,1 m³), un reactor de metanogénesis también dotado de agitación con velocidad variable (800 mm diámetro interno y 1.200 mm altura, fabricado en acero inoxidable con un volumen de trabajo de 0,5 m³) y un tanque para el efluente digerido. Los reactores acidogénico y metanogénico fueron contruidos con una relación de volúmenes 1:5 para mantener menores THR en el reactor metanogénico. Los materiales de entrada eran pretratados en el triturador, bombeados al reactor de acidificación y de ahí bombeados al reactor metanogénico. Sendos termómetros y pH-metros fueron instalados en los reactores de acidogénesis y metanogénesis. Un sistema de presión fue instalado en la línea del biogás para monitorear la presión en cabeza de ambos reactores. El biogás generado en ambos equipos fue medido mediante sendos gasómetros. El exterior de ambos reactores se recubrió de una capa de espuma de poliuretano de 5 mm de espesor para aislarlos térmicamente y la temperatura fue mantenida a 35±1 °C mediante resistencias eléctricas encamisadas. Varios puertos fueron instalados en las paredes del sistema de fermentación para toma de muestras.



Fig. 2: Planta de digestión anaerobia en dos fases

2.2. PLANTA DE PIRÓLISIS-TORREFACCIÓN A BAJA TEMPERATURA

El sistema desarrollado de pirólisis catalítica a baja temperatura (torrefacción) está formado básicamente por un bloque principal de tratamiento térmico en condiciones controladas (Figura 3). La degradación catalítica de la fracción no reciclable de los CTR permite direccionar el craqueo molecular maximizando, en este caso, la fracción gaseosa. Este nuevo diseño de pirolizador (propiedad de la empresa InfinitVE) permite trabajar a temperaturas inferiores que los sistemas tradicionales manteniendo altas velocidades de reacción, lo que reduce los costes del proceso.

El proceso que tiene lugar consiste en la descomposición química por degradación térmica catalizada en ausencia de oxígeno de una mezcla de materiales plásticos y otros compuestos no reciclables procedentes de CTR y de la industria en general. Todos los residuos de entrada que llegan a la planta son mezclados sin importar, en principio, su naturaleza, dado que el proceso es el mismo para todos, y son introducidos para su tratamiento en la cámara cilíndrica (horno de reacción). En dicha cámara la mezcla de alimentación es sometida a temperaturas en torno a los 400-500°C, y el gas generado, syngas, se condensa en un proceso de dos etapas con el fin de alcanzar un destilado de hidrocarburos y un gas rico en metano. La fracción sólida o char es recogida aparte para su posterior valorización agronómica o energética.



Fig. 3: Reactor de pirólisis-torrefacción (Fuente: InfinitVE)

2.3. ENSAYOS DE CRISTALIZACIÓN

La valorización del digestato generado en la planta piloto de digestión anaerobia en dos fases se ha realizado mediante un proceso de cristalización como estruvita. Dicho proceso consiste en la co-precipitación del nitrógeno amoniacal y fósforo ortofosfórico contenido en el digestato mediante la adición de óxido de magnesio, formando una sal llamada estruvita (fosfato amónico magnésico hexahidratado), valorizable en la formulación de fertilizantes minerales (Fig. 4).

Los tipos de reactor más empleados en la cristalización de estruvita son el de lecho fluidizado (Bowers y Westerman, 2005) y las columnas agitadas con aire (Münch y Barr, 2001), pero en este caso se ha optado por un reactor de tanque agitado por su mayor flexibilidad y facilidad en el manejo siendo, ade-



Fig. 4: Estruvita seca obtenida a partir de digestato

más, el tipo de reactor que más se emplea en la cristalización industrial.

2.4. INTEGRACIÓN DE PROCESOS

En el conjunto de procesos que conforman la “Planta Mixta” se tienen corrientes a diferentes temperaturas así como fuentes y sumideros energéticos y de materiales. La integración busca conseguir una operación energéticamente eficiente mediante el aprovechamiento de la energía remanente en las corrientes calientes del proceso para precalentar o calentar las corrientes frías del mismo, logrando así una reducción de costes principalmente en cuanto al uso de energía eléctrica y combustibles (Kemp, 2007).

A la hora de plantearse la integración energética, lo primero que hay que hacer es cuantificar la energía disponible en corrientes y efluentes. Para ello se debe proceder a un exhaustivo diseño y definición de bloques y elementos funcionales presentes en la planta (Figura 5). En cada uno de ellos se ha de plantear el balance individual de masas, de flujos y temperaturas, así como los consumos eléctricos estimados, máximos y mínimos. Con ello se obtiene una fotografía global de la planta que permitirá identificar las fuentes y sumideros energéticos y de materiales.

El objetivo final es organizar el sistema de transmisión energética y de materiales para reducir las pérdidas del sistema, así como potenciar el intercambio de calor y frío (energía térmica) entre elementos clave de la planta.

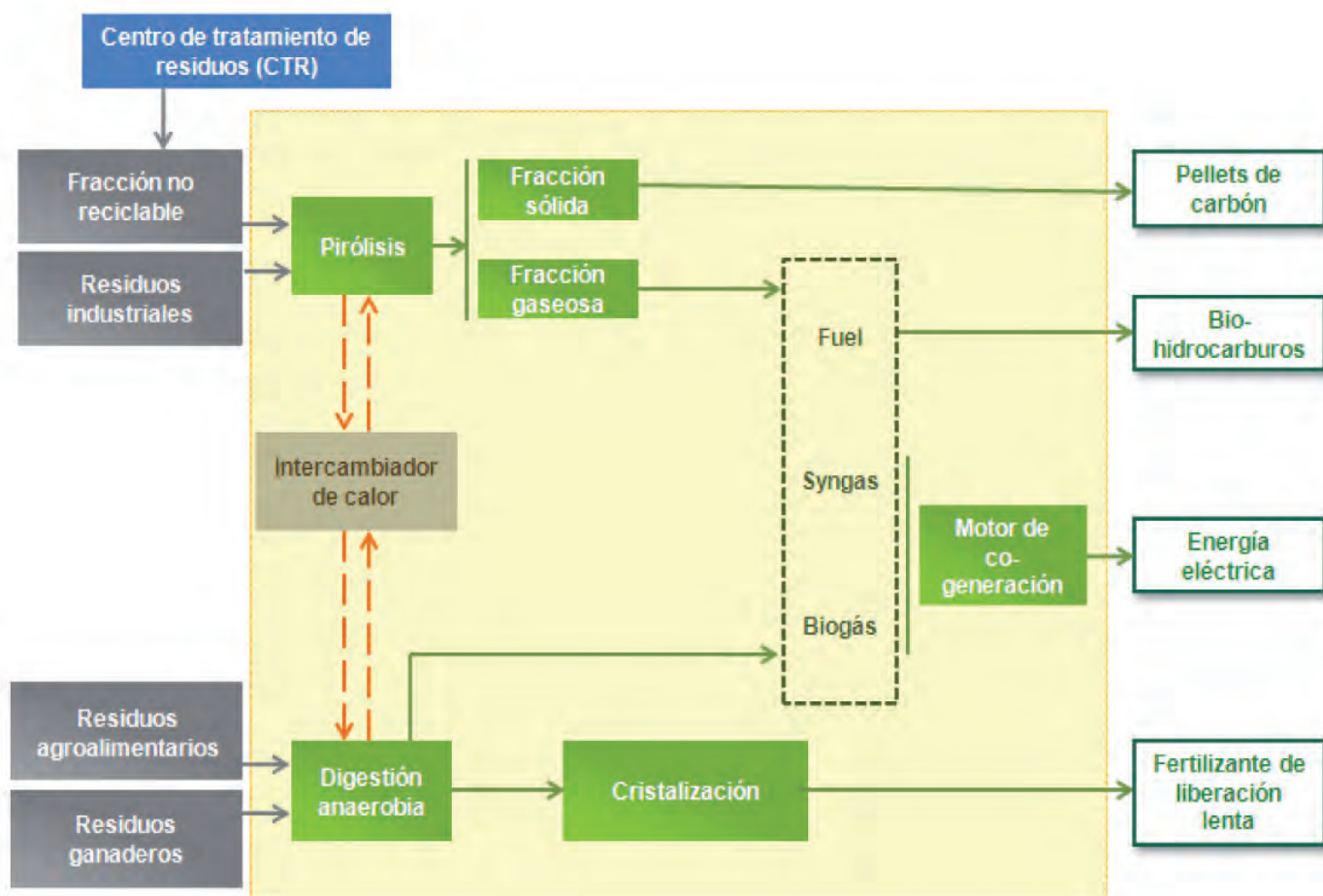


Fig. 5: Diagrama de proceso con integración de flujos energéticos y másicos

3. RESULTADOS

3.1. BIOMETANIZACIÓN DE RESIDUOS AGROALIMENTARIOS Y GANADEROS

El comportamiento de la digestión en una y dos fases de una mezcla de residuos agroalimentarios y ganaderos fue comparado a escala laboratorio en términos de estabilidad, producción de metano y capacidad de tratamiento.

Aun manteniendo condiciones de pH, THR y velocidad de carga orgánica (VCO) similares en ambos sistemas, el sistema 2F parece proporcionar un efluente de mejor calidad en términos de eliminación de sólidos volátiles (SV), mayor estabilidad a corto y largo plazo y mayores rendimientos de generación de metano que el sistema 1F (Figura 6).

Ambos sistemas consiguieron una más que aceptable eficiencia de eliminación de SV (superiores al 70%) operando en estado estacionario, pero cuando se producía una sobrecarga de alimentación en los sistemas, el reactor 1F mostraba poca estabilidad, mientras que el reactor 2F se recuperaba rápidamente de dichas sobrecargas. Este hecho ya fue observado por Solera et al. (2002) quien concluyó que el sistema 2F aumenta la estabilidad del proceso controlando la fase de acidificación, lo que permite evitar alteraciones en la fase metanogénica, siempre más sensible a cambios bruscos.

Adicionalmente, el sistema 2F fue capaz de operar a VCO de 3,1 kgSV/m³d de forma estable, mientras que el reactor 1F no superó 2,6 kgSV/m³d de carga orgánica. Mayor VCO im-

	% N	% C	% H	% S	% O	%Cenizas
Residuo 1	1,51	35,79	5,20	0,16	27,11	30,23
Residuo 2	1,12	41,57	6,59	0,15	32,79	17,78

Tabla 1: Composición elemental.
Fuente: InfinitVE

plica mayor capacidad de tratamiento para el mismo volumen de digestor, lo que resulta económicamente más beneficioso.

Comparando la producción de metano en ambos sistemas (Figura 6c y 6d) se puede concluir que el sistema 1F generalmente produce más biogás, pero el sistema 2F produce un biogás con mayor contenido en metano (67% frente al 65% del sistema 1F), por lo que en términos de producción de energía, el sistema 2F es también más ventajoso.

Como consecuencia, y basándose en los datos del estudio, puede decirse que el sistema 2F consigue, en general, mejores resultados que el sistema 1F en el tratamiento de residuos agroalimentarios y ganaderos.

En la operación de la planta piloto con la misma mezcla de residuos se consiguieron resultados incluso mejores que en laboratorio. La eliminación de SV alcanzó el 81,9% trabajando con 20 días de THR. En estas condiciones la producción máxima de biogás fue de 0,65 m³ kg/SV disuelto con un contenido en metano del 65%.

	100 °C	150 °C	200 °C	300 °C	400 °C	600 °C	800 °C	1.000°C
Residuo 1	5,79	6,64	9,41	25,35	35,92	43,19	45,34	48,87
Residuo 2	4,43	5,24	8,47	-	73,99	83,31	85,07	90,10

Tabla 2: Análisis termogravimétrico. Pérdida de peso (%).
Fuente: InfinitVE

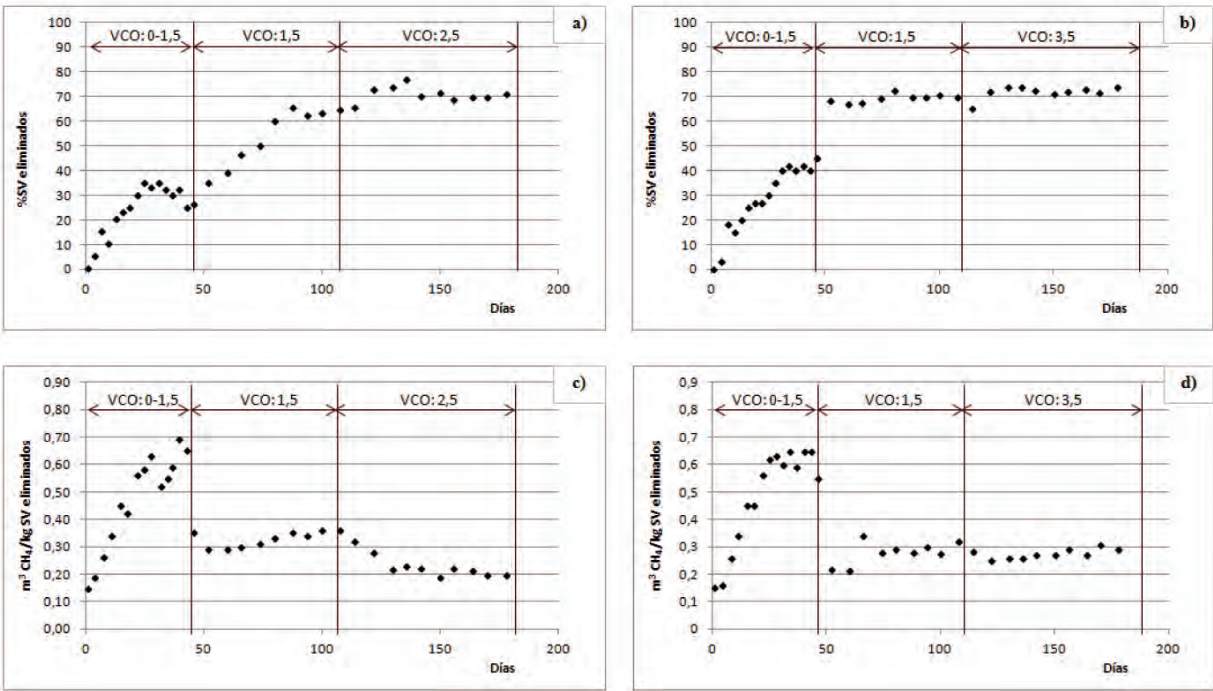


Fig. 6: Evolución comparativa de los digestores de laboratorio en una (a, c) y dos fases (b, d). VCO: kg SV/m³d

3.2. PIROLÍISIS DEL RECHAZO DE LOS CTR Y RESIDUOS PLÁSTICOS

Se han testado dos productos en la planta de pirólisis, el Residuo 1, un mix de Ecoparc con triaje de baja eficiencia, compuesto en diferentes proporciones por una mezcla de orgánicos, inertes y plásticos no reciclables y el Residuo 2, o residuo industrial plástico no reciclable con pequeñas trazas de otros residuos. Ambos muestran un balance compositivo muy similar frente al carbono (C), nitrógeno (N), hidrógeno (H), azufre (S) y oxígeno (O), como puede observarse en la Tabla 1.

Aunque la composición analizada es similar, el Residuo 2 presenta un mayor rendimiento pirolítico que el Residuo 1, pues contiene una mayor proporción de carbono (C) y de hidrógeno (H) y, por tanto, tiene un mayor PCI (poder calorífico inferior). A todos los efectos, tener más carbono implica una mayor posibilidad de obtener productos gaseosos de mayor valor añadido (mayor valor energético).

El análisis termogravimétrico (valoración de cómo disminuye el peso en función de la temperatura aplicada durante aproximadamente una hora), proporciona los valores recogidos en la Tabla 2, teniendo presente que el material remanente a 1.000 °C para los residuos testados indica cenizas.

Se pueden apreciar grandes diferencias entre ambos residuos. Mientras que a 100 °C la humedad de los dos productos es totalmente similar, a 400 °C se ha producido un 73,99% de gases para el Residuo 2 mientras que en el caso del Residuo 1 no llega ni a la mitad de este valor, corroborando que a menor carbono menor es la cantidad de producto gaseoso de interés. Pero la mayor diferencia es que el Residuo 1 tiene una elevada cantidad de cenizas, más de cuatro veces las cenizas obtenidas con el Residuo 2. Este hecho es de nuevo indicativo de una menor proporción de volátiles o gases al tratar el Residuo 1, corroborando lo dicho anteriormente respecto a rendimientos de operación con ambas corrientes.

Por tanto, en el tratamiento del Residuo 1 se espera la formación de un porcentaje de gas no superior al 60% en el mejor de los casos, mientras que en el caso del Residuo 2 se espera conseguir hasta un 90%. Este factor tiene una enorme repercusión económica, pues por un lado al tratar el Residuo 1 se generan más cenizas (fracción no aprovechable energéticamente, aunque puede que sí agrónicamente, todo dependerá de su contenido en metales) a la vez que menos fracción gas (la que realmente interesa en este caso).

Desde el punto de vista del proceso en sí, el estudio arroja como conclusión que si se controlan las propiedades del catalizador empleado, es posible disminuir la energía necesaria para la degradación térmica de los residuos y optimizar así el craqueo de las cadenas poliméricas en forma controlada, obteniéndose compuestos gaseosos de alto valor añadido.

3.3. APROVECHAMIENTO AGRÍCOLA DEL DIGESTATO

La composición del digestato generado en la planta piloto de digestión anaerobia en dos fases se muestra en la Tabla 3. Para alcanzar las relaciones molares necesarias para producir la precipitación de la estruvita (fórmula química $(\text{NH}_4)\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) se añadieron las siguientes sales $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ en la proporción demandada por la estequiometría.

Ca^{2+} (mg/L)	86,00
Mg^{2+} (mg/L)	9,19
K^+ (mg/L)	436,20
Na^{2+} (mg/L)	242,50
PO_4^{3-} (mg/L)	5,94
N-NH_4 (mg/L)	879,00
CO_3 (meq/L)	3,80
HCO_3 (meq/L)	69,50

Tabla 3: Composición del digestato

La reacción de cristalización de estruvita depende de varios factores, siendo el pH uno de los más influyentes. Para evaluar su efecto se llevaron a cabo varios experimentos en un intervalo de pH comprendido entre 8,5 y 11,5. Para ajustar el pH se utilizó NaOH 1 M.

La eliminación del nitrógeno y fósforo presentes en el digestato fue máxima a pH 10,5. En estas condiciones, cerca del 90% de estos elementos precipitaron como cristales estruvita (Figura 7).

Para estudiar el efecto de ión magnesio (Mg^{2+}) en la cristalización de estruvita, se analizaron relaciones molares de Mg/P comprendidas entre 1 y 1,9 mediante la adición de $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ al medio. Manteniendo un pH de 10,5 se observa que el porcentaje de eliminación de fósforo aumenta al hacerlo la relación Mg/P hasta un máximo de 95,02% con una relación Mg/P = 1,4. A partir de este momento, aunque la relación Mg/P aumente, no se consigue retirar más fósforo del medio.

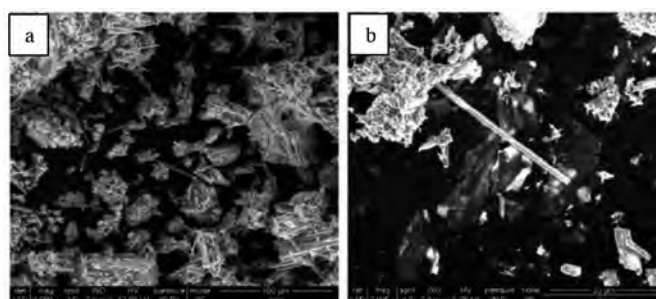


Fig. 7: Cristales de estruvita: a) 1000x; b) 5000x

En el proceso de cristalización de la estruvita, la presencia del ión calcio (Ca^{2+}) influye debido a la competencia que genera este ión por su tendencia a formar un precipitado de fosfato de calcio. Durante la experimentación se observó que a pH 10,5 con el incremento de la relación molar de Ca/Mg, aumentaba el porcentaje de eliminación de magnesio y calcio mientras que la cantidad de fósforo precipitado se mantenía constante, por lo que se deduce que a este valor de pH su recuperación sería la misma independientemente del calcio presente.

4. CONCLUSIONES

El estudio realizado arroja como conclusión general que es posible realizar, desde el punto de vista técnico y económico, el tratamiento integral de múltiples residuos en una única Planta Mixta, mediante la selección de las tecnologías más adecuadas en cada caso y la integración energética y material de los sistemas.

Se ha propuesto una alternativa innovadora para el tratamiento de la fracción de plásticos no reciclable que va a vertereder como es el reciclado químico mediante pirólisis a baja temperatura en un reactor catalizado de diseño novedoso. Esta tecnología, además de operar más eficientemente que la mayoría de los sistemas actualmente existentes en el mercado, genera dos ventajas ambientales adicionales: por un lado se evita la deposición de residuos plásticos en vertedero, por lo que se reducen de forma considerable las emisiones perjudiciales a la atmósfera y, por otro lado, se generan productos combustibles a partir de residuos.

Se propone además la integración en una única instalación, la Planta Mixta, del sistema de pirólisis con un sistema de digestión anaerobia 2F que ha demostrado su mayor eficacia en el tratamiento de residuos orgánicos frente a los tradicionales sistemas 1F. Ambos bloques, pirolizador y biodigestor, se retroalimentan entre sí para evitar insumos externos de energía y otros recursos necesarios. Para completar el ciclo cerrado con el mínimo impacto ambiental, los residuos generados durante los procesos serán valorizados como productos de alto valor añadido: pelets de carbón (biocombustible sólido), bio-hidrocarburos de segunda generación y fertilizantes de liberación lenta.

En resumen, basándose en los logros alcanzados con la experimentación realizada, se prevén alcanzar los siguientes resultados con la planta en pleno funcionamiento:

- Ahorro de un 80% de los costes de generación térmica y eléctrica en comparación con una planta de bio-digestión tradicional que opere de forma autónoma.
- Ahorro de un 15% de los costes de generación térmica y eléctrica en comparación con una planta de pirólisis de residuos plásticos no reciclables tradicional que opere de forma autónoma.
- Valorización del 100% del digerido producido en el proceso anaerobio como un fertilizante de liberación lenta, el cual ofrece como ventajas la reducción de la toxicidad a las plantas y de las pérdidas de nitrógeno al suelo.
- Reducción entre un 65% y un 80% el impacto ambiental asociado a la deposición en vertederos de la fracción no reciclable procedente de los CTR.
- Obtención de rendimientos de eliminación de sólidos volátiles de al menos un 90%.
- Obtención de rendimientos de recuperación del nitrógeno contenido en el digestato en forma de estruvita del 95-98%.
- Obtención de rendimientos de fase líquida, sólida y gas en el proceso de pirólisis-torrefacción en torno a 7%, 3% y 90%, respectivamente.
- Valorización del 100% de los subproductos generados en el proceso de pirólisis-torrefacción como pelets de carbón, syngas y bio-hidrocarburos.

En la actualidad, y en el marco del proyecto

LIFE REVAWASTE, se está planificando la construcción de la primera planta Mixta en España para el tratamiento de 1t/h de residuos.

NOMENCLATURAS

- 1F: Digestión anaerobia tradicional (una fase)
- 2F: Digestión anaerobia en dos fases
- CTR: Centro de Tratamiento de Residuos
- SV: Sólidos Volátiles
- THR: Tiempo Hidráulico de Residencia
- VCO: Velocidad de carga orgánica

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la financiación recibida de la Comisión Europea a través de su programa LIFE+ para la realización de este trabajo (proyecto LIFE 12 ENV/E/000727-REVAWASTE).

BIBLIOGRAFÍA

- Bowers KE, Westerman PW. "Design of cone-shaped fluidized bed struvite crystallizers for phosphorus removal from wastewater". Transactions of the ASAE. 2005. Vol. 48(3) p.1217- 1226.
- IAEST - Instituto Aragonés de Estadística. "Información estadística del sector agrario". Junio 2013.
- Kemp I. Pinch analysis and process integration. 2^o edición. Oxford. Ediciones BH, 2012. ISBN 13: 978-0-75068-260-2.
- Münch EV, Barr K. "Controlled struvite crystallization for removing phosphorus from anaerobic digester sidestreams". Water Research. 2001. Vol. 35 p.151-159. (DOI:10.1016/S0043-1354(00)00236-0).
- Plastics Europe. "Plásticos-Situación en 2011" [en línea]. http://www.plasticseurope.org/documents/document/20111107102611-pe_factsfigures_es_2011_lr_final041111.pdf [consulta: septiembre 2013].
- Solera R, Romero LI, Sales D. "The evolution of biomass in a two-phase anaerobic treatment process during start-up". Chem Biochem Eng Q. 2002. Vol. 16(1) p.25-29.
- Wust E. "Single-phase and two-phase cheese wastewater treatment by anaerobic SBRs". PhD thesis, Civil, Construction and Environmental Engineering Department, Marquette University, Milwaukee, Wisconsin. 2003.

Desarrollo de equipo para la realización de test de respuesta térmica del terreno (TRT) en instalaciones geotérmicas

DEVELOPMENT OF DEVICE FOR GROUND THERMAL RESPONSE TESTS (TRT) IN GEOTHERMAL INSTALLATIONS

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/6943> | Recibido: 29/07/2013 • Aceptado: 10/12/2013



Pedro J. Casanova-Peláez¹, José M. Palomar-Carnicero²,
Rafael López-García², Fernando Cruz-Peragón²

¹ UNIVERSIDAD DE JAÉN. Dpto. de Ingeniería Electrónica y Automática. Campus Las Lagunillas, s/n. Edif. A-3 - 23071 Jaén. Tfno: + 34 953 212805. casanova@ujaen.es

² UNIVERSIDAD DE JAÉN. Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera. Campus Las Lagunillas, s/n - 23071 Jaén. Tfno: + 34 953 212805

ABSTRACT

• The use of the ground as heat source in air-conditioning has become a renewable energy resource increasingly booming since it maintains a stable temperature in both winter and summer, from a certain depth. For the design of facilities that take advantage of this resource is necessary to know the thermal characteristics of the ground (conductivity, diffusivity and undisturbed ground temperature, etc.), from them the ground heat exchanger (GHE) is dimensioned (depth, diameter and number of boreholes).

In this sense, it has been developed and built a system that allows make ground thermal response tests (TRT), to obtain ground characteristics mentioned above. This paper describes the design of the equipment and the computing software that obtains the required results.

• **Key words:** geothermal, HVAC, renewable energy, sustainable building, ground source heat pump.

RESUMEN

La utilización del terreno como fuente térmica en instalaciones de climatización se ha convertido en un recurso energético renovable cada vez más en auge gracias a que mantiene una temperatura estable, tanto en invierno como en verano, a partir de una determinada profundidad. Para el diseño de instalaciones que aprovechen este recurso es necesario conocer las características térmicas del suelo (conductividad, difusividad y temperatura del suelo inalterado, entre otras), a partir de las cuales se dimensiona el intercambiador geotérmico (profundidad, diámetro y número de sondas).

En este sentido, se ha desarrollado y construido un equipo que permite realizar ensayos de respuesta térmica del terreno (TRT), para conocer las características del suelo anteriormente mencionadas. En este trabajo se describe el diseño del equipo y el software de cálculo que obtiene los resultados requeridos.

Palabras clave: geotermia, climatización, energías renovables, edificación sostenible, bomba de calor geotérmica.

1. INTRODUCCIÓN

La propuesta 20-20-20 de la Unión Europea [1] traduce los objetivos estratégicos en materia de energía de la Unión Europea destinados a combatir el cambio climático, incrementar la seguridad de suministro energético minimizando la dependencia del exterior y reducir el coste de la factura energética. En ella se pretende lograr una reducción del 20% de las emisiones de gases de efecto invernadero, llegar a un consumo final del 20% procedente de energías renovables y ahorrar otro 20% en la demanda futura de energía para el año 2020. Por ello, la utilización de la energía procedente de fuentes renovables desaceleraría el cambio climático, al disminuir consecuentemente las emisiones de CO₂. Dentro de las energías renovables, la energía geotérmica es una de las que está por desarrollar [2].

El sector energético en el ámbito de la edificación no ha pasado desapercibido para estas políticas, estableciéndose medidas para una mejora en la demanda y consumos de energía en edificios [3], lo que se asocia directamente a los sistemas de climatización. En este sentido, la energía que consumen las familias se acerca al 30% del consumo energético total en España, y se reparte entre un 18% en la vivienda y un 12% en el del coche. Un 44 % de la demanda de energía en el hogar se corresponde con la climatización, y el 20% con la producción de agua caliente sanitaria (en adelante ACS) [4].

El Gobierno de España a través del Ministerio de la Vivienda ha dispuesto el nuevo *Código Técnico de la Edificación*, estableciéndose medidas para la certificación de edificios de nueva construcción [5], y cuya normativa se ha actualizado recientemente ampliando aquella para edificios existentes [6]. Con estos antecedentes, un paso más hacia la edificación sostenible implicaría el uso de fuentes renovables para la producción de frío: por un lado, ampliaría el aprovechamiento de fuentes renovables a una aplicación adicional, aparte de las ya existentes para producción exclusiva de calor o electricidad, y por otra parte, modificaría la concepción de producción de calor en invierno con fuentes renovables al utilizar un ciclo frigorífico con bomba de calor [7].

Hasta la fecha, los sistemas de climatización (calefacción en invierno, refrigeración en verano) utilizan equipos que aportan o roban calor a una fuente térmica, que es el local a calefactar o refrigerar, respectivamente. Estos equipos suelen utilizar un ciclo frigorífico convencional de compresión de vapor [8], para lo cual es preciso el uso de un sistema de compresión, robando o cediendo calor al ambiente exterior (equipo exterior). La eficiencia de este tipo de sistemas se establece como la relación entre el calor que se cede (calefacción) o roba (refrigeración) del local a climatizar, y la energía eléctrica que se consume en el motor que mueve al compresor, a través de su eficiencia. A su vez, dicho indicador depende de la eficiencia de cada uno de los elementos que componen el sistema (evaporador, condensador, compresor). Los equipos que transfieren calor tienen una eficiencia limitada a las temperaturas puestas en juego, tanto en los ambientes exterior e interior, como de los fluidos térmicos involucrados. Así, se encuentra una limitación debida al equipo exterior impuesta por la temperatura del aire ambiente: la diferencia de temperaturas entre los focos de trabajo va acompañada de un salto de presiones en el compresor, incrementándose el trabajo del mismo y por tanto el consumo de energía eléctrica.

Con objeto de aumentar la eficiencia de este tipo de sistemas (disminuyendo los consumos energéticos y emisiones), uno de los aspectos que va cobrando mayor auge es el uso del terreno como fuente térmica a través de las bombas de calor geotérmicas (GSHP o *Ground Source Heat Pump*) [9]. Esto supone que el equipo exterior no trabaja intercambiando calor con el medio ambiente, sino con el terreno por medio de un fluido térmico (agua líquida con anticongelante). Para ello, se entierran una serie de tubos por los que circula dicho fluido a calentar o enfriar. El medio exterior se sustituye por terreno y presenta la ventaja de una elevada eficiencia energética como consecuencia de estar empleando una fuente térmica que mantiene estable su temperatura en el rango de interés.

Una de las características principales del terreno es que, a partir de una profundidad determinada, su temperatura es muy estable, oscilando estacionalmente mucho menos que la del aire ambiente. Así, se puede hablar de temperaturas que oscilan entre 16°C y 22°C, para los países del sur de Europa, como es el caso de España. Esto repercute muchísimo en la transferencia de calor, no por la cantidad, sino por su calidad. Al existir menos diferencia de temperaturas entre los fluidos que intercambian calor, significa que el incremento de presión al que tiene que hacer frente el compresor de la máquina se reduce, y con ello el consumo eléctrico. A igualdad de calores transferidos, un menor consumo de electricidad supone un

incremento de eficiencia en la máquina, y con ello una reducción considerable de las emisiones asociadas a su generación.

Las principales ventajas de este tipo de sistemas son, en primer lugar, un ahorro en la factura energética, mejorando en más del 30% la eficiencia del sistema en invierno, y más del 45% en verano (superando con creces un ahorro en consumo de energía final del 20%) [10], la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero en más de un 66% respecto a los sistemas que utilizan combustibles fósiles y por último la reducción de los costes de mantenimiento de la instalación en aproximadamente la mitad respecto a otros sistemas convencionales [11]. Asimismo, las bombas de calor geotérmicas son más silenciosas que las aerotérmicas y el intercambiador de calor acoplado al terreno puede sustituir a las torres de refrigeración evitando los problemas asociados de legionelosis [12]. Finalmente, al utilizar como foco térmico el terreno, se evitan problemas de funcionamiento por temperaturas ambientales extremas (muy altas en verano y muy bajas en invierno). Esta tecnología está actualmente muy extendida en el Norte de Europa y América [10, 13-14], pero no así en las zonas mediterráneas, donde la demanda de refrigeración prima sobre la de calefacción.

Desde hace algún tiempo se viene investigando e impulsando esta tecnología en España, a través de diferentes proyectos, guías y proyectos asociados [15-17], lo que ha permitido incluir esta solución como herramienta de ahorro energético en la certificación energética de edificios. Con el objetivo de alcanzar un consumo final de energía de 40,5 ktep para esta tecnología, en 2020, en España, el PANER establece unas previsiones de actuaciones para su correcta implantación en el sector de la edificación, implicando para ello a las diferentes administraciones [18]. Todo ello se ha plasmado recientemente en la publicación de la Guía Técnica de Diseño de Bomba de Calor Geotérmica por parte del IDAE [19].

Esta Guía será la fuente inicial de la que se tomarán los requerimientos mínimos para el diseño del sistema. El objeto de este documento es fijar las condiciones técnicas mínimas que deben cumplir las instalaciones de bomba de calor geotérmica de circuito cerrado para climatización de edificios y producción de agua caliente sanitaria, especificando los requisitos de diseño, instalación y mantenimiento. En la propia introducción del documento, se indica que esta guía no constituye un manual de diseño de aplicación indiscriminada, y aconseja recurrir, en caso necesario, a herramientas de análisis y simulación más avanzadas.

Con los antecedentes mencionados se justifica el interés por parte de las diferentes administraciones en cuanto al desarrollo de sistemas eficientes energéticamente. Entre ellos, se ha constatado la importancia del uso del terreno como fuente térmica para la climatización de edificios y viviendas. En este sentido, también se constata la necesidad de realizar, en áreas mediterráneas, estudios asociados al uso del terreno como fuente térmica en sistemas de climatización, de los que no se tiene suficiente información.

Estos estudios tienen como objetivo principal la definición del número suficiente de perforaciones en el subsuelo que permita a éste responder de forma adecuada a los requerimientos de las máquinas climatizadoras del edificio, para hacer frente a las diferentes demandas térmicas del mismo con un menor consumo de energía final (electricidad). Para tal fin será nece-

sario conocer, de forma precisa, las características del terreno (temperaturas, conductividad y difusividad térmica, etc.) y para ello se ha diseñado un equipo que permite realizar un test de respuesta térmica del terreno (TRT) [20]. Estos ensayos siguen las especificaciones de la Agencia Internacional de la Energía (IEA) y la Asociación Internacional de Bomba de Calor Acoplada al Terreno (IGSHPA). Para ello se ha realizado una perforación piloto de diámetro 150 mm y profundidad 120 m, disponible en la Universidad de Jaén. En la perforación vertical se ha introducido un tubo en U (ida y vuelta), de polietileno PE 100 SDR11 PN16 y diámetros 40x36 mm, rellenándola con bentonita (Fig. 1). Los extremos del tubo se unen al dispositivo de ensayo, que es el equipo desarrollado y que se presenta en este artículo (Fig. 2).



Fig. 1: Extremos de la tubería en U introducida en la sonda



Fig. 2: Maquina TRT montada sobre remolque y conectada a sonda

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. FUNDAMENTOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL TERRENO A PARTIR DE ENSAYOS TRT

Para el diseño del campo de sondas será necesario conocer las cargas térmicas del edificio a climatizar y la capacidad de disipación de cada una de las sondas. Para obtener la capacidad de disipación de cada una de las sondas será necesario el análisis y modelado de la transferencia de calor con el terreno a partir de la *ley de Fourier* [21] y utilizando técnicas experimentales asociadas a su análisis teórico con modelos analíticos [22, 23].

Existen diferentes modelos analíticos y numéricos para evaluar la respuesta térmica del suelo. En Europa el método más empleado es el de la línea infinita [24], debido a su simplicidad y a la rapidez de su aplicación. Este método parte de la ecuación general de difusión de calor en coordenadas cartesianas, Ec. (1):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{g} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

y considerando flujo unidimensional, conductividad constante y que no existe generación de energía, la ecuación se reduce a la Ec.(2):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{donde: } \alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} = \frac{\lambda}{C_p} \quad \text{Difusividad térmica} \quad (2)$$

Para resolver la ecuación se define la variable $\eta = \frac{x^2}{4\alpha t}$, que permitirá integrar la Ec. (2), llegando a la Ec.(3):

$$T_b = T_{sur} + C_1 \int_{\eta_0}^{\infty} \frac{e^{-\eta}}{\eta} d\eta \quad (3)$$

Fijando las condiciones de contorno para r_b (radio de la sonda), obtendremos el valor de la constante C_1 , y llevando este valor a la Ec.(3), se obtendrá la ecuación buscada, Ec.(4):

$$T_b = T_{sur} + \frac{\dot{m} c_p \Delta T}{4 \pi \lambda H} e^{-\eta_0} \int_{\eta_0}^{\infty} \frac{e^{-\eta}}{\eta} d\eta \quad (4)$$

Esta ecuación puede simplificarse sabiendo que el término $e^{-\eta_0} \rightarrow 1$ cuando el tiempo es prolongado. Con esta simplificación, la Ec.(4) se reduce a:

$$T_b - T_{sur} = \frac{\dot{q}}{4 \pi \lambda} \int_{\frac{1}{4F_0}}^{\infty} \frac{e^{-\eta}}{\eta} d\eta \quad \text{donde: } \dot{q} = \frac{\dot{m} c_p \Delta T}{H} \quad \text{y} \quad F_0 = \frac{\alpha t}{r_b^2} \quad (5)$$

siendo: H = profundidad de la sonda (m); $\dot{m}$ = Flujo (kg/s); c_p = calor específico del fluido (kJ/kg K); T_b = Temperatura extremo del relleno (K); T_{sur} = Temperatura no perturbada del terreno (K); $\dot{q}$ = Flujo de calor (W/m); λ = conductividad térmica del terreno (W/m K); F_0 = número de Fourier; r_b = radio de la sonda (m); α = difusividad térmica del terreno (m²/s);

La integral exponencial de la Ec.(5) puede ser aproximada [25], obteniéndose:

$$\int_{\frac{1}{4F_0}}^{\infty} \frac{e^{-\eta}}{\eta} d\eta = -\gamma + \ln \left(\frac{1}{\eta^*} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n (\eta^*)^n}{n n!} \quad (6)$$

Teniendo en cuenta que el término $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n (\eta^*)^n}{n n!} \rightarrow 0$ para valores de tiempo $t \geq \frac{5 r_b^2}{\alpha}$, se llega a:

$$T_b = T_{sur} + \frac{\dot{m} c_p \Delta T}{4 \pi \lambda H} \left[\ln \left(\frac{4 \alpha t}{r_b^2} \right) - \gamma \right] \quad (7)$$

Por otro lado, para el problema de transferencia de calor dentro de la sonda, la temperatura media del tubo (T_f) puede ser calculada usando la temperatura de la cara lateral de la sonda [26], considerando que entre el fluido caloportador y la pared del pozo existe una resistencia térmica R_b (K/(W/m)), resistencia que caracteriza la transferencia de calor entre el fluido térmico y la pared exterior del sondeo, en contacto con el terreno circundante, cumpliéndose:

$$T_f = T_b + \frac{\dot{q} R_b}{H} \quad (8)$$

Igualando las Ecs. (7) y (8) se obtiene:

$$T_f = T_{sur} + \frac{\dot{m} c_p (T_{out} - T_{in})}{4 \pi \lambda H} \left[\ln \left(\frac{4 \alpha t}{r_b^2} \right) - \gamma \right] + \frac{\dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) R_b}{H} \quad (9)$$

dónde: $\dot{Q} = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in})$ = diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida del fluido (K); γ = constante de Euler = 0,577216; t = tiempo (s).

Teniendo en cuenta que es la potencia calorífica que aporta el fluido, llegamos a:

$$T_f = T_{sur} + \dot{Q} \frac{1}{4 \pi \lambda H} \left[\ln \left(\frac{4 \alpha t}{r_b^2} \right) - \gamma \right] + \dot{Q} \frac{R_b}{H} \quad (10)$$

Si $\dot{Q}$ es constante, realizando los cambios oportunos, se puede expresar la Ec.(10) como:

$$T_f = m \ln(t) + n \quad (11)$$

Que presenta una relación lineal entre T_f y $\ln(t)$. Por tanto, realizando un ensayo en la sonda que consistirá en hacer circular un fluido que aporte una potencia calorífica constante al terreno, a partir de la serie de valores de las temperaturas de entrada y salida del fluido a lo largo del tiempo, se obtiene una serie de valores de T_f como la media aritmética entre cada temperatura de entrada y de salida. Mediante una regresión lineal obtendremos los valores m y n de la Ec.(11). Las series de datos deberán ser lo suficientemente largas para garantizar un buen ajuste, además, deberán descartarse las primeras horas del ensayo para garantizar la condición que dio lugar a la Ecuación 7.

Para obtener los valores buscados λ y α a partir de m y n aún se necesita conocer T_{sur} y R_b .

La resistencia del material de relleno R_b es conocida a partir de las características del mismo que aporta el fabricante, mientras que T_{sur} debe obtenerse experimentalmente mediante un ensayo en el que se hace circular, en régimen laminar, el fluido contenido en la sonda antes de cualquier aporte calórico al terreno. En este ensayo se registran los valores de temperatura del fluido a lo largo del tiempo necesario para que toda la columna de agua haya circulado, calculando T_{sur} como su valor medio.

En la Fig. 3 se muestra el equipo desarrollado para realizar estos ensayos, cuyo funcionamiento general es el siguiente:

- Inicialmente hay que realizar una prueba de presión, para garantizar la estanqueidad de la instalación enterrada. Posteriormente se realizan dos tipos de pruebas para la caracterización térmica del terreno: Estimación de la temperatura del terreno a diferentes profundidades (perfil de temperaturas) con el objeto de determinar la temperatura media del suelo inalterado (T_{sur}). Para ello se rellena el circuito con agua y se deja reposar un tiempo prudencial. El agua adquiere una temperatura prácticamente igual a la del terreno circundante. Posteriormente, se hace recircular y se mide su temperatura. En este caso, el régimen de circulación del fluido debe ser laminar, para que el error producido sea mínimo.

- Determinación de las características de conductividad y difusividad térmicas del terreno y sondeo. Para ello, se hace recircular agua en el circuito enterrado (en este caso con régimen turbulento), manteniendo constante la potencia calorífica aportada y se mide la evolución de la temperatura de impulsión y retorno a lo largo del tiempo. De los resultados de estas mediciones se determinan aquellas características mediante los cálculos matemáticos anteriormente descritos.



Fig. 3: Vistas anterior y posterior del equipo desarrollado mostrando circuitos hidráulico y eléctrico

2.2. DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO DESARROLLADO

Para llevar a cabo los ensayos descritos y medir las variables de interés a lo largo de los mismos, se ha diseñado y construido un equipo que consiste en un sistema hidráulico que permite la circulación de fluido por la sonda geotérmica con diferentes caudales tanto en régimen laminar como turbulento. Además, el equipo debe ser capaz de inyectar al terreno distintas potencias caloríficas. Para cada uno de los ensayos, tanto el caudal como la potencia calorífica aportada deben permanecer lo más estables posible a lo largo de todo el tiempo que dure el experimento; esto obliga a incluir reguladores tanto para el caudal como para la potencia.

Las variables de interés son las presiones y temperaturas del fluido, tanto en la impulsión hacia la sonda como en el retorno de la misma, así como el caudal circulante. Estas deben ser medidas con una precisión razonable a intervalos regulares de tiempo, en torno a un segundo. En la Fig.4 se muestra la pantalla de control del sistema donde aparecen los valores instantáneos de las variables de interés y los controles necesarios para la puesta en marcha y programación de los ensayos.

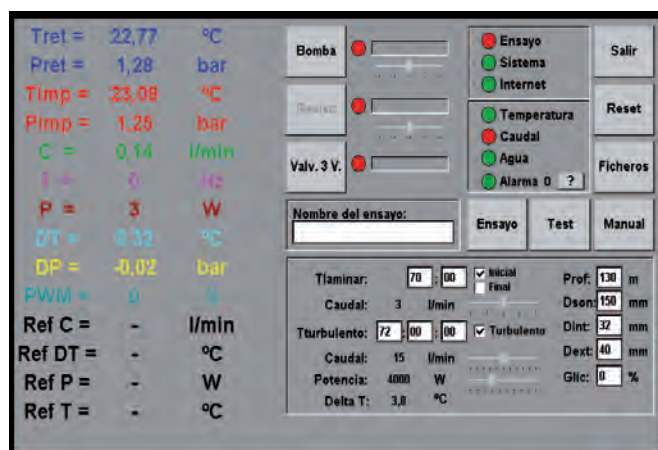


Fig. 4: Pantalla de control del sistema antes del inicio del ensayo



Fig. 5: Software para obtención del informe final del ensayo

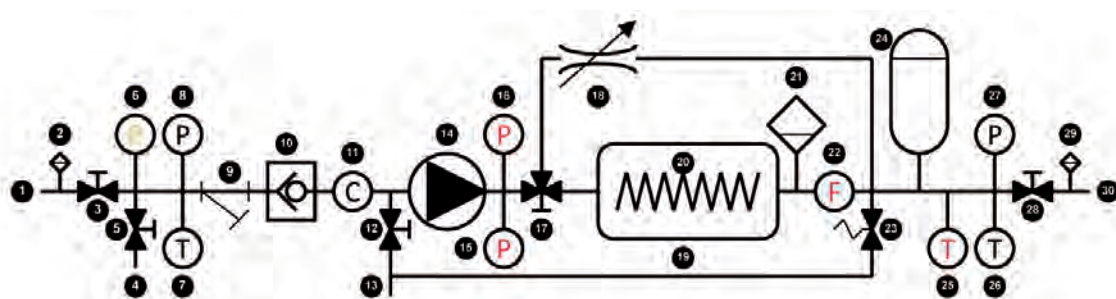
Tras realizar los ensayos se tienen las series de datos que deben ser procesadas adecuadamente para obtener los parámetros del suelo. Estos parámetros servirán de base en el diseño del campo de sondas necesario para cubrir la demanda térmica del edificio a climatizar. El equipo almacena todos estos datos en una memoria tipo SD para facilitar el trasvase de información a un PC donde, con el software desarrollado para esta aplicación (Fig.5), se obtiene el informe final del ensayo.

Además de lo indicado, el prototipo debe incluir las medidas de seguridad, tanto hidráulicas como eléctricas, para evitar accidentes y daños al equipo por mal funcionamiento. Es importante destacar que, debido a la larga duración de los diferentes ensayos (3 a 5 días), el sistema debe funcionar sin

supervisión; esto ha sido tenido en cuenta en el diseño incorporando las medidas de seguridad oportunas.

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, el prototipo sigue el esquema de principio mostrado en la Fig.6.

- Como elementos actuadores consta de una bomba centrífuga, una resistencia eléctrica de potencia inmersa en un depósito y una válvula de 3 vías para hacer pasar el fluido por una válvula de estrangulamiento en los ensayos de bajo caudal, buscando el régimen laminar, pero evitando bajos regímenes de funcionamiento de la bomba.
- Como elementos hidráulicos adicionales se incorporan las válvulas de llenado y vaciado, un filtro para evitar la entrada de impurezas a la máquina, una válvula antirretorno que evita la circulación en sentido contrario y un vaso de expansión para absorber las dilataciones del fluido.
- Como elementos de seguridad se dispone de una válvula de sobrepresión hidráulica que descarga el fluido en caso de alcanzarse la presión máxima de trabajo, de presostatos para detectar situaciones de baja y alta presión que deberán impedir el funcionamiento de la bomba, un flujostato detector de caudal mínimo para evitar el aporte de potencia calorífica sin circulación de fluido, y un termostato de seguridad para impedir que el fluido alcance temperaturas superiores a las recomendadas por el fabricante de la sonda.



1	Retorno de sonda	2	Purgador	3	Válvula de retorno
4	Entrada de agua	5	Válvula de llenado	6	Manómetro
7	Sensor de temperatura de retorno	8	Sensor de presión de retorno	9	Filtro
10	Válvula antirretorno	11	Caudalímetro	12	Válvula de vaciado
13	Desagüe	14	Bomba	15	Presostato de baja
16	Presostato de alta	17	Válvula de 3 vías	18	Válvula de estrangulación
19	Depósito de calentamiento	20	Resistencia de calentamiento	21	Purgador
22	Flujostato	23	Válvula de sobrepresión	24	Vaso de expansión
25	Termostato	26	Sensor de temperatura de impulsión	27	Sensor de presión de impulsión
28	Válvula de impulsión	29	Purgador	30	Impulsión a sonda

Fig. 6: Esquema de principio del equipo desarrollado

El circuito eléctrico de control, que se encarga de accionar tanto la bomba como la resistencia, utiliza los contactos de los elementos de seguridad de forma que sea imposible tanto el funcionamiento de la bomba cuando las presiones no son adecuadas, como el aporte de potencia cuando no exista caudal por el depósito que contiene la resistencia, o cuando se alcancen temperaturas excesivas.

En la Tabla I se incluyen las características principales de los sensores de medida utilizados. Como sensores de temperatura de utilizan resistencias PT-100, como sensores de presión se utilizan células cerámicas piezo-resistivas y como sensor de caudal se utiliza uno del tipo ultrasónico.

Sensor	Tipo	Mínimo	Máximo	Exactitud
Temperatura	PT-100	0 °C	50 °C	±0,5 °C
Presión	Piezo-resistivo	0 bar	10 bar	±0,03 bar
Caudal	Ultrasonidos	0,5 l/min	25 l/min	±0,75 l/min

Tabla I: Características principales de los sensores de medida

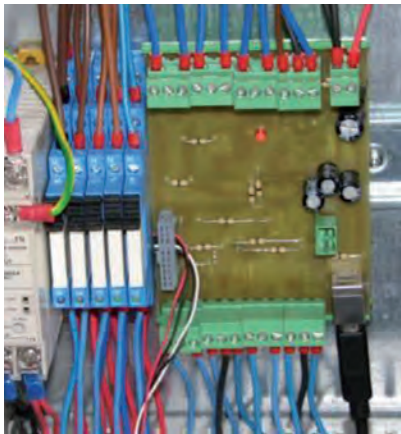


Fig. 7: Sistema electrónico de control y adquisición de datos

Para el accionamiento de la bomba con diferentes regímenes de caudal se utiliza un variador de frecuencia cuya consigna es establecida mediante un regulador PID implementado en el sistema electrónico de control y adquisición de datos. El accionamiento de la resistencia se realiza mediante un relé de estado sólido que permite variar la potencia entregada, variando el tiempo de encendido y apagado de la misma a intervalos de un semiperiodo de la red eléctrica mediante PWM, controlado mediante otro regulador PID también implementado en el sistema electrónico.

El sistema electrónico de control y adquisición de datos (Fig. 7) se ha diseñado específicamente para este prototipo encargándose tanto de la medida

de las variables necesarias para los experimentos como del control de los actuadores y la detección de situaciones anómalas. La manipulación del sistema se realiza desde una pantalla táctil (Fig. 4), desde la que es posible tanto la puesta en marcha del equipo (llenado, purgado y pruebas de estanqueidad y circulación) como la configuración de los parámetros de los experimentos y la realización de los mismos, capturando todas



Fig. 8: Máquina TRT montada sobre remolque para su transporte

las medidas a lo largo del tiempo del ensayo para su posterior procesamiento en un PC, consiguiendo así los parámetros de respuesta térmica del terreno buscados.

Todo el sistema se ha montado sobre una estructura a base de perfiles de aluminio que ha permitido dotarlo de una gran resistencia mecánica. Para evitar la transmisión de vibraciones e impactos, especialmente en el transporte, han sido utilizados elementos silent-blocks. Para poder transportar el equipo, toda la estructura se ha ubicado en un remolque estándar acoplable a un turismo sin superar la carga máxima transportable (Fig.8).



Fig. 9: Página web para la monitorización remota a través de Internet antes del inicio del ensayo

Puesto que los ensayos son de muy larga duración (de 3 a 5 días) y se realizan normalmente en obra, se ha dotado al prototipo de un equipo de comunicaciones basado en tecnología 3G que permite la monitorización y control remotos a través de Internet (Fig. 9). De esta forma es posible visualizar el estado del sistema, manipularlo a distancia si fuera necesario e incluso descargar los resultados de los ensayos antes de retirar la máquina por si fuera necesario realizar nuevos experimentos en caso de producirse cualquier fallo.

3. RESULTADOS

En las Figs. 10 y 11 se muestran los resultados gráficos obtenidos en el ensayo TRT realizado en la sonda piloto disponible en la Universidad de Jaén. La Fig. 10 muestra el perfil de temperatura del terreno no perturbado a lo largo de toda la profundidad del mismo (120 m). A partir de estos datos se obtiene la temperatura T_{sur} . La Fig. 11a representa la evolución de las temperaturas de impulsión y retorno así como la temperatura media a lo largo del tiempo para un ensayo turbulento de 70 horas con potencia constante de 3000 W. Por último, en la Fig. 11b aparecen estas mismas temperaturas pero representa-

das en función del logaritmo neperiano del tiempo. Se aprecia perfectamente la forma lineal de la gráfica si descartamos la primera parte del ensayo.

En la Fig. 12 se muestra parte del informe que emite el software desarrollado, en el que se indican la geometría de la sonda y de la tubería, los resultados del análisis TRT (conductividad del terreno, conductividad del relleno, resistencia térmica de la sonda, capacidad calorífica del terreno, difusividad térmica del terreno, potencia, flujo y número de Reynolds) y las gráficas comentadas en las Figs. 10 y 11, entre otros datos de interés.

Además de los ensayos tradicionales, el equipo está preparado para llevar a cabo otros tipos de test. Entre ellos, uno muy característico es el de emular el funcionamiento real de sistemas de climatización para obtención de frío.

En la etapa de diseño del intercambiador geotérmico (GHE) se considera el funcionamiento a largo plazo con flujos caloríficos constantes. Sin embargo, las máquinas frigoríficas utilizadas en GSHP operan con ciclos a intervalos regulares, lo que hace que los transitorios a corto plazo sean bastante importantes en la transferencia térmica. Realmente, los picos de carga hacen que la temperatura del terreno aumente de forma significativa justo en el borde del relleno, lo que puede hacer que el sistema 'sature' y no pueda seguir funcionando (normalmente por precaución para evitar el deterioro del material del tubo de la sonda). Así, en dicho diseño se analiza el sistema considerando picos de carga, reajustando el diseño para evitar llegar a dicha situación. Sin embargo, el modelado a tan corto plazo no llega a ser tan fiable como el que se realiza a largo plazo.

El dispositivo desarrollado permite realizar una emulación del funcionamiento en condiciones reales. Así se puede conocer experimentalmente la desviación diaria estimada en el fluido térmico respecto a un valor medio, consiguiendo determinar los picos de temperatura que deben sumarse a los valores medios en la etapa de diseño, para garantizar la seguridad del sistema. La Fig. 13 muestra los datos que se obtendrían en una instalación real funcionando 12 horas diarias durante 5 días.

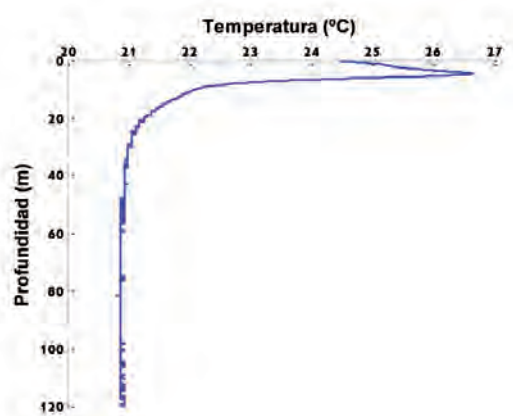


Fig. 10: Perfil de temperatura del terreno no perturbado a lo largo de toda la profundidad del mismo (120 m)

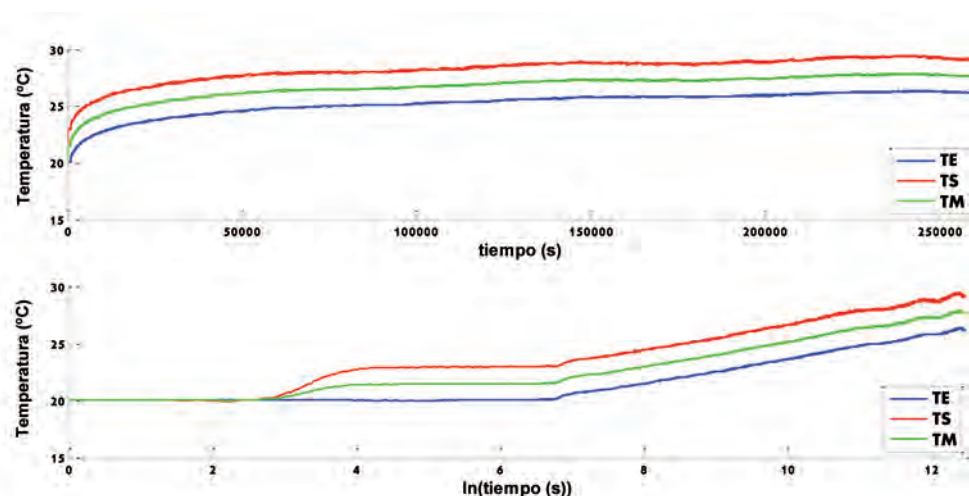


Fig. 11: a) Evolución a lo largo del tiempo de las temperaturas de impulsión (TS), retorno (TE) y media (TM) en el ensayo turbulento de 70 horas con potencia constante de 3000 W.

b) Idem al caso a) pero representadas en función del logaritmo neperiano del tiempo.

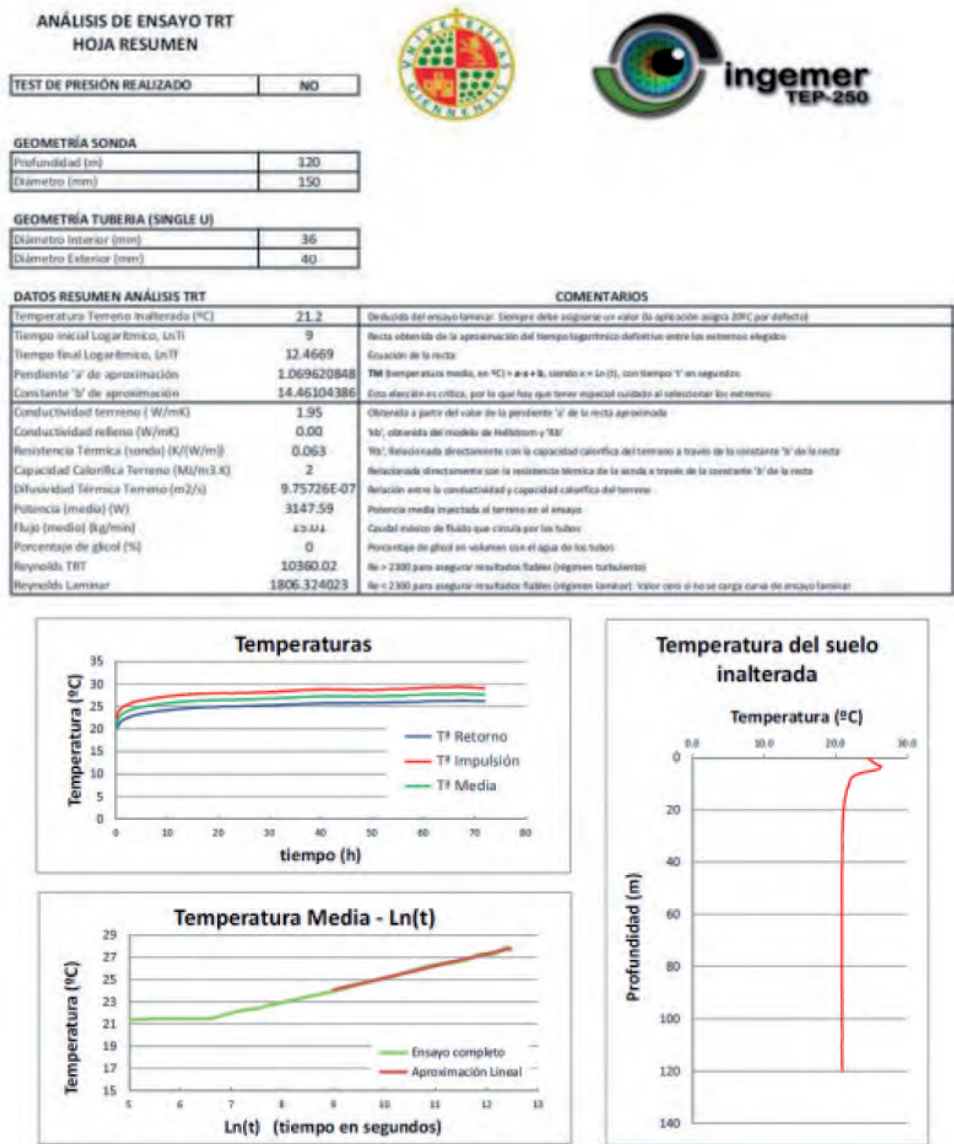


Fig. 12: Informe generado tras la realización del ensayo TRT

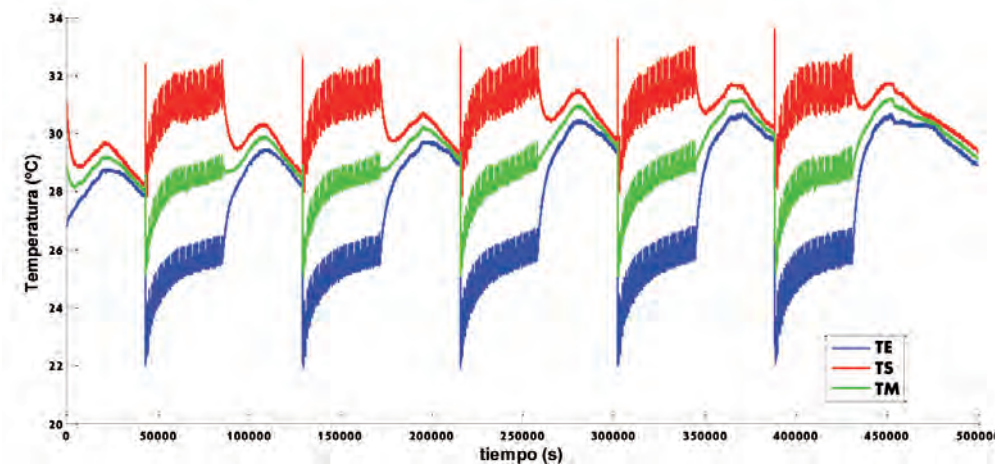


Fig. 13: Evolución a lo largo del tiempo de las temperaturas de impulsión (TS), retorno (TE) y media (TM) emulando una instalación real funcionando 12 horas diarias durante 5 días

4. CONCLUSIONES

El prototipo desarrollado ha concluido satisfactoriamente la fase de pruebas, tanto hidráulicas y eléctricas como de software y hardware. Se trata de un equipo robusto, fiable y de fácil manejo por parte del operario. Realiza de forma automática los test de respuesta térmica estandarizados y puede realizar otros, como se ha comentado anteriormente.

El equipo ha sido sometido a múltiples pruebas: ensayos de hasta 72 horas ininterrumpidas y emulación de ciclos intermitentes durante periodos de 7 días. Ha sido utilizado durante más de 6 meses (periodo invierno-verano) en distintas condiciones de funcionamiento en aras a conseguir simular el desgaste de los componentes más críticos de la máquina. Durante las pruebas se monitorizaron diferentes parámetros (presiones, caudales, temperaturas, etc.) de funcionamiento de la máquina lo que permitió evaluar su comportamiento y sintonizar correctamente los reguladores PID de caudal y potencia. La gran cantidad de ensayos realizados ha permitido detectar fallos y mejorar las prestaciones del equipo.

En la actualidad la máquina está siendo empleada por la empresa solicitante para realizar estudios TRT en distintas instalaciones proyectadas, tanto en viviendas unifamiliares como en edificios del sector terciario, con el fin de conseguir dimensionar el campo de sondas más adecuado. Los resultados obtenidos han sido plena-

mente satisfactorios, habiendo sido cotejadas las prestaciones de las instalaciones de climatización una vez puestas en funcionamiento.

AGRADECIMIENTOS

Parte del trabajo presentado es el resultado de un contrato de investigación suscrito entre miembros del grupo de investigación TEP-250 de la Universidad de Jaén y la empresa Pilotes y Recalces del Sur S.L., para el desarrollo de un Sistema de ensayo de características del terreno como fuente térmica (Expediente 2439). Asimismo, este trabajo ha sido posible gracias al proyecto del Plan Propio de apoyo a la investigación de la Universidad de Jaén titulado ‘Análisis del aprovechamiento de fuentes renovables para la producción de frío: Aplicación a la provincia de Jaén (UJA 2007).

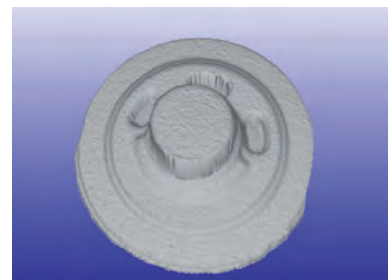
BIBLIOGRAFÍA

- [1] European Commission. Europe 2020 – a strategy for smart, sustainable and inclusive growth. COM (2010) 2020 final. 2010, p. 35.
- [2] Manzano-Agugliaro, F., Alcayde, A., Montoya, F.G., Zapata-Sierra, A., Gil, C. 2013. Scientific production of renewable energies worldwide: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 18, pp. 134-143
- [3] Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de mayo de 2010, relativa a la eficiencia energética en los edificios. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 18 de junio de 2010
- [4] Anónimo (2010), Guía práctica de la energía: consumo eficiente y responsable (3ª ed.). IDAE, Madrid.
- [5] RD 47/2007, de 19 de enero, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción, BOE nº 27, 31 de enero de 2007, p. 4499-4507.
- [6] Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios. BOE nº 89 de 13 de abril de 2013, p. 27548-27562
- [7] Gómez Moreno A, Casanova Peláez PJ, Díaz Garrido FA, Palomar Carnicero JM, López García R, Cruz Peragón F. *Results of an experimental study of a solar cooling system in jaén using single effect lithium bromide absorption chiller*, *Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PJ)*, 2010, pp. 522.01-522.05
- [8] Wark, K.; Richards, D.E. (2000), *Termodinámica*, 6ª edición, McGraw-Hill, 2000
- [9] Anónimo (1997), *Geothermal Heat Pumps. Introductory Guide*. National Rural Electric Cooperative Association, Electric Power Research Institute, Oklahoma State University, International Ground Source Heat Pump Association.
- [10] Lund J.W. (2004), *Geothermal (Ground-Source) Heat Pumps – A World Overview*, edited and updated version of the article from *Renewable Energy World* (July-Aug, 2003, Vol. 6, No. 4), Geo-Heat Center (GHC) Quarterly Bulletin, Vol. 25, No. 3, ISSN 0276-1084, September 2004, 10 pp
- [11] Omer A.M. (2008), Ground-source heat pumps systems and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 12, 344-371.
- [12] Magraner Benedicto, T. (2010), Validación Experimental de los Métodos de Diseño de Instalaciones de Bomba de Calor Acoplada al Terreno. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Física Aplicada
- [13] Lund J.W., Freeston D.H. (2000), World-wide direct uses of geothermal energy 2000, en: *Actas del Congreso World Geothermal Congress 2000 (Kyushu-Tohoku, Japón)*. 2000, p.1-21.
- [14] Sanner B., Karytsas C., Mendrinos D., Rybach L. (2003), Current status of ground source heat pumps and underground thermal storage in Europe, *Geothermics*, 32, 579-588.
- [15] Anónimo (2008), *Manual de geotermia*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Instituto Geológico y Minero de España. Madrid: IDAE
- [16] Anónimo (2006), *Geothermal Heat Pump for Cooling and Heating along European Coastal Areas. Final Report*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2006. EU 5th Framework Programme, NNE5-2001-00847.
- [17] Programa de Impulso a las empresas de servicios energéticos térmicos con energías renovables, GEOTCASA, BOE 122, 19 de mayo de 2010.
- [18] Plan de Acción Nacional de Energías Renovables (PANER) 2011-2020, IDAE y Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2010.
- [19] Anónimo (2010), Guía Técnica de Diseño de Sistemas de Bomba de Calor Geotérmica, Guía Técnica, IDAE, Serie Ahorro y Eficiencia Energética en Climatización.
- [20] Witte HJL, van Gelder GJ, Spitler JD. (2002). In Situ Measurement of Ground Thermal Conductivity: The Dutch Perspective. *ASHRAE Transactions*. 108(1):263-272
- [21] Incropera & Dewitt (1996): *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley. New York, USA.
- [22] Piechowski, M., (1999), Heat and mass transfer model of a ground heat exchanger: Theoretical development, *Int. J. Energy Res.*, 23, 571-588
- [23] Yang H, Cui P, Fang Z. Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: a review of models and systems, *applied Energy* 87 (2010), 16-27
- [24] Ingersoll L.R., & Plass, H.J. (1948). Theory of the ground pipe heat source for the heat pump. *Heating, Piping & Air Conditioning* 20/7, 119-122
- [25] Abramovitz M and Stegun I. Eds. (1964). *Handbook of Mathematical Functions*. National Bureau of Standards, Washington D.C.
- [26] Eskilson P. Thermal analysis of heat extraction boreholes, Ph.D. Thesis, Universidad de Lund (Suecia), 1987.

Visión artificial basada en aprendizaje automático para la categorización de defectos superficiales en fundición

MACHINE VISION FOR SURFACE DEFECTS CATEGORISATION IN FOUNDRIES BASED ON MACHINE LEARNING

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/6940> | Recibido: 22/07/2013 • Aceptado: 11/12/2013



Iker Pastor-López, Jorge de-la-Peña-Sordo, Sendoa Rojas, Igor Santos, Pablo G. Bringas

UNIVERSIDAD DE DEUSTO. DeustoTech Computing. Avda. Las universidades, 24 - 48007 Bilbao. Tfno: +34 944 139000 iker.pastor@deusto.es

ABSTRACT

- Foundry is an important industry that supplies key castings to other industries where they are critical. Hence, iron castings¹ are subject to very strict controls to assure the quality of the manufactured castings. One of the type of flaws that may appear in the castings are defects on the surface; in particular, our work focuses in inclusions, cold laps and misruns. We propose a new approach that detects imperfections on the surface using a segmentation method that marks the regions of the casting that may be affected by some of these defects and, then, applies machine-learning techniques to classify the regions in correct or in the different types of faults. We show that this method obtains high precision rates.
- **Keywords:** machine vision, machine learning, defect categorisation.

RESUMEN

La fundición de hierro² es una importante industria que suministra piezas clave a otras industrias donde son críticas. Es por este motivo, que las piezas fabricadas están sujetas a controles de seguridad muy estrictos para garantizar la calidad de las mismas. Algunos de los defectos que se producen con una mayor frecuencia son los superficiales, y en particular, este trabajo se centra en las inclusiones, uniones frías y las faltas de llenado. Para ello se propone un nuevo método que se basa en un algoritmo de segmentación para marcar las regiones de la superficie potencialmente defectuosas y, a continuación, aplicando técnicas de aprendizaje automático categoriza las regiones indicando el defecto existente. El método propuesto demuestra unas tasas altas de precisión.

Palabras clave: visión artificial, aprendizaje automático, categorización de defectos.

1. INTRODUCCIÓN

La fundición es uno de los procesos más antiguos en la historia de la humanidad y ha servido como indicador de referencia del progreso de la sociedad. Generalmente, consiste en fundir un material y verterlo en un molde, en el que se enfriará adquiriendo la forma deseada. Las piezas obtenidas a partir de este proceso se emplean como componentes de otros sectores clave como por ejemplo, la industria aeronáutica, la automovilística, la armamentística o la naval, entre otras. En muchos de estos casos, las piezas fabricadas juegan un papel crítico, lo que implica que deben ser objeto de numerosos controles para asegurar, de esta forma, la calidad de las piezas producidas.

Existe una gran variedad de defectos que pueden aparecer en las piezas de fundición. Este trabajo se centra en los que aparecen en la superficie de las piezas. Más concretamente, los defectos que se han seleccionado para su estudio son:

- **Inclusiones:** originadas por la incorporación de algún material no metálico a la pieza en alguna de las etapas del proceso de fundición. Este material suele ser arena del molde o escoria.

¹ Iron castings are iron-carbon alloys that solidify as laminar or nodular graphitic structures.

² Entendemos por fundición de hierro las aleaciones hierro-carbono que solidifican con estructuras gráficas laminares o esferoidales.

- **Uniones frías:** ocurren cuando la temperatura de la colada es baja y la solidificación de la pieza se realiza en distintos tiempos.
- **Faltas de llenado:** provocadas por una falta de material fundido en el molde.

Actualmente la inspección de la calidad superficial de las piezas de fundición se realiza de forma manual por operarios, ya que son capaces de realizar esta tarea de una forma más eficaz que un sistema automatizado[1], debido principalmente a su capacidad de visión y manejo de las manos para inspeccionar las piezas desde todos los puntos de vista posibles. Por contra, según pasan las horas de trabajo, el operario va incrementando su fatiga y su capacidad de detectar defectos mengua de forma considerable.

En este sentido, la visión artificial se ha convertido en un campo importante dentro de la inspección de calidad en los procesos productivos, sobre todo en aquellos que implican un peligro o son críticos[2]. En concreto los sistemas de visión artificial están sustituyendo a los operarios en distintas industrias como por ejemplo, la maderera[3], la textil[4] o la metalúrgica [5][6]. En estos casos los sistemas implantados se han caracterizado principalmente por una disminución de errores en el proceso de inspección, inherentes al factor humano de los operarios.

En resumen, las contribuciones realizadas son: (i) la adaptación de un sistema de visión artificial y aplicación de un método de segmentación para la captura de información de las zonas de interés de las superficies de las piezas de fundición, (ii) un enfoque basado en aprendizaje automático para la categorización de las regiones superficiales defectuosas y (iii) una validación empírica del enfoque presentado empleando para ello piezas de fundición reales.

2. EL PROCESO DE FUNDICIÓN

Aunque todos los procesos de fundición son distintos entre sí, podemos establecer una serie de etapas comunes, véase la Fig. (1). [7].

En nuestro caso nos centraremos en una fundición de hierro como caso de uso:

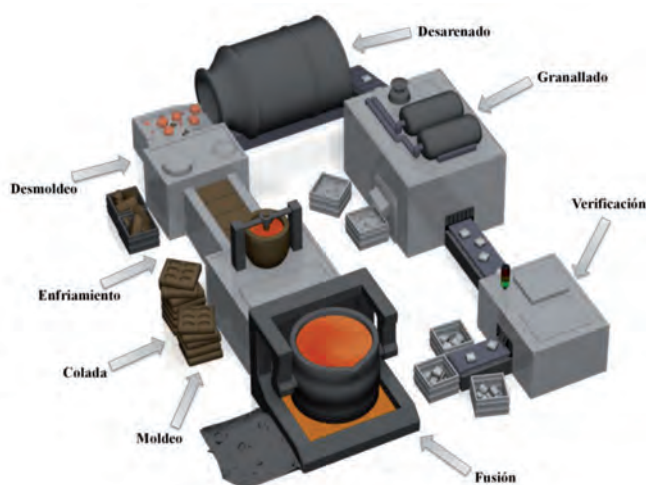


Fig. 1: Vista general de una planta de fundición

- **Moldeo:** en este punto se prepara el molde. Para ello, es necesario que la arena se encuentre en óptimas condiciones antes de ser prensada y troquelada con la forma de la pieza a alojar en su interior. En caso de la pieza disponga de huecos en su interior, es necesario añadir machos. Un molde consta de dos mitades que son unidas de forma horizontal o vertical, dependiendo de la técnica de moldeo empleada.
- **Fusión:** se prepara el metal para ser vertido a los moldes previamente preparados. Éste, dependiendo de las características finales de la pieza, tendrá una composición química determinada.
- **Colada:** se trata del punto dónde se vierte el metal en el molde, ya sea de manera manual o automática. Es un punto crítico donde pueden aparecer los primeros defectos.
- **Enfriamiento:** es otro de los puntos críticos donde se va reduciendo la temperatura de la pieza desde aproximadamente los 1300 °C hasta los 650 °C. Aquí pueden aparecer la mayoría de defectos ya sea por la reacción molde-metal, mala composición química, enfriamiento brusco, etc.
- **Desmoldeo:** los moldes continúan su enfriamiento y de manera paralela se van rompiendo separando, así las piezas de la arena. Posteriormente, las piezas son limpiadas mediante granallado para seguidamente pasar a verificación.
- **Verificación:** antes de verificar las piezas, como generalmente se realizan varias en un mismo molde, éstas son separadas. En este punto un operario examina las piezas y retira las que son defectuosas.

3. SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL PARA LA CAPTURA DE LA INFORMACIÓN

Para la captura de la información se ha construido un sistema de visión artificial básico, que devuelve la información de las superficies de las piezas a escanear. Este sistema está compuesto por una cámara láser con tecnología 3D, una estación de trabajo con alta capacidad de procesamiento y un brazo robótico[8].

3.1. ELEMENTOS DEL SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL

Como ya se ha mencionado anteriormente, el sistema de visión artificial construido se compone de tres elementos principales:

- **Dispositivo de captura:** como dispositivo de captura se ha recurrido a una cámara con tecnología láser para la captura de la información tridimensional de las piezas. Este tipo de dispositivos se caracterizan por ser menos sensibles a las condiciones de iluminación del entorno de trabajo, adaptándose de una forma más adecuada a una planta de fundición. La cámara que se ha seleccionado posee un dispositivo láser de clase 3B, debido principalmente a que el entorno dónde se quiere instalar el sistema es oscuro y es necesaria una potencia extra para observar las piezas oscuras que provocan una menor reflexión del haz láser.

- **Equipo de procesamiento:** se ha utilizado una estación de trabajo con una alta capacidad de cómputo compuesta por: (i) un procesador XENON E5506, (ii) 6GB de memoria RAM y (iii) una tarjeta gráfica QUADRO FX1800. Este dispositivo se encarga no sólo del control de la cámara y del brazo robótico, sino también de procesar toda la información que el dispositivo de captura va recogiendo.
- **Brazo robótico:** este dispositivo es el encargado de realizar los movimientos necesarios para la captura de la información. Existen dos configuraciones diferentes dependiendo del uso que se le quiera dar[9]: (i) en la primera configuración se ensambla el dispositivo de captura en el extremo del brazo robótico, mientras que por el contrario en la segunda (ii), se utiliza el brazo para manipular la pieza a escanear. Debido principalmente a que la naturaleza geométrica de las piezas que se va a manejar es muy heterogénea, se ha optado por la primera configuración, ya que de esta forma no se tiene que utilizar un utillaje distinto para cada tipo de pieza.

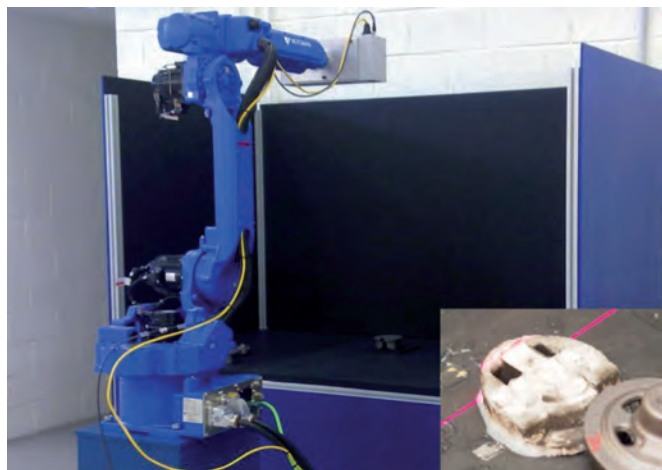


Fig. 2: Prototipo del sistema de visión artificial propuesto y detalle del molde

El posicionamiento de la pieza se realiza de forma manual, empleando para ello una mesa de trabajo y un soporte en el que se encaja la pieza. Este molde está fabricado a base de un material similar a la silicona, por lo que es muy maleable. En caso de que se quiera cambiar de modelo de pieza, se tendría que cambiar este molde por uno que se ajuste al nuevo modelo. Con esta mesa de trabajo y el molde se consigue escanear siempre las piezas en la misma posición, lo cual reduce la complejidad del sistema.

3.2. PROCESADO DE LA INFORMACIÓN

Empleando la arquitectura propuesta se obtiene la información superficial de las piezas. El proceso comienza con un movimiento lineal del brazo robótico, permitiendo que la cámara realice una captura cada 0.2 mm (este dato se corresponde con el grosor de la línea capturada y viene fijado por el fabricante del dispositivo de captura). De esta forma se ira recogiendo los datos con las diferentes alturas de forma consecutiva. A partir de este punto se denominara cada línea de datos obtenida con el nombre de perfil. Por lo que formalmente

se puede afirmar que una superficie escaneada S está formada por un conjunto de perfiles P siendo

Uniendo estos perfiles se genera la matriz de alturas $A_{n \times m}$ (donde n es el número de perfiles y m es el número de alturas distintas que existen en cada perfil) que representa la información de la superficie S . De esta matriz se elimina toda la información relativa a la mesa estableciendo un umbral a partir del cual se establecerá como el nuevo 0.

Posteriormente se crean varias representaciones de la información con las que se van a ir trabajando. Estas son: (i) la matriz de alturas, (ii) la matriz de vectores normales y (iii) el mapa de vectores normales codificado en RGB.

3.2.1. Matriz de alturas

La matriz de alturas es la representación que se ha creado mediante el proceso de captura. En ella se encuentran los valores de las alturas en cada uno de los puntos de la superficie respecto al origen de coordenadas establecido en la mesa de trabajo.

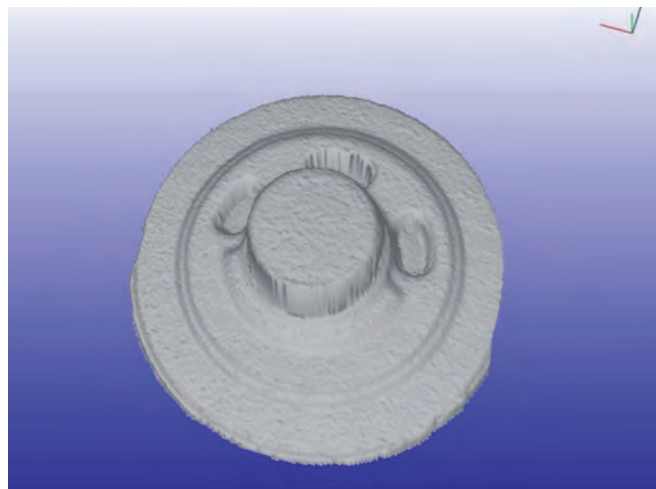


Fig. 3: Visualización de la matriz de alturas mediante el renderizado de una malla 3D

3.2.2. Matriz de vectores normales

En informática gráfica, un vector normal es aquel que determina la orientación de una superficie triangular. Este vector es un elemento esencial a la hora de optimizar el proceso de dibujo de superficies, ya que contiene una gran cantidad de información sobre la superficie.

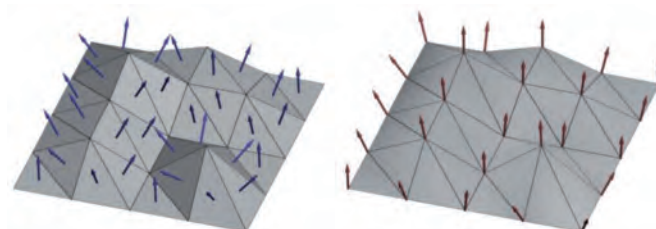


Fig. 4: Ejemplo de promediado de los vectores normales

En la Fig. (4) se puede observar en la primera de las imágenes los vectores normales para cada uno de los triángulos de

la superficie. Posteriormente, para calcular el vector normal en cada uno de los puntos de la matriz de alturas, se promedia los valores de los vectores normales de los triángulos adyacentes a cada punto.

De esta forma se obtiene una matriz con la información de las componentes del vector normal en cada punto.

3.2.3. Mapa de vectores normales codificado en RGB¹

Para representar la información de la matriz de vectores normales, se ha generado una imagen que representa los distintos componentes de los vectores normales mediante los canales RGB de la imagen.

Esta imagen se genera transformando cada uno de los valores para las 3 componentes de la matriz, a su valor correspondiente en un rango cuyo valor mínimo es 0 y el máximo es 255. Posteriormente, se crea una imagen con las mismas dimensiones que la matriz de vectores normales, y se asigna los valores transformados, correspondiendo la componente *X* al valor del color rojo, la *Y* al valor del color verde y la *Z* al valor del color azul.

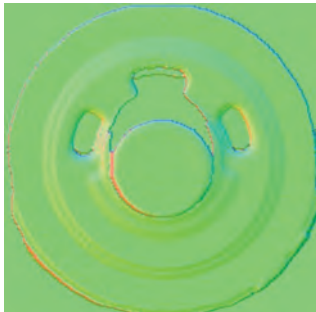


Fig. 5: Mapa de vectores normales codificados en RGB

3.3. SEGMENTACIÓN DE LOS DATOS

El primer paso que realiza el sistema es segmentar las imágenes para identificar posibles regiones potencialmente defectuosas.

A continuación se describe los pasos en los que se divide este proceso.

1. Subproceso para cada una de las piezas sin indicaciones de defecto que vamos a emplear como modelos.

- Se convierte el mapa de vectores normales codificado en RGB en una imagen en escala de grises. El principal motivo de este paso es disminuir el gran volumen de ruido que presenta una imagen en color.

2. Subproceso para cada una de las piezas con indicaciones de defecto.

- Se convierte el mapa de vectores normales codificado en RGB en una imagen en escala de grises. El principal motivo de este paso es disminuir el gran volumen de ruido que presenta una imagen en color.

¹ Siglas en inglés de los colores Rojo, Verde y Azul (Red, Green y Blue). Es un modelo de color con el que es posible representar un color mediante la mezcla por adición de los tres colores primarios.

1	2	3	2	1
2	4	5	4	2
3	5	6	5	3
2	4	5	4	2
1	2	3	2	1

Fig. 6: Matriz de convolución del filtro de difuminado simple empleado.

- Se aplica al resultado del paso anterior un filtro de difuminado simple[10] para continuar con la eliminación de ruido.
- Se aplica un filtro de imagen que calcula la diferencia píxel a píxel entre el resultado del paso anterior y cada uno de los modelos procesados. De esta forma se obtiene aquellas regiones de la imagen que presentan diferencias con respecto a cada uno de los modelos.
- En este paso se agrupa la información de todas las imágenes de diferencia que se han obtenido del paso anterior. Para ello, se aplica la intersección píxel a píxel de todas ellas obteniendo una única imagen. La finalidad de esta intersección es la de agrupar en una única imagen las diferencias comunes entre la imagen de la pieza defectuosa y cada uno de los modelos.
- Una vez obtenida la intersección de las diferencias, se binariza (se convierte cada píxel a dos colores, blanco o negro, empleando un umbral de valor "1") destacando de esta forma las regiones que son susceptibles de tener un defecto.
- Finalmente, se extrae porcada una de las regiones que han sido marcadas como consecuencia del proceso realizado, el rectángulo mínimo que las contiene, eliminando aquellas que tienen un tamaño muy pequeño. En este caso se ha establecido el umbral a 3 píxeles de ancho por 3 de alto.

Como resultado del proceso de segmentación, se ha obtenido un conjunto de regiones entre las que se encuentran partes de la superficie que presentan diferencias tolerables con respecto a los modelos, así como partes de la pieza con defectos que provocan el rechazo de la misma.

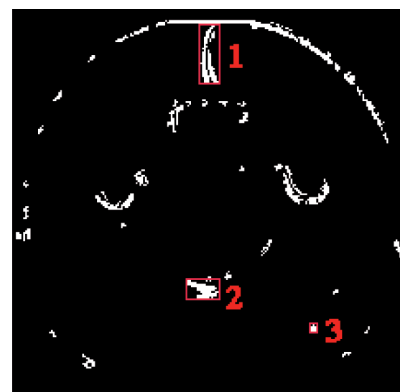


Fig. 7: Imagen binarizada obtenida mediante el método de segmentación descrito. En ella, podemos ver señaladas en rojo tres regiones con indicaciones de defecto

3.4. CARACTERÍSTICAS EXTRAÍDAS

A continuación, se agrupan las distintas características que se han extraído en base a su representación de origen.

- **Características extraídas de la imagen binarizada resultado del método de segmentación.** Esta imagen se ha obtenido del proceso de segmentación y se encuentra binarizada. De esta forma se tiene marcado en color blanco la porción de la región marcada como potencialmente defectuosa, y en negro el resto del segmento.

Las características son:

- Alto, ancho, perímetro y área de la porción de píxeles blancos contenida en la región.
- Distancia euclidiana entre el centro de gravedad de la región y el origen de coordenadas.
- Plenitud⁴ de la región.
- **Características extraídas de la imagen binarizada convertida a imagen integral.** La imagen integral I de una imagen G se define como la imagen en la que la intensidad de un pixel en una posición determinada es igual a la suma de las intensidades de todos los píxeles que hay encima y a la izquierda de la posición dada en la imagen original G [11]. En concreto, las características que hemos extraído son:
 - Media de los valores de los píxeles de la imagen integral.
 - Sumatorio de los valores de los píxeles de la imagen integral.
- **Características extraídas de la matriz de alturas.** En este caso se extraen dos regiones distintas. En la primera de ellas, se obtiene todos los píxeles de la matriz de alturas para la región extraída mediante el proceso de segmentación. En el segundo, se quedan únicamente con aquellos píxeles que hayan sido marcados en blanco en el segmento obtenido mediante el método de segmentación. Posteriormente, se extraen las siguientes características:
 - Sumatorio, media, varianza, desviación estándar, error estándar, mínimo, máximo, rango, mediana, entropía, sesgo y curtosis de las alturas de la región.
- **Características extraídas de las matrices de vectores normales.** Se extraen las regiones correspondientes a la zona delimitada por el método de segmentación. Como se ha especificado anteriormente, cada una de las matrices hace referencia a las componentes del vector normal en cada punto (x, y, z) . Además, como en el caso anterior, se extrae por cada matriz dos regiones distintas, una obteniendo todos los valores, y otra con los valores marcados en blanco por el método de segmentación. Posteriormente, se extraen las siguientes características:
 - Sumatorio, media, varianza, desviación estándar, error estándar, mínimo, máximo, rango, mediana, entropía, sesgo y curtosis de cada una de las componentes de los vectores normales de la matriz.

4. ALGORITMOS DE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO SUPERVISADO

El aprendizaje automático es un área activa de investigación dentro de la Inteligencia Artificial, que se centra en el diseño y desarrollo de nuevos algoritmos que permiten a los ordenadores razonar y decidir sobre un conjunto de datos conocido [12].

Los algoritmos de aprendizaje automático pueden dividirse en tres tipos diferentes, dependiendo del conjunto de datos de entrenamiento: (i) aprendizaje supervisado, (ii) aprendizaje no supervisado y (iii) aprendizaje semi-supervisado. Para los algoritmos de aprendizaje supervisado, el conjunto de datos de entrenamiento tiene que estar etiquetado (p. ej., el defecto en la pieza) [13]. Los algoritmos de aprendizaje no supervisado intentan determinar cómo se pueden organizar los datos en diferentes conjuntos o grupos, por lo que no es necesario etiquetar⁵ los datos [14]. Finalmente, los algoritmos semi-supervisados usan una combinación de datos etiquetados y no etiquetados para construir los modelos, mejorando de forma exclusiva la precisión obtenida por los métodos no supervisados [15].

Debido a que las regiones extraídas de las piezas pueden ser etiquetadas, se han utilizado algoritmos de aprendizaje automático supervisados. A continuación, se describen los algoritmos empleados.

4.1. REDES BAYESIANAS

Las redes bayesianas, las cuales están basadas en el teorema de Bayes, se definen como un modelo gráfico probabilístico para el análisis multivariable. Específicamente, son grafos acíclicos directos que tienen asociada una función de distribución de probabilidad [16]. Los nodos del grafo representan variables del problema (que pueden ser una premisa o conclusión) y las aristas representan las dependencias condicionales entre dichas variables.

La ventaja principal de las redes bayesianas es su capacidad para determinar la probabilidad de que una hipótesis sea verdadera, dado un conjunto de datos.

4.2. ÁRBOLES DE DECISIÓN

Los árboles de decisión son un tipo de clasificador dentro del aprendizaje automático supervisado que puede representarse gráficamente con forma de árbol. Los nodos internos representan condiciones con respecto a las variables del problema, mientras que por el contrario, las hojas o nodos finales representan la decisión del algoritmo [17].

Existen distintos métodos de aprendizaje dentro de los árboles de decisión entre los que destacan los bosques aleatorios, un conjunto de diferentes árboles de decisión creados aleatoriamente [18] y, J48 la implementación en WEKA [19] del algoritmo C4.5 [20].

⁴ Se define como el número de píxeles blancos dividido por el número de píxeles totales de la región.

⁵ Se basa en clasificar de forma manual el tipo de indicación de defecto que presenta la región.

4.3. K VECINOS MÁS PRÓXIMOS

El clasificador K vecinos más próximos o KNN (K Nearest Neighbours)[21] es uno de los modelos más simples de aprendizaje automático supervisado. Este método clasifica una muestra desconocida basándose en la clase de las instancias más próximas a ella en el espacio de entrenamiento.

4.4. MÁQUINAS DE SOPORTE VECTORIAL

Los algoritmos basados en máquinas de soporte vectorial o SVM (*Support Vector Machines*) dividen la representación n -dimensional del espacio de datos en dos regiones empleando para ello un hiperplano. Este hiperplano siempre maximiza el margen entre estas dos regiones o clases. Este margen se define como la distancia más lejana entre las muestras de dos clases y se calcula en base a la distancia entre los elementos más cercanos de las dos clases, que se denominan vector de soporte[22].

Por último, estos clasificadores emplean las denominadas funciones del núcleo, que les permiten crear divisiones no lineales, como superficies polinómicas, radiales o sigmoideas[23].

5. VALIDACIÓN DEL MÉTODO DESARROLLADO

5.1. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN

Los experimentos se han centrado en 3 defectos superficiales: las inclusiones, las uniones frías y las faltas de llenado. En cuanto a la pieza empleada, se trata de una pieza circular con un diámetro de 87mm. y una altura de 43mm. Está producida mediante moldeo vertical con hierro grafitico-esferoidal y se usa en la construcción de vehículos industriales.

Se ha comenzado el experimento capturando la información de cada una de las superficies de un total 639 piezas distintas. Entre ellas se han identificado 236 ejemplares totalmente correctos, esto es que han pasado los procesos de calidad manuales correspondientes; y 403 piezas que presentan una o más indicaciones de defecto superficial.

Posteriormente, se han aplicado el proceso descrito en las secciones 3.2 y 3.3 obteniendo 6.150 regiones potencialmente defectuosas. Concretamente, se tiene la siguiente distribución de regiones: 5,686 tolerables, 392 con inclusión, 17 con unión fría y 55 con falta de llenado.

Una de las primeras conclusiones a tener en cuenta al ver el conjunto de datos es que no se encuentra balanceado, debido principalmente a que en un entorno real son más probables las regiones correctas que las que presentan algún defecto. Por este motivo, se ha aplicado una técnica de re-muestreo sintético minoritario o SMOTE por sus siglas en inglés (*Synthetic Minority Over-sampling TEchnique*)[24]. Ésta, se basa en generar muestras sintéticas de las clases que tienen un número menor de elementos, balanceando de esta forma el conjunto de datos de entrenamiento.

La clasificación de las regiones defectuosas se ha realizado de forma manual por un operario especializado, basándose en los criterios de aceptación establecidos por el cliente. Hay que tener en cuenta que estos criterios son muy estrictos debido principalmente a que la industria de la automoción establece unos estándares de calidad muy altos.

La primera evaluación que se ha realizado es del método de segmentación de regiones potencialmente defectuosas. Para ello se ha calculado la *Cobertura* del mismo:

$$Cobertura = \frac{SDE}{SDE + SDNE} * 100 \quad (1)$$

donde SDE es el número de segmentos defectuosos encontrados, y $SDNE$ es el número de segmentos defectuosos no encontrados. Este valor de cobertura se utiliza para medir la fiabilidad de la detección de regiones con indicación de defecto.

La segunda evaluación que se realiza es la precisión del método basado en aprendizaje automático.

Para ello, se ha seguido la siguiente metodología de experimentación:

- **Validación cruzada:** este método se basa en la división del conjunto de regiones en K subconjuntos distintos[25], empleándose una parte de cada uno de estos K subconjuntos para entrenar el modelo y la otra para probarlo. En nuestro caso concreto, se ha asignado a la K el valor 10, con lo que se ha dividido el conjunto de regiones con indicación de defecto en 10 subconjuntos distintos. En cada uno de estos subconjuntos se han empleado el 90% para entrenar el modelo y el 10% restante para probarlo.
- **SMOTE:** para cada uno de los subconjuntos de entrenamiento generados mediante la validación cruzada, se aplica la técnica de SMOTE, consiguiendo de esta forma que estos subconjuntos de entrenamiento estén balanceados.
- **Generación de los modelos:** para cada subconjunto de entrenamiento hemos generado un modelo basado en distintos algoritmos de aprendizaje automático supervisado. En concreto, se han empleado los siguientes algoritmos:
 - **Redes bayesianas:** dentro de los algoritmos basados en el teorema de Bayes, se ha utilizado distintos tipos: red bayesiana ingenua[25], red bayesiana con K2[26] y red bayesiana ingenua aumentada con árbol[27].
 - **Máquinas de soporte vectorial (SVM):** para este clasificador se han empleado distintos núcleos: el polinomial[23], el normalizado polinomial[28], el Pearson VII[29] y el de función de base radial o RBF[30].
 - **K-vecinos más próximos:** se ha realizado el experimento con los siguientes valores para K : 1, 2, 3, 4 y 5.
 - **Árboles de decisión:** los algoritmos empleados basados en árboles de decisión son: J48, que se trata de la implementación para la herramienta WEKA[19] del algoritmo C4.5[20]; y bosques aleatorios[18], para los que hemos definido distintas configuraciones en base al número de árboles aleatorios a generar N : 10, 25, 50, 75 y 100.

Para evaluar los resultados obtenidos de los modelos generados, se ha basado en la precisión o porcentaje de instancias clasificadas correctamente y en el área bajo la curva ROC, que representa la relación entre la tasa de falsos negativos y la de falsos positivos[31].

5.2. RESULTADOS OBTENIDOS

En primer lugar se va a evaluar la validez del método de segmentación, para lo que se calcula la cobertura del mismo.

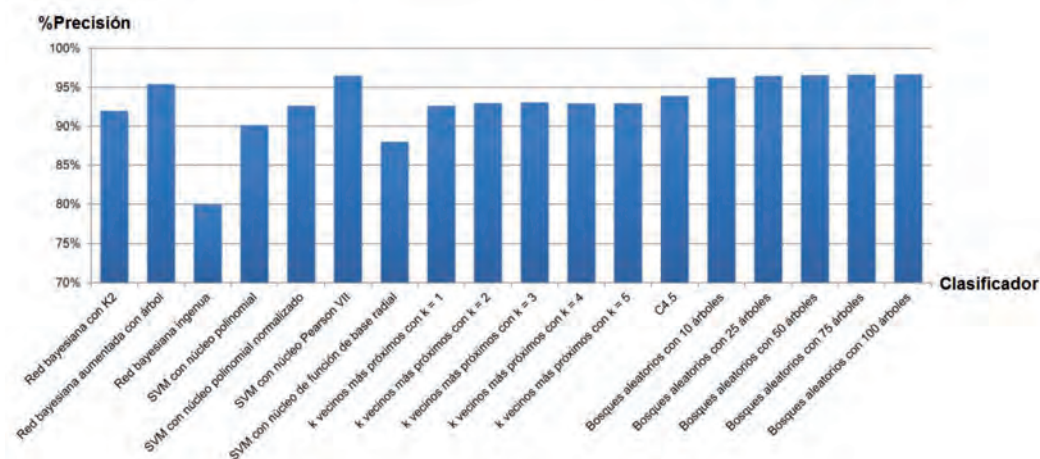


Fig. 8: Porcentaje de acierto de los clasificadores empleados

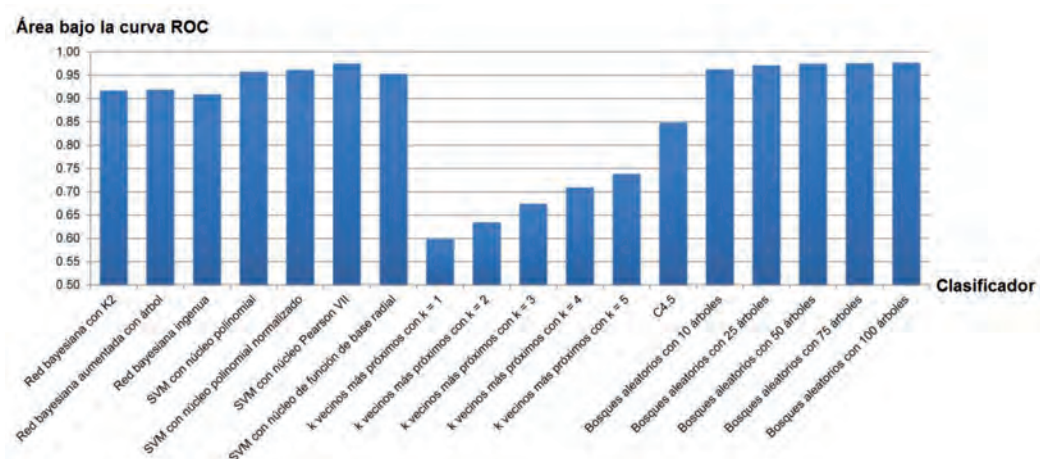


Fig. 9: Resultados en términos de área bajo la curva ROC obtenidos con los diferentes algoritmos de aprendizaje automático empleados

En este caso el sistema ha sido capaz de detectar el 59,70% de los defectos. Se quiere destacar que el resto de defectos presentes en las superficies escaneadas, se encuentran en zonas con bordes; los cuales, serían detectados realizando otros movimientos de escaneo complementarios. Aun así, una de las futuras mejoras es incrementar la cobertura del método de segmentación desarrollado, teniendo en cuenta que este porcentaje puede variar dependiendo de la geometría de la pieza con la que se está trabajando.

Como se puede observar en las gráficas de la Fig.(8) y Fig.(9), los mejores resultados son los obtenidos por los bosques aleatorios de más de 50 árboles y por la máquina de soporte vectorial con un núcleo *Pearson VII*. En ambos casos la precisión supera el 95% y el área bajo la curva ROC es ligeramente superior a 0,97.

En cuanto al resto de clasificadores empleados, se observa que de entre los bayesianos únicamente son destacables los resultados obtenidos por la red bayesiana aumentada con árbol, con más de un 95% de precisión, y un área bajo la curva ROC superior a 0,90. En el caso de los KNN ninguna de las configuraciones probadas arroja unos resultados satisfactorios.

6. CONCLUSIONES

En este artículo se ha propuesto un nuevo sistema basado en visión artificial y aprendizaje automático con el fin de detectar y categorizar defectos en las superficies de piezas de fundición de hierro nodular. Este enfoque empieza recuperando la información superficial de las piezas y generando distintas representaciones de la misma. Posteriormente, se propone un método de segmentación para determinar regiones potencialmente defectuosas. Finalmente, se categoriza las regiones en base a modelos de aprendizaje automático.

Se ha evaluado nuestro enfoque en términos de cobertura para el método de segmentación y, en base a la precisión y área bajo la curva ROC para la categorización de las regiones. Los resultados experimentales muestran una precisión alta en cuanto a la categorización de defectos.

El trabajo futuro está orientado hacia dos líneas de trabajo principalmente. En la primera de ellas,

trabajar en la mejora de la cobertura, modificando el método de segmentación. En la segunda línea, buscar incrementar la precisión en la categorización de regiones, para lo que investigaremos el uso de nuevos tipos de características así como la aplicación de nuevos métodos de aprendizaje para la disminución del esfuerzo de etiquetado.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente apoyado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España bajo el programa “Proyectos Singulares y Estratégicos del Programa Nacional de Cooperación Público-Privada 2009”, proyecto “POLIFEMO: Polifemo, Lowering Imperfections in Foundry Enterprise via a Machine-vision Oriented model” (en castellano, Polifemo, Reduciendo las Imperfección en la empresa de fundición a través de un modelo orientado a la visión artificial), proyecto “CIT-020000-2009-008. Por último, se quiere agradecer al centro de investigación metalúrgica IK4-AZTERLAN por su colaboración en el proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Mital, M. Govindaraju, and B. Subramani. "A comparison between manual and hybrid methods in parts inspection," *Integrated Manufacturing Systems*. 1998, vol. 9. no. 6. pp. 344–349. (doi: <http://dx.doi.org/10.1108/09576069810238709>).
- [2] P. Kopardekar, A. Mital, and S. Anand. "Manual, hybrid and automated inspection literature and current research," *Integrated Manufacturing Systems*. 1993. vol. 4. no. 1. pp. 18–29. (doi: <http://dx.doi.org/10.1108/09576069310023838>).
- [3] O. Silván, M. Niskanen, and H. Kauppinen. "Wood inspection with non-supervised clustering." *Machine Vision and Applications*. 2003. vol. 13. no. 5. pp. 275–285. (doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00138-002-0084-z>).
- [4] V. Murino, M. Bicego, and I. Rossi. "Statistical classification of raw textile defects". *Proceedings of the 17th International Conference on*. vol. 4. pp. 311– 314. (doi: <http://dx.doi.org/10.1109/ICPR.2004.1333765>).
- [5] F. Pernkopf. "Detection of surface defects on raw steel blocks using bayesian network classifiers". *Pattern Analysis & Applications*. 2004. vol. 7. no. 3. pp. 333–342. (doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10044-004-0232-3>).
- [6] Y. Frayman, H. Zheng, and S. Nahavandi. "Machine vision system for automatic inspection of surface defects in aluminum die casting". *Journal of advanced computational intelligence*. 2005. vol. 10. no. 3. pp. 281–286.
- [7] S. Kalpakjian and S. Schmid. *Manufacturing engineering and technology*. 2005.
- [8] F. Pernkopf and P. O'Leary. "Image acquisition techniques for automatic visual inspection of metallic surfaces". *NDT & E International*. 2003. vol. 36. no. 8. pp. 609–617. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695\(03\)00081-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695(03)00081-1)).
- [9] D. vom Stein. "Automatic visual 3-d inspection of castings". *Foundry Trade Journal*. 2007. vol. 180. no. 3641. pp. 24–27.
- [10] R. Gonzalez and R. Woods. "Digital image processing". 1992. Reading, Mass.: Addison-Wesley. vol. 16. no. 716. p. 8.
- [11] P. Viola and M. Jones. "Robust real-time face detection". *International journal of computer vision*. 2004. vol. 57. no. 2. pp. 137–154. (doi: <http://dx.doi.org/10.1023/B:VISI.0000013087.49260.fb>).
- [12] C. Bishop. *Pattern recognition and machine learning*. Springer New York. 2006.
- [13] S. Kotsiantis. "Supervised Machine Learning: A Review of Classification Techniques". in *Proceeding of the 2007 conference on Emerging Artificial Intelligence Applications in Computer Engineering: Real Word AI Systems with Applications in eHealth, HCI, Information Retrieval and Pervasive Technologies*. 2007. pp. 3–24.
- [14] S. Kotsiantis and P. Pintelas. "Recent advances in clustering: A brief survey". *WSEAS Transactions on Information Science and Applications*. 2004. vol. 1. no. 1. pp. 73–81.
- [15] O. Chapelle, B. Schölkopf, and A. Zien, *Semi-supervised learning*. 2006. MIT Press.
- [16] E. Castillo, J. M. Gutiérrez, and A. S. Hadi. *Expert Systems and Probabilistic Network Models*. 1996. erste ed.. New York. NY. USA.
- [17] J. Quinlan. "Induction of decision trees". *Machine learning*. 1986. vol. 1. no. 1. pp. 81–106. (doi: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1022643204877>).
- [18] L. Breiman. "Random forests". *Machine learning*. 2001. vol. 45. no. 1. pp.5–32. (doi: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1010933404324>).
- [19] S. Garner. "Weka: The Waikato environment for knowledge analysis". in *Proceedings of the 1995 New Zealand Computer Science Research Students Conference*. 1995. pp. 57–64.
- [20] J. Quinlan. *C4. 5 programs for machine learning*. 1993. Morgan Kaufmann Publishers.
- [21] E. Fix and J. L. Hodges. "Discriminatory analysis: Nonparametric discrimination: Small sample performance". *Technical Report Project*. 1952. 21–49–004, Report Number 11.
- [22] V. Vapnik. *The nature of statistical learning theory*. Springer. 2000.
- [23] S. Amari and S. Wu. "Improving support vector machine classifiers by modifying kernel functions". *Neural Networks*. 1999. vol. 12. no. 6. pp. 783– 789. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0893-6080\(99\)00032-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0893-6080(99)00032-5)).
- [24] N. Chawla, K. Bowyer, L. Hall, and W. Kegelmeyer. "SMOTE: synthetic minority over-sampling technique". *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2002. vol. 16. no. 3. pp. 321–357. (doi: <http://dx.doi.org/10.1613/jair.953>).
- [25] C. M. Bishop. *Neural Networks for Pattern Recognition*. Oxford University Press. 1995.
- [26] G. F. Cooper and E. Herskovits. "A bayesian method for constructing bayesian belief networks from databases". in *Proceedings of the 1991 conference on Uncertainty in artificial intelligence*, 1991.
- [27] D. Geiger, M. Goldszmidt, G. Provan, et al. "Bayesian network classifiers" in *Machine Learning*. 1997. pp. 131– 163. (doi: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1007465528199>).
- [28] S. Maji, A. Berg, and J. Malik. "Classification using intersection kernel support vector machines is efficient". in *Proc. CVPR*. 2008. vol. 1. no. 2. p. 4. (doi: <http://dx.doi.org/10.1109/CVPR.2008.4587630>).
- [29] B. U" stu"n, W. Melssen, and L. Buydens. "Visualisation and interpretation of support vector regression models". *Analytica chimica acta*. 2007. vol. 595. no. 1–2. pp. 299–309. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aca.2007.03.023>).
- [30] B. Cho, H. Yu, J. Lee, et al. "Nonlinear support vector machine visualization for risk factor analysis using nomograms and localized radial basis function kernels". *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*. 2008. vol. 12. no. 2. p. 247. (doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TITB.2007.902300>).
- [31] Y. Singh, A. Kaur, and R. Malhotra. "Comparative analysis of regression and machine learning methods for predicting fault proneness models". *International Journal of Computer Applications in Technology*. 2009. vol. 35. no. 2. pp. 183–193. (doi: <http://dx.doi.org/10.1504/IJCAT.2009.026595>).

Tratamiento térmico en hornos de atmosfera de nitrógeno para piezas de equipos de radiofrecuencia

HEAT TREATMENT IN NITROGEN ATMOSPHERE FURNACES FOR RADIOFREQUENCY EQUIPMENT PARTS

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/6931> | Recibido: 12/07/2013 • Aceptado: 10/02/2014

Aitor Zugazaga-Cortazar,
Igor Madariaga-Gallastegui

ESS-BILBAO. Parque Tecnológico. c/ Laida Bidea, 201. Pab. 4 -
48170 Zamudio (Bizkaia). azugazaga@essbilbao.org

ABSTRACT

- Some parts of austenitic stainless steels structures which must operate with radiofrequency in ultra high vacuum need to be machined with very high precision and need to have a copper plating treatment. The heat treatment for stress relief due to machining proposed by the major research centres is performed by vacuum furnaces, that do not damage the structure of the material, but these ovens are very complex and unusual, especially for large pieces. To facilitate this process and reduce its cost is proposed to realize in common furnaces of inert atmosphere. But it is necessary to perform the tests of intergranular corrosion susceptibility and adhesion of copper, to validate the change of the process.
- **Keywords:** Stainless steel pieces, stress relieving, heat treatment, surface treatment of copper plating, corrosion test, adhesion test.

RESUMEN

Algunas piezas de aceros inoxidables austeníticos para estructuras de radiofrecuencia que deban funcionar en ultra alto vacío son mecanizadas con muy alta precisión y llevan un cobreado posterior. El tratamiento térmico de alivio de tensiones de mecanizado propuesto por los grandes centros de investigación se efectúa mediante hornos de vacío, para que no dañe la estructura del material, pero estos equipos son muy complejos y poco comunes, en especial para piezas de grandes dimensiones. Con objeto de facilitar este proceso así como abaratar su coste se propone realizarlo en hornos más comunes, de atmosfera inerte. Pero es necesario, con la realización de los ensayos de susceptibilidad a la corrosión intergranular y de adherencia del cobre, validar que el cambio de proceso puede ser aceptable.

Palabras clave: Piezas de aceros inoxidables, tratamiento térmico, alivio de tensiones, tratamiento superficial de cobreado, ensayo de corrosión, ensayo de adherencia.

1. INTRODUCCIÓN

Para un número considerable de estructuras de radiofrecuencia que deban funcionar en ultra alto vacío (principalmente equipos de aceleradores de partículas) es necesario realizar un recubrimiento superficial de cobre a piezas de acero inoxidable (AISI 304L o AISI 316L) de grandes dimensiones. Además estas piezas tienen unos requerimientos dimensionales y geométricos muy elevados, por lo que para poder garantizar estas tolerancias es necesario realizar un tratamiento de alivio de tensiones en alguna etapa de su mecanizado.



Fig. 1: Piezas cobreadas

El método habitual de solucionar estos dos requerimientos (el alivio de tensiones y la buena adherencia del cobreado) es realizar el tratamiento térmico en un horno de vacío. Este tipo de tratamientos viene descrito en la presentación “Vacuum for DTL” de G. Vandoni[1] en el cual describe que la elección del mismo es una acuerdo entre la necesidad de alivio de tensiones y el riesgo de corrosión, para lo que usan presiones durante el calentamiento desde 10^{-6} hasta $5 \cdot 10^{-7}$ mbar.

Debido a las grandes dimensiones de las piezas (hasta 1.000 mm de diámetro y 3.500 mm de longitud) es complicado abordar este tipo de tratamientos, ya que los equipos son muy poco comunes debido a su complejidad y coste. Como alternativa propusimos realizar el mismo tratamiento pero utilizando un horno de atmosfera inerte (nitrógeno). Estos hornos son mucho más comunes, más simples y el tratamiento resulta mucho más económico.

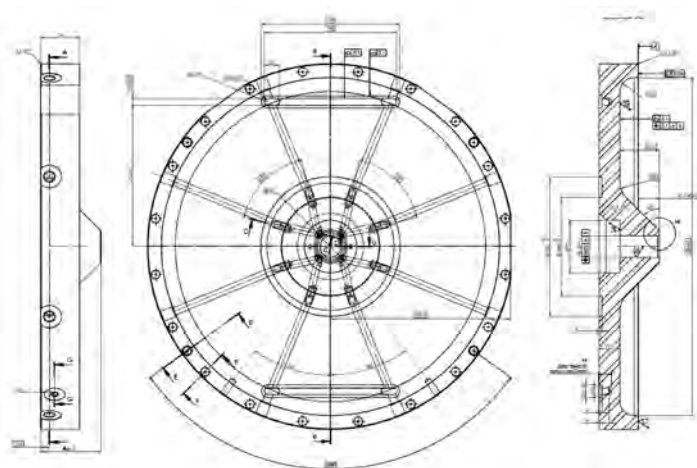


Fig. 2: Plano de una cavidad de AISI 304L a cobrear de Ø ext. 520mm

Considerando que el cambio de proceso puede dar lugar a que el nitrógeno ataque la estructura superficial del acero impidiendo una buena adherencia del cobre en el futuro proceso de cobreado, se estimó necesario realizar unos ensayos de validación del nuevo proceso, que incluían el de susceptibilidad a la corrosión intergranular basado en la norma “ASTM A262 - Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels” [2] [3], y el de adherencia del cobre según especificaciones del CERN. En caso de no haber cambios estructurales inadecuados y ser correcta dicha adherencia, el tratamiento con nitrógeno sería válido por lo que se podría utilizar como alternativa al horno de vacío.

2. DESARROLLO Y EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS

2.1. TRATAMIENTO TÉRMICO [4]

El proceso para el tratamiento térmico propuesto por los Centros competentes (CERN) y que se efectúa en hornos de vacío, consiste en:

- Calentamiento sin restricciones hasta 150 °C
- Calentamiento de 150 °C a 385 °C a <50 °C/hora
- 385 °C durante 2 horas

- Enfriamiento hasta 70 °C a <50 °C/hora
- Enfriamiento libre.

El nuevo tratamiento realizado es exactamente igual, con la diferencia de utilizar nitrógeno en lugar de hacerlo en vacío.

2.1.1. Materiales para los ensayos

Los ensayos se realizaron en las siguientes muestras:

- 5 barras de Ø 25 mm x 30 mm de longitud de AISI 304L
- 3 barras de Ø 60 mm x 20 mm de longitud de AISI 316L
- 2 tubos de Øext 60 mm, espesor 3mm x 300 mm de longitud de AISI 304L



Fig. 3: Piezas muestra para realizar la prueba

Las barras muestra, antes de ser tratadas térmicamente, fueron pulidas con discos de grano 80 para conseguir que la superficie pudiera, después del tratamiento, ser inspeccionada directamente en el microscopio una vez realizado el ataque ácido previsto por el ensayo de susceptibilidad, sin necesidad de nuevo pulido. De esta manera se comprobaría la posible incidencia de la atmósfera de nitrógeno durante el tratamiento.

2.2. ENSAYO DE SUSCEPTIBILIDAD A LA CORROSIÓN INTERGRANULAR

El ensayo realizado para comprobar la posible alteración de la estructura inter-granular de la superficie fue el A de la norma ASTM A262. Esta prueba se utiliza como método rápido de identificación de materiales en los cuales la estructura inter-granular haya sido atacada con una solución de ácido oxálico. Las muestras identifican la susceptibilidad a este ataque según las estructuras de unión granular que aparecen después del mismo.

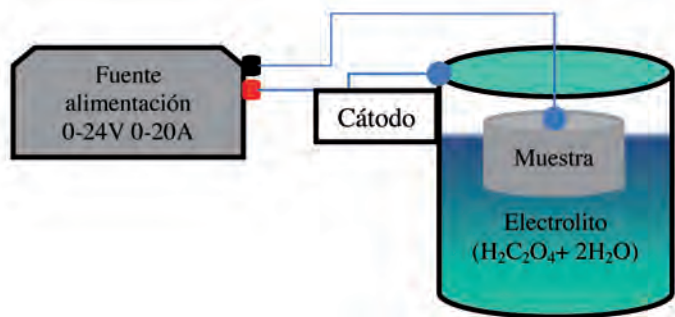


Fig. 4: Esquema del equipo para realizar la prueba

2.2.1. Equipo de la prueba

Para realizar la prueba es necesario el siguiente equipo:

- Fuente alimentación regulable hasta 24 V y 20 A
- Cátodo, un vaso de precipitados de acero inoxidable donde añadir el electrolito en el que sumergir la muestra
- Ánodo, la muestra de acero inoxidable actuaría como tal
- Electrolito, ácido oxálico-dihidrato ($H_2C_2O_4 + 2H_2O$) en una solución del 10% en peso en agua destilada.

2.2.2. Procedimiento de la prueba

A las muestras pulidas y tratadas térmicamente, se les realizó el ataque ácido, que consiste en introducir la superficie pulida en la disolución acuosa de ácido oxálico y someterlas a una corriente de 1 A/cm² durante 1,5 min. Para calcular la intensidad que debe aplicarse a la muestra debe contabilizarse toda la superficie inmersa en la disolución acuosa no solo la cara pulida. Una vez transcurrido el tiempo de ataque, se deben lavar las muestras con agua y etanol para evitar que el ácido se cristalice en la superficie ocultando la zona tratada.

La última operación de la prueba es el análisis de la estructura inter-granular del material atacado en un microscopio metalográfico a 500 aumentos.

2.2.3. Clasificación de las estructuras inter-granulares

Según aparece en la norma ASTM A262 las estructuras inter-granulares resultantes del ataque ácido son de:

- estructura **escalonada**: solo se aprecian los diferentes niveles de los granos, sin intersticios en los límites de los mismos
- estructura **dual**: se observan algunos intersticios profundos en los límites de grano, pero que no bordean completamente ninguno de ellos
- estructura **atacada**: existen intersticios intergranulares con uno o más granos completamente rodeado por ellos.

La evaluación de las estructuras escalonada y atacada puede llevarse a cabo de forma relativamente rápida, ya que son estructuras reconocibles, que en el primer caso confirmarían la idoneidad del proceso y en el segundo la invalidez del mismo. En el caso de observar alguna estructura dual, es necesario un examen más exhaustivo de la probeta ya que podrían ser indicadores de predominar cualquiera de las otras dos, por lo cual se deben examinar diferentes áreas de la pieza para observar si existe algún grano rodeado completamente por zanjas, lo que la identificaría como una de las estructuras.

2.2.4. Resultados

Para la determinación de las estructuras se llevó a cabo un estudio comparativo de las imágenes obtenidas de las diferen-

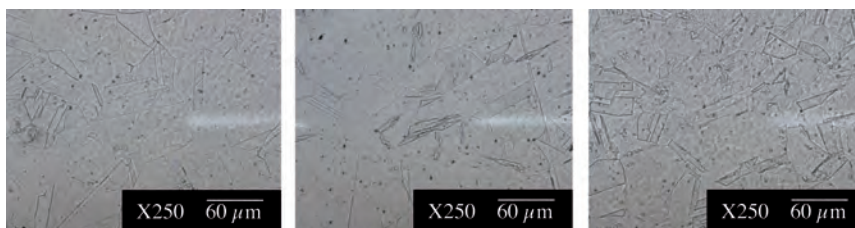


Fig. 5: Microfotografías x 250 de las estructuras escalonadas en las probetas de las muestras de Ø25mm

Condiciones de la prueba: disolución acuosa de ácido oxálico a una corriente de 1 A/cm² durante 1,5 min



Fig. 6: Microfotografías x 250 de las estructuras escalonadas y dual en las probetas de Ø60mm

Condiciones de la prueba: disolución acuosa de ácido oxálico a una corriente de 1 A/cm² durante 1,5 min

tes pruebas con las imágenes patrón de la normativa ASTM, las estructuras escalonadas y atacadas son fácilmente identificables a simple vista debido a sus características marcadas con o en ausencia de zanjas. En el caso de las estructuras duales el examen visual debe ser más en detalle debido a la fácil confusión de los patrones observados con zanjas o viceversa. Para dicho examen es necesario realizar, en las zonas especialmente problemáticas, un análisis de más detalle de los granos utilizando para ello un mayor aumento de la resolución de la microfotografía, lo cual nos permite tener una mayor apreciación de las estructuras granulares eliminando zonas ambiguas por posibles sombras o falta de resolución.

Las estructuras que se muestran en las microfotografías obtenidas en las probetas atacadas indicaron inicialmente el predominio de estructuras escalonadas con la aparición de alguna escasa estructura dual, sin existir intersticios profundos

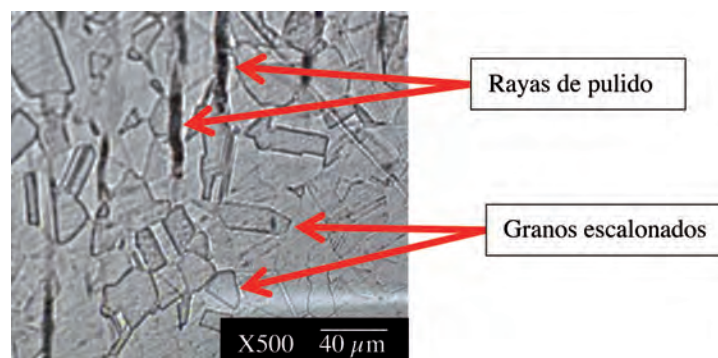


Fig. 7: Microfotografía x 500 de las estructuras escalonadas en una probeta de las muestras de Ø60mm

Condiciones de la prueba: disolución acuosa de ácido oxálico a una corriente de 1 A/cm² durante 1,5 min

rodeando completamente ningún grano. Se observaron algunas rayas de defectos de pulido.

Como la presencia de estructura dual más extensa podría ser una posibilidad, lo que indicaría que no es adecuado nuestro proceso térmico, se requería un examen general para determinar si existían algunos granos completamente rodeados de intersticios. Tras ese examen, en el resto de las imágenes la aparición de estructuras duales fue muy escasa y no se encontraron granos rodeados por intersticios, por lo que la calificación global fue de estructura escalonada.

Tras el examen de las microfotografías se puede afirmar que el tratamiento térmico en atmosfera controlada de nitrógeno no altera las estructuras del material.

2.4. ENSAYO DE ADHERENCIA DEL COBREADO

Para tener la seguridad de que, a pesar de no haberse modificado la estructura superficial, el tratamiento sea completamente compatible con el proceso de recubrimiento de cobre, es necesario realizar una prueba de adherencia de una pieza, cobreada después de haber sido tratado en el horno de nitrógeno.

La operación de cobreado para conseguir el espesor deseado (40 μm) en las piezas de inoxidable consiste en una serie de procesos electroquímicos detallados a continuación [5] [6]:

- Desengrase químico con ultrasonidos

- Activado con ácido nítrico y solución de ácido fluorhídrico
- Activado Ni WOOD
- Cobreado ácido con Sulfato de cobre (CuSO_4)
- Pasivado con Ácido crómico y ácido sulfúrico.

Para realizar el ensayo de adherencia se cobreadon tubos de $\varnothing_{\text{ext}}$ 60 mm de AISI 304L por el interior. Se seleccionaron tubos de las dimensiones indicadas para simular a escala las piezas definitivas de $\varnothing 500\text{mm}$ y 2500mm de longitud. El cobreado se realizó sobre el interior de los mismos ya que en las piezas definitivas solo es necesario por esta parte, para lo cual el exterior se enmascara mediante cera y cinta adhesiva.

2.4.1. Método del ensayo

El método para el ensayo de adherencia propuesto por los Centros competentes (CERN), consiste en un calentamiento



Fig. 8: Tubo cobreado (izq). Tubos enmascarados (der)

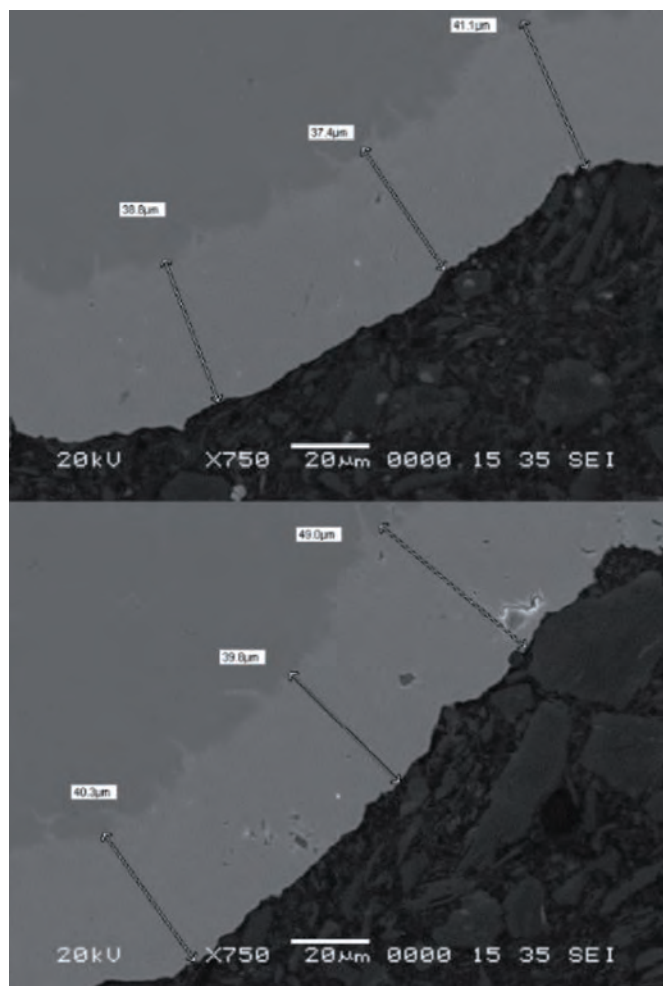
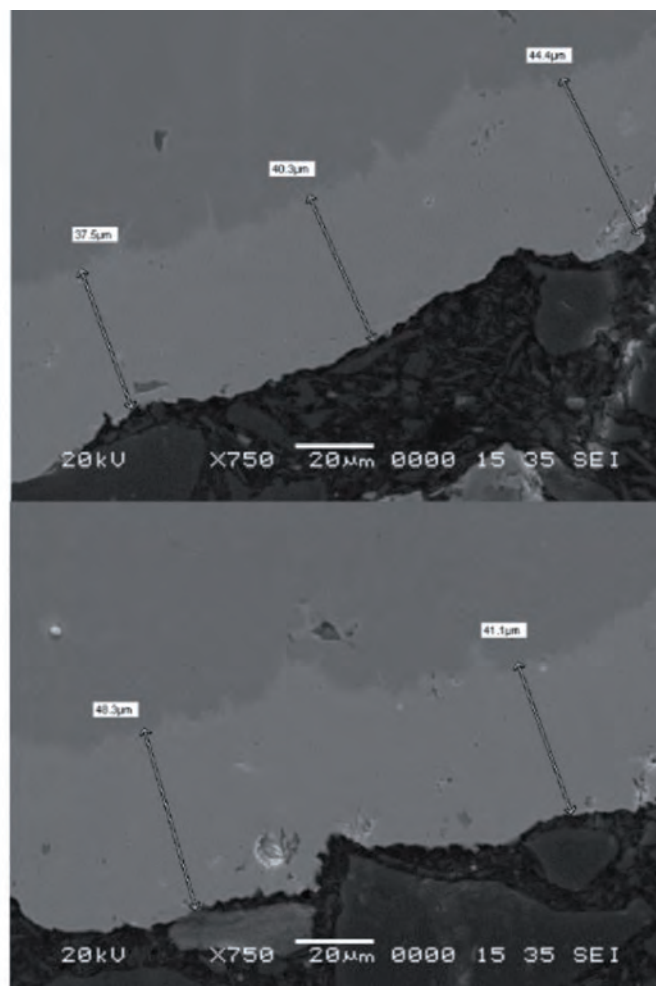


Fig. 9: Microfotografías de la zona superficial cobreada



para simular unas condiciones de trabajo asimilables a las reales durante su empleo:

- Calentamiento hasta 350 °C a <100 °C/hora
- 350 °C durante 1 hora
- Enfriamiento libre.

Este ensayo se debe realizar en ausencia de oxígeno ya que a dichas temperaturas la oxidación del cobre haría descascarillar el cobreado. Al igual que en el caso anterior debido a la dificultad de encontrar un horno de vacío se utilizó para el ensayo un horno de atmosfera controlada de Argón para realizar la prueba.

La evaluación de los tubos tratados se realiza visualmente observando si existe alguna zona con ampollas o con falta de adherencia. Posteriormente para comprobar el espesor del proceso de cobreado se realiza un corte al tubo tratado, se realiza el pulido del mismo y se lleva a un microscopio metalográfico de 750 aumentos para observar que el espesor del cobre es el deseado.

2.4.2. Resultados

En el examen visual tras el ensayo no se observó deterioro alguno en el cobreado de los tubos, no existiendo zonas con ampollas ni con falta de adherencia.

En el análisis microscópico del espesor medio del depósito de cobre que se muestran en las micrografías indican que este es cercano a 40 µm, valor requerido inicialmente.

En las micrografías se puede observar en la zona superior izquierda el acero inoxidable del tubo, a continuación de color gris más claro la capa de cobre y por último de color negro la resina usada para el pulido. El espesor del cobre varía entre las 37,4 µm de la primera fotografía hasta las 49 µm de la tercera.

3. CONCLUSIONES

Dados los resultados obtenidos con ambos ensayos podemos concluir que el proceso de tratamiento térmico de alivio de tensiones practicado en hornos con atmósfera de nitrógeno es ampliamente satisfactorio para los requerimientos de las piezas en aceros inoxidables austeníticos prescritos para su utilización en equipos que trabajarán con radiofrecuencia en equipos de ultra alto vacío que vayan a ser posteriormente recubiertas mediante cobreado electrolítico.

3.1. VENTAJAS

El empleo de hornos con atmosfera controlada es más habitual y está más extendida en nuestra industria. Ello supone un considerable abaratamiento en su realización frente al proceso en hornos de vacío:

- Transporte de los equipos, frecuentemente de gran tamaño, a los centros de tratamiento térmico
- Seguimiento y control de los procesos
- Equipos utilizados mucho más económicos, (en relación de precio de 1 a 3) con su equivalente coste asociado a pieza
- Existencia de mercado con la consiguiente competencia entre proveedores y ajuste de precios.

El cálculo aproximado de los costes de la hornada para el tratamiento en vacío equivaldría a 2-3 veces al coste del tratamiento en atmosfera controlada.

3.2. INCONVENIENTES

El empleo de hornos con atmosfera controlada no permite la misma capacidad que los hornos de vacío de controlar de forma precisa el calentamiento, lo que minimiza la distorsión inducida por el calor. Además, el tratamiento en vacío permite cambiar las velocidades de enfriamiento con facilidad, incluso dentro de un solo ciclo, por lo que en caso de requerirse un ciclo con unas rampas de calentamiento o enfriamiento de mayor demanda sería más sencillo realizarlo con un horno de vacío.

De la misma manera las piezas tratadas en vacío quedan limpias y brillantes requiriendo relativamente poco acabado post-tratamiento y limpieza, mientras que las tratadas en atmosfera requieren de una limpieza más a fondo al quedar rastros de oxidación de suciedades e impurezas del mecanizado previo.

AGRADECIMIENTOS

Quisiéramos agradecer especialmente a Arrate Rueda de la empresa RAZYA, S.A. por su dedicación en el proceso del tratamiento térmico asegurando que todo él se realizara con unos controles, medidas y condiciones impecables.

También quisiéramos dar las gracias a Suitbert Ramberger y Stefano Sgobba del CERN por su ayuda en la definición procesos y ensayos a realizar.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Vacuum for DTL (<http://indico.cern.ch/getFile.py/access?contribId=13&resId=1&materialId=slides&confId=152766>). G. Vandoni. CERN. Route de Meyrin 385, Geneva – Switzerland, 13 September 2011
- [2] ASTM International A262 – 10 – Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Abril 2010
- [3] ASTM A484 / A484M – 13a – Standard Specification for General Requirements for Stainless Steel Bars, Billets, and Forgings. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- [4] Steel Treatment Handbook – Second Edition. Steel Heat Treatment – Metallurgy and Technologies. Taylor and Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton, 2006
- [5] ASTM International D3359 – 09e2 – Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- [6] Especificaciones Técnicas del Procedimiento del Cobreado de en Superficies de Ultra-Alto Vacío – DTLS-TK-0222-ESS.01-TSP. A. Zugazaga – ESS Bilbao, Enero 2013

Taladrado láser mediante un láser convencional

LASER PERCUSSION DRILLING USING A CONVENTIONAL LASER

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5877> | Recibido: 25/06/2013 • Aceptado: 11/12/2013



Jon Iñaki Arrizubieta-Arrate, Silvia Martínez-Rodríguez, Aitzol Lamikiz-Mentxaka, Eneko Ukar-Arrien, Iván Tabernero-Campos, Aitor Zugazaga

ETSI Bilbao. Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad del País Vasco UPV-EHU. c/ Alameda Urquijo, s/n - 48013 Bilbao. Tfno: +34 946 017347. joninaki.arrizubieta@ehu.es

ABSTRACT

• Nowadays, laser drilling is increasing its relevance among the industrial applications, especially in the aeronautical sector for the manufacture of small holes in the blades of a turbine for their internal cooling. There are more applications in other sectors like automotive or energy, where high aspect ratio drills are demanded. Currently there are robust industrial solutions to perform these type of drills, but these system are specific for this application and present high costs. On the other hand, conventional solid state lasers are relatively widespread in the industry for laser cutting or welding. Thus, the present article presents a double objective: On the one hand, a laser percussion drilling process for high aspect ratio holes using a conventional laser will be evaluated. On the other hand, in the article is shown the development of a numerical model or estimating the internal geometry of the hole and the temperature field of the workpiece for the different operating conditions.

• **Keywords:** laser, drilling, modelling.

RESUMEN

El taladrado láser es un proceso que está incrementando su relevancia industrial dentro de algunas aplicaciones, empleándose especialmente en el sector aeronáutico en la realización de microagujeros en los álabes de las turbinas para la refrigeración de los mismos. También hay otros ejemplos en sectores como automoción y energía, en los que se requieren agujeros de elevada relación de aspecto (relación longitud/diámetro). Para la realización de este tipo de taladros existe equipamiento específico capaz de realizar estas operaciones de forma rápida y robusta, pero son específicos para esta aplicación y su coste es elevado. Por otro lado, el empleo de fuentes láser de estado sólido convencionales, como pueden ser láser de fibra o disco, es cada vez más habitual para operaciones de corte de chapa o soldadura.

Así, el presente artículo plantea un doble objetivo: por un lado, se analiza la capacidad de un láser convencional para la realización de agujeros de alta relación de aspecto y la calidad de los mismos, tanto en lo que respecta a la geometría externa, como a la geometría interna. Por otro, se ha desarrollado un modelo numérico capaz de simular la geometría el agujero y el campo de temperaturas de la pieza para las distintas condiciones de funcionamiento.

Palabras clave: láser, taladrado, modelización.

1. INTRODUCCIÓN

El taladrado láser es un proceso de arranque de material térmico, donde gracias a las características de la fuente láser se logra concentrar grandes cantidades de energía en un área

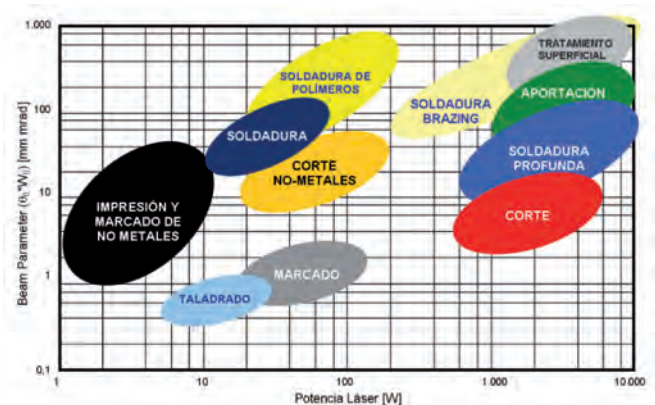


Figura 1: Procesos industriales donde se utiliza el láser

de pequeñas dimensiones. De esta forma, se consiguen densidades de potencia del orden de 10^9 - 10^{10} W/cm² con equipos convencionales. Como puede verse en la Fig. 1, en función de la densidad de energía del haz, puede obtenerse desde un calentamiento superficial con baja penetración (para procesos como el temple o pulido), hasta una fusión con penetraciones altas como es el caso del corte o la vaporización del material (en el taladrado láser).

Debido a los requisitos de funcionalidad o diseño de la pieza, en ocasiones es necesario disponer de decenas o cientos de orificios de diámetros inferiores al milímetro en espesores relativamente grandes (superiores a 2-3 mm). De esta forma, es fácil demandar una gran cantidad de taladros con profundidades superiores a 15 veces el valor del diámetro. Para estos casos, el taladrado mediante láser es una alternativa muy utilizada, ya que permite la realización de agujeros de muy buena calidad en tiempos muy reducidos, del orden de milisegundos. Sin embargo, es difícil encontrar proveedores con equipos específicos para la realización de dichos taladros, siendo estos equipos muy caros y específicos para esta operación.

Si se realiza un análisis de los trabajos realizados hasta el momento sobre el taladrado láser, se puede observar que se han realizado diversas investigaciones, con el objetivo de mejorar el proceso de taladrado [1], [2] y adquirir un mejor conocimiento de los procesos físicos involucrados en este proceso de taladrado [3]. Así mismo, las investigaciones realizadas en torno al microtaladrado láser se pueden separar en dos grupos. Por un lado se encuentran los estudios experimentales, mientras que por el otro lado se encuentran aquellos donde el objetivo es la modelización del proceso.

Dentro de los estudios experimentales, se ha analizado la influencia de las distintas variables sobre la geometría final de los taladros [4], [5]; se ha examinado también la repetitividad del proceso, tanto en lo que respecta a la geometría de los agujeros [4], [6], como a la zona afectada que se genera alrededor de los mismos [7]. En todos ellos, se consideraban como variables, los diámetros de entrada y salida y la conicidad de los agujeros, variables que se pueden medir externamente.

En lo que respecta a la caracterización de la geometría interna y de la profundidad de los agujeros, se han realizado diversos trabajos, empleándose técnicas de medición diferentes. Algunos autores, como Verhoeven [8] han realizado cortes longitudinales de los agujeros, mostrando imágenes de las secciones, donde puede verse tanto la profundidad del mismo como la geometría interna. Otros autores como Petkovsek [3] han recurrido a técnicas basadas en la medición del tiempo que tardan las ondas de impacto que se generan durante el proceso de taladrado láser en llegar a un sensor, determinando

de esta manera la profundidad taladrada. También se han realizado trabajos relacionados con la medición de la geometría interna de los agujeros utilizando rayos X y métodos DODO (*Direct Observation of Drilled Hole*) [9].

En cuanto a los trabajos orientados hacia la modelización del proceso, a medida que se han ido desarrollando modelos numéricos más complejos y precisos, se han resuelto modelos más complejos, partiendo del primer modelo unidimensional hasta modelos tridimensionales [10], [11]. En cualquier caso, todos los modelos desarrollados incluyen una serie de hipótesis para simplificar los cálculos a realizar y disminuir el coste computacional de los mismos. Las hipótesis simplificadoras más habituales son no tener en cuenta aspectos del proceso como la posible generación de plasma, suposición de la no existencia de corrientes convectivas que se generan dentro del material fundido, mantener constantes determinadas características del material, etc.

Algunos de estos estudios incluyen modelizaciones de la respuesta del material frente a un pulso láser [12]. También se han desarrollado modelos bidimensionales axisimétricos que tienen en cuenta el efecto de las reflexiones del haz láser en las paredes del agujero durante el proceso de taladrado [13], [14].

Por último, se han realizado diversos estudios en relación con el mecanismo de expulsión del material de la zona de trabajo, determinando cual es el mecanismo predominante, vaporización o expulsión directa del material fundido [8], analizando cuales son las ventajas de cada uno de ellos.

De este análisis, puede concluirse que no se han realizado estudios relacionados con el empleo de equipos convencionales en operaciones de taladrado láser, lo cual puede ser de gran interés para empresas y talleres que ya dispongan de un equipo láser y deseen emplearlo en operaciones de taladrado láser. Es por ello, que en el presente proyecto se ha analizado la calidad de los microagujeros realizados mediante un láser de fibra convencional, que tiene una potencia máxima de funcionamiento de 1kW. Las pruebas se han realizado sobre una lámina de acero inoxidable AISI 304, de 1mm de espesor, analizando los diámetros de salida y entrada, conicidad del agujero, repetitividad del proceso y la geometría interna de los mismos. Asimismo, se presenta un enfoque a un modelo capaz de predecir la geometría interna de los agujeros realizados.

2. EL PROCESO DE TALADRADO LÁSER

El proceso de taladrado láser se basa en la fusión/vaporización del material mediante una sucesión de pulsos láser.



Figura 2: Proceso de taladrado láser

En la Fig. 2 se describe de forma esquemática el proceso y los diferentes aspectos que influyen en el mismo, como son la expulsión del material fundido, la absorptividad y la reflectividad del material y la disipación de la radiación láser debido al vapor de plasma generado durante el proceso.

El proceso comienza en el instante en el que el haz láser incide sobre la superficie del material [1]. Parte de la energía del haz es absorbida y parte reflejada. La fracción de energía absorbida, que depende de las características del material y de la longitud de onda del láser, genera un aumento de la temperatura del material, por encima de la temperatura de fusión y después de un cambio de fase, puede llegar hasta la temperatura de vaporización. En piezas de pequeño espesor, es posible realizar agujeros pasantes en un único pulso, pero lo habitual es que se necesite una secuencia o tren de pulsos para realizar un agujero completo [8]. A la operación que emplea de un tren de pulsos para realizar un taladro se le denomina Taladrado Láser por Percusión o *Laser Percussion Drilling*.

El taladrado láser es un proceso de extracción del material, el cual tiene dos mecanismos principales para eliminar el material de la zona de interacción con el haz [15]:

- 1.- Vaporización del material fundido: mecanismo dominante para el caso de pulsos láser de alta energía y duraciones muy cortas.
- 2.- Expulsión del fundido mediante presión de expulsión (*recoil pressure*): mecanismo dominante para condi-

ciones de pulsos más largos y de menor densidad de energía.

El mecanismo de expulsión, mediante la presión de extracción (*recoil pressure*) para la eliminación del material fundido, es el mecanismo dominante para láseres de baja potencia, y consecuentemente para menores temperaturas en la superficie fundida. Lo cual, como consecuencia de la viscosidad del material fundido, conlleva a que no pueda ser expulsado completamente de la zona taladrada antes de su solidificación, creando una capa de material resolidificado alrededor del agujero.

Para mayores temperaturas de la superficie del material fundido, ya sea por el uso de pulsos de mayor densidad de energía y duraciones más cortas, la vaporización se convierte en el principal mecanismo de eliminación del material de la zona de interacción.

De entre los dos mecanismos para la eliminación del material durante el taladrado láser (vaporización o fusión), y considerando únicamente criterios energéticos, la fusión es un mecanismo más eficiente, ya que no es necesario que el material absorba el calor latente de vaporización. Así, la energía requerida para la eliminación del material fundido mediante la presión de expulsión, es aproximadamente la cuarta parte de la que se necesita para vaporizar la misma cantidad de volumen del mismo.

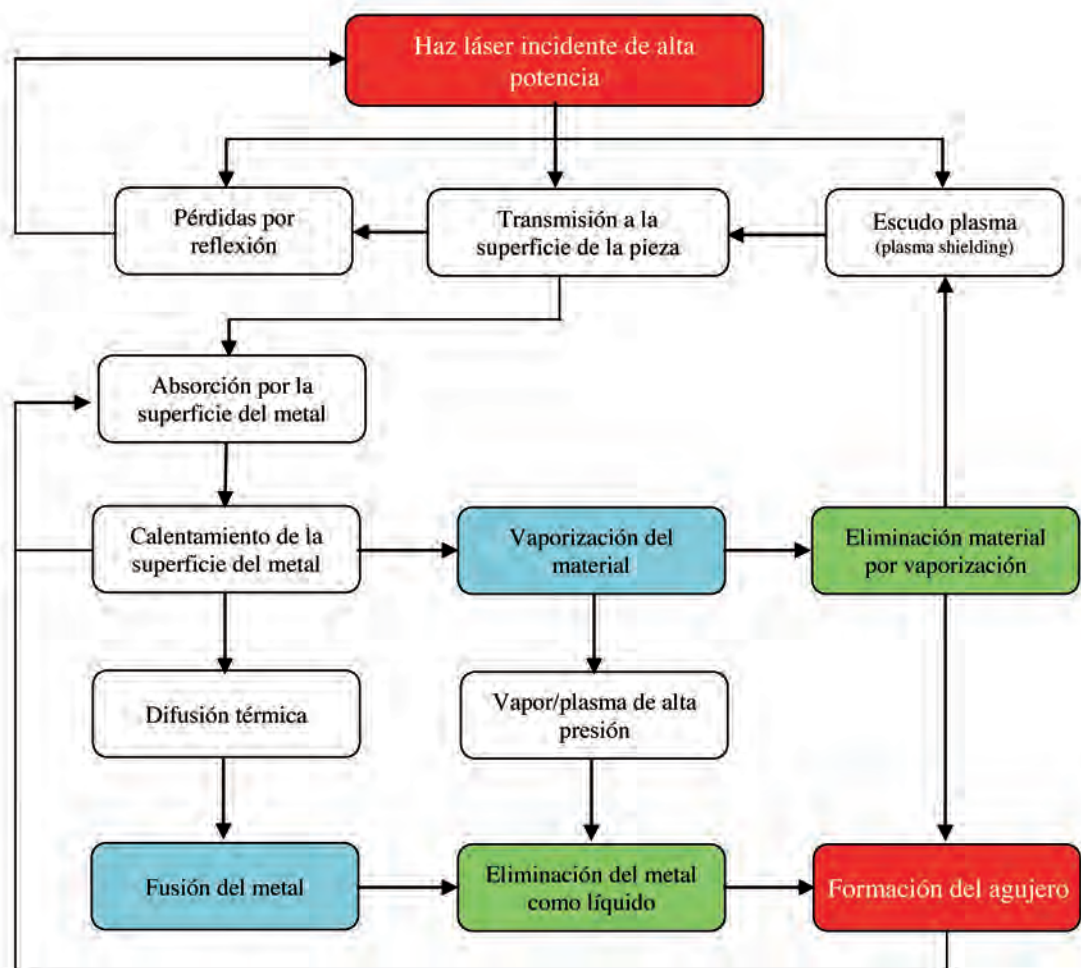


Figura 3: Fenómenos que intervienen en el procesado láser

Sin embargo, el mecanismo de fusión requiere la expulsión del material en estado líquido. Para ello, los gradientes de presión generados por la vaporización de parte de material en la zona donde ha incidido el haz láser, deben de ser lo suficientemente grandes para superar las tensiones superficiales y expulsar el material fundido del agujero [7]. En la Fig. 3 se describen los principales fenómenos físicos que intervienen en el proceso de taladrado láser.



Figura 4: Láser de fibra



Figura 5: Centro de Mecanizado KondiaAktinos 500



Figura 6: Microscopio confocal Leica DCM 3D

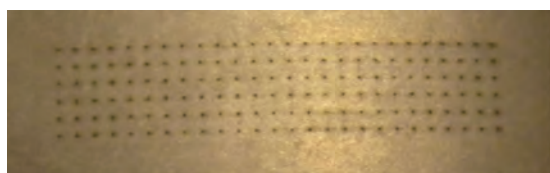
a) Microagujeros en Tungsteno $\varnothing=100\mu\text{m}$ b) Agujeros $\gamma\text{-Ti-Al}$ $\varnothing=500\mu\text{m}$ c) Agujeros en AISI 304 $\varnothing=2,15\text{mm}$

Figura 7: Ejemplos de agujeros realizados

3. MATERIALES Y MAQUINARIA EMPLEADAS

Los ensayos se han llevado a cabo en el Taller Mecánico del Dpto. de Ingeniería Mecánica de la (UPV-EHU), donde además de máquinas de mecanizado como centros de mecanizado o electroerosión, se cuenta con un equipo láser de alta potencia. También se cuenta con el del equipo necesario para la medición de los taladros realizados y el análisis de la calidad de los mismos. El equipo láser empleado para la realización de los taladros y el microscopio confocal empleado para su posterior medición se muestran en las Figuras 4, 5 y 6. El equipo láser, es un láser de fibra *ROFIN FL-010* de alta potencia, con una potencia de hasta 1 kW y una frecuencia máxima de pulsado de 5000Hz.

El láser de fibra empleado es un láser de marcado convencional y capaz de realizar operaciones de corte, soldadura o aporte de material entre otros procesos. Se trata por tanto de un equipo convencional. Previa-

mente, antes de profundizar en el estudio de los taladros sobre acero inoxidable, se realizaron una serie de ensayos sobre diferentes materiales y espesores para evaluar la viabilidad del empleo del equipo en este proceso. Así, en la Figura 7 se observan diferentes ensayos hechos sobre una lámina de tungsteno puro, una aleación $\gamma\text{-Ti-Al}$ y acero inoxidable AISI 304.

Aunque durante la realización del proyecto se han taladrado distintos materiales (*AISI 304*, *DIN C45*, $\gamma\text{-Ti-Al}$,

tungsteno, etc.), el análisis de la calidad de los microagujeros y la verificación de la aptitud de un láser de dichas características para la realización de microagujeros se ha realizado sobre una lámina de 1mm de espesor de AISI 304. La metodología empleada puede extrapolarse a cualquier material ensayado.

4. ENSAYOS EXPERIMENTALES REALIZADOS

El taladrado láser es un proceso en el cual intervienen un número elevado de variables. En la Figura 3 ya se habían adelantado una serie de interacciones entre variables del proceso,

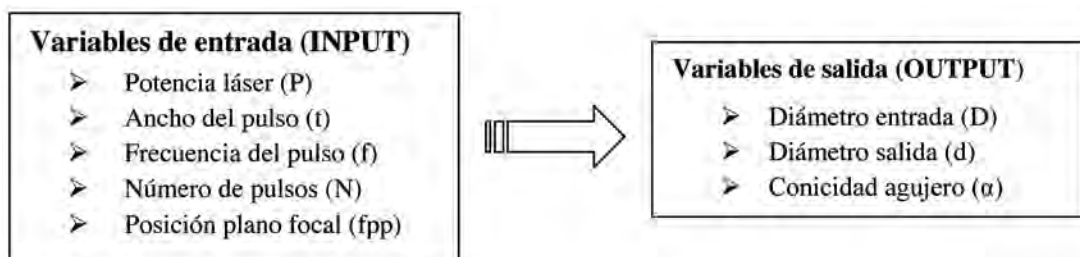


Figura 8: Variables de entrada y salida

	C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Ni [%]	P [%]	S [%]
AISI 304	<0,08	<2,00	<1,00	18,0 , 20,0	8,0 , 10,5	<0,045	<0,03

Tabla 1: Composición química del acero AISI 304

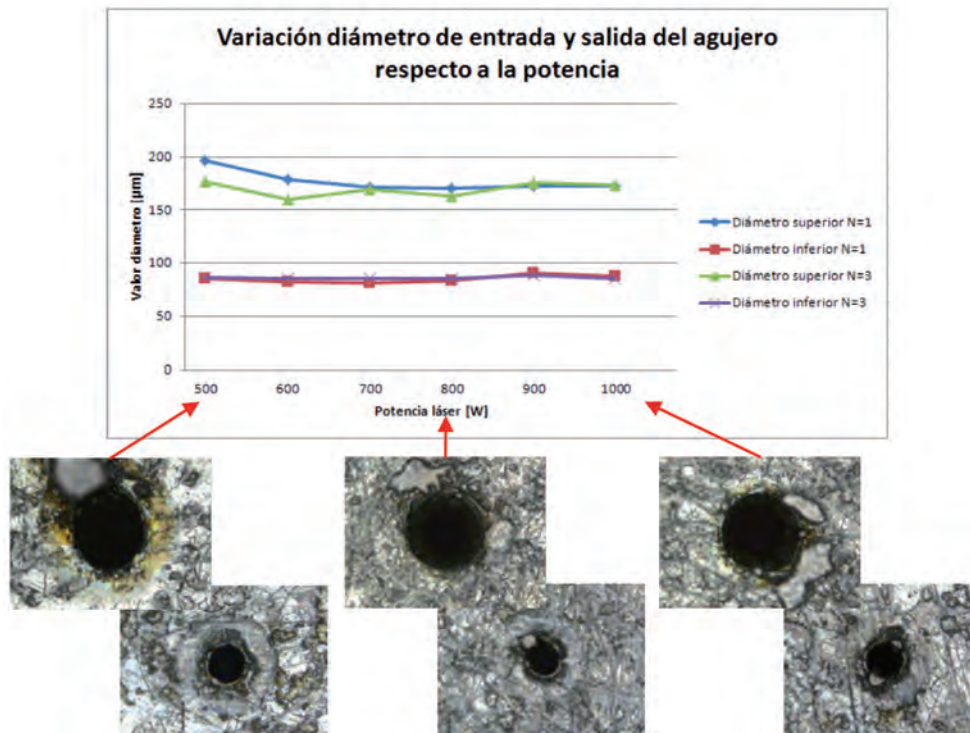


Figura 9: Efecto de la variación de la potencia en el tamaño de los microagujeros taladrados mediante laser en una chapa AISI 304 de 1mm de espesor. fpp=0mm, f=5Hz, t=5ms.

pero recogiendo estos parámetros de una forma más sistemática, se observan en la Fig.8 las diferentes variables de entrada y salida consideradas. Dado que algunas variables están interrelacionadas entre ellas, es muy importante realizar un análisis de estas interrelaciones para poder obtener cuales serían las condiciones óptimas de taladrado para cada material.

mayor zona afectada térmicamente (véase la fotografía de la entrada del agujero de la izquierda de la Fig. 9). Es por ello que se ha determinado como la potencia óptima de taladrado, aquella potencia mínima que permita la obtención de un agujero pasante, con una ZAT mínima. Para los equipos y materiales empleados, esta ha resultado ser de 800W.

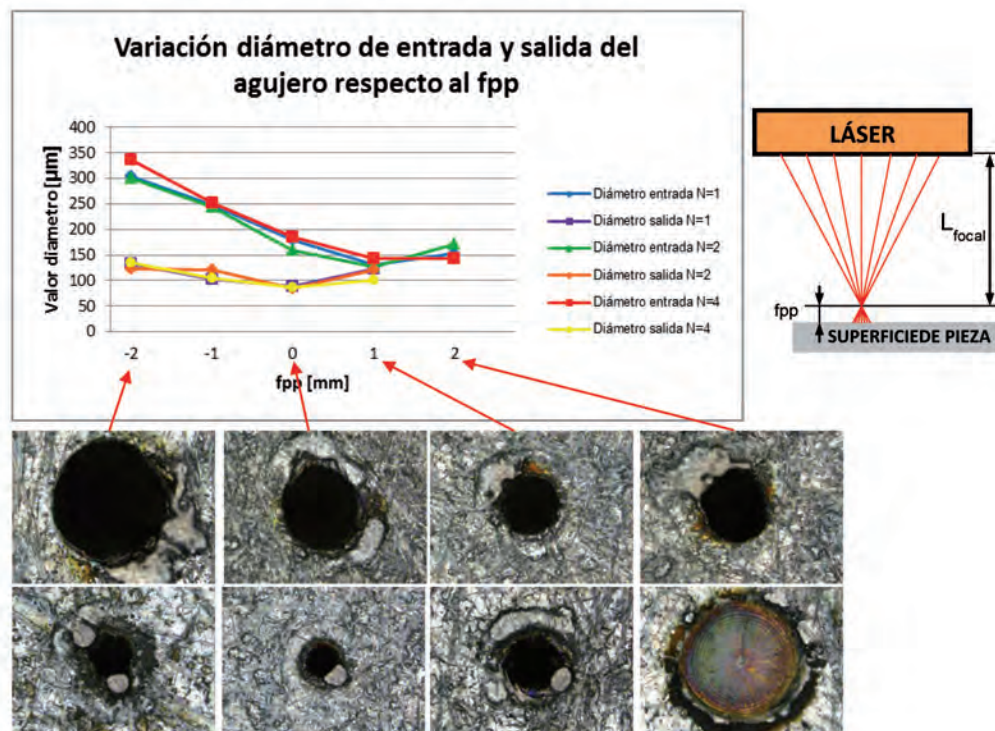


Figura 10: Efecto de la variación del fpp en el tamaño de los microagujeros taladrados mediante laser en una chapa AISI 304 de 1mm de espesor. P=800W, f=5Hz, t=5ms.

Todas las variables de entrada influyen sobre las dimensiones y geometría de los agujeros, pero se ha comprobado que las variables de salida presentan una mayor sensibilidad a las variaciones de potencia y posición del plano focal.

En la Fig. 9, se muestran los resultados obtenidos de los ensayos realizados variando la potencia del láser (manteniendo el resto de las variables constantes). Tal y como puede verse, para altas potencias, debido a las altas densidades de potencia que se consiguen, el mecanismo predominante de eliminación del material es la vaporización. Mientras que para bajas potencias el efecto de la vaporización del material es menor y se necesita más tiempo para la realización del agujero. Lo que se traduce en una mayor conducción del calor, y una

Por otro lado, en la Fig.10 se muestra la influencia del plano focal (fpp) del láser en los diámetros de entrada y salida de los taladros. Para su obtención se han realizado diversos ensayos variando la posición relativa entre el láser y la pieza, que debido a la divergencia del haz láser, resulta en una variación del diámetro del spot láser y de su densidad de potencia. Como puede observarse, una variación del foco del láser de $\pm 2\text{mm}$ tiene una gran influencia en ellos, lo que quiere decir que el control de la distancia pieza-láser es uno de los aspectos clave a considerar en esta operación para garantizar la buena calidad de los taladros.

De esta manera, analizando la influencia de todas las variables de entrada sobre las

variables de salida, se han desarrollado gráficas y tablas dinámicas, que permiten obtener el valor óptimo de los parámetros para conseguir unos agujeros de calidad adecuada.

5. ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE LOS TALADROS

Puesto que el taladrado láser es un proceso térmico, la aparición de defectos de origen térmico asociados a la fusión del material es algo inherente al propio proceso. Los defectos más habituales son la generación de una capa de material refundido, material adherido en forma de rebaba, zona afectada térmicamente, o defectos geométricos asociados a la fusión de material no controlada.

Es por ello que deben ajustarse correctamente los parámetros del proceso para garantizar una buena calidad de los taladros y evitar, en la medida de lo posible, estos defectos. Para ello, además de analizar la redondez de los orificios de entrada y salida, se ha analizado la geometría interna de los mismos.

Debido a las pequeñas dimensiones de los taladros, se ha empleado un microscopio óptico confocal para su medición, que además de permitir obtener imágenes de alta calidad y precisión, permite realizar un barrido en la dirección del eje Z y extraer la topografía de la superficie analizada. En la siguiente imagen se muestra la topografía del orificio de entrada de uno de los ensayos, donde puede comprobarse que el material refundido adherido a su periferia es mínimo en este caso.

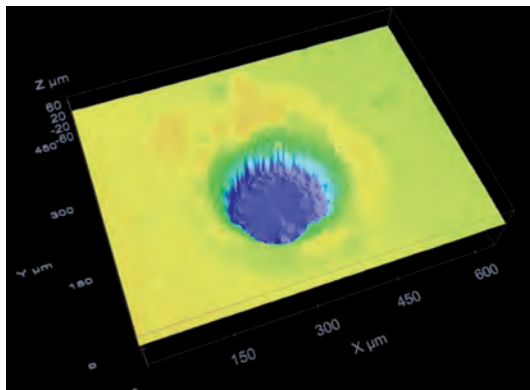


Figura 11: Topografía tridimensional del orificio de entrada de un microagujero

Para el análisis de la geometría interna de los microagujeros, se ha realizado el corte de la pieza mediante electroero-

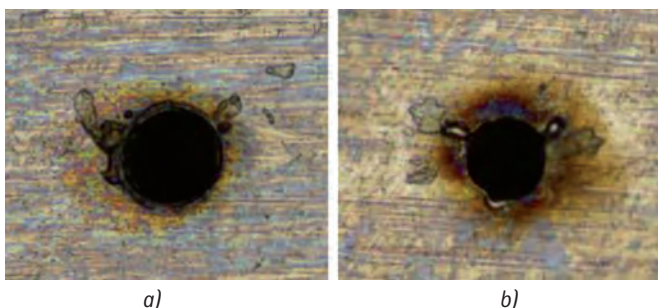


Figura 12: Entrada (a) y salida (b) de un microagujero de $d=100\mu\text{m}$ en AISI 304

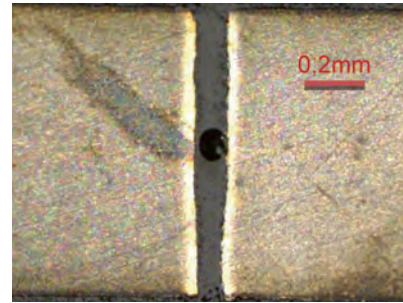


Figura 13: Sección del taladro pulida y atacada con Nital

sión por hilo, de esta manera se puede comprobar que la conicidad de los agujeros es mínima. Además de ello, atacando las probetas con Nital, se observa en la sección del agujero la zona afectada térmicamente (ZAT). Como puede verse en la Figura 13, la zona afectada térmicamente es mínima, siendo su espesor de unas pocas micras.

6. MODELO NUMÉRICO

Otro aspecto desarrollado en este trabajo, además de analizar la calidad de los microagujeros realizados mediante un láser convencional, ha sido la obtención de un modelo numérico que permite la simulación del proceso de taladrado. De tal manera que puede obtenerse una estimación de la geometría final de los taladros obtenidos, lo que permite la minimización del número de ensayos a realizar en la máquina, con el consiguiente ahorro económico que ello conlleva.

Al desarrollar el modelo numérico, se han realizado una serie de hipótesis simplificativas, de tal manera que aunque introduzcan un error relativo en los resultados finales, agilizan los cálculos a realizar y facilitan el desarrollo y programación del modelo. Así, las hipótesis introducidas son las siguientes:

- El material de la pieza se considera un cuerpo continuo, homogéneo e isotrópico.
- La eliminación del material se da mediante vaporización, dado que los pulsos que se alcanzan con el láser son del orden de $1,27 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$ [8].
- Se desprecian los fenómenos viscoso-dinámicos del material fundido, ya que el material fundido está confinado en un taladro de pequeño diámetro.
- No se tienen en cuenta ni la convección ni la radiación, incluyendo ambos fenómenos, junto con la generación de plasma y las reacciones exotérmicas que se producen debido a la oxidación del material dentro de un coeficiente de pérdidas global "A".
- Se consideran variaciones lineales de las propiedades físicas en función de la variación de la temperatura.

Aunque no se va a profundizar en las bases del modelo numérico, debe mencionarse que se basa en el balance energético en cada uno de los elementos que conforman el cuerpo mediante la aplicación del primer principio de la termodinámica:

$$dE_{\text{entrada}} - dE_{\text{salida}} + dE_{\text{generada}} = dE_{\text{acumulada}}$$

Desarrollando esta ecuación, se obtiene la ecuación general del campo de temperaturas por conducción:

$$a \cdot \nabla^2 \theta \pm \frac{q_v}{\rho \cdot c_p} = \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

donde:

c_p : Calor específico [KJ/Kg.K]
 q_v : Potencia calorífica por unidad de volumen [W/m³]
 ρ : Densidad del cuerpo [Kg/m³]
 a : Difusividad térmica [m²/s] donde $a = \lambda / (\rho \cdot c_p)$
 $\frac{\partial \theta}{\partial t}$: Variación de la temperatura respecto al tiempo

Se trata de una ecuación diferencial de segundo orden, el cual debe derivarse para obtener la ecuación del campo térmico. En ella aparecerán dos constantes de integración que deberán fijarse mediante condiciones de contorno y condiciones iniciales, los cuales se definen de la siguiente manera:

- Condiciones iniciales (CI): se ha establecido que la pieza en el instante $t=0$ s se encuentra a temperatura ambiental: $\theta_0 = \theta(x, y, z, 0)$: donde θ_0 es la temperatura ambiente.
- Condiciones de contorno (CC): estas condiciones hacen referencia a la interacción entre el material y el medio en el que se encuentra. Se han introducido dos tipos de condiciones de contorno: las CC de primera especie (tipo Dirichlet) se han introducido en aquellas caras donde no incide el haz láser e imponen que la temperatura del nodo adyacente a la pieza, pero que no pertenece a ella, sea igual a la del nodo de la pieza. Esto es equivalente a poner una condición de segunda especie donde el flujo de calor sea cero ($q_s=0$). Por otro lado, las CC de segunda especie (tipo Neumann) introducen un flujo de calor en la cara donde incide el haz láser.

Para el desarrollo de la ecuación anterior, se han empleado las diferencias finitas centrales. La energía que el haz láser a la pieza se ha introducido como condición de contorno y no existen fuentes ni sumideros de calor internos en la pieza, el valor de q_v es nulo. Por lo que, la ecuación general del campo de temperaturas queda definido de la siguiente manera:

$$a \cdot \nabla^2 \theta = \frac{\partial \theta}{\partial t}$$



$$\theta_{x,y,z}^{t+1} = \theta_{x,y,z}^t + a \cdot r_1 \cdot (\theta_{x+1,y,z}^t - 2\theta_{x,y,z}^t + \theta_{x-1,y,z}^t) + a \cdot r_2 \cdot (\theta_{x,y+1,z}^t - 2\theta_{x,y,z}^t + \theta_{x,y-1,z}^t) + a \cdot r_3 \cdot (\theta_{x,y,z+1}^t - 2\theta_{x,y,z}^t + \theta_{x,y,z-1}^t)$$

Donde,

$$r_1 = \frac{\Delta t}{\Delta x^2}; \quad r_2 = \frac{\Delta t}{\Delta y^2}; \quad r_3 = \frac{\Delta t}{\Delta z^2}$$

Δx : Distancia entre nodos en la dirección del eje X
 Δy : Distancia entre nodos en la dirección del eje Y
 Δz : Distancia entre nodos en la dirección del eje Z
 Δt : Incremento de tiempo en cada paso

Representando matricialmente la ecuación anterior para todos los nodos e introduciendo las condiciones de contorno, se llega a la siguiente ecuación, que debe resolverse iterati-

vamente para la obtención del campo de temperaturas de la pieza.

$$\{\theta^{t+1}\} = [M] \cdot \{\theta^t\} + \left\{ \frac{l \cdot (1-A) \cdot \Delta x}{\lambda} \cdot a \cdot r_1 \right\} = [M] \cdot \{\theta^t\} + \left\{ \frac{l \cdot (1-A) \cdot \Delta t}{\Delta x \cdot \rho \cdot c_p} \right\}$$

$$\{\theta^{t+1}\} = [M] \cdot \{\theta^t\} + \{F\}$$

Donde, $\{M\}$ = Matriz de transferencia, $\{F\}$ = Vector fuente, y $\{\theta^t\}$ y $\{\theta^{t+1}\}$ son los vectores de las temperaturas de los distintos nodos para los instantes de tiempo " t " y " $t+1$ " respectivamente.

Tras la realización de todos los cálculos, el programa desarrollado permite la representación gráfica de la geometría tridimensional del taladro. A modo de ejemplo, en la Fig. 14 se muestran las representaciones 3D del agujero formado, como si fuera un cuerpo sólido (donde se muestra el campo térmico alcanzado durante la operación de taladrado) y una vista en alámbrico del mismo (que permite una mejor visión del agujero internamente).

Además de ello, el programa permite realizar secciones de la geometría 3D, lo que ha permitido validar del modelo numérico en comparación con las secciones obtenidas de los microagujeros reales.

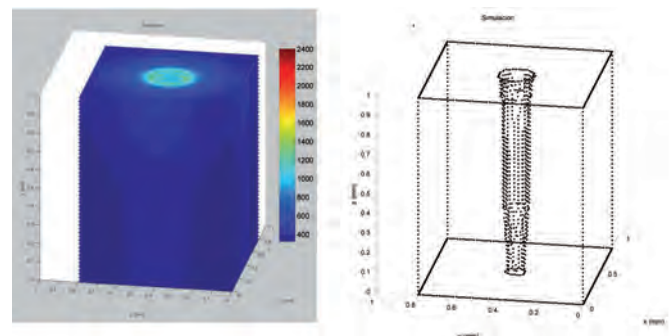


Figura 14: Representación 3D y vista en alámbrico del microagujero simulado

Realizando una comparación entre los resultados del modelo experimental y del modelo numérico, puede concluirse

que la diferencia entre ambos es inferior al 10% en todos los casos estudiados, lo que indica que los resultados del modelo desarrollado se aproximan razonablemente a la realidad y que

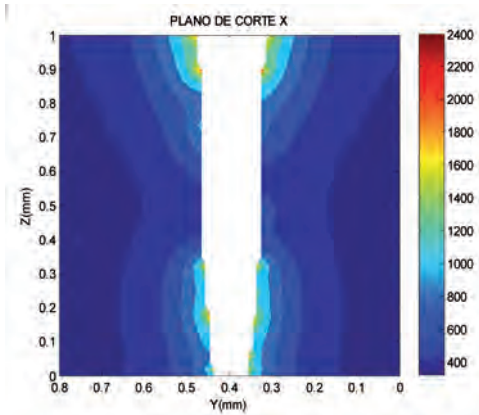


Figura 15: Sección de un microagujero simulado

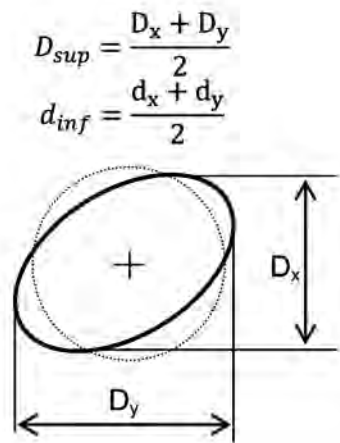


Figura 16: Medición de los diámetros en X e Y

puede ser una herramienta útil en el proceso de puesta a punto de este proceso.

A continuación se muestran los resultados para una serie de ensayos. Las condiciones utilizadas se indican en la Tabla 2.

Valores óptimos de las variables			
Potencia	=	800	W
frecuencia	=	5	Hz
numero de pulsos	=	1	
fpp	=	0	

Tabla 2: Parámetros de proceso empleados

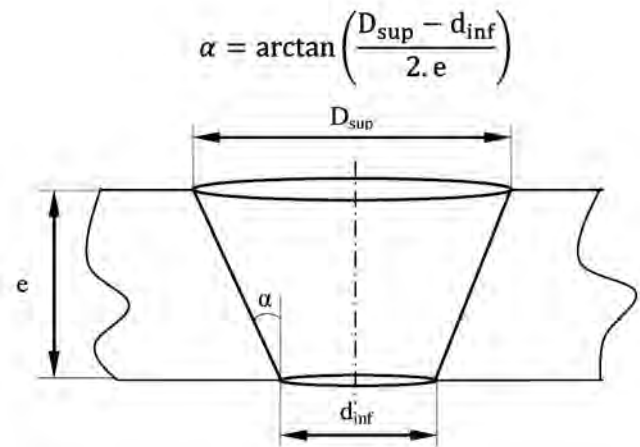


Figura 17: Esquema para el cálculo de la conicidad

Donde:

- D_x, D_y : Diámetros en las direcciones X e Y del orificio de entrada.
- D_{sup} : Diámetro medio de cada agujero $D_{sup} = (D_x + D_y) / 2$.
- $D_{sup\ medio}$: Diámetro medio del orificio de entrada de los agujeros realizados en las mismas condiciones.
- Las letras de los orificios de salida se han indicado en minúscula.

7. CONCLUSIONES

Mediante el presente artículo se ha verificado que es posible realizar taladros con un láser convencional de fibra, obteniendo en la mayoría de los casos agujeros de alta calidad en tiempos razonables. Los resultados muestran que puede taladrarse una pieza de acero inoxidable AISI 304 de 1mm de espesor en un tiempo total de 3ms por taladro, por lo que se

ensayo	t [ms]	DC [%]	D_x	D_y	D_{sup}	$D_{sup\ med}$	d_x	d_y	d_{inf}	$d_{inf\ med}$	conicidad $2.\alpha$ [°]
2.1	1	100	162	158	160	158,25	0	0	0	0	4,52
			160	153	156,5		0	0	0		
2.2	5	100	145	155	150	158,75	88	86	87	80,25	2,26
			168	167	167,5		66	81	73,5		
2.3	10	100	162	166	164	173	82	82	82	82,5	2,59
			184	180	182		81	85	83		
2.4	20	100	173	182	177,5	177,5	87	82	84,5	88	2,56
			172	183	177,5		91	92	91,5		

Tabla 3: Resultado experimentales

Ensayo	orificio	X_0 [mm]	X_1 [mm]	D_m [μ m]	D_r [μ m]	error [%]
2.1	Sup	0,47595	0,31392	162,03	158,25	2,39
	inf	0	0	0	0	0,00
2.2	Sup	0,47595	0,31392	162,03	158,75	2,07
	inf	0,43544	0,35443	81,01	80,25	0,95
2.3	Sup	0,47595	0,31392	162,03	173	-6,34
	inf	0,43544	0,35443	81,01	82,5	-1,81
2.4	Sup	0,48608	0,3038	182,28	177,5	2,69
	inf	0,44557	0,35443	91,14	88	3,57

Tabla 4: Comparación entre los resultados experimentales y los resultados del modelo numérico ¹

Donde:

$D_m = (X_1 - X_0)$ es el diámetro obtenido mediante el modelo numérico y el D_r es el valor del diámetro medio real obtenido experimentalmente.

podrían realizar más de 150 taladros por segundo, consideran-
do tiempos de posicionamiento y retirada de la máquina.

El proceso ha resultado ser altamente repetitivo, y los
agujeros obtenidos muestran una gran circularidad tanto en
el orificio de entrada como en el de salida. Además de ello, al
analizar la geometría interna de los taladros, se ha visto que
el efecto de abarrilamiento típico de esta operación y la con-
icidad de los taladros son mínimos, obteniendo unas paredes
relativamente lisas y verticales, especialmente una vez que el
agujero es pasante. También se ha observado que aunque la
calidad de los taladros es buena, aún existe margen de mejora
en aspectos como control de distancia láser-pieza, inyección
de gas en la superficie, aspiración por el orificio de salida, etc.
por lo que se pretende continuar trabajando sobre este proceso.

Por último, se ha desarrollado y validado un modelo relati-
vamente sencillo de poner en funcionamiento y que considera
la influencia de las variables más relevantes del proceso. Me-
diante el empleo del modelo, se puede simular el proceso de
una manera bastante precisa y en tiempos de cálculo reduci-
dos, obteniendo una estimación de la geometría de los taladros
y de los parámetros del proceso con un error inferior al 10%.
De esta manera, antes de comenzar con los ensayos, es posible
obtener una ventana de parámetros de las condiciones neces-
arias para realizar los taladros, minimizando el número de
ensayos necesarios y ahorrando tanto en tiempo de máquina,
como en costes de material.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Avanish Kumar Dubey, Vinod Yadava "Laser beam
machining—A review" International Journal of Machine Tools &
Manufacture, Vol. 48, pp. 609–628, 2008
- [2] Avanish Kr. Dubey, Vinod Yadava "Experimental study of
Nd:YAG laser beam machining—An overview" Journal of
materials processing technology, Vol. 195, pp. 15–26, 2008
- [3] Petkovsek P., Panjan I., Babnik A et al. "Optodynamic study of
multiple pulses micro drilling" Ultrasonics, Vol 44, pp. e1191–
e1194, 2006.

- [4] Ghoreishi M, Low DKY, Li L. "Comparative statistical analysis
of hole taper and circularity in laser percussion drilling"
International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol 42,
pp. 985–995, 2002.
- [5] Wang AH et. al "YAG laser percussion drilling of a functional
multi-layer thin plate" Optics & Laser Technology, Vol 39 pp.
840–845, 2007
- [6] Ng GKL, Li L. "Repeatability characteristics of laser percussion
drilling of stainless-steel sheets" Optics and Lasers in
Engineering, Vol 39, pp. 25–33, 2003
- [7] Low DKY, Li L, Byrd PJ. "The effects of process parameters on
spatter deposition in laser percussion drilling" Optics & Laser
Technology, Vol 32 pp. 347–354, 2000
- [8] Verhoeven K. (2004) "Modelling Laser Percussion Drilling"
Printed by Eindhoven University Press, The Netherlands. A
research supported by Eldim B.V. and Rolls Royce plc.
- [9] Schneider M, Berthe L, Muller M, et al. "A fast method for
morphological analysis of laser drilling holes" Laser Institute of
America, 2010
- [10] Ng GKL, Crouse PL, Li L. "An analytical model for laser drilling
incorporating effects of exothermic reaction, pulse width
and hole geometry" International Journal of Heat and Mass
Transfer, Vol. 49, pp. 1358–1374, 2006
- [11] Yan Y, Lingfei Ji, Bao Y, Jiang Y. "An experimental and
numerical study on laser percussion drilling of thick section
alumina" Journal of Materials Processing Technology, Vol.
212, pp. 1257– 1270, 2012
- [12] Yilbaa S, Sahin AZ, Davies R. "Laser heating mechanism
including evaporation process initiating laser drilling" Journal
Machining Tools Manufacturing, Vol. 35. No. 7, pp. 1047–
1062, 1995
- [13] Modest MF. "Effects of Multiple Reflections on Hole
Formation During Short-Pulsed Laser Drilling" Journal of Heat
Transfer, Vol. 128, pp. 653–661, 2006
- [14] Ohmura E, Noguchi S "Laser Drilling Simulation Considering
Multiple Reflection of Laser, Evaporation and Melt Flow"
A. Öchsner et al. (eds.), Materials with Complex Behaviour,
Advanced Structured Materials 6, Springer-Verlag Berlin
Heidelberg, 2010
- [15] Ghoreishi M, Nakhjavani OB. "Optimisation of effective
factors in geometrical specifications of laser percussion
drilled holes" journal of materials processing technology,
Vol. 196, pp. 303–310, 2008

¹ Unidades no indicadas en micras

Aplicación de un sistema de gestión del mantenimiento basado en un RCM adaptado

APPLICATION OF A MAINTENANCE MANAGEMENT SYSTEM BASED ON A TAILORED RCM

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/3908> | Recibido: 01/09/2013 • Aceptado: 10/02/2014

Gorka Unzueta-Aranguren, Aitor Goti-Elordi,
Josune Garitano-Aranda, Iker Sánchez-Ganchegui

Departamento de Mecánica y Producción Industrial. Escuela
Politécnica Superior de Mondragón. C. Loramendi, 4 - 20500
Mondragón (Guipuzkoa). Tfno: +34 943 794700.
gunzueta@mondragon.edu



RESUMEN

En este artículo se presenta el resultado de la aplicación de una versión adaptada de la metodología RCM (*Reliability Centered Maintenance*), mediante la cual tres empresas de distintos sectores han podido establecer un programa de mantenimiento preventivo a medida de cada caso, realizando aportaciones al mantenimiento autónomo. De esta manera han conseguido reducir la carga de trabajo de mantenimiento sin reducir la disponibilidad de las instalaciones. El trabajo realizado ha servido a dichas empresas para poder establecer las bases de la implementación o mejora de un programa de gestión del mantenimiento asistido por ordenador.

Palabras clave: Mantenimiento, RCM, Mantenimiento preventivo sistemático, Implantación de un GMAO, Gestión del Mantenimiento en una PYME (pequeña y mediana empresa).

ABSTRACT

• This paper presents the results of the application of an adapted version of the RCM (Reliability Centered Maintenance) methodology. Through its implementation, three companies of distinct industrial sectors have been capable of establishing customized preventive maintenance program, having done contributions to the autonomous maintenance. Thus, the workload of the maintenance staff has been reduced without altering equipment unavailability. The work has been also useful to establish the bases for the implementation or the improvement of a computerized maintenance management system.

• **Keywords:** Maintenance, RCM, Systematic preventive maintenance, implementation of a CMMS, Maintenance Management in SMEs.

1. INTRODUCCIÓN

Como consecuencia del incremento en la automatización de sistemas y debido también a unos estándares de servicio al cliente cada vez más severos, la disponibilidad de los medios en la fase de operación ha cobrado una creciente importancia.

Cada etapa del ciclo de industrialización de un activo influye en mayor o menor medida en los distintos costes de su ciclo de vida. Sin embargo, la gran mayoría de estos costes ocurrirán durante la fase de operación, por lo que se aprecia necesario desarrollar sistemáticas de mejora de disponibilidad orientadas a esta fase del ciclo de vida. El *Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad* (*Reliability Centered Maintenance*, RCM) de Moubray (1999) es una sistemática que cumple con estas características, pues puede ser aplicado tanto en la fase de diseño como en la de operación. Pej., Ben-Daya (2004) afirma que el RCM ofrece un marco sólido para la optimización del esfuerzo de mantenimiento y obtener el máximo de los recursos comprometidos para el *Mantenimiento Preventivo* (MP) del programa.

El proceso RCM cuenta con una aceptación generalizada entre las empresas industriales (Goti et al. 2008), y está orientado a mejorar la seguridad y disponibilidad de los medios mediante la recomendación e implementación de mejoras, rediseños, tareas de mantenimiento y modificaciones en la operación. Para ello el RCM implica responder sistemáticamente las siguientes siete preguntas sobre el sistema en estudio:

- 1) ¿Cuáles son las funciones y normas de comportamiento asociadas al activo en su contexto operativo actual?
- 2) ¿De qué manera hace esto que no llegue a cumplir sus funciones?

- 3) ¿Cuál es la causa de cada fallo funcional?
- 4) ¿Qué sucede cuando ocurre cada fallo?
- 5) ¿De qué manera afecta cada fallo al sistema, su entorno y su misión?
- 6) ¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir cada fallo?
- 7) ¿Qué debe hacerse si no se puede encontrar una tarea proactiva adecuada?

Las grandes empresas pueden llegar a gastar grandes sumas de dinero para responder con rigor a las preguntas presentadas en el proceso de RCM. Sin embargo, la mayoría de las empresas (pequeñas y medianas empresas, PYMEs, por ejemplo) no pueden invertir tanto, ya que, como Storey (1994) indica, las principales limitaciones a las que se enfrentan las PYMEs comprenden unos recursos financieros muy ajustados, falta de personal y tiempo, poca o ninguna experiencia en la iniciativa, y una escasa confianza en la aplicación de nuevos sistemas.

Las restricciones a las que se enfrentan la mayoría de las empresas demandan la aplicación de herramientas sistemáticas pero sencillas. Considerando esta manejabilidad, autores como Kelly (1984) determinan que la aplicación del RCM puede ser “una iniciativa anti-datos”: teniendo en cuenta los antecedentes expuestos y considerando que el 55% de las empresas no utiliza un programa de *Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador* (GMAO) para la gestión del mantenimiento (Goti, Egaña, & Iturrutxa 2009), parece claro que esta característica no tiene por qué ser una desventaja para la aplicación del RCM. En caso de que las empresas cuenten con datos, podrán aplicar la sistemática con mayor rigor, mientras que si no se cuenta con los mismos se tendrán que recopilar las experiencias de las personas relacionadas con el sistema a estudiar. Considerando esta carencia o no disposición de datos, también cabe señalar que “el concepto original de RCM se modifica con el fin de ajustarse mejor a las necesidades específicas en términos de requisitos técnicos y de organización de la empresa en cuestión (Pintelon, Nagarur, & Van Puyvelde 1999)”.

Este capítulo expone una gestión sistemática de la disponibilidad en la operación basada en la sistemática RCM y adaptada a empresas que cuentan con las limitaciones de recursos mostradas por Storey (1994). Esta versión adaptada del proceso de RCM ha sido probada en seis unidades de negocio de dos PYMEs y una planta de producción mediana de una empresa de aproximadamente 800 empleados. La primera entidad es una planta industrial de tamaño medio de la Corporación MONDRAGON (conocida hasta 2008 como Mondragón Corporación Cooperativa, MCC, la tercera compañía más grande de España), donde se fabrican componentes de plástico para los sectores de automoción y de electrodomésticos. Esta compañía ha tomado parte en varios proyectos orientados a la mejora y optimización del mantenimiento, cuyos casos se muestran en varias Refs., p.ej. (Astoreka & Goti 2008). La segunda compañía fue Inquitex S.A. (Inquitex), que a posteriori de su liquidación fue transformada en la actual Eko-REC S.L, empresa que mantiene la base de activos y conocimiento de la anterior Inquitex.

Una empresa donde se fabrican productos de poliéster y PET mediante procesos continuos. La empresa ha trabajado en numerosos proyectos de Investigación, Desarrollo e Innovación relacionados con la fiabilidad (probabilidad de que

un dispositivo realice adecuadamente su función prevista a lo largo del tiempo, por lo tanto, tiempo medio entre pérdidas de función de la instalación) y mantenibilidad (Tiempo necesario para restablecer la pérdida de función de una instalación), cuyos resultados se muestran en la Ref. (Goti, Egaña, Iturrutxa, & Gardella 2008). En tercer lugar se encuentra Goizper S. Coop. Goizper trabaja en tres negocios diversificados: Industrial, Pulverización y Biotecnología. En el sector Industrial desarrolla componentes de transmisión de potencia (Sistemas de giro, Levas, Elevadores, Frenos, Embragues, Freno-Embragues...). La unidad de negocio de Pulverización diseña y fabrica pulverizadores manuales y espolvoreadores para tratamientos en agricultura, jardinería, industria... y por último en el negocio de Biotecnología se investiga y formula soluciones a situaciones de plagas de cultivos, salud ambiental y alimentaria, etc. Como en el resto de casos, Goizper lleva a cabo varios proyectos de I+D y mejora continua.

Estas tres empresas han implementado con éxito la iniciativa de RCM. Así, todas las figuras y tablas elaboradas en este trabajo han sido tomadas de sus implantaciones, las cuales son muestra de las actividades realizadas. En las siguientes secciones se describe la metodología adaptada de RCM, junto con las conclusiones más importantes obtenidas durante las implantaciones.

2. PROCEDIMIENTO DE GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO BASADO EN EL RCM

Como todo proyecto de sistemática, es necesario contar con una organización temporal que pueda ejecutar las etapas operativas de la implantación. En concreto, en los casos mostrados, el esfuerzo de coordinación y la ejecución técnica han sido la labor de un ingeniero novel dedicado al proyecto a tiempo completo. En los tres casos detallados, el ingeniero novel ha sido un estudiante de ingeniería dirigido por un tutor universitario y un jefe de mantenimiento. El ingeniero novel ha sido tutelado a lo largo de las siguientes fases:

- Control de la documentación
- Análisis de los modos de fallo y sus causas
- Desarrollo del plan de mantenimiento preventivo
- Desarrollo del sistema de gestión del mantenimiento
- Panel de mando: retroalimentación continua y resultados.

El rol principal de este ingeniero novel ha sido la coordinación de las tareas, ya que no podemos olvidar que un escolar no es capaz de hacer frente a la responsabilidad de la gestión de personas con experiencia en la empresa. Evidentemente, la responsabilidad del éxito o fracaso del proyecto han sido compartidas entre la dirección de la planta y el profesional de la universidad que desempeña el tutelaje del ingeniero novel.

Los proyectos se han llevado a cabo a lo largo de un curso (septiembre-septiembre). Durante este curso, para la implementación del sistema de gestión del mantenimiento basado en un RCM adaptado, se ha llevado a cabo una sistemática de reuniones semanales en las que se han aplicado numerosas técnicas y metodologías como AMFE (análisis modal de fallos y efectos), Ishikawa, Pareto, Matrices de selección ponderada, etc. para documentar el conocimiento y el saber hacer de los

técnicos y profesionales de mantenimiento, y poder trasladar este conocimiento a los planes de mantenimiento preventivo y al desarrollo del sistema de gestión del mantenimiento. Por lo tanto, el esfuerzo realizado por parte de los equipos temporales ha estado supeditado a la sistemática de reuniones semanales y a tareas puntuales realizadas para la correcta implementación del sistema de gestión del mantenimiento.

2.1. CONTROL DE LA DOCUMENTACIÓN

De acuerdo con el procedimiento presentado aquí, y como primera tarea, es necesario priorizar qué equipamiento va a ser estudiado en virtud de este procedimiento. Para este fin se pueden utilizar iniciativas de priorización tales como la matriz de selección ponderada.

En segundo lugar, el ingeniero novel tiene que recopilar todo el conocimiento explícito de los equipos a mantener previamente priorizados. Esta tarea incluye recopilar toda la documentación relacionada con la máquina (catálogos, manuales, instrucciones, folletos, etc.), la cual se utilizará en la fase siguiente (véase la sección 2.2, Análisis de modos de fallo y sus causas).

El análisis de la documentación de diseño, operación y mantenimiento realizada en este primer paso es, además, útil para llevar a cabo un control de la documentación. La documentación relacionada sobre todo con el mantenimiento tiende a ser crucial cuando ocurren averías correctivas complejas. Por esa razón, se recopila toda la documentación relacionada, siguiendo los siguientes pasos:

1. Elección del equipo
2. Recolección de la información
3. Generación de una tabla de contenidos
4. Organización de la documentación de acuerdo con dicha tabla
5. Clasificación de la carpeta en el repositorio común.

Así, gracias a las tablas de contenidos y la clasificación en el repositorio común creados, los técnicos de mantenimiento pueden rápidamente acceder a la documentación ante cualquier incidencia que requiera una consulta. Este trabajo sirve para reducir la mantenibilidad (Tiempo necesario para restablecer la pérdida de función de una instalación) de los activos, y asimismo para familiarizar al técnico novel en los activos que tendrá que analizar.

2.2. ANÁLISIS DE LOS MODOS DE FALLO Y SUS CAUSAS

Toda la información recogida en la fase anterior, está destinada a responder a las tres primeras preguntas de los siete pasos del RCM (1 - las funciones y normas de comportamiento asociadas, 2 - los modos de fallo y 3 - las causas); para ello será necesario combinar el trabajo realizado por los diseñadores de los activos, plasmados en los manuales de instrucciones de Operación y Mantenimiento y en las experiencias de los técnicos de mantenimiento.

Los proveedores y diseñadores de equipos

invierten una gran cantidad de recursos en la definición de cómo debe ser utilizado el equipo, de qué forma puede fallar y por qué puede fallar. Después, teniendo en cuenta estos hechos, desarrollan modificaciones en el diseño o planean actividades orientadas a reducir o evitar esos fallos. Como consecuencia, los manuales de instrucciones de mantenimiento traen consigo numerosas acciones de MP: gracias a esas acciones recogidas en los manuales de mantenimiento, se evitan los diferentes modos de fallo y sus causas, y el equipo del proyecto no tiene que malgastar tiempo ni recursos en tareas realizadas previamente. Así, se obtiene una base importante para establecer un plan de MP.

2.3. DESARROLLO DEL PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO

En una segunda fase, con la ayuda de la colaboración y el esfuerzo de los técnicos y profesionales de mantenimiento, son afrontados los pasos del cuarto al séptimo del análisis del RCM (4- Análisis de las consecuencias, 5- Selección de eventos de mayor impacto, 6- Acciones preventivas o predictivas para evitar la generación de un evento, y 7- Acciones alternativas). Adicionalmente, aprovechando la presencia de los técnicos, se lleva a cabo una revisión de los modos de fallo del equipamiento, incluyendo el conocimiento implícito y las experiencias de los técnicos y profesionales de mantenimiento y operarios de producción.

GOIZPER		MANTENIMIENTO PREVENTIVO		Num: 66D013 Nivel: 00 Fecha: 2008/XX/XX Aceptado: Director de calidad: Hoja 1 / 1	
GARANTIA DE CALIDAD				MÁQUINA: CORREA 0013	
NUM. GAMA	NUM. NORMA	OPERACIONES A REALIZAR	DIARIO	SEMANAL	ANUAL
1	1	Auditoria interna al automantenimiento.			
	2	Limpiar los depósitos y bombas de taladrina.			
	3	Limpiar (en caso necesario sustituir) los filtros del tanque de taladrina.			
	4	Equipo de tratamiento de taladrina: Lubricar los rodamientos (6 rodamientos).			
	5	Limpiar las boyas de las micro boyas.			
	6	Mantenimiento del armario eléctrico de Correa: Si fuera necesario cambiar cables.			
	7	Comprobar y limpiar los detectores.			
	8	Lubricar las partes móviles de la máquina en general.			
	9	Lubricar la cadena del almacén de herramientas.			
	10	Lubricar el manipulador de la grúa.			
	11	Lubricar el intercambiador.			
	12	Lubricar las pinzas del manipulador.			
	13	Lubricar la cadena del manipulador.			
	14	Comprobar que la diferencia de voltaje es +/- 5% del valor nominal.			
	15	Inspección global de las partes eléctricas: masa, conectores y transformadores.			
	16	Revisión del movimiento de los ejes X,Y,Z.			

ATENCIÓN!!!!

VERIFICAR QUE LA MÁQUINA ESTÁ APAGADA MIENTRAS SE REALIZAN LAS TAREAS DE MANTENIMIENTO

Fig. 1: Ejemplo de un plan sistemático de MP

GOIZPER



AUTOMANTENIMIENTO

Num.: 66D013
 Nivel: 00
 Fecha: 2008/XX/XX
 Aceptado:
 Director de Calidad
 Hoja 3 / 3

GARANTIA DE CALIDAD

MÁQUINA: CORREA IGMZ0013

NUM. GAMA	NUM. NORMA	OPERACIONES A REALIZAR	DIARIO	SEMANAL	MENSUAL	TRIMESTRAL	SEMESTRAL	ANUAL
1		1. Eje central, limpiar la superficie de contacto entre mandrino y herramienta.						
		2. Comprobar las presiones de la central hidráulica (dereg. 70 bar/ izq. 130 bar) y verificar niveles.						
		3. Comprobar el cabezal UAD. Verificar la presión de las bombas de aceite y el nivel de aceite. Cuando sea necesario llenar. Aceite de engranaje ISO VG-68 (KLUBERSYNT GH 6-80).						
		4. Compensación hidráulica. Comprobar que la presión que hay es el que se especifica en el apartado 5. (P=115bar). Comprobar posibles fugas.						
2		5. Durante la semana limpiar la máquina (por fuera) y colocar cada utensilio en su lugar.						
		6. Limpiar toda viruta y suciedad de la máquina con productos de limpieza no irritantes y lubricar las zonas pulidas (por dentro). Limpiar las defensas telescópicas. La limpieza se deberá realizar mientras la telescópica este abierta. Una vez se haya limpiado se procederá a su lubricación exterior.						
		7. Verificar que las conexiones del flujo hidráulico y el flujo neumático del plato divisor se encuentran en perfecto estado.						
		8. Comprobar que la presión y el nivel de aceite del plato divisor están en perfecto estado. (P=80 Bar).						
		9. Comprobar las posibles fugas de aceite de la máquina.						
		10. Vaciar el depósito si se aprecian sobras de lubricante en el cabezal UAD.						
		11. Comprobar que el nivel del agua refrigerante y que este en T=22°C y P=4bar.						
		12. Comprobar el nivel de aceite ZF de la caja de velocidades y rellenar si se considera oportuno. Aceite hidráulico ISO VG-32 (TELLUS 37).						
3		Medidas de seguridad: 						
		13. Mientras este en marcha las puertas no se podrán abrir y en caso de que estén abiertas la máquina no funciona en automático.						
		14. Emergencias (stop). Comprobar el botón de emergencia.						
		15. Filtro del aire. Verificar el cartucho del filtro del aire. En especial, el silenciador del filtro aire-aceite.						
4		16. Desmontar y limpiar el filtro del aire del lubricador del cabezal UAD.						
		17. Comprobar los consumos de los ejes principal, X, Y, Z. %X=%12; %Y=%13; %Z= % , %S=%4.						
		18. Limpiar la entrada y salida del enfriador del armario eléctrico.						
4		19. Cambiar la pila de Renishaw.						

NOTA:

MIENTRAS SE MANTENGA LA MÁQUINA EN MARCHA SI SE APRECIA ALGUN RUIDO EXTRAÑO, CAMBIO DE TEMPERATURA, ETC. AVISAR A MANTENIMIENTO MEDIANTE OT.

Fig. 2: Ejemplo de un plan autónomo de MP (nota: el color de cada instrucción sirve de planta para identificar su periodicidad)

En la mayoría de los casos las acciones de MP incluidas en los manuales de Operación y Mantenimiento están sobredimensionadas, debido a que los diseñadores no disponen de información sobre las consecuencias de los modos de fallo que se deben evitar y sus causas. Así, ciertos fallos pueden no importar, siendo la acción correctiva su acción de mantenimiento idónea. Teniendo en cuenta este hecho, en el proyecto se definen y analizan las consecuencias, su impacto y las acciones que deben tomarse, y se adaptan a cada caso específico. Por consecuencia, considerando las probabilidades de fallo y el impacto de sus consecuencias, los técnicos de mantenimiento deberán ajustar la periodicidad de las acciones de MP, modificando o incluso eliminando algunas actividades del manual de mantenimiento. Además, los técnicos acumulan una experiencia incalculable que les será útil para adoptar otras acciones de mantenimiento, y esta información será recopilada con el fin de incluir las actividades de MP que eviten los modos de fallo

y las causas que no fueron incluidas cuando se diseñó el manual de mantenimiento.

Gracias a estas iniciativas es posible establecer un plan inicial de MP, que deberá ser actualizado periódicamente en función de la evolución de las frecuencias de fallos y las consecuencias. Estas actividades de MP tendrán que ser ejecutadas por operarios de producción y profesionales de mantenimiento, quienes compartirán las tareas en función del nivel de implicación de los operarios de producción en la realización de actividades de mantenimiento. Por lo tanto, se diseñará un plan sistemático de MP (ejecutado por técnicos de mantenimiento) y un plan de mantenimiento autónomo (realizado y ejecutado por operarios de producción) para cada instalación. En las Figuras 1 y 2 se muestran un ejemplo de cada uno, los planes sistemático y autónomo de MP respectivamente, que corresponden a un torno de Goizper:

Además de los planes globales de MP mostrados en las Figuras 1 y 2, es esencial definir el nivel de definición adecuado de cada tarea a realizar. En el presente trabajo, esta definición se ha realizado teniendo en cuenta la complejidad de la tarea y la experiencia del ejecutor, y con el fin de describir las normas que deben realizarse, se han establecido los tres siguientes niveles de detalle para diseñar una norma de MP:

1. Para la ejecución de las tareas que no necesiten ningún detalle para llevarse a cabo correctamente, será suficiente la línea incluida en el plan global de MP (véase ejemplo en la Figuras 1 y 2).
2. Para las operaciones que para ser completadas requieran una breve descripción, serán incluidos documentos de instrucción que describan los puntos clave de la operación, y éstas se facilitarán a la persona que vaya a ejecutar la tarea (véase ejemplo en la Figura 3).
3. Para las acciones que requieran un procedimiento detallado, será documentado un procedimiento de operación exhaustivo, e incluido en la documentación de MP desarrollado para el técnico (véase ejemplo en la Figura 4).

Gracias a la descripción incluida, todos los operarios son capaces de completar las actividades de MP que deban realizar, así la dirección sólo debe establecer un sistema de control para analizar si se ejecutan las acciones, siendo este indicador una entrada más para la mejora continua del plan de mantenimiento preventivo.

2.4. DESARROLLO DEL SISTEMA DE GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO

El proceso de RCM no sólo es útil para definir un plan de mantenimiento preventivo inicial, sino que también es adecuado para mejorarlo de manera secuencial. Para ello, se con-

Operación	Procedimiento y material necesario	Situación	Criterio	Responsable	≈ Tiempo	Frecuencia	Referencia
15. Filtrado del aire. Verificar el cartucho del filtro del aire. En especial, el silenciador del filtro aire-aceite.	Realizar el drenaje del tercer filtro apretando el pulsador y verificar que solo sale aire.	Máquina en marcha	Si se observa que sale agua y aire al mismo tiempo, avisar a mantenimiento.	Operario máquina	≈ 1 min	Mensual	
16. Desmontar y limpiar el filtro del aire del lubricador del cabezal UAD.		Máquina parada	Si el filtro presenta mucha suciedad.	Operario máquina	≈ 5 min	Mensual	

Fig. 3: Ejemplo de un plan de MP detallado por partes (nota: el color de cada instrucción representa su periodicidad)

sidera necesario establecer un proceso para implementar un sistema de retroalimentación que recoja lo que ocurre en el equipamiento a mantener.

Evidentemente, una herramienta GMAO puede ser una mejor herramienta que este sistema, principalmente manual, para llevar una gestión eficiente de las actividades realizadas. No obstante, y en relación con la automatización de las operaciones de gestión del mantenimiento, O’Hanlon (2003) indica que cambiar tanto el modo de trabajar para adaptarlo al nuevo GMAO, como el GMAO para adaptarlo al modo de operar de la empresa, puede acarrear numerosos riesgos. En este caso se considera más adecuado determinar inicialmente cómo funcionará la gestión de la fiabilidad y la mantenibilidad en la

técnicos y profesionales de mantenimiento y producción. Por último, una vez consolidada la forma de funcionar, es relativamente fácil automatizar el proceso sobre un GMAO adaptado a las necesidades y modo de operar de las empresas.

2.5. PANEL DE MANDO OPERATIVO A OBTENER

Tal y como Galar-Pascual, Berges-Muro, & Royo-Sánchez (2010) indican, el mantenimiento tiene que ser gestionado como una unidad de negocio y, por tanto, basada en indicadores. Esto significa que el panel de mando de mantenimiento debe incluir las cuatro perspectivas de negocio definidas por Kaplan & Norton (1992), perspectivas 1- Financiera, 2- De cliente, 3- De aprendizaje y crecimiento y 4- De

operación, y después escoger y adaptar el GMAO a lo que se quiera obtener.

La investigación divide este proceso en tres pasos: inicialmente se diseña el panel de mando que la empresa necesita para gestionar adecuadamente el mantenimiento. En segundo lugar, la información a recabar para implementar el panel de mando debe ser recogida en unos campos, que deberán ser plasmados en una orden de trabajo de mantenimiento, la cual deberá ser implementada en la planta, siendo continuamente actualizada y adaptada a las necesidades tanto de la dirección, como de los

GOIZPER GARANTÍA DE CALIDAD		NORMAS DEL AUTOMANTENIMIENTO		Num.: 66D0136 Nivel: 00 Fecha: 2008/XX/XX Aceptado: Director de Calidad Hoja 2 / 3	
Nº Norma: 1		Nº Máquina: CORREA IGMZ0013			
NOMBRE: Desmontar y limpiar el filtro del aire del lubricador del cabezal UAD			RESPONSABLE: Operario de máquina		
HERRAMIENTAS NECESARIAS: Escalera, trapo y pistola de aire comprimido.			TIEMPO NECESARIO: ≈ 10 min		
ATENCIÓN  CERCIORARSE DE QUE LA MÁQUINA ESTÁ APAGADA!!!!					
OPERACIONES:			Fotos		
1	Soltar la tapa de abajo				
2	Extraer el filtro girándolo (tiene rosca).				
3	Limpiar la caja protectora (con el trapo).				
4	Limpiar el filtro con aire comprimido.				
5	Montar todo de nuevo.				
					
					
					
					
			1. Operación		
			2. Operación		
			3. Operación		
			4. Operación		

Fig. 4: Ejemplo de una actividad detallada de MP

procesos internos. Así, los directores de mantenimiento de cada empresa deben definir cómo medir la realización de sus actividades. La Figura 5 muestra un ejemplo de la perspectiva del cliente del Panel de mando integral de Goizper:

En la Figura se observan 4 indicadores, Disponibilidad (relación entre el tiempo de buen funcionamiento y el tiempo total de funcionamiento programado en %), MTTR (*Medium Time To Repair*, o tiempo medio hasta haber reparado la avería), Tiempo de respuesta para actividades de correctivo urgente (tiempo medio de respuesta a las averías ocurridas mensualmente) y Tiempo de respuesta para actividades de correctivo programado (tiempo medio de respuesta a las solicitudes de actividades de mantenimiento correctivo que no han supuesto una pérdida de función permanente en la instalación o equipo).

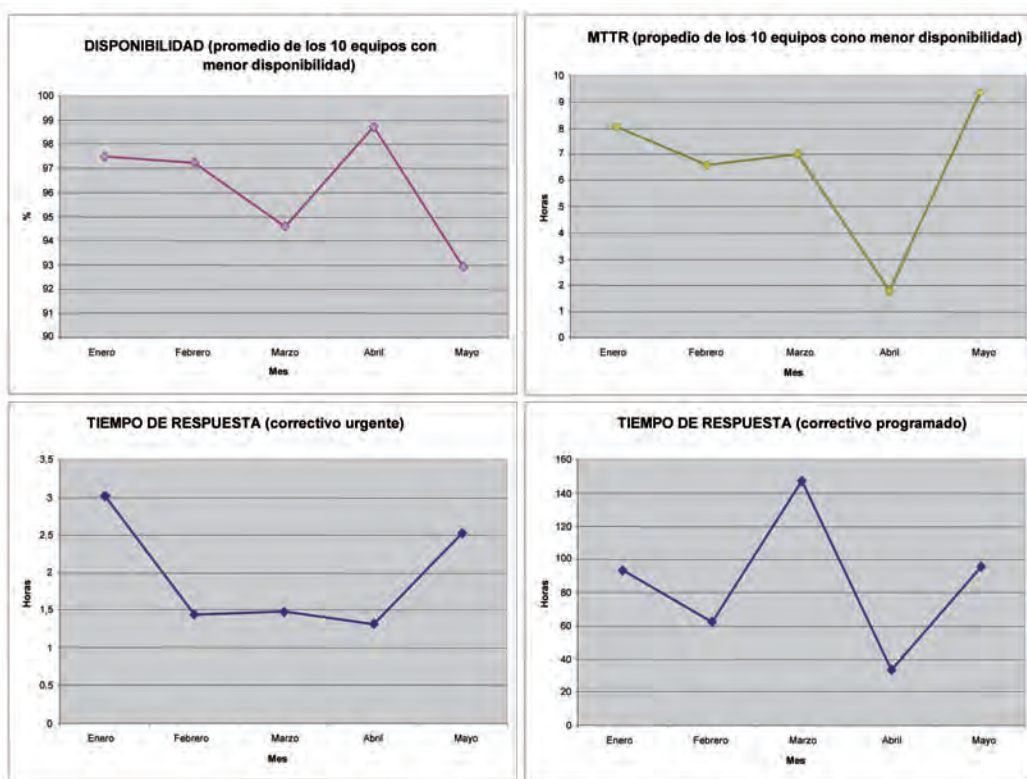


Fig. 5: Ejemplo de la perspectiva del cliente del Panel de mando integral de Goizper

La implementación de este panel de mando sirve, como Gardella et al. (2010) indican, para establecer prioridades a la hora de asignar recursos con el objetivo de mejorar los valores de los indicadores del panel de mando, además de consolidar la revisión y mejora continua de los planes de mantenimiento preventivo, y establecer necesidades de mejora en las instalaciones para disminuir la mantenibilidad de las mismas.

Como se muestra en la sección anterior, los directores de planta deben diseñar y gestionar un panel de mando de mantenimiento. Con este fin, los técnicos de mantenimiento tienen que cumplimentar los campos creados para recopilar todos los datos relativos a la intervención, de modo que es posible convertir esos datos en información.

2.5.1. Diseño, implementación y consolidación de la orden de trabajo

Estos datos deben ser recogidos en una orden de trabajo, ya que de lo contrario no es posible obtener toda la información

Inquixet		PARTE DE INTERVENCIÓN		Fecha																												
				Nº																												
SOLICITUD DE INTERVENCIÓN																																
Solicitante:		Departamento: PET																														
Línea	Bandera	Máquina parada	SI	NO																												
Descripción Anomalia:		Hora solicitud																														
		Firma																														
RESUMEN DE LA INTERVENCIÓN																																
Recepción	Fecha/HH:MM	Tempo reparación	VºBº Solicitante																													
En marcha	Fecha/HH:MM	0:00	Inicio	Final																												
			HH:MM	HH:MM																												
1				0:00																												
2				0:00																												
3				0:00																												
DESCRIPCIÓN TRABAJO REALIZADO:																																
nº	Material	Unid	Coment	nº																												
ANÁLISIS DE LA INTERVENCIÓN																																
Grupo funcional	Defecto	Acciones																														
Elemento	Causas	Clasificación																														
¿LOS 5 POR QUÉ?																																
1º	POR QUÉ SE HA PARADO LA LÍNEA?																															
2º	POR QUÉ 1º?																															
3º	POR QUÉ 2º?																															
4º	POR QUÉ 3º?																															
5º	POR QUÉ 4º?																															
AVERÍA SUBSANADA SI ☐ NO ☐ PENDIENTE AVERÍA EVITABLE SI ☐ NO ☐ PROPUESTA DE MEJORA Responsable de mejora Sr. Sr. Fecha de implantación Firma Firma COSTE DE INTERVENCIÓN <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Horas</th> <th>Tasa</th> <th>Importe</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Personal interno</td> <td></td> <td></td> <td>€</td> </tr> <tr> <td>Personal externo</td> <td></td> <td></td> <td>€</td> </tr> <tr> <td>Materiales</td> <td></td> <td></td> <td>€</td> </tr> </tbody> </table> COSTE DE PRODUCCIÓN <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Horas</th> <th>Tasa</th> <th>Importe</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Línea Bandera</td> <td></td> <td></td> <td>€</td> </tr> <tr> <td>Línea Reifenhauser</td> <td></td> <td></td> <td>€</td> </tr> </tbody> </table> COSTE TOTAL € FECHA DE CIERRE PI FIRMA:						Horas	Tasa	Importe	Personal interno			€	Personal externo			€	Materiales			€		Horas	Tasa	Importe	Línea Bandera			€	Línea Reifenhauser			€
	Horas	Tasa	Importe																													
Personal interno			€																													
Personal externo			€																													
Materiales			€																													
	Horas	Tasa	Importe																													
Línea Bandera			€																													
Línea Reifenhauser			€																													

Fig. 6: Orden de trabajo de mantenimiento de Inquixet

deseada en el panel de mando. Cabe señalar que esta sistemática aún no considera el uso de un programa de GMAO para recopilar la información. Así, resulta difícil implementar en una orden de trabajo toda la información a mostrar en el panel de mando de mantenimiento, por el excesivo tamaño que tendría la orden en formato papel. Por tanto, la orden de trabajo en formato papel habitualmente considerará aquellos campos de importancia que puedan obtenerse con relativa facilidad. Como ejemplo, la Fig. 6 muestra la orden de trabajo de mantenimiento de Inquitex.

Por lo tanto, todas las acciones de mantenimiento correctivo tienen que tener su respectiva orden de trabajo. Todas estas órdenes deberán ser completadas por los técnicos de mantenimiento, que a la vez estarán respaldados por el ingeniero novel. El ingeniero novel supervisará que todos los técnicos cumplimenten debidamente las órdenes de trabajo. Por ejemplo, para la empresa no es permisible no incluir una acción llevada a cabo en una avería, y no realizarla utilizando la lista de acciones estándares de la unidad de negocio, ya que de lo contrario la dirección no detectará las averías repetitivas cuya reparación podría ser estandarizada. Aquí, el ingeniero novel, junto con el técnico que no haya cumplimentado el campo ‘acción’ de la orden de trabajo, deberá establecer cuál es la acción real adoptada, utilizando la lista estandarizada de acciones. En caso de que sea necesario incluir un nuevo tipo de acción, el ingeniero novel deberá también actualizar la lista de acciones, para que el tipo de acción de la incidencia también sea considerado en un futuro.

El ejemplo mostrado en el párrafo anterior deriva en que la lista de defectos, causas y acciones debe ser actualizada continuamente por el ingeniero novel, con el fin de reflejar la realidad de la planta. Teniendo en cuenta un ejemplo real relacionado con este hecho, cabe señalar que la orden de mantenimiento de Goizper fue actualizada 15 veces durante los primeros 6 meses de la implantación de la sistemática.

Una vez realizado todo este trabajo, el ingeniero novel es el responsable de obtener el informe mensual de mantenimiento. Una vez se haya obtenido el informe, deberán ser tomadas las decisiones sobre la validez del informe, la gestión global del mantenimiento y las acciones realizadas por el mantenimiento. Una lección aprendida de estos seis casos es que si las empresas quieren tener técnicos motivados para hacer el papeleo necesario para implementar esta sistemática, los beneficios de hacerlo deben reflejarse lo antes posible.

2.5.2. Implantación de un GMAO

O’Hanlon (2003) determina que el 57% de las implantaciones de GMAO no generan la rentabilidad esperada de la inversión y, como una de las razones principales para ello, argumenta la falta de una definición adecuada de las necesidades. En este caso, se ha realizado un gran esfuerzo en la definición, ya que las empresas han definido de antemano cómo quieren gestionar su mantenimiento. Una vez definido qué información se necesita para gestionar el mantenimiento adecuadamente, es factible considerar la posibilidad de implementar un GMAO.

En este caso, es altamente recomendable

diseñar una lista de control donde estén incluidas todas las especificaciones que se implementarán en el GMAO. Como base, es posible obtener una lista de control estándar para la elección de un GMAO a través de, por ejemplo, foros de Internet. En esta investigación se ha optado por el Synterprise Global Consulting, Pre CMMS Planning/ Vendor Evaluation (Synterprise 2004). La anterior referencia, adaptada y mejorada mediante las necesidades propias de cada caso fue enviada a los proveedores: estos proveedores responden si su GMAO cumple los requisitos exigidos, e informan sobre la facilidad con la que responden a cada especificación (incluyendo, si es necesario, capturas de pantalla y videos). Así, como clientes potenciales, los directores de planta pueden analizar la aptitud de cada GMAO para cumplir los requisitos que deben satisfacer los productos informáticos. Merece destacar que este proceso fue ejecutado en Goizper e Inquitex, ya que la tercera empresa contaba ya previamente con un GMAO operativo.

3. RESULTADOS

Es una afirmación general de gestión que “lo que no se mide difícilmente mejora”, y “lo que se mide y no mejora, contiene un problema importante”. Es necesario decir que no existen datos sobre la gestión del mantenimiento anteriores a los proyectos presentados en este artículo, por lo que no es posible realizar la comparación cuantitativa del antes y el después de dichos proyectos. Sin embargo, vale la pena señalar

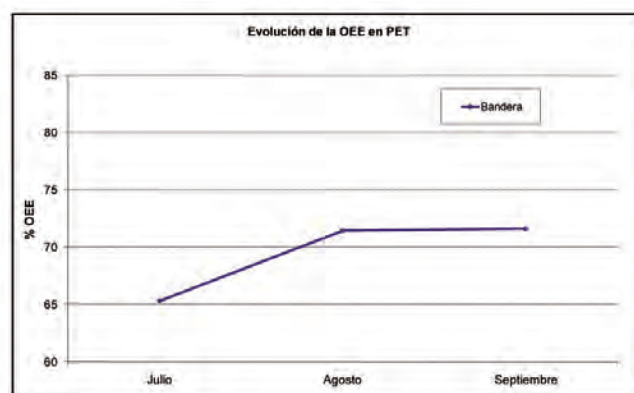


Fig. 7: Evolución de la OEE en una línea de producción de PET de Inquitex

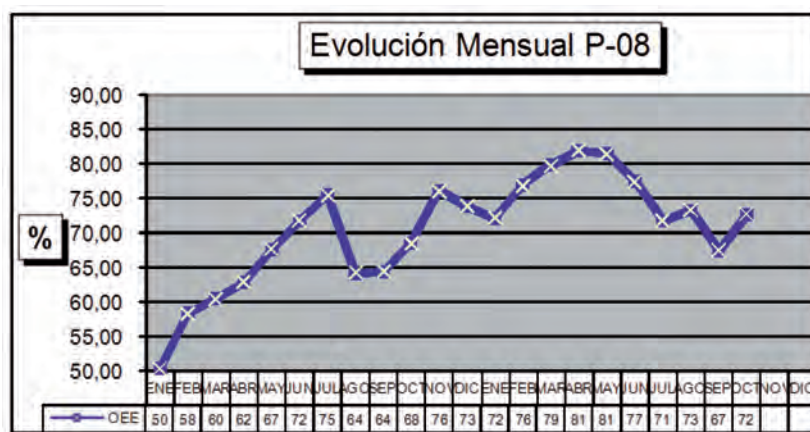


Fig. 8: Evolución mensual de la OEE en la estación de pintado P-08 de la planta del grupo Mondragón dedicada a la fabricación de componentes de plástico (Astoreka & Goti 2008)

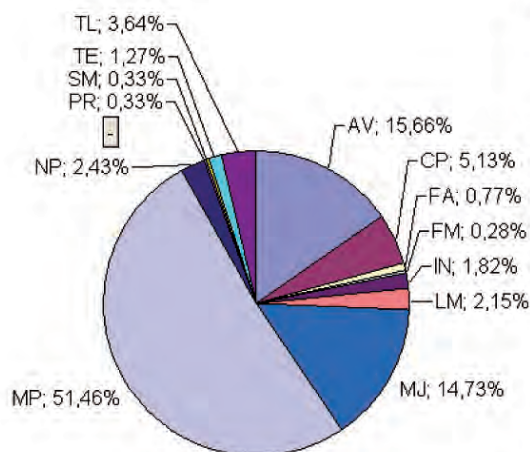


Fig. 9: Desglose de carga de trabajo por tipos de actividades en Inquitex

Clasificación de trabajos	
Avería	AV
Defecto	CP
Mto.Prevent.	MP
Mejoras / Innovación	MJ
Predictivo	PR
Seguridad / Medio Amb.	SM
Formación (Maestro)	FM
Formación (Alumno)	FA
Trabajos especiales	TE
Nuevo Proyecto	NP
Orden y limpieza	LM
Inspección	IN
Taller, Oficina	TL

ponde a las cuestiones básicas definidas por Moubray, y tiene en cuenta las severas restricciones con las que deben tratar las empresas que trabajan en entornos de producción ajustados y PYMEs en general. Adicionalmente, el proceso seguido en este documento podría ser válido también como un paso previo para poner en práctica un GMAO, ya que la definición de cómo quiere funcionar el mantenimiento de una empresa se lleva a cabo antes de implantar el software.

que las empresas mencionadas han creado un sistema de retroalimentación continua que permite mejorar la calidad de las decisiones que toman, ya que tienen más y mejor información sobre los procesos que tienen que gestionar. Así, las compañías pueden analizar el tiempo necesario para restablecer el funcionamiento de las instalaciones, tiempo incurrido en la ejecución de las distintas actividades relacionadas con el mantenimiento (véase ejemplo en la Figuras 1 y 2),... para su posterior análisis y mejora de los procesos y las tareas de mantenimiento. Además, cabe subrayar que las compañías están encarando la implantación de un GMAO, con el objetivo de mejorar administrativamente su mantenimiento. Como ejemplo de la mejora cuantitativa, la Figura 7 representa la evolución positiva de la Efectividad Global del Equipo (Overall Equipment Effectiveness, OEE) de una línea de producción de PET en Inquitex, obtenida gracias a la adopción de acciones de mejora del mantenimiento basados en esta metodología de RCM adaptado.

En cuanto a la planta industrial de la Corporación MONDRAGON, los resultados mostrados en la Ref. (Astoreka & Goti 2008), resumidos en la Figura 8, demuestran la efectividad de la iniciativa presentada.

Adicionalmente, se ha podido obtener información sobre a qué se dedica la plantilla de mantenimiento (ver ejemplo de Inquitex en la Figura 9).

4. CONCLUSIONES

La disponibilidad de los equipos de planta queda en gran medida supeditada a las decisiones tomadas en las fases de diseño y desarrollo. Sin embargo, la tendencia a automatizar sistemas, y las cada vez más exigentes demandas de los clientes requieren gestionar sistemáticamente la fiabilidad y la mantenibilidad de los equipos en fase de operación. Esta investigación presenta la implantación de una gestión del mantenimiento sistemática basada en RCM. El RCM ha sido planteado como una herramienta adecuada para la gestión de la disponibilidad en la operación sistematizando el mantenimiento preventivo y autónomo, y discriminando las acciones de mantenimiento correctivo. El proceso desarrollado res-

AGRADECIMIENTOS

El presente proyecto ha sido cofinanciado a través del proyecto de investigación "RCMTools": Desarrollo e implantación de una herramienta de Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad simplificada (Proyecto financiado por el Gobierno Vasco, Departamento de educación, universidades e investigación, código UE2010-03).

BIBLIOGRAFÍA

- Moubray, J. 1999, *Reliability centered maintenance*, 2 edn, Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Ben-Daya, M. 2004, "You may need RCM to enhance TPM implementation", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 82-85.
- Goti, A., Egaña, M. M., Iturrutxa, A., & Gardella, M. 2008, "RCM for Small- To Medium-Sized and Lean Organizations", *Maintenance Technology* no. December, pp. 13-17.
- Storey, D. J. 1994, *Understanding the small business sector* Routledge, London.
- Kelly, A. 1984, *Maintenance Planning and Control* Butterworths, Oxford.
- Goti, A., Egaña, M. M., & Iturrutxa, A. 2009, "Encuesta sobre el estado del mantenimiento industrial en España", *Revista DYNA*, vol. 84, no. 3, pp. 225-230.
- Pintelon, L., Nagarur, N., & Van Puyvelde, F. 1999, "Case study: RCM - yes, no o maybe?", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 182-191.
- Astoreka, J. L. & Goti, A. OEE como herramienta para el análisis de la eficiencia de equipos productivos. *Ingeniería y Gestión de MANTENIMIENTO* [57], 54-57. 2008. Madrid, Ed. Alción. 2006.
- O'Hanlon, T. CMMS Best Practices. *Reliabilityweb.com*. 2003. 20-7-2004.
- Galar-Pascual, D., Berges-Muro, L. F., & Royo-Sánchez, J. 2010, "La problemática de la medición del rendimiento en la función mantenimiento", *Revista DYNA*, vol. 85, no. 5, pp. 429-438.
- Kaplan, R. & Norton, D. 1992, "The balanced scorecard - measures that drive performance", *Harvard Business Review*, vol. 70, no. 1, pp. 71-79.
- Gardella, M., Goti, A., Egusquiza Pérez, E., & Escaler, X. 2010, "Management of costs and incidences in industrial plant equipment", *Hydrocarbon Processing*, vol. 89, no. 1, pp. 55-61.
- Synterprise. Synterprise Global Consulting, *Pre CMMS Planning/ Vendor Evaluation*. Synterprise Global Consulting. 2004.

- Los artículos deberán ser originales e inéditos y no deben de haber sido enviados simultaneamente a otros medios de comunicación.
- Tendrán siempre preferencia los que versen sobre temas relacionados con el objetivo, cobertura temática y/o lectores a los que se dirige la revista.
- Todos los trabajos serán redactados en castellano o inglés y deberán cumplir los siguientes requisitos:
 - Título en castellano e inglés de 150 caracteres máximo
 - Un breve resumen (Abstract), de unas 300 palabras, en castellano e inglés.
 - Entre tres y cinco palabras clave (Key words) en castellano e inglés, que permitan identificar la temática del artículo
 - No deberían de tener más de aproximadamente 5.500 palabras, o 17 páginas formato A4 en fuente Arial 10 con interlineado simple (Consultar con DYNA extensiones superiores).
 - Bibliografía relacionada o referencias según normas DYNA en www.revistadyna.com
- Con el objeto de facilitar la "revisión entre pares", el autor deberá asignar el código DYNA de 6 dígitos correspondiente a la temática del artículo, seleccionándolo de entre los códigos disponibles en la dirección de Internet: www.revistadyna.com
- Los originales se remitirán mediante nuestra página web (envío artículos), en formatos .DOC (msword), .RTF, o .TXT. Se recomienda una calidad mínima de 300ppp para las fotografías que se adjunten con el artículo. Se harán constar: título del artículo, nombre del autor, título académico, empresa o institución a la que pertenece, dirección electrónica, dirección postal y teléfono.
- Se someterán al Consejo de Redacción cuantos artículos se reciban, realizándose la "revisión entre pares" por los expertos del Consejo o los que éste decida. El resultado de la evaluación será comunicado directamente a los autores. En caso de discrepancia, el editor someterá el trabajo a un revisor externo a la revista cuya decisión será trasladada nuevamente al autor.
- Los autores aceptan la corrección de textos y la revisión de estilo para mantener criterios de uniformidad de la revista.
- La revista se reserva el derecho de no acusar recibo de los trabajos que no se ajusten a estas normas.
- Para mayor detalle sobre estas normas, por favor visite nuestra web <http://www.revistadyna.com> (en el apartado de "autores y evaluadores").

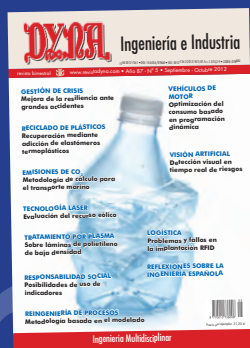
- Paper will be original and unpublished and it must not be concurrently submitted for publication elsewhere.
- Preference will be given to articles on the main subject areas of the Journal.
- Papers should be written in Spanish or English and should fulfil the following requirements:
 - Title in both English and Spanish with a maximum length of 150 characters.
 - Brief Summary or Abstract, about 300 words, in Spanish and English.
 - Between three and five keywords in English and Spanish, that identify the paper theme.
 - Written text should not exceed 5.500 words, or 17 A4 format pages in 10 size arial font single-spaced (For longer lengths consult with DYNA)
 - Bibliographical references according to DYNA norms at www.revistadyna.com
- To facilitate the "peer review" process, the author will assign the six digits DYNA code corresponding to the paper thematic, selecting it between the codes available at the Internet address: www.revistadyna.com
- Papers should be sent by our web page (envío artículos), in .DOC (MSWord), .RTF, or .TXT format. It is recommended a minimum quality of 3000 ppp for the pictures enclosed in the article. These papers will include: Article title, author name, academic title, company or institution, email, correspondence address and telephone.
- All papers must pass the Editorial Board (EB) evaluation process. The "peer review" will be made by the Editorial experts or those that the EB decides. The evaluation result will be directly communicated to the author. In case of discrepancy, the publisher will refer the work to an external reviewer whose decision will again be transferred to the author.
- The authors accept the text correction and the style revision to maintain uniformity criteria for the magazine.
- The journal reserves the right not to accept articles which do not comply with said instructions.
- To find more details about these instructions, please visit our web page <http://www.revistadyna.com> (authors and referees section).

DYNA

Ingeniería e Industria

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

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



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

Promoción válida para los Ingenieros Industriales colegiados en:

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

Si está interesado, envíe un email a dyna@revistadyna.com mencionando que se acoge a la promoción e indicando su nº de colegiado y el nombre de su Colegio de Ingenieros Industriales.

LOCTITE®

**Todo resultado perfecto
empieza con
la herramienta perfecta**



Tú haces que funcione. Con LOCTITE.
El experto en adhesión, sellado, limpieza, lubricación,
protección y reconstrucción de superficies.

Descúbrelo todo en: www.loctite-maintenance.es

Henkel

Excellence is our Passion