

DYNA

ingeniería e industria #5

www.revistadyna.com

Año 92 | N°5 | Septiembre - Octubre 2017

DetECCIÓN DE FALLOS EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Las instalaciones eléctricas en infraestructuras críticas

Blockchain: retos y oportunidades

Influencia del número de álabes en microturbinas hidráulicas

Vida a fatiga de cojinetes para TAV



Revista de Ingeniería Multidisciplinar con factor de impacto en JCR

ISSN 0012-7361 | DOI: 10.6036/DYNAII | SICI: 0012-7361(2017190701)92:5<>1.0.TX;2-M | CODEN: DYNAAU



MANTÉNTE INFORMADO

con **DYNA**

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

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

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

Publicamos la actualidad en Ingeniería desde 1926.

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

Revista científica convenida con la Asociación Española de Ingeniería Mecánica (AEIM).

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

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

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

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

<http://www.revistadyna.com>

dyna@revistadyna.com

CONSEJO DE ADMINISTRACIÓN

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

Presidente: Luciano Azpiazu Canivell (Asociación de Bizkaia - Bilbao)

Vicepresidente: Enrique Macián Cardete (Asociación de Asturias - Oviedo)

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

Vocales:

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

Manuel Villalante LLauradó (Asociación de Catalunya - Barcelona), Germán

Ayora López (Asociación de Andalucía Occidental - Sevilla), Francisco Cal

Pardo (Asociación de Madrid - Madrid), Manuel Lara Coira (Asociación de

Galicia - Santiago), Luis Soriano Bayo (Asociación de Aragón), José Antonio

Muñoz Argos (Asociación de Cantabria - Santander).

OTROS SOCIOS

José Miguel Muñoz Veiga (Asociación de la Comunidad Valenciana), José

Isidoro Marín Torrens (Asociación de la Región de Murcia), Ramón Larrinoa

Barreda (Colegio de Alava), Gabriel Egaña Uranga (Colegio de Gipuzkoa),

Carlos Izkue Montejo (Colegio de Navarra), Francisco J. Marrodán

Esparza (Asociación de La Rioja), Jesús María Mirat Celdrán (Asociación

de Extremadura), Ginés Moratalla Valero (Asociación de Albacete), Begoña

Martín Pérez (Asociación de Canarias Occidental), Gregorio Martínez Royano

(Asociación de Canarias Oriental), Alfredo Arias Berenguer (Asociación de

Baleares), Manuel María Uruña Cuadrado (Asociación de León).

CONSEJO DE REDACCIÓN

Presidente: Ignacio Fernández de Aguirre Guantes (Instituto de

Fundación Tabira - Durango)

Vicepresidente: Néstor Goicoechea Larracochea (Universidad del País

Vasco - Bilbao)

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

Vocales:

Alfonso Parra Gómez (Asociación de Bizkaia - Bilbao), Angel Arcos Vargas

(Universidad de Sevilla - Sevilla), Eduardo Valle Peña (Asociación de

Cantabria - Santander), Franck Girot (Ecole Nationale Supérieure d'Arts et

Metiers - Paris, Francia), Angel Mena Nieto (Universidad de Huelva - Palos

de la Frontera), José Manuel Palomar Carnicero (EPS Jaén - Jaén), José

María Bueno Lidón (Green Power Tech - Sevilla), José Rafael Castrejón

Pita (Queen Mary University of London - London, UK), Manuel Lara Coira

(Escuela Politécnica Superior de Ferrol - Ferrol), Nicolás Gaminde Alix

(Asociación de Bizkaia - Bilbao), Mikel Sorli Peña (Asociación de Bizkaia

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

Barcelona).

CONSEJO ASESOR

Alberto Del Rosso (Universidad Tecnológica Nacional - Buenos Aires,

Argentina), Andrés Ortuño Carbonell (Asociación de Murcia - Murcia),

Antonio Adsuar Benavides (Consellería de Industria Comercio e Innovación

- Valencia), Allan Joseph Wailoo (Universidad de Sheffield - Sheffield,

UK), Blas Hermoso Alameda (Universidad Pública de Navarra - Pamplona),

Fernando Guijarro Merelles (Universidad de Extremadura - Cáceres),

Fernando López Rodríguez (Agencia Extremeña de la Energía - Cáceres),

Ferrán Puerta Sales (Universidad Politécnica de Cataluña - Barcelona),

Roberto Uribeetxeberria (Universidad de Mondragón - Mondragón), Eva

Martínez Caro (Universidad Politécnica de Cartagena - Cartagena), Javier

Santos García (Universidad de Navarra - San Sebastian), Joan L. Serarols

Font (Universidad de Girona - Girona), Jorge Arturo Del Angel Ramos

(Universidad Veracruzana - Veracruz, México), Juan M. Gers (Gers USA LLC

- Weston, Florida, USA), Ricardo Rodríguez Jorge (Universidad Tecnológica

de Ciudad Juárez - Juárez, México), Erik Ocaranza Sánchez (Instituto

Politécnico Nacional - Tlascala, México), Joshué Manuel Pérez Rastelli

(Tecnalia - Bilbao, España) - Lina Montuori (Universidad de Nueva York -

Buffalo, USA), Jacques Mercadier (UISBA - Pau, Francia), Noelia Fernández

Díaz (NaCOM Energy - Agotnes, Noruega), Luis Alfonso Fernández

Serantes (Universidad FH JOANNEUM - Graz, Austria), Jose L. Fernández

Solís (Texas A&M University - College Station, Texas, USA), María Cristina

Rodríguez Rivero (University of Cambridge - Cambridge, UK), Nadia Rego

Monteil (Queen's University - Ottawa, Canada), Raimundo Martínez

Giménez (Euroconseil - Sevilla), Víctor Petuya Arcocha (Asociación

Española de Ingeniería Mecánica - Madrid).

© 2017. Publicaciones DYNA S.L.

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

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

IMAGEN DE PORTADA:

Por cortesía de Pexel.com

ENTIDAD EDITORA:

Federación de Asociaciones de Ingenieros Industriales de España

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

Publicaciones DYNA S.L.

www.dynapubli.com

Alameda de Mazarredo, 69 - 48009 BILBAO.

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

email: dyna@revistadyna.com

Instrucciones detalladas para los autores en la

web: www.revistadyna.com

IMPRESOR: MCCGRAPHICS

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

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

Formato: 21 x 29,7 cm (A4)

D.L. BI-6-1958

ISSN 0012-7361

ISSN electrónico 1989-1490

SICI: 0012-7361(2017190701)92:5<>1.0.TX;2-M

CODEN: DYNAAU

DOI: 10.6036/DYNAII

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

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

UNIVERSIDADES COLABORADORAS

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

ORGANIZACIONES COLABORADORAS

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

ORGANIZACIONES AMIGAS DE DYNA

Bodegas Muriel y Structuralia

DIRECCIÓN

José María Hernández Álava

Miembro de:

- Council of Science Editors
- Asociación Española de Comunicación Científica

contenido

Septiembre - Octubre 2017

525

OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE LA GEOMETRÍA DEL CONDUCTO DE ENTRADA DE CALDERAS DE PLANTAS DE CICLO COMBINADO

BOILER INLET DUCT SHAPE DESIGN OPTIMIZATION FOR COMBINED CYCLE POWER PLANTS

538

FATIGUE LIFE PREDICTION OF THE AXLE BOX BEARINGS FOR HIGH-SPEED TRAINS

PREDICCIÓN DE LA VIDA A FATIGA DE LA CAJA DE RODAMIENTOS DE EJE PARA TRENES DE ALTA VELOCIDAD

552

OPTIMIZACIÓN PARAMÉTRICA DEL PROCESO DE ENGATILLADO LINEAL POR ROLDANA PARA CHAPAS METÁLICAS

PARAMETRIC OPTIMIZATION OF LINEAR ROLL-HEMMING PROCESS FOR METAL SHEETS

566

ANÁLISIS DE LOS FACTORES CLAVE PARA MEJORAR LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO EN LA INDUSTRIA DE OIL&GAS EN AMÉRICA LATINA

ANALYSIS OF KEY FACTORS TO IMPROVE MAINTENANCE MANAGEMENT IN THE OIL & GAS INDUSTRY IN LATIN AMERICA

580

APROXIMACIÓN BAYESIANA APLICADA AL REPARTO MODAL EN MODELOS DE TRANSPORTE DE MERCANCIAS (CASO PRÁCTICO: CORREDOR FERROVIARIO BIOCEÁNICO CENTRAL)

BAYESIAN APPROACH TO MODEL CHOICE ANALYSIS IN FREIGHT TRANSPORT MODELS (CASE STUDY: CENTRAL BIOCEANIC RAILWAY CORRIDOR)

532

ENFOQUE PARA LA DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLOS EN SISTEMAS DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA BASADO EN LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL

AN APPROACH FOR FAILURE DETECTION AND DIAGNOSIS IN PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS BASED ON WEIBULL DISTRIBUTION FUNCTION

545

DIAGNÓSTICO DE FALLOS EN EL CONTROL Y COMPENSACIÓN DE LA MEDICIÓN POR SENSORES VIRTUALES EN UNA CENTRAL TERMOELÉCTRICA

FAULT DIAGNOSIS IN CONTROL AND MEASUREMENT COMPENSATION BY VIRTUAL SENSORS IN A THERMAL POWER PLANT

560

RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO Y OPERACIÓN DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS EN INFRAESTRUCTURAS CRÍTICAS

RECOMMENDATIONS FOR THE DESIGN AND OPERATION OF ELECTRICAL INSTALLATIONS IN CRITICAL INFRASTRUCTURES

572

BUILDING STOCK CATEGORIZATION FOR ENERGY RETROFITTING OF HISTORIC DISTRICTS BASED ON A 3D CITY MODEL

CATEGORIZACIÓN DE EDIFICIOS BASADA EN UN MODELO 3D DE LA CIUDAD PARA ABORDAR LA RECONVERSIÓN ENERGÉTICA DE DISTRITOS HISTÓRICOS

587

SUITABLE INJECTION DURATION OF PURE ETHANOL FUEL FOR MOTORCYCLE AT A HIGH COMPRESSION RATIO

DURACIÓN APROPIADA DE LA INYECCIÓN DE ETANOL PURO PARA UNA MOTOCICLETA CON UNA RELACIÓN DE COMPRESIÓN ALTA

■■■ **nuestras cosas**

476
Hitos de la ingeniería industrial

477
Editorial

■■■ **perspectivas**

478
Como socios energéticos: Sandia National Laboratories lidera a la industria en la búsqueda de una electricidad más económica y más limpia

481
Consecuencias sociales del desarrollo tecnológico. Más allá de la industria 4.0

483
Ferrocarriles del futuro: evolución y perspectivas de la alta velocidad, del Maglev y del Hyperloop (parte 2)

■■■ **notas técnicas**

486
Marco para automatizar la selección de un mecanismo de coordinación entre sociedades de agentes

487
Comportamiento dinámico y análisis de escenarios del sistema de producción en una línea de estampados, caso de estudio

489
Comparación numérica del HIC (Head Injury Criterion) en condiciones de atropello a diferentes velocidades con un vehículo tipo sedán

490
Vehículo automáticamente guiado (AGV) por odometría y visión artificial

491
Riesgos de descargas electrostáticas y humedad en los procesos de manipulación almacenamiento y embalaje en la industria electrónica

492
Nuevas metodologías centradas en el usuario para la creación de software en la industria 4.0

493
Sensores de visión aplicados a una mano biomimética

494
Biogás hoy, biometano mañana

■■■ **colaboraciones**

495
La revista española DYNA sigue mejorando su prestigio internacional

497
Evolución histórica en el desarrollo y fabricación de transformadores de potencia en la fábrica ABB de Córdoba

503
Variación de la potencia en una microturbina hidráulica de flujo axial con respecto al número de álabes

507
Demanda potencial de mercancías en el corredor ferroviario transfronterizo extremeño

513
Relación entre la crisis de la construcción y la accidentalidad de las obras en España (período 2002-2015)

517
Blockchain: retos y oportunidades más allá de bitcoin

522
Estudio sobre la implantación de prótesis de reemplazo total de rodilla

UNA TRANSFORMACIÓN RADICAL DE LA SIDERURGIA: EL CONVERTIDOR BESSEMER

El año 1845, el joven José de Vilallonga, hijo del propietario de una farga catalana en la comarca de Figueres que compraba el mineral de hierro a la empresa comercial de la familia vizcaína Ybarra, llega a Bilbao enviado por su padre para su primer contacto con los proveedores y en un momento en el que se iniciaban los proyectos de industrialización de la hasta entonces artesanal producción de acero de ferrerías y fargas. José había cursado estudios en la Escuela de Ingeniería de Montpellier y pronto los Vilallonga se incorporaron societariamente a la creación de la empresa siderúrgica Nuestra Señora del Carmen en Baracaldo.

Casi paralelamente, en Inglaterra, Henry Bessemer patentaba en 1855 un nuevo proceso para obtener acero líquido a partir del llamado hierro fundido obtenido en hornos altos al carbón vegetal primero y posteriormente cada vez más con carbón de cok fabricado a partir de carbones minerales. El método consistía en insuflar aire al hierro fundido, originando la combustión y subsiguiente eliminación de la mayor parte del carbono, silicio y otros elementos, con un fuerte incremento de la temperatura por las reacciones exotérmicas de oxidación, resultando un acero líquido fácilmente lingotable.

A unas pruebas realizadas en Sheffield por Bessemer en 1856, asistieron José Vilallonga y José María de Ybarra, que pronto decidieron la adopción de la patente en España, conseguida a lo largo de 1857. Sin embargo y dado que N^ª. Sra. del Carmen, incluía en su proyecto hornos Chenot para la producción del acero, se determinó que los ensayos del procedimiento Bessemer se harían en la Fundición La Merced del valle cántabro de Guriezo, también propiedad de la familia Ybarra. Esta fábrica contaba con un horno alto al carbón vegetal, hornos crisol de pudelado para obtener acero y algunos trenes de laminación para barras y pletinas. Entre finales de 1857 y comienzos de 1858 se efectuaron dichos ensayos, pero debido al diferente equipamiento previsto para N^ª. Sra. del Carmen y al previsto cese de la producción de acero en la fundición de Guriezo, se abandonó la idea y las patentes se devolvieron a Bessemer.

Los que posteriormente se han conocido como *convertidores Bessemer* son muy diferentes de los hornos donde se probaba el procedimiento en sus primeros años. Tal como figuran en los documentos de solicitud de patente era una especie de reverbero cilíndrico al que, cargado con arrabio líquido, se le insuflaba aire por la parte inferior y que después habría que picar para la salida del acero fundido (hierro maleable).

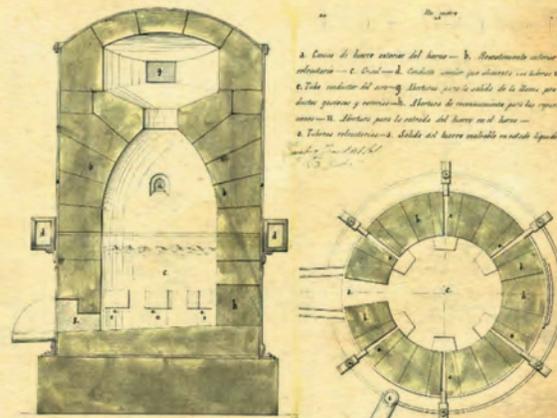
En Asturias la Fábrica Nacional de Trubia, posiblemente el mayor complejo siderúrgico de España a mediados del siglo XIX, estuvo a punto en 1861 de incorporar la tecnología Bessemer, pero por diversas circunstancias administrativas no se hizo y cayó en una progresiva decadencia.

La competencia de otras siderúrgicas vecinas (La Vizcaya y La Iberia) provocó en 1882 una radical modernización en N^ª. Sra. del Carmen que la convirtió en Altos Hornos de Bilbao, adoptando ya la tecnología Bessemer de convertidores basculantes, tal como es bien conocida. Estas empresas son las que formaron conjuntamente en 1902 Altos Hornos de Vizcaya.

La esposa de José Vilallonga, Rafaela de Ybarra, fundó en su palacio de residencia y a la muerte de su marido la Congregación Los Ángeles Custodios para la instrucción de niñas y jóvenes necesitadas. José M^a de Ybarra que se ocupaba preferentemente de los asuntos comerciales, se estableció en Sevilla creando una naviera y negocios de alimentación: fue uno de los promotores de la Feria de Abril.



Henry Bessemer



Diseño del horno Bessemer según la solicitud de patente

LA INGENIERÍA INDUSTRIAL ANTE LA DIGITALIZACIÓN DE LA INDUSTRIA

Es indudable que nos encontramos a las puertas, cuando no ya en los comienzos, de una transformación mundial sin precedentes y comparable con la sobrevenida a lo largo del siglo XIX con el desarrollo de aplicaciones para la máquina de vapor en la industria y en los transportes. Aunque diferente en lo que respecta a las formas y desarrollo, la actual tiene unas características de rapidez y profundidad, debidas a la globalización, que marcará mayores diferencias que entonces entre los países, y aun las regiones, más desarrollados tecnológicamente y los más desfavorecidos.

Las tecnologías asociadas a esta transformación están, en una parte notable de su contenido, basadas en conocimientos menos habituales para nuestro quehacer industrial convencional. No se trata solamente de la aplicación extensiva de la electrónica de maniobra o de potencia, de la informática para el diseño o la manufactura, de la robótica para la realización de tareas programables: es la incorporación masiva de la sensorica, la óptica, el tratamiento de datos o las telecomunicaciones en los equipos que debamos diseñar o utilizar para o en la industria de un futuro próximo.

Como ejemplos paradigmáticos, componentes de automoción que deberán estar preparados para una propulsión eléctrica o una conducción autónoma, suministros que dispondrán de sensores informando directamente al fabricante de su comportamiento en uso y anomalías sobrevenidas, inspecciones de calidad automatizadas por visión artificial, robots que aprenden a lo largo de su trabajo más allá de los programas al uso, formación y desempeño de las personas a través de representaciones virtuales o aumentadas de la realidad. Y completando el panorama de la gestión, las decisiones pierden una buena parte de su intuición personal para basarse en conclusiones obtenidas del tratamiento de grandes cantidades de información.

La conclusión de todo esto nos lleva a la reflexión de que la práctica de la ingeniería en la industria será algo mucho más complejo que las actuales divisiones de conocimiento técnico derivadas de una época ya a punto de terminar: todo tipo de ingenierías pueden formar parte en la actividad industrial y deben aunar esfuerzos de apoyo mutuo para conseguir que sobreviva, como creadores o como usuarios. De otra manera, con los medios que dispondrán las industrias avanzadas podría repetirse lo que nos sucedió en aquella primera revolución a la que nos incorporamos con tal retraso y que costó más de un siglo recuperar.

Es preciso que nuestras Escuelas actúen con prontitud en formar a las nuevas promociones sobre estos conceptos y que los que están ya en activo se dispongan a reciclarse con intensidad. Las Asociaciones pueden jugar un papel esencial en facilitar este último cometido.

editorial

Como socios energéticos: Sandia National Laboratories lidera a la industria en la búsqueda de una electricidad más económica y más limpia

As energy partners: Sandia National Laboratories leads industry in the quest for economic and cleaner electricity

Sandia National Laboratories (EEUU)

DOI: <https://doi.org/10.6036/8449>

Sandia National Laboratories trabaja con tres socios industriales para comercializar un sistema de energía distribuida capaz de producir electricidad de forma más económica, más limpia y más eficiente. Los Laboratorios han firmado por tres años, unos Acuerdos Cooperativos de Investigación y Desarrollo (CRADA) con

Peregrine Turbine Technologies (Wiscasset – Maine), *Xdot Engineering and Analysis* (Charlottesville – Virginia) y *Flowserve Corp.* (Irving – Texas).

“Estos acuerdos nos ofrecen el camino para incorporar a la industria lo que nosotros necesitamos y lo que ella necesita, identificando la ruta de comercialización de una tecnología que cambia las reglas de juego”, dice Gary Rochau, Director en Sandia de Conceptos Nucleares Avanzados. “El objetivo es duplicar la eficiencia para convertir el calor en electricidad sin utilizar agua y hacerlo económicamente, tanto como lo es con el vapor”.

Sandia está desarrollando la tecnología del ciclo cerrado Brayton por recompresión de dióxido de carbono supercrítico (S-CO₂), un sistema de generación de energía que podría aumentar el índice de eficiencia de conversión como mínimo hasta el 50%, mayor que la tecnología convencional del vapor. El ciclo Brayton se denomina por el ingeniero mecánico del siglo XIX **George Brayton**, que desarrolló su método calentando aire en un espacio cerrado y liberándolo después para producir energía sobre un eje o para expulsarlo como en una turbina de reacción.

El fluido de

trabajo que Sandia propone para el ciclo Brayton es S-CO₂, producto químicamente estable, de bajo costo, no tóxico ni inflamable, y de fácil adquisición. *“Se trata básicamente de una turbina de reacción trabajando en ciclo cerrado con S-CO₂ como fluido de trabajo”, dice Darryn Fleming, principal investigador para la Tecnología Avanzada de Reactores en el programa del Departamento de Energía (DoE), Energía Eléctrica por Transformación Supercrítica.*

En el ciclo de energía más común, el de Rankine, el agua a presión hierve para producir vapor que posteriormente expande en una turbina. La eficiencia del ciclo es alrededor del 33%, lo que significa que el 33% de la energía térmica aportada al fluido se convierte en electricidad. *“Solo un 1% de eficiencia en una central energética que se traslada al mercado supondría millones de dólares por menor combustible quemado para producir la misma cantidad de electricidad”, dice Fleming. “Este uno por ciento de mejora en la eficiencia reduce alrededor del 2,9% la emisión de gases de efecto invernadero. Y si llegamos a aumentar esa eficiencia al 50%, las emisiones se reducirían un 34%. Los costos para el consumidor se reducirían a medida que la eficiencia mejora y se consumirían menos recursos naturales”.*

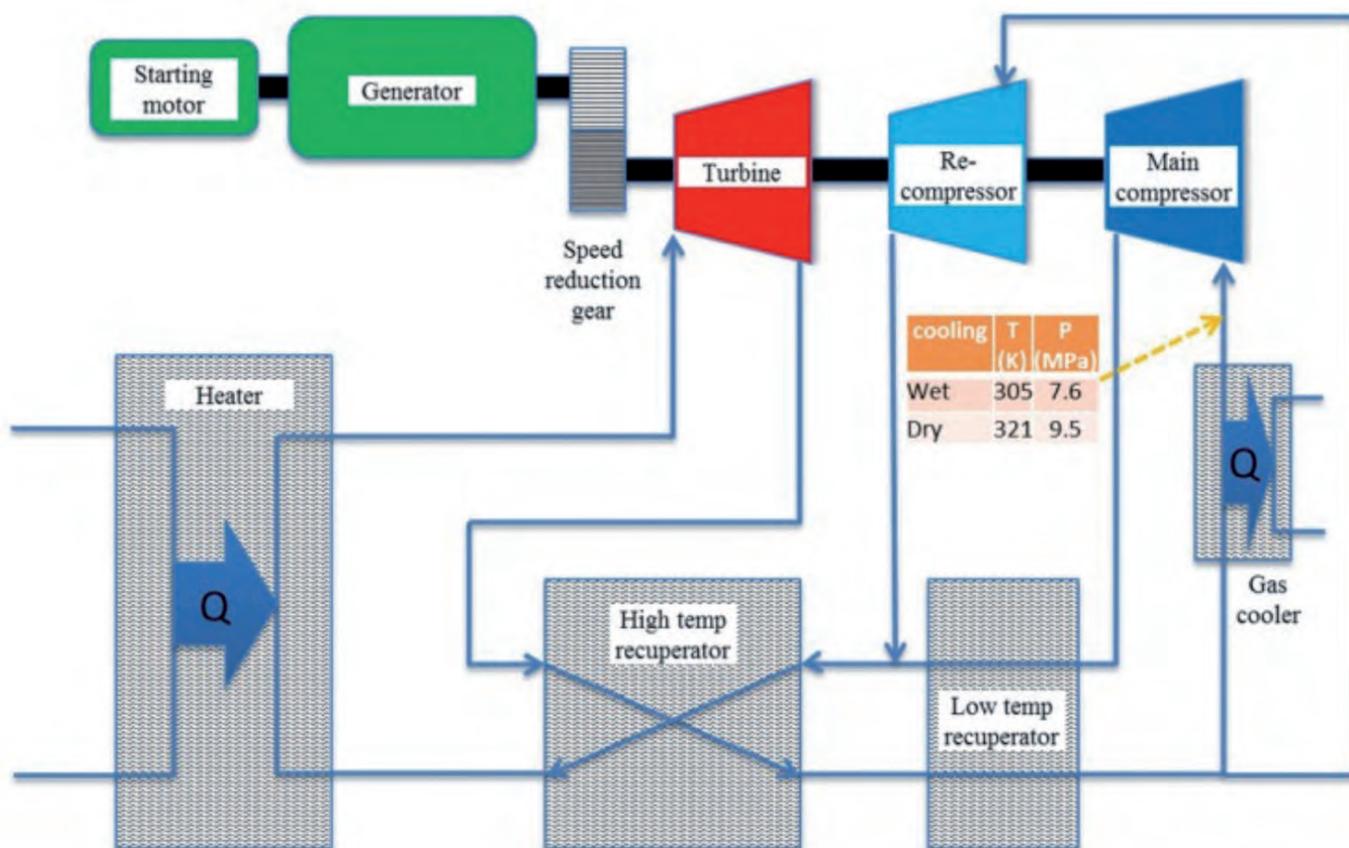
UN RETO MEDIOAMBIENTAL PARA LOS COMPONENTES

La razón de tan alta eficiencia en el ciclo Brayton S-CO₂ es que la sensible diferencia de temperatura entre la descarga caliente de la turbina y la descarga fría del compresor origina una transmisión de calor al ciclo que aporta la mayoría de la adición de calor al fluido a alta presión. Se evita así el calor perdido mientras se condensa el vapor a temperatura constante del ciclo de Rankine.

Sandia ha estado ensayando diversos componentes, cojinetes, retenes y cambiadores de calor próximos o por encima del punto crítico en que la densidad del dióxido de carbono está cercana al líquido



El investigador principal de Sandia, Darryn Fleming, rodeado del equipo térmico de laboratorio de 1 MW con ciclo Brayton S-CO₂



En el ciclo cerrado Brayton por recompresión se indica con flechas el flujo del dióxido de carbono supercrítico: partiendo de la esquina inferior izquierda, se calienta el S-CO₂ y se envía a una turbina donde se produce energía; después va a través de los recuperadores (cambiadores de calor), donde el S-CO₂ caliente cede calor a un S-CO₂ más frío. Ambos, a través del compresor o del recompresor retornan al equipo de calentamiento y cierran el circuito

do pero con muchas propiedades de gas. Estos ensayos han mostrado que varios elementos del sistema no disponen aún de la madurez tecnológica necesaria. "Para llegar a este mercado, necesitamos aumentar el nivel de fiabilidad técnica de numerosos componentes y procedimientos, particularmente retenes, cojinetes y cambiadores de calor", dice Fleming.

Sandia convocó como oportunidad de negocio federal la búsqueda de socios industriales y las empresas Peregrine, Xdot y Flowserve estuvieron entre las muchas respuestas.

Peregrine trabaja con Sandia en un cambiador de calor térmicamente apropiado que pueda soportar las fuertes sollicitaciones térmicas del ciclo Brayton. "Utilizamos nuestra experiencia en el diseño de las partes calientes de turbomáquinas y la aplicamos al diseño de un cambiador de calor para reducir los daños normalmente causados por fuertes oscilaciones de temperatura", dice David Stapp, presidente de Peregrine. "Este diseño abrirá las puertas a cambiadores de calor competitivos que cumplan los requisitos del cliente en aplicaciones comerciales".

Xdot está desarrollando un cojinete de lámina que soporte el eje de turbina gi-

rando a elevada velocidad en S-CO₂. "Los rodamientos de bolas no trabajan bien en ambiente de S-CO₂", nos dice el fundador de Xdot, Erik Swanson. "Tenemos un cojinete de lámina que puede ser lubricado directamente por el S-CO₂ con mejores resultados y a mejor precio – una mejor solución".

El retén de alta intensidad de Flowserve está diseñado para mantener la estanqueidad con el S-CO₂ entrando en la turbina a 700°C y 300 kg/cm². "Son muy altas temperaturas y presiones", dice Fleming. "Los cierres pueden perder y nosotros necesitamos que no lo hagan para no enviar CO₂ a la atmósfera".

Lionel Young, director de tecnología avanzada en Flowserve, expone que su empresa partió de considerar retenes que podrían dar resultado con S-CO₂. "Aunque las altas presiones y velocidades de esta aplicación no son nuevas para Flowserve, no habíamos diseñado un cierre para esta extrema presión y temperatura". "La pieza crítica ha sido el diseño del cierre secundario dinámico. La mayoría de piezas son de tecnología convencional, pero el cierre dinámico, que debe ser capaz de deslizarse y sellar, debe hacerlo a esas extremas presiones y temperatura sin pérdidas".

POSIBILIDAD DE ENSAYOS A ALTA TEMPERATURA Y PRESIÓN

Sandia ofrece a sus socios un equipo de prueba del ciclo cerrado Brayton por recompresión de S-CO₂ con 1 MW térmico, que puede llevar a cabo ensayos dinámicos a medida que prueba cojinetes o retenes. De este modo Sandia ayuda a las empresas a probar el resultado de sus tecnologías con CO₂ supercrítico.

"El ir a temperaturas y presiones que exceden con mucho lo habitual en metales usuales no es trivial", dice Fleming. "Los ensayos a elevada temperatura y presión con CO₂ supercrítico son complejos, caros y de alto riesgo. Debemos plantearnos unas pruebas múltiples y amplias aplicando alta temperatura y alta presión. Eso ayuda a colocar productos en el mercado más rápido y con menos riesgo".

Las tres empresas han dado pasos y desarrollado prototipos con apoyo técnico de Sandia y ensayos posibilitados por los acuerdos de la Agencia con empresas o universidades para la investigación y el desarrollo.

"Ha sido excelente trabajar con un laboratorio nacional", dice Swanson. "Disponen de grandes recursos. Partimos de nuestra tecnología y a medida que avanza

el programa avanzamos con los datos obtenidos en los ensayos de esta aplicación extrema".

Young dice que Flowserve tiene limitadas posibilidades de realizar ensayos con los requisitos de temperatura del ciclo Brayton S-CO₂. "Aunque podemos ensayar un prototipo a la presión y velocidad plenamente exigidas, dependeremos de Sandia para la alta temperatura". "La colaboración entre nuestro equipo y el de Darryn ha sido excelente. Son abiertos y útiles, y creemos que el resultado será un avance en la tecnología de sellado".

Stapp manifiesta que la colaboración con los expertos de Sandia ha sido inestimable: no podría ser mejor.

DIRIGIÉNDOSE A UNA DEMOSTRACIÓN DE 10 MEGAVATIOS

El objetivo de Sandia y el DoE es disponer en los laboratorios de un ciclo Brayton S-CO₂ de 10 MW comercialmente probado en 2020. "Ahora es momento de utilizar esta tecnología y construir el equipo de demostración", dice Fleming. "Es preciso que sea de 10 MW, pues es cuando las organizaciones empresariales se convencen. No se interesan por pequeñas unidades de laboratorio. Necesitamos un sistema comercialmente desarrollable".

"La tecnología Brayton puede utilizar energía solar, biocombustibles y gas natural para producir electricidad para el mercado de la energía distribuida", dice Rochau. "La generación eléctrica distribuida

es producir energía en un punto cercano al consumo, frente a la generación centralizada de gran dimensión que requiere transmisión a gran distancia y distribución local. La transmisión y la distribución suponen la mitad del costo del suministro eléctrico".

Rochau agrega que Sandia está trabajando con las tres empresas para poner en el mercado una tecnología Brayton creada, fabricada y exportable desde EE.UU. "Nosotros les ayudamos y ellos nos ayudan. Si ellos ven el mercado y nosotros aportamos la ciencia, conseguiremos la ingeniería preparada para acceder al mercado y eso es la meta. No queremos novedades que nadie pueda utilizar".

NOTAS DEL TRADUCTOR

Fluidos supercríticos

Se denomina en termodinámica punto crítico de una sustancia a los valores del diagrama presión/temperatura en los que el volumen del líquido es igual al que ocuparía una masa igual de vapor o, dicho de otro modo, en el cual las densidades del líquido y del vapor son iguales. Más allá de ese punto, la situación se denomina supercrítica. El fluido que más se usa en esas condiciones es el dióxido de carbono (CO₂), que es barato y fácilmente disponible. Su empleo principal es como disolvente ecológico porque no es tóxico, ni inflamable y se puede recuperar con facilidad. La presión y temperatura críticas del CO₂ son 73 atmósferas y 31°C, respectivamente. En el caso del agua son 221 atmósferas y 374 °C, respectivamente.

En estado supercrítico, el CO₂ se emplea para producir extractos, desalcoholizar bebidas, descafeinado, purificación o fraccionamiento de hidrocarburos, desinfección, purificación de aguas residuales, etc.

Ciclos termodinámicos

Son la representación de los procesos de transformación de la energía térmica (calor aportado) en energía dinámica (trabajo). Según el medio empleado en la transformación (agua, aire, etc.) se tienen diferentes tipos.

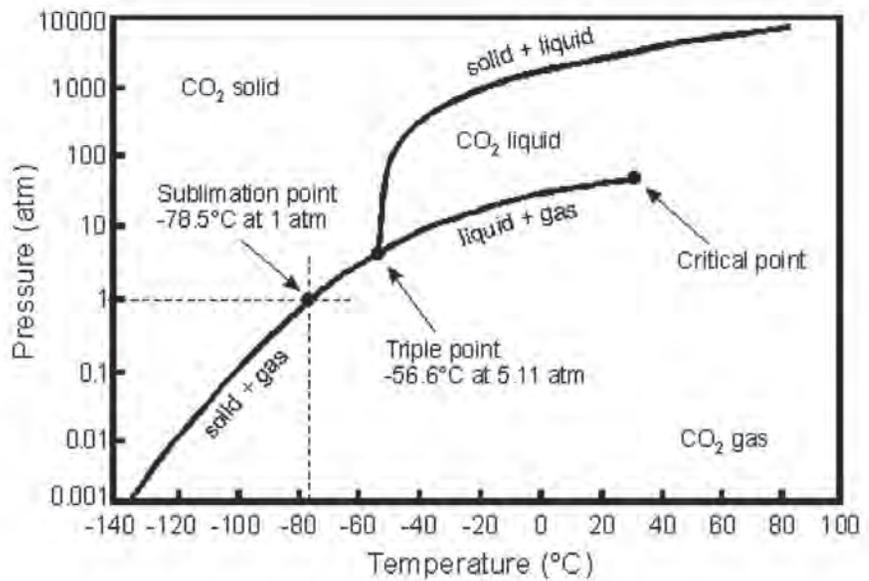
Dejando aparte los aplicados en motores de combustión interna, los más utilizados sobre todo para la generación eléctrica son los llamados de Rankine y de Brayton.

El ciclo de Rankine utiliza agua-vapor como medio y la fuente térmica aplicada a una caldera puede provenir de combustibles fósiles o renovables, energía solar, fisión nuclear, etc. El rendimiento entre la energía eléctrica obtenida y la potencia calorífica aportada por la fuente térmica puede superar ligeramente el 30%.

El ciclo Brayton emplea el aire precomprimido como medio y en él se realiza la combustión, siendo la expansión de los gases la productora del trabajo: es típico de las turbinas de gas, tanto de tipo axial como de propulsión (jet). Si el ciclo es regenerativo y además tiene compresión con refrigeración intermedia es algo superior al 40 %.

El llamado ciclo combinado une en dos procesos consecutivos ambos ciclos, con un primero de Brayton de turbina axial movida por el combustible gaseoso y un segundo de Rankine de turbina de vapor obtenido total o parcialmente con los gases de escape de la turbina de gas. Su rendimiento supera el 50% y en algunos modelos actuales se afirma que puede alcanzar el 60%.

La investigación expuesta por Sandia pretende conseguir rendimientos comparables con el ciclo combinado mediante un único Brayton, utilizando como medio CO₂ supercrítico en una sola etapa de generación. Ello supondría instalaciones más simples, haciéndolo muy ventajoso para la cogeneración, las fuentes térmicas solares, el mini-nuclear, etc.



Pressure-Temperature phase diagram for CO₂.

Consecuencias sociales del desarrollo tecnológico. Más allá de la industria 4.0

Social consequences of technological development. Beyond industry 4.0



Ignacio Fernández de Aguirre
Asociación de Ingenieros Industriales de Bizkaia
(España)

DOI: <https://doi.org/10.6036/8450>

LOS PRIMEROS PASOS DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

El mes de diciembre del pasado año, muy poco antes del final del mandato del Presidente en activo, la Casa Blanca dio a luz un documento titulado *Artificial Intelligence, Automation and the Economy*. Estaba encargado expresamente por Barack Obama a un grupo de expertos, *advisors in economy and science*, de la Presidencia que ya en octubre habían redactado *Preparing the Future of Artificial Intelligence*. El texto actual no solo pretendía alertar de las posibles consecuencias que la tecnología puede traer a la sociedad, sino marcar pautas y proponer estrategias para suavizar las que tuvieran más capacidad de erosionar el vigente status social.

Esta preocupación no era exclusiva del anterior Presidente de los EE.UU. Muchos científicos y sociólogos están tratando de analizar el derrotero que en los próximos 15 a 25 años puede llevar la aplicación práctica de muchas tecnologías ahora en fase de experimentación o pilotaje y que les causan alta preocupación. No vamos a entrar aquí en los numerosos aspectos éticos que se presentan en los campos de la biología o la medicina, sino como propio de la Revista DYNA, ceñirnos a los avances en el terreno industrial y tecnológico.

La **Inteligencia Artificial** (AI por sus siglas en inglés) no es una tecnología unitaria sino un conjunto de ellas aplicado según convenga a diferentes tareas, por lo que su desarrollo puede afectar a muchas áreas de la actividad humana y, en consecuencia, de la economía: es la sustitución de las tareas mentales o físicas personales por sistemas automatizados de software o hardware, incluida la robótica.

Como algunas tareas son más sencillas de automatizar que otras, el número de puestos de trabajo afectados es sumamente variable: en ciertos casos puede tratarse de pérdida total de los mismos, en otros de mejorar sus condiciones, aumentar la productividad o ser sustituidos por

otros de mayor nivel técnico. Se ha calculado que en el período temporal aludido anteriormente, para los EE.UU. y según el tipo de trabajo que se considere, entre el 9% y el 47% del empleo se verá amenazado de alguna forma y que esta amenaza será mayor para el de menores habilidades o conocimientos tecnológicos.

Por poner un ejemplo popular, son públicas todas las propuestas que se están haciendo por grandes empresas de servicios con automóviles autoguiados que afectarían de forma importante al gremio del taxi y el ensayo realizado con un semirremolque sin conductor capaz de transportar de puerta a puerta durante 120 millas (200 km) una expedición de cerveza.

Otro aspecto propio de las utilizaciones de la AI está en que la aplicación económica de los beneficios conseguidos por los aumentos de la calidad o la productividad no se dirigen habitualmente a los ejecutantes de los trabajos mejorados, que incluso podrían ser llevados a cabo por personas de menor nivel, sino a los desarrolladores de la tecnología, con lo que es posible un crecimiento de la desigualdad social o el desplazamiento del crecimiento a las regiones o países más avanzados.

LAS REVOLUCIONES INDUSTRIALES

A partir del siglo XVIII y con cada "revolución industrial", se ha producido un período de fuertes convulsiones en la so-

cialidad. La primera, de la máquina de vapor y el ferrocarril supuso la casi eliminación de la fuerza hidráulica, los animales de tiro y todos sus empleos asociados; la fabricación en serie en los albores del siglo XX, la desaparición de los artesanos; la utilización de ordenadores y robots para cadenas de producción, una considerable mejora en la productividad de oficinas y fábricas. La mayor parte de los problemas surgidos se iban mitigando con el tiempo por la reducción de horas de trabajo, la aparición de profesiones no existentes y la posibilidad de acceso a nuevos bienes y servicios que, a su vez, creaban nuevos empleos, aunque estos procesos eran muy dispares para los distintos países.

En el siglo XXI, y con una intensa globalización, la situación social creada por la tecnología resultará más difícil de que evolucione por sí sola sobre todo en un sentido positivo que compense el negativo que se produzca. Evidentemente habrá desfases temporales entre países, pero las situaciones que se originen serán bastante más próximas en el tiempo que las acaecidas cuando se iba extendiendo el uso de máquinas de vapor o del ferrocarril.

La industria no será posiblemente el área más afectada por las muchas aplicaciones de la AI. La que en Europa llamamos "industria 4.0" no es más que algunos pasos de una automatización masiva. La banca, los servicios públicos, la medicina, los transportes, el comercio, el turismo, el ocio



El tráiler de reparto autoguiado en la autopista

y, por qué no, la agricultura o la ganadería, pueden ser afectados de forma notable.

El New York Times, publicó en abril una entrevista a cinco personas que entrenan a un sistema para hacer su propio trabajo (sic). No se trata precisamente de industrias, sino empresas de servicios que desean realizarlos a través de aplicaciones de AI por diálogo directo con los clientes: una agencia de viajes, un centro de planificación de reuniones, una consultoría de temas legales, una consultoría de opositores y una ingeniería de software para la conducción automática. Se pretende que el resultado de estas aplicaciones puede ir desde mejorar la calidad o eficiencia del servicio a ampliar el mercado o reducir drásticamente al personal de la organización.

¿Se deben adoptar medidas socio-económicas?

En los países más desarrollados no debería dejarse a la evolución de los acontecimientos la toma de medidas para una transición menos traumática. El documento de la Casa Blanca propone tres acciones o estrategias, naturalmente para los EE.UU.

1. Ser un país líder en la I + D de la AI, apoyando desde la Administración todo lo necesario para la defensa y para la detección de agresiones externas a los sistemas, ayudando a las empresas involucradas en la creación y aplicación de tecnologías de la AI.
2. Educar y formar a las personas para empleos con futuro, estudiando el tipo de conocimiento y habilidades solicitadas por el mercado de trabajo, con la necesaria colaboración de la Universidad. Preparar a los trabajadores actuales a afrontar los cambios que pueda tener su ocupación con la aplicación de las nuevas tecnologías.
3. Ayudar a los colectivos que más puedan sufrir situaciones de riesgo mediante una eficaz búsqueda de trabajo, adquisición de nuevas habilidades, seguros de desempleo, acciones para casos de exclusión, ayudas a la reubi-



Brazo robot recolector de manzanas

cación familiar, etc. Todo ello apoyado por políticas apropiadas.

David Rotman, economista neo-keynesiano de Harvard, ahora profesor en Berkeley y uno de los editores de la *MIT Technology Review*, analiza la perspectiva a 10/20 años vista en su artículo *El inexorable camino hacia la Automatización*, y subraya estas ideas diciendo, "la inteligencia artificial puede mejorar extraordinariamente la economía y otros aspectos del día a día, pero necesitamos crear medios para asegurar que sean beneficiosos para todo el mundo". No considera tan grave el hecho de un futuro en el que los robots asuman gran parte del trabajo que hoy día realizan las personas, sino el desorden de un amplio período de transición

Especialmente los EE.UU., que por su nivel tecnológico será el más próximamente afectado, dedican muy poco de su presupuesto a fomentar planes de ayuda para acompañar estas transformaciones, y eso que las predicciones estiman que muchos de los puestos de trabajo actuales podrían ser ejercidos por autómatas. La posibilidad de reducción de jornada con un aumento de la demanda en entretenimiento y cultura deberá enfrentarse a la eventual reducción de los salarios; aunque ampliamente descartada la concesión de una "renta básica universal" no lo es

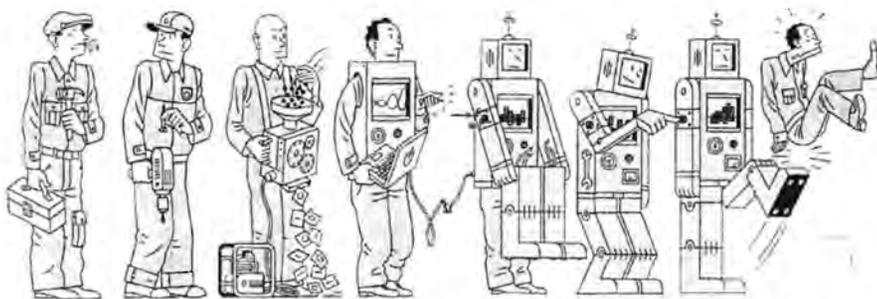
tanto la utilización de una tasa sobre los beneficios derivados del uso de la AI. En todo caso se recomienda adelantarse a los acontecimientos, aunque, en opinión de los analistas los líderes políticos americanos no están en absoluto preparados para ello.

Es evidente que el momento y nivel de impacto no serán los mismos para un país tecnológicamente avanzado que para quienes lo estemos menos, pero no debemos perder el objetivo de que será absolutamente necesario adoptar todas las posibilidades que ofrezca la AI, si no como creadores, al menos como usuarios y desarrolladores de aplicaciones. De otra manera la pérdida de competitividad sería irreparable.

También hay quien considera que el panorama no es tan grave aunque, admitiendo una importante destrucción de empleo, argumentan que no es posible predecir el número o tipología de las nuevas ocupaciones que se generen. ¿Quién podría pensar en los años 80 el desarrollo en la creación de videojuegos o aplicaciones para móviles?

PARA SABER MÁS

- [1] Artificial Intelligence, Automation, and the Economy (National Science and Technology Council) - <https://www.whitehouse.gov/sites/whitehouse.gov/files/images/EMBARGOED%20AI%20Economy%20Report.pdf>
- [2] Preparing for the Future of Artificial Intelligence (National Science and Technology Council) - https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/whitehouse_files/microsites/ostp/NSTC/preparing_for_the_future_of_ai.pdf
- [3] The Relentless Pace of Automation (David Rotman) - <https://www.technologyreview.com/s/603465/the-relentless-pace-of-automation/>



Una visión humorística crítica del MIT sobre la aplicación de nuevas tecnologías en la industria

Ferrocarriles del futuro: evolución y perspectivas de la alta velocidad, del Maglev y del Hyperloop (parte 2)

Railways of the future: evolution and prospects of high-speed rail, maglev and hyperloop (2nd part)

■■■■
Esther González-González y Soledad Nogués
Universidad de Cantabria (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8323>

2. DESARROLLO ACTUAL Y RETOS DE FUTURO

La AVF es el sistema con mayor desarrollo actualmente. Según datos proporcionados por la UIC, en 2016 existen unos 29.000 km de líneas en servicio en 13 países que transportan cerca de 1.600 millones de pasajeros al año, a los que se unen 15.000 km más en construcción y otros miles planificados para los próximos años. Sin embargo, su futuro también se encuentra en discusión tanto en el mundo académico como en el político [1], debido a sus elevados costes de construcción y de mantenimiento y a la falta de viabilidad económica. Esto se ha puesto de manifiesto por ejemplo en el caso español, donde las líneas de AVE no resultan rentables ni siquiera en el corredor Madrid-Barcelona [2,3].

Por su parte, al MAGLEV se le presuponen una serie de ventajas frente a la AVF, tal como recoge Yaghoubi [4]. Por un lado, ventajas medioambientales, como son menores emisiones, ocupación de suelo y fragmentación al discurrir sobre estructuras elevadas. Por otro lado, una mayor seguridad por la inexistencia de cruces e intersecciones con otros medios de transporte, así como por la propia naturaleza de la propulsión, que impide que se produzca el choque de vehículos. También presenta mejoras en la explotación, como menores tiempos y distancias para acelerar y decelerar, lo que implica un menor tiempo de viaje global a igual velocidad. Por último, desde el punto de vista de los pasajeros, un mayor confort, frecuencia, capacidad y fiabilidad.

Estas ventajas podrían suponer una alternativa a la AVF, sin embargo, su desarrollo todavía es marginal ¿Por qué? Si para el primero el principal inconveniente es el coste, éste se ve enormemente agravado en los MAGLEV, tanto en la construcción de su infraestructura como en la energía necesaria para su funcionamiento.

Mientras la AVF tiene un coste medio de unos 18 millones de euros por kilómetro según datos de 2005, la línea al aeropuerto de Shanghai costó una media de 33 millones €/km, y el futuro SCMAGLEV se espera que cueste del orden de US\$72 billion, es decir 125 millones €/km [3,5]. Esto, acompañado de las dificultades en la gestión de incidentes -como se demostró en el accidente del circuito de pruebas de Emsland en 2006-, sus no tan menores emisiones de ruido y vibraciones, así como su incompatibilidad con las líneas existentes, ha dificultado su desarrollo a lo largo del mundo, apareciendo como un sistema desconectado con dudoso potencial de futuro [5,6,7,8,9].

Por último, Hyperloop se encuentra actualmente en un proceso ilusionante de participación de la comunidad científico-tecnológica para desarrollar su diseño inicial. En este sentido, a comienzos de 2016, la empresa SpaceX organizó un concurso de diseño de las cápsulas en el que participaron unos 120 equipos, principalmente de estudiantes de ingeniería de diversas universidades de todo el mundo. Los 30 equipos finalistas, entre los que se encuentra uno de la UPV de Valencia que ganó dos de los premios de la competición (Mejor Diseño y Mejor Subsistema de Propulsión), han sido emplazados para construir modelos a escala $\frac{3}{4}$ completamente funcionales que serán probados en 2017 en una pista de pruebas de la empresa *Hyperloop Transportation Technologies (HTT)*, cerca de la sede de SpaceX en California [10,11,12]. La otra empresa en la batalla, *Hyperloop One*, ha realizado recientemente una prueba en Nevada con el objetivo de probar varios componentes y mostrar que se está avanzando en la investigación de este sistema [13].

Además de la reducción de tiempos de viaje y la no utilización de combustibles fósiles, y por tanto la ausencia de emisiones -al contrario que el avión-, la gran ventaja de este sistema era aparentemente su reducido coste frente a los anteriores modos. En este sentido, la primera propuesta de Musk para la conexión de California se estimaba en un entorno de los 6,6 millones €/km (US\$11,5 millones/

milla), muy inferior a los 56 millones €/km de la AVF planteada en el mismo corredor. Sin embargo, las últimas estimaciones lo sitúan en una horquilla entre los 52 y 71 millones €/km. Asimismo, las valoraciones para la unión de los 484 km entre las ciudades de Estocolmo (Suecia) y Helsinki (Finlandia) en 28 minutos, estimada en 40 millones €/km, incluyendo en el presupuesto la construcción del túnel marino más largo del mundo, y los 30 millones €/km previstos en una futura línea entre Dubai y Abu Dhabi [14], se acercan a estas cifras, que son bastante superiores a la media de la AVF y muy similares a los MAGLEV.

La infravaloración económica inicial de Hyperloop, asociada principalmente a costes de compra de terrenos, es sólo uno de los errores y dudas señalados por diversos técnicos y científicos reconocidos que cuestionan la viabilidad del sistema. A estos aspectos no resueltos se unen: la realización de pruebas que puedan reflejar problemas solo identificables *in situ*, la cantidad real de energía necesaria para su funcionamiento, el mantenimiento de la baja presión a lo largo del tubo, el equilibrio de las cápsulas ante cambios de presión, la infravaloración del diámetro necesario del tubo, su adaptabilidad a riesgos geológicos, la complejidad de implementación en la mayor parte del mundo dado sus exigentes requisitos, etc. [5,9,15,16,17,18].

3. CONCLUSIONES

Las investigaciones de los últimos años están demostrando capacidad científico-tecnológica para desarrollar sistemas cada vez más veloces, por lo que parece indudable que a medio-largo plazo las tecnologías actuales se van a ver sobrepasadas por nuevos sistemas. Sin embargo, estos modelos avanzados han de ser considerados como una alternativa cuya implantación no va a ser ni tan rápida ni tan fácil.

Los requerimientos singulares y enormes costes de MAGLEV e Hyperloop dificultarán enormemente su posicionamiento como modo sustitutivo de la AVF.

De hecho, estas exigencias, técnicas y presupuestarias, hacen cuestionarse si el objetivo de aumentar la velocidad responde verdaderamente a las necesidades generales de la sociedad. Por un lado, el ahorro en tiempos de viaje ha resultado mucho más eficaz en el salto del ferrocarril convencional a la AVF (150-300 km/h),

que los que se pueden esperar entre AVF y MAGLEV o MAGLEV e Hyperloop para las distancias que se recorren normalmente (ahorros de 2h frente a ahorros de 30 minutos en 500 km) [7], y de otro, tal como afirma Crozet [8], la mejora de la "velocidad social generalizada" por km es mucho menor de lo esperado frente a los sistemas

ya establecidos y su coste mucho mayor, si se tienen en cuenta costes externos, subvenciones recibidas, etc. Como consecuencia, estas grandes inversiones no siempre encuentran justificación, y estos sistemas aislados, destinados a servir de conexión entre nodos urbanos principales, seguramente completarán las redes exis-

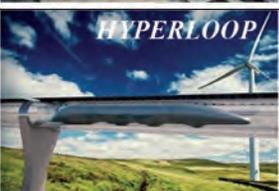
		Tracción	Tipo de línea y compatibilidad	Tráfico	Velocidad máxima (km/h)	Coste (millones €/km)
AVF		Eléctrica: ruedas sobre railes	LAV nueva	Uso exclusivo pasajeros	250-300	20-40
	Aislada de la red convencional					
		Eléctrica: ruedas sobre railes	LAV nueva o convencional adaptada	Uso exclusivo pasajeros	300-500	4,7 - 23
	Compatible con red convencional					
MAGLEV		EMS: Levitación y guía separada sobre vías electromagnéticas	LAV nueva	Uso exclusivo pasajeros	400-500	33-75
			Aislada de la red convencional			
		EDS: Imanes permanentes	LAV nueva	Mixto	> 500	
			Aislada de la red convencional			
HYPERLOOP		Levitación en tubo sobre colchón de aire	Tubo nuevo	Mixto	1200	30 - 71
			Aislado de la red convencional			

Tabla I: Resumen tipos AVT

Fuente: elaboración propia a partir de [3,5,6,7,14,19,20,21]. Imágenes: Shinkansen: "JR Central Shinkansen 700" por Sui-setz, 2008, Wikimedia commons; TGV: "TGV" por Eric Salard, 2015, Flickr; ICE: "ICE-3-frankfurt" por Sebastian Kasten, 2005, Wikimedia commons; Transrapid: "Maglev" por Max Talbot Minkin, 2012, Flickr; HSST: "ECOBEE" por Minseong Kim, 2016, Wikimedia commons; Inductrack: "Inductrack" por US Department of Energy, 2012, web; SCMAGLEV: "Series Lo" por Saruno Hirobano, 2013, Wikimedia commons; Hyperloop: "HyperLoop 1" por Hyperloop Transportation Technologies, 2015, Flickr. Acceso: 7 Febrero 2017. Licencias CC BY 2.0.

tentes puntualmente y competirán de una forma más directa con el avión que con el ferrocarril.

Parece, por tanto, que el futuro del transporte ferroviario no es sólo una cuestión de velocidad, donde los nuevos sistemas pueden tener una ventaja comparativa, sino que es, o debería ser, sobre todo una cuestión de mejora general de los servicios a los usuarios y de la eficiencia energética, lo que implica antes que nada adecuar las redes existentes con actuaciones como la optimización de la energía, la electrificación sistematizada de las vías o su adaptación a velocidades comerciales más acordes a lo que se espera en este siglo. Por otro lado, han de considerarse otros medios de transporte que incluyan nuevas tecnologías o formas de uso eco-sostenibles y que ofrezcan acceso generalizado a la población, como son los vehículos eléctricos o de bajas emisiones o el coche compartido, dado que van a jugar, junto con el ferrocarril, un papel fundamental en el futuro.

PARA SABER MÁS

[1] Delaplace M., Dobruszkes, F. "Editorial: Thinking beyond the cost-benefit analysis: the wider impact of high-speed rail on local development". *Belgeo* [en línea], January 2016, Vol.3. Disponible en: <http://belgeo.revues.org/18166> [consulta: 10 Noviembre 2016]

[2] Albalade D., Bel G., Fageda X. "When supply travels far beyond demand: Causes of oversupply in Spain's transport infrastructure". *Transport Policy*, July 2015, Vol. 41, p. 80-89. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2015.03.004>

[3] Campos J., de Rus G. "Some stylized facts about high-speed rail: A review of HSR experiences around the world". *Transport Policy*, January 2009, Vol. 16: 1, p. 19-28. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2009.02.008>

[4] Yaghoubi H. "The most important advantages of Magnetic Levitated Trains". En: Proceedings of the 11th International Conference of Chinese Transportation Professionals, ICCTP 2011: Towards Sustainable Trans-

portation Systems, Nanjing (China): August 14-17, 2011. p. 3974-3986. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/41186\(421\)398](http://dx.doi.org/10.1061/41186(421)398)

[5] Palacin R. "The future of travel and why it doesn't look like Hyperloop" [en línea]. The Conversation Trust. 4 Agosto 2015. Disponible en: <https://theconversation.com/the-future-of-rail-travel-and-why-it-doesnt-look-like-hyperloop-45354> [consulta: 15 noviembre 2016]

[6] Lee H-W., Kim K.C., Lee J. "Review of MA-GLLEV train technologies". *IEE Transactions on Magnetics*, June 2006, Vol. 42: 7, p.1917-1925. DOI: 10.1109/TMAG.2006.875842

[7] Vuchic V.R., Casello J.M. "An evaluation of Maglev technology and its comparison with high speed rail". *Transportation Quarterly*, March 2002, Vol. 56: 2, p. 33-49.

[8] Crozet Y. "Maglev (603 km/h), Hyperloop (1102 km/h). Vers un "retour sur terre" de la très grande vitesse?". *Transports*, 2015, p. 5-15. ISSN 0564-1373

[9] Goodall R.M., Ward C.P. "Rolling stock technology for the future". En: International Conference on High Speed Rail. University of Birmingham: 8-10 Diciembre 2014.

[10] Ross P.E. "Hyperloop: No Pressure: The vacuum train project will get its first test track this year". *IEEE Spectrum*, January 2016, Vol. 53: 1, p. 51-54.

[11] Hawkins A.J. "Here are the Hyperloop pods competing in Elon Musk's big race later this year" [en línea]. *The Verge*. 18 Junio 2016. Disponible en: <http://www.theverge.com/2016/6/18/11965354/hyperloop-pod-competition-elon-musk-spacex-team-design> [consulta: 15 Noviembre 2016]

[12] Jiménez M. "Hyperloop UPV, el tren a 1.000 Km por hora con sello español" [en línea]. Cinco días. 15 Diciembre 2016. Disponible en: http://cincodias.com/cincodias/2016/12/14/tecnologia/1481745152_174901.html [consulta: 7 Febrero 2017]

[13] Szondy D. "Hyperloop One shows off magnetic drive in dramatic demonstration" [en línea]. *New Atlas - Urban Transport*. 12 Mayo 2016. Disponible en: <http://newatlas.com/hyperloop-one-demonstration/43283/> [consulta: 15 Noviembre 2016]

[14] Konrad A. "Leaked Hyperloop One docs reveal the startup thirsty for cash as costs will stretch into billions" [en línea]. *Forbes*. 25 Octubre 2016. Disponible en: <https://www.forbes.com/sites/alexkonrad/2016/10/25/hyperloop-one-seeks-new-cash-amid-high-costs/#6fc6552f125c> [consulta: 7 Febrero 2017]

[15] Chin J.C., Gray J.S., Jones S.M., Berton J.J. "Open-Source Conceptual Sizing Models for the Hyperloop Passenger Pod". En: *Actas del 56th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, Florida: 5-9 Enero 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.2514/6.2015-1587>

[16] Kosowatz J. "Investigating Hyperloop's Viability" [en línea]. *Mechanical Engineering*, October 2013. Disponible en: <https://www.asme.org/engineering-topics/articles/transportation/investigating-hyperloops-viability.aspx> [consulta: 10 Noviembre 2016]

[17] Wolverton T. "Wolverton: Elon Musk's Hyperloop hype ignores practical problems" [en línea]. *The Mercury News*. 13 Agosto 2013. Disponible en: <http://www.mercurynews.com/2013/08/13/wolverton-elon-musks-hyperloop-hype-ignores-practical-problems/> [consulta: 15 Noviembre 2016]

[18] Romero P. "Hyperloop, el tubo supersónico de Elon Musk, es posible" [en línea]. *El Español*. 14 Octubre 2015. Disponible en: http://www.elespanol.com/ciencia/tecnologia/20151013/71242899_0.html [consulta: 15 Noviembre 2016]

[19] Najafi F.T., Nassar F.E. "Comparison of High-speed rail and MAGLEV systems". *Journal of Transportation Engineering*, July 1996, Vol. 122: 4, p. 276-281. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1996\)122:4\(276\)#sthash.2RUFkLQD.dpuf](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1996)122:4(276)#sthash.2RUFkLQD.dpuf)

[20] Givoni M. "Development and impact of the modern High-Speed Train: A review". *Transport Reviews*, 2006, Vol. 26: 5, p.593-611. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/01441640600589319>

[21] Post R.F., Ryutov D.D. "The Inductrack: A Simpler Approach to Magnetic Levitation". *IEEE Transactions on applied superconductivity*, March 2000, Vol.10: 1, p. 901-904. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/77.828377>

AGRADECIMIENTOS

Parte de este trabajo se basa en la Tesis Doctoral "Los impactos territoriales en la elección del modelo ferroviario: El caso de las conexiones de Cantabria" realizada por Esther González-González y dirigida por Soledad Nogués y Luigi dell'Olio, cuya elaboración fue financiada por la beca pre-doctoral FPI del Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España (referencia BES-2008-00436).

DYNA

Ingeniería e Industria



Suscríbete a Revista Dyna

Revista técnico científica de ingeniería multidisciplinar desde 1926

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

PROMOCIÓN PARA COLEGIADOS:

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

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

Suscripción Impresa + 4 revistas digitales 48 €/año

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



Marco para automatizar la selección de un mecanismo de coordinación entre sociedades de agentes

Framework to automate the selection of a coordination mechanism between agent groups

Rodolfo Ostos-Robles, Vanessa Félix-Aviña, Luis Mena-Camaré
 Universidad Politécnica de Sinaloa (México)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8396>

La creciente disponibilidad de nueva y mejor tecnología está propiciando que los hogares se transformen en entornos donde los dispositivos tecnológicos se insertan de manera natural y son asimilados de forma rápida y transparente por los usuarios. En este sentido, la automatización de procesos o servicios tales como el encendido y apagado de las luces, el control de la temperatura del clima doméstico y la apertura o desbloqueo de puertas son cada vez más comunes [1]. En consecuencia, el siguiente paso en esta evolución tecnológica/espacios es el desarrollo de entornos inteligentes que cuenten con una red de dispositivos interconectados (sensores y actuadores), de forma tal que trabajen como un sólo elemento, y cuya operación esté relacionada, permitiendo así integrar servicios complejos, entendiendo estos como la combinación de nuevas funcionalidades disponibles pero no explotadas por el sistema [2].

No obstante, si bien es cierto que la composición de dispositivos y servicios en un espacio representa una ventaja operativa, es necesario destacar que los mismos están limitados a un solo lugar y se aíslan de otros sistemas semejantes [3]. En consecuencia, se plantea la necesidad de ofrecer servicios complejos a través de la coordinación con sistemas análogos para así superar la barrera de aislamiento que poseen los entornos inteligentes. En este sentido, se propone diseñar un entorno de trabajo (*framework*) que aborde el problema de la coordinación entre espacios inteligentes, modelados mediante un sistema multiagente para disponer de un ecosistema donde los usuarios tengan la libertad de migrar a distintos espacios inteligentes sin perder sus servicios.

La operatividad del *framework* desarrollado se divide en cuatro procesos

principales separados en módulos. En el primero se recibe y caracteriza a la sociedad de agentes que desea interactuar con otra sociedad, el segundo tiene la función de clasificar a la sociedad migrante con un determinado tipo de coordinación, el tercer módulo empareja las características de la sociedad con un mecanismo de coordinación, mientras que en el cuarto módulo se asigna la opción más apropiada para que los sistemas cooperen, seleccionando el mecanismo de coordinación que mejor se adapte a la solución del problema.

Por lo tanto, el problema de coordinación entre las sociedades de agentes que intentan interactuar se resuelve gradualmente, ya que cada módulo desarrollado aporta parte de la solución, permitiendo que al final se asigne el mejor mecanismo de coordinación a partir de las características de las sociedades que interactúan.

El algoritmo completo del *framework* desarrollado es mostrado continuación:

1. Inicio.
2. Leer ontología de la sociedad migrante.
3. Si el tipo de comunicación es orientada a procesos entonces
 - Si la sociedad tiene estructura organizacional entonces
 - El tipo de estructura organizacional es jerárquica.
 - De lo contrario
 - El tipo de estructura organizacional es plana.
 - Fin de condición.
 - De lo contrario
 - El tipo de estructura organizacional es social.
 - Fin de condición.
4. Dependiendo del tipo de estructura organizacional se asigna un tipo de mecanismo de coordinación.
 - Si la estructura organizacional es jerárquica entonces
 - Se utilizan mecanismos de subasta.
 - De lo contrario si la estructura organizacional es plana entonces
 - Se utilizan mecanismos de regateo.
 - De lo contrario



- Se asignan mecanismos sociales.
 - Fin de condición múltiple.
5. Buscar en la base de datos de mecanismos de coordinación los mecanismos asignados.
 6. Seleccionar el mecanismo de coordinación con mejor rendimiento.
 7. Proporcionar a ambas sociedades las reglas para coordinarse.
 8. Fin.

El *framework* propuesto representa una alternativa de solución en la selección de mecanismos de coordinación, ya que toma en cuenta las características de las sociedades de agentes que requieren interactuar, incluyendo una clasificación de los mecanismos de coordinación a través de un algoritmo que permite seleccionar el mecanismo apropiado.

La cooperación entre distintos sistemas coadyuva en la obtención de esquemas más flexibles y dinámicos, y por lo tanto, puede contribuir a la migración de usuarios entre espacios inteligentes y a la composición de nuevos servicios.

REFERENCIAS

- [1] Waher P. Learning internet of things. Birmingham: Packt Publishing Ltd, 2015. ISBN: 9781783553532.
- [2] Martínez OHM, Astaiza ZMS. "Arquitectura para la creación de servicios ubicuos orientados a salud". Entre Ciencia e Ingeniería, 2012., Vol.10 p.9-23.
- [3] Weitz D, Lianza F, María, D, et al. "Red de sensores inalámbricos para el monitoreo de adultos mayores". En: XXII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación, 2016. San Luis: Universidad de San Luis. p.1054-1063.

Comportamiento dinámico y análisis de escenarios del sistema de producción en una línea de estampados, caso de estudio

Dynamic behavior and scenarios analysis of the production system in a stamping line, case study



Lisaura Rodríguez-Alvarado¹, Pedro Tamayo-Meza², Usiel-Sandino Silva-Rivera²

¹ Universidad Autónoma Metropolitana (México)

² Instituto Politécnico Nacional (México)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8319>

El proceso de planificación y control de la producción son dos de los elementos más importantes dentro de la logística de un proceso de manufactura. Con el objetivo de plantear diferentes escenarios para la toma de decisión en dichos procesos se desarrolla un modelo dinámico del flujo de producción, tomando como caso de estudio una línea de estampados de una empresa de autopartes. El modelo considera las condiciones y restricciones del sistema tanto reales como teóricas y su impacto económico en los costos de producción [1].

El enfoque sistémico bajo el cual fue desarrollado el modelo, permite analizar el

comportamiento del sistema bajo condiciones reales, considerando las afectaciones de las variables de interés. De esta manera es posible analizar el comportamiento del flujo de producción y el desempeño del sistema en condiciones normales de operación, ante el efecto de demoras y eventos propios del sistema [2-3].

Como punto de partida para proceder con el análisis del caso de estudio fue necesario definir los límites y analizar la información sobre la problemática del objeto de estudio. Se estableció que el escenario complejo y variable del proceso ocurre debido a la mezcla de producción y a las características de los requerimientos de producción, concluyendo que: *"la problemática principal que se presenta en el área de control de la producción es la afectación de los tiempos de demora ocasionada por los cambios de herramental y material y actividades anexas al proceso"*.

La estructura general del modelo desarrollado en el *software Vensim* consta de

dos módulos y cinco bucles de retroalimentación. Esta estructura determina la interrelación y afectación de las 100 variables claves representadas en 32 ecuaciones que caracterizan el sistema desarrolladas en el modelo dinámico. El esquema general del modelo y sus módulos se presenta en la Figura 1.

El primer módulo, se refiere al análisis de la producción de componentes en cada prensa de la línea involucrada en el proceso. La información proveniente del módulo 1 se convierte en la variable de entrada para el módulo 2, el cual corresponde a la producción del producto terminado. En este segundo módulo se evalúa si la programación de la carga asignada a las prensas involucradas en el proceso en el módulo 1, permiten la entrega del producto final a tiempo.

Los principales resultados de las corridas de simulación muestran que el modelo permite establecer un escenario de decisión en cómo y cuándo implementar medidas de mejora tomando como parámetro

BUENOS COMPAÑEROS DE VIAJE

¿TE ACOMPAÑAMOS EN TU PRÓXIMO PROYECTO INTERNACIONAL?

> SECTORES

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

> SERVICIOS

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



TRESCA
ENGINEERING SOLUTIONS

de medición el porcentaje de contribución a la utilidad en función de la reducción de costos e incremento en el volumen de producción. Otro parámetro de medición importante es el porcentaje de capacidad requerido, ya que se le ayuda al planificador de la producción a equilibrar la necesidad de cumplimiento del plan con la necesidad de mantener un nivel aceptado de capacidad requerido de acuerdo a las mejoras a implementar.

Por último, el planteamiento del modelo desarrollado en un caso práctico real pone en evidencia que el enfoque sistémico es útil para simular y modelar situaciones bajo condiciones reales de eventos

que afectan al sistema [4], en este caso al proceso de planeación y control de la producción. Esta situación refleja aún más la complejidad de los casos de estudios en este campo de investigación.

REFERENCIAS

[1] RODRIGUEZ-ALVARADO, Lisaura Walkiria, TAMAYO-MEZA, Pedro, SILVA-RIVERA, Usiel Sandinol. DYNAMIC ANALYSIS OF THE PRODUCTION FLOW OF AN AUTOMOTIVE STAMPING LINE . DYNA Management, January-December 2017, vol. 5, no. 1, p.[22 p.]. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/MN8160>

[2] Deif A, ElMaraghy H. "Cost performance dynamics in lean production leveling". Journal of Manufacturing Systems. 2014. Vol. 3 Issue 4. p. 613-623. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.05.010>

[3] Ahmed M. Deif. A system dynamic approach to manage changeability in manufacturing systems. 2nd International Materials, Industrial, and Manufacturing Engineering Conference, MIMEC2015, 4-6 February 2015, Bali Indonesia

[4] Shady S. Elmasry, Ayman M.A. Youssef, Mohamed A. Shalaby. A cost-based model to select best capacity scaling policy for reconfigurable manufacturing systems. International Journal of Manufacturing Research , Volume 10, Issue 2 , DOI: <http://dx.doi.org/10.1504/IJMR.2015.069715>. 2015.

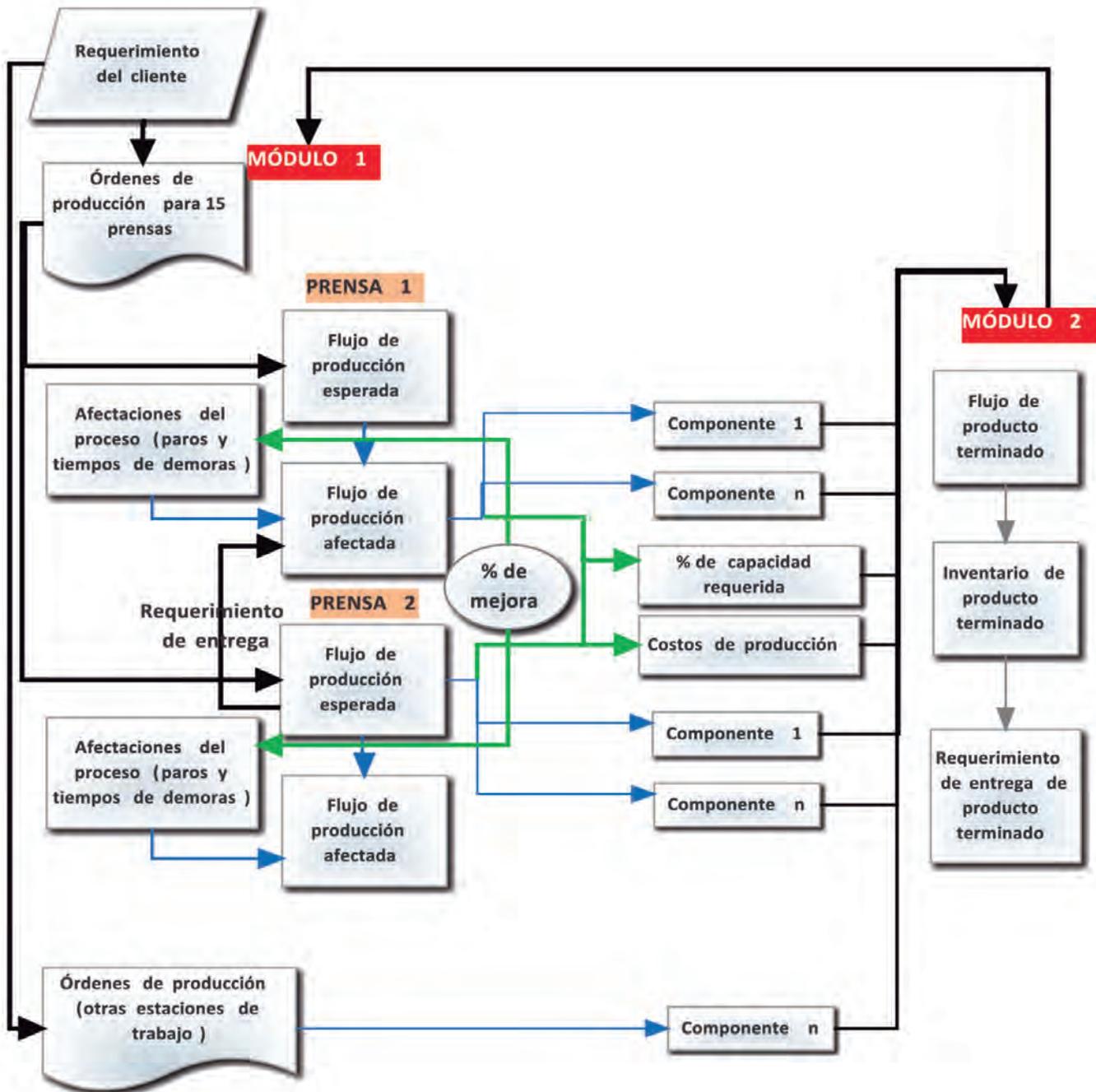


Fig. 1: Estructura general del modelo

Comparación numérica del HIC (head injury criterion) en condiciones de atropello a diferentes velocidades con un vehículo tipo sedán

Head injury criterion (HIC) numerical comparison in run over conditions at different speeds with a sedan vehicle type

■■■■
Omar Cortes-Vasquez¹, Christopher-René Torres-San-Miguel¹, Guillermo Urriolagoitia-Sosa¹, Iván-Lenin Cruz-Jaramillo¹, Luis-Antonio Aguilar-Pérez¹, Luis Martínez-Sáez², Beatriz Romero-Ángeles¹, Guillermo-Manuel Urriolagoitia-Calderón¹

¹ Instituto Politécnico Nacional (México)

² Universidad Politécnica de Madrid (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8401>

Un mecanismo de lesión es definido como una descripción de los cambios mecánicos y fisiológicos que resultan en un daño anatómico y funcional en el ser humano. El criterio de lesión mayormente usado en la industria para daño en la cabeza es el denominado HIC (*Head Injury Criterion*). El HIC toma en cuenta la aceleración lineal resultante y el intervalo de tiempo de 36 ms (HIC_{36}) para posteriormente ser comparados los valores con las curvas de riesgo de Mertz y ETH zürich. El presente trabajo exhibe los efectos de atropello bajo circunstancias normales donde el peatón se encuentra posicionado al frente del vehículo en posición lateral y es atropellado considerando 4 diferentes velocidades del vehículo (40 km/h, 30 km/h, 20 km/h y 10 km/h). Para los análisis de impacto se utilizaron dos modelos

en Elementos Finitos, el vehículo sedán Toyota Yaris 2010 y el maniquí *Hybrid III* percentil 50 masculino.

Los resultados que se muestran en la Fig. 1. Representan cada uno de los casos de estudio aquí expuestos. Con cada dato de HIC obtenido, es posible hacer una comparación con las curvas de tolerancia para conocer el índice de lesión AIS. Para una velocidad de impacto de 40 km/h con un valor HIC equivalente a 1244, se obtiene que el peatón tiene un riesgo del 35% de sufrir lesión cerebral con escala. Mientras que para una velocidad de 30 km/h con valor HIC de 448.5, se tiene un valor. Para los dos últimos casos (10 y 20 km/h) los valores quedan fuera del rango de la curva, lo que significa que no representa ser riesgo alguno de daño cerebral.

A la velocidad de 40 km/h y valor AIS=4, el nivel de gravedad se considera como *grave vital* o *daño severo*, con un porcentaje de fatalidad de entre 7.9% al 10.6%. La escala AIS indica que, de acuerdo a este valor, es probable que el peatón desarrolle inconciencia por un periodo de 1 a 6 h, inconciencia menor a 1 h con déficit neurológico, fractura de base craneana, contusión cerebral, hemorragia subaracnoidea o contusión severa. A la velocidad de 30 km/h con valor, el nivel

de riesgo se considera como *leve* o *menor*, con un 0.0% de fatalidad y se puede experimentar durante el post impacto, cefalea o vértigo secundarios, estiramiento columna cervical, sin fractura o luxación. Para la velocidad de 20 km/h no es probable presentar riesgo de fatalidad y únicamente se pueden presentar mínimas molestias en la cabeza que no implican riesgo en lo absoluto. Finalmente, la velocidad de 10 km/h representa cero riesgos, existiendo la posibilidad de que se presente un nulo contacto entre el vehículo y la cabeza del peatón.

Es importante señalar que los datos obtenidos mediante programas computacionales son únicamente resultados probables, bajo condiciones muy similares. Sin embargo, se cumple con una regla bien establecida, a mayor velocidad, mayor será el daño cerebral. La velocidad de impacto es el factor más importante para establecer relación con posibles consecuencias. Otro factor importante es el vehículo mismo, pues su centro de gravedad, así como los materiales empleados en su fabricación y el perfil frontal, influyen directamente sobre el peatón. El sedán empleado indica según su reporte de validación una mejora en cuanto a seguridad pasiva para el peatón, debido a que tanto la fatalidad como el daño cerebral comparados con otros vehículos son mínimos.

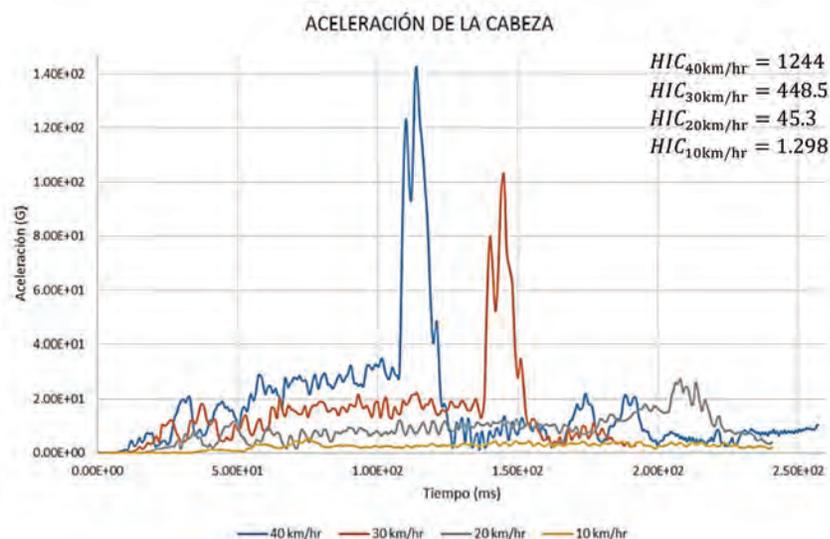


Fig. 1: Aceleración en cabeza a distintas velocidades de colisión y obtención del HIC_{36} .

REFERENCIAS

- [1] Cortes-Vasquez, O., Torres-San Miguel, C., Urriolagoitia-Sosa, G., Cruz-Jaramillo, I., Aguilar-Pérez, L., Martínez-Saez, L., Urriolagoitia-Calderón, G. (2017). NUMERICAL SIMULATION OF RUN OVER SCENARIOS TO ADULT PEDESTRIAN WITH VEHICLE TYPE SEDAN IN MEXICO CITY. DYNA New Technologies, 4(1). [17 p.]. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT8105>.
- [2] Paez-Ayuso, Francisco Javier, Sanchez-Sanz, Manuel, Sanchez-Alejo, Fco. Javier et al. IMPROVEMENTS OF THE PASSIV SAFETY IN VEHICLES FOR THE PEDESTRIAN PRETECTION. DYNA, Mayo 2009, vol. 84, no. 4, p.315-320.
- [3] Irureta, V., Method for Pedestrians Accidents Reconstruction, European Journal of Traffic, Vol. 2, No. 2, pp 65-72, 2010.

Vehículo automáticamente guiado (AGV) por odometría y visión artificial

Automatically guided vehicle (AGV) for odometry and artificial vision

Julio César Martínez-Romo, Francisco Javier Luna-Rosas, Ricardo Mendoza-González, José Valentín López-Rivas, Mario Alberto Rodríguez-Díaz
TecNM/Instituto Tecnológico de Aguascalientes (México)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8420>

El uso de robots en la industria manufacturera moderna es intensivo; en particular, la robótica móvil encuentra un extenso campo de aplicación en una de sus realizaciones industriales más relevantes: los *Vehículos de Guiado Automático*, mejor conocidos por sus siglas como AGV, del inglés *Automatic Guided Vehicle*; de manera común, tales vehículos transportan desde el almacén al punto de ensamble partes que serán integradas a algún producto, realizando esto mediante sensores que rastrean sendas cintas o bandas magnéticas enterradas superficialmente o sobrepuestas y sujetas firmemente al piso. En general, este método cumple con el objetivo de guiar al AGV en su recorrido a través de los puntos de ensamble en la planta, siempre y cuando la cinta magnética se mantenga completa y sin deformarse. No obstante, dada la naturaleza de las plantas industriales, el paso de vehículos pesados diversos por encima de la cinta magnética es frecuente y tiene el efecto de deformar, y eventualmente destruir, la cinta magnética, trayendo como consecuencia que el AGV se desoriente y se detenga, perjudicando el proceso productivo. Ante esta situación, una solución es retirar la banda magnética del piso y proveer al AGV de un sistema de guía basado en sensores internos o externos, a fin de proveer al vehículo de su posición y orientación relativas a una referencia arbitraria con fines de libre navegación [1]. Existen varios sensores que pueden aplicarse para la realización de esta tarea, entre los que se encuentran encoders ópticos, sistemas de ultrasonido y acelerómetros [2]. Específicamente, al uso de encoders ópticos fijados a las ruedas traseras de un robot móvil se le conoce como *odometría* y sirve para calcular su desplazamiento y orientación; la odometría utiliza un método simple, el cual consiste en determinar cuánto se desplaza linealmente una llanta

por cada pulso del encoder óptico y acumular los pulsos para estimar la distancia total recorrida; combinando la distancia recorrida por cada llanta se determina la nueva posición y orientación del vehículo. Una desventaja de la odometría es que, para ser efectiva, deben efectuarse procedimientos de calibración especializados; una segunda desventaja consiste en que, a pesar de lograr una calibración con muy bajas tasas de error, éste es acumulativo y es función directa de la distancia recorrida [2]; para corregir el efecto del error se requiere de sensores externos que eventualmente corrijan el dato de la posición y orientación del vehículo móvil.

Con base en lo anterior, se realizó la integración de la odometría y de un sistema de visión artificial como sensor externo, para lograr el desplazamiento de un robot móvil de topología tipo triciclo, liberándolo así del uso de la cinta magnética.

INTEGRANDO ODOMETRÍA Y VISIÓN ARTIFICIAL

La aproximación adoptada para la calibración odométrica del robot móvil es la descrita en [3]; con el algoritmo allí descrito se logran tasas de error de menos del 0.1% en el recorrido de trayectorias cortas de forma cerrada de hasta 31m de longitud y del 1% en recorridos continuos de hasta 70m. Para abatir el error de posición se utilizó como sensor exterior una cámara a color. La cámara se conecta a una computadora personal en la cual las imágenes son procesadas digitalmente para obtener la medición de la posición y orientación, mismas que se transmiten al AGV para su actualización vía radiofrecuencia. La cámara representa un *punto de paro* en el recorrido, el cual puede situarse en la posición final o en un punto intermedio de la trayectoria; la cámara se coloca directamente a una distancia sobre el vehículo, tal que abarque al propio vehículo y la posible área de llegada del mismo, la cual se determina como el círculo de radio igual al 1.5% de la longitud de la trayectoria. La calibración odométrica asegura que el vehículo llegará repetitivamente a la escena que capta la cámara. Por ejemplo, para una trayectoria de 50m de longitud, se requiere de un radio de 0.75m, existiendo

un factor de seguridad para las distancias esperadas de llegada del AGV, que se limitarán a un máximo 0.5m (1%) o menos del punto final de la trayectoria. La aplicación para trayectorias muy largas, por ejemplo, de 200m, se lograría fraccionando en 3 sub-trayectorias de 66.66m, requiriendo tres sensores externos.

Para determinar si el AGV se desempeña con la misma repetitividad que si se usara una guía magnética, se diseñó una trayectoria cerrada semicircular de 31m de longitud y se programó al AGV para recorrerla continuamente arrastrando una carga de 250kg, instalando sólo una cámara en el punto de llegada; después de 70 recorridos, se detuvo al AGV. Aunque los resultados fueron satisfactorios, se requiere realizar más pruebas para investigar el efecto de los errores aleatorios en la repetitividad de la posición y orientación de llegada.

REFERENCIAS

- [1] Azizi F, Houshang N. "Mobile Robot Position Determination". En: Venelinov-Topalov A. (ed). *Recent Advances in Mobile Robotics*. Croatia: IntechOpen, 2011. p. 69-82.
- [2] Borenstein J. *Where am I? Sensors and methods for mobile robot positioning*. [en línea]. Everett HR, Feng L. Michigan, U.S.A.: Borenstein, J. (ed), Marzo de 1996 [ref. 18 de diciembre de 2015]. Disponible en Web: <http://www-personal.umich.edu/~johannb/Papers/pos96rep.pdf>
- [3] Martínez Romo, JC, Luna-Rosas, FJ, López-Rivas, V. et al. *Genetic Optimization for Odometry Calibration of Tricycle Topology Mobile Robots*. DYNA New Technologies, Enero-Diciembre 2017, vol. 4, no. 1, p. [19 p.]. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT8079>.

Riesgos de descargas electrostáticas y humedad en los procesos de manipulación, almacenamiento y embalaje en la industria electrónica

Electrostatic discharges and humidity risks in handling processes storage and packaging in electronic industry

Manuel-Jesús Hermoso-Orzáez¹, Manuel Jiménez-Fernández²

¹ Universidad de Jaén (España)

² SurTel Electrónica (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8464>

Este trabajo presenta un método sencillo y práctico, que permite controlar los riesgos asociados a las descargas electrostáticas (ESD) y a la humedad (MSD), en los procesos productivos de manipulación, almacenamiento y embalaje de componentes electrónicos, mediante *software* SAP (*Sistemas, Aplicaciones y Producto*) implementado en un sistema de planificación de la producción tipo ERP (*Enterprise Resource Planning*).

Las razones que nos han llevado están relacionadas con la necesidad de incorporar y controlar estos riesgos que hasta ahora pasaban desapercibidos y que causan importantes trastornos, en los procesos de almacenaje y *handling*, en los sistemas de gestión de la planificación productiva y control de calidad de las empresas de componentes electrónicos. Con esta experiencia y como resultado de este estudio o caso práctico se ha puesto de manifiesto la necesidad de implementar controles complementarios y específicos, dentro de un sistema moderno de gestión productiva y de stocks tipo ERP, que permita minimizar los problemas ocasionados por las descargas electrostáticas y humedad en equipos electrónicos de alta sensibilidad.

Uno de los aspectos más importantes, a tener en cuenta en el proceso de manipulación, almacenamiento y embalaje de componentes electrónicos son las descargas electrostáticas que constituyen un peligro para la electrónica de estado sólido pues pueden inutilizar los dispositivos electrónicos, como los circuitos integrados, siendo numerosos, los estudios realizados sobre los efectos de la ESD (*Electrostatic Sensitive Devices*), traduci-

do comúnmente del inglés *Electro-Static Discharge*). [1] [2].

La propuesta de método de control expuesta en el caso objeto de estudio, se basará en la aplicación de la norma americana y concretamente en la ANSI/ESD S6.1-Grounding y ANSI/ESD S541-*Packaging Materials for ESD Sensitive Items*, orientada a los procedimientos específicos aplicables a los sistemas de almacenamiento de componentes electrónicos [3].

Por otro lado, en los dispositivos sensibles a la humedad (MSD, del inglés *Moisture Sensitivity Devices*), la expansión de la humedad atrapada puede provocar la separación interna, laminación del plástico, daños en las conexiones, y grietas internas, aunque la mayor parte de este daño no es visible en la superficie del componente. En los casos más graves, el componente se hinchará y crepitará (efecto de "palomitas de maíz").

En nuestro caso de estudio se ha realizado una revisión de los distintos procesos de manipulación, almacenamiento y embalaje, en la industria electrónica resumidos como: (Recepción de materiales comprados, Almacenaje, Devolución al proveedor, Entrega de materiales y disposición a línea de montaje, Recorrido durante el proceso de fabricación y pruebas, Entrega de productos controlados al almacén de expediciones, Embalaje, Marcado e identificación, Almacenamiento y conservación y Entrega). Considerando muy importante la definición clara de las distintas fases del proceso, para determinar así los controles de seguridad aplicada a los stocks intermedios de los componentes electrónicos dentro de la cadena de suministro "*supply chain*".

Consideramos a modo de conclusión, que la novedosa experiencia desarrollada con este trabajo, puede de ser gran ayuda práctica para el control de riesgos electrostático, incorporándolos en los procesos específicos de control de inventario en los sistemas modernos de gestión de la producción (MRP, JIT, OPT) que han ido evolucionando desde simples técnicas de

gestión de stocks hacia modelos integrales de gestión empresarial de desarrollo y gestión de sistemas de producción. La cuestión planteada ha mostrado la necesidad de introducir en la gestión y almacenamiento este control añadido, considerando el sistema de planificación ERP (con SAP) especialmente indicado, y surge debido a la necesidad manifiesta de englobar dentro del proceso de integración logística todos los datos referentes a la totalidad de la cadena de producción y poder así ofrecer información confiable en tiempo real, garantizando de esta forma el almacenamiento, manipulación, trasiego y el flujo de componentes de naturaleza electrónica de forma segura. [4]

REFERENCIAS

- [1] Gendron, A., Renaud, P., Bafleur, M., Et Nolhier, N. Analytical description of the injection ratio of self-biased bipolar transistors under the very high injection conditions of ESD events. *Solid-State Electronics*, 52 (5), pp. 663-674, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sse.2007.11.011>
- [2] Wei, G., Chen, Y., Et Liu, L. Research on the security of electro-igniting device in long-term storage condition towards ESD. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Applied Electrostatics*, Shanghai, China, pp. 244-247, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-008044584-7.50063-3>.
- [3] ANSI/ESD S20.20-2007 para el desarrollo de un programa de control de descarga electrostática. [consulta, 5 de febrero de 2016]. Available at: <http://www.bystat.com/pdf/S2020-2007.pdf>
- [4] Hermoso-Orzaez, M., Jimenez-Fernandez, M. (2017). Handling, storage and packaging in the electronics industry: a methodological experience. *DYNA Management*, 5(1). [11 p.]. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/MN8340>

Nuevas metodologías centradas en el usuario para la creación de software en la industria 4.0

New user centered methodologies for software development in the industry 4.0 era

Erik Aranburu-Zabalo, Ganix Lasa-Erle, Garikoitz Iruretagoiena-Irazusta, Daniel Reguera-Bakhache, Jon-Kepa Gerrikagoitia-Arrien
Universidad de Mondragón (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8447>

La cuarta revolución industrial o más conocida como la industria 4.0 ha supuesto una gran transformación en el ámbito de la máquina herramienta. Mediante los sistemas ciber-físicos se logra conectar todos los objetos de la empresa a una red que recoge datos, los almacena y los estudia para ofrecer nuevas soluciones que aumentan la productividad y explotan al máximo el potencial de esta nueva industria inteligente (Lee, 2014). Como consecuencia, los entornos digitales han aumentado de forma considerable, donde la participación de los usuarios es fundamental. Por lo tanto, la comunicación entre la máquina y el usuario es clave para que puedan emplear sus habilidades al máximo y así habilitar la innovación en los servicios y procesos productivos. (Gorecky, 2014).

Sin embargo, actualmente en el desarrollo de la interacción entre máquina y usuario se tiende a centrarse en la optimización de la funcionalidad del software, dejando a un lado al usuario. (Brhel, 2015). Ante esta situación, se ha creado la metodología *User Centered Agile Design* (UCAD), un método de trabajo para crear un software centrado en las necesidades y motivaciones de los usuarios para así crear entornos interactivos amigables, intuitivos y efectivos (Aranburu-Zabalo et al., 2017). La metodología propone un proceso estructurado con las fases a trabajar y las herramientas a emplear en cada una de ellas, de modo que sirve como guía para la aplicación en casos reales.

En este artículo se expone de forma detallada la metodología UCAD y se presenta un caso práctico realizado junto a la empresa DANOBATGROUP S.COOP, situado en Elgoibar (Gipuzkoa) para crear la interfaz de su máquina láser 4.0.

UCAD nace de la unión de las metodologías Desarrollo de Software Ágil (DSA) y

el Diseño Centrado en el Usuario (DCU). El primero de ellos, es un método de desarrollo de software, en el que se centra en proveer un proceso dinámico caracterizado por ciclos iterativos y la participación activa de agentes externos, para que el Producto Mínimo Viable (PMV) se diseñe lo antes posible y se mejore con las continuas evaluaciones. El segundo de ellos, es un método de diseño cuyo foco principal de desarrollo son las necesidades y objetivos de los usuarios, donde participan de forma activa durante todo el proceso para así conseguir un producto adaptado al usuario. De este modo, UCAD reúne las perspectivas tanto de desarrollo de software como de diseño centrado en el usuario.

La metodología propuesta se divide en tres fases principales: Comprender, Diseñar y Desarrollar. La primera fase tiene como objetivo comprender el contexto que forma el entorno digital de la máquina, analizando la máquina, el usuario y la interacción máquina-usuario. Mediante el análisis de la máquina, se conocen las características y funciones de la misma, para conocer en profundidad su funcionamiento. En cuanto al usuario, se analizan sus objetivos, hábitos, acciones habituales, etc. para conocer las necesidades y el modo de trabajo y así crear un interfaz adaptado a ello. Para finalizar la primera fase, se analiza la interacción máquina-usuario, visualizando la arquitectura de navegación de la aplicación. En la segunda fase, se define y se diseña el concepto del nuevo interfaz, en tres pasos principales: arquitectura de la nueva aplicación, bocetos a mano de nuevas pantallas y las propuestas visuales sin código. Los tres pasos constan de continuas evaluaciones con usuarios reales de la máquina, para que el punto de vista del usuario esté presente en los avances del proceso. Por último, la tercera fase trata de desarrollar el concepto definido anteriormente, en un proceso cíclico de tres pasos: definición de requerimientos, codificación de las interfaces y evaluación con los usuarios. Cada iteración finaliza con la valoración de si la aplicación está listo para el lanzamiento, para que en el caso negativo se continúe en el ciclo de desarrollo.

Gracias a la implantación de la metodología UCAD en el caso práctico realizado junto a la empresa DANOBATGROUP S.COOP, se ha conseguido diseñar un interfaz útil y eficiente mediante las mejoras funcionales, e intuitivo y amigable mediante las mejoras de usabilidad.

Como conclusión final, se ha detectado que las nuevas tendencias en el ámbito de desarrollo de software se dirigen hacia la experiencia de usuario, donde los nuevos entornos interactivos parten de las necesidades emocionales de los usuarios. Por consiguiente, con la finalidad de adaptarse a las nuevas tendencias, se tratará de reforzar la fase inicial Comprender con la incorporación de la perspectiva de las necesidades emocionales. Para ello, se investigará en métodos de identificación y evaluación de emociones y experiencias de los usuarios.

BIBLIOGRAFÍA

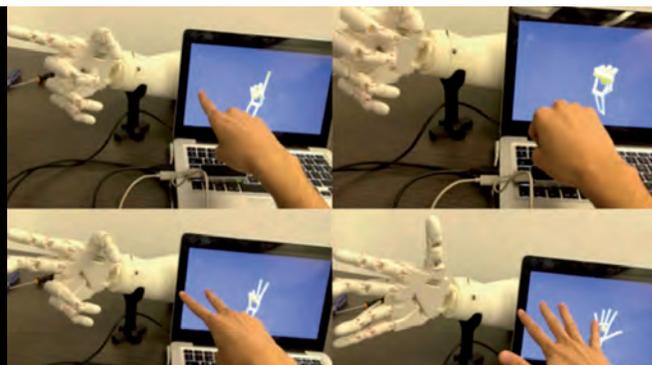
- [1] Lee, J. Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment. Cincinnati : Elsevier, 2014, Vol. 16. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2014.02.001>
- [2] Gorecky, D. Human-machine-interaction in the industry 4.0 era. s.l. : IEEE, 2014. doi: 10.1109/INDIN.2014.6945523
- [3] Bhrel, M. Exploring principles of user-centered agile software development: A literature review. s.l. : Elsevier, 2015, Vol. 61, págs. 63-181. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.infsof.2015.01.004>
- [4] Aranburu-Zabalo, E., Lasa-Erle, G., Reguera, D., Gerrikagoitia, J., Iruretagoiena, G. (2017). UCAD methodology: new user centered interface design proceeding for Industry 4.0. DYNA New Technologies, 4(1). [15 p.]. DOI: <https://doi.org/10.6036/NT8301>

Sensores de visión aplicados a una mano biomimética

Vision sensors applied to a biometric hand

Jordi Torner, Francesc Alpiste, Miguel Brigos
Universitat Politècnica de Catalunya (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8422>



Existe un interés creciente en la exploración de soluciones de bajo coste para controles en dispositivos biomecánicos. Existen numerosos antecedentes de brazos y manos biónicas que utilizan desarrollos tecnológicos y biomédicos avanzados [1-3]. Los brazos controlados por implantes cerebrales o por la actividad nerviosa de la base del brazo que transmite las órdenes de movimiento desde el cerebro a los servomotores que accionan los dedos y la muñeca y cuyos movimientos se ajustan con sensores de presión, temperatura y contacto. En este trabajo se plantea la construcción de un brazo biónico biomimético de bajo coste, accionado a partir de sensores de movimiento y de electromiografía (EGM). Los captadores de movimiento propuestos no son invasivos, por lo que no requieren implantes quirúrgicos. El sensor de visión *Leap Motion* es un pequeño dispositivo de sobremesa que incorpora dos cámaras. La pequeña modificación del punto de vista que ofrecen las cámaras permite la reproducción tridimensional de la imagen de la mano del operario y su posterior análisis para poder accionar un brazo robótico. La mano se construye mediante impresión 3D, que sea capaz de seguir los movimientos captados de una mano real. La mano robótica empleada para realizar este proyecto es el denominado BIONICO, extraído de la iniciativa *InMoove* [2] de Gael Langevin. Se basa en la creación de un robot humanoide a escala real, fabricado a partir de una impresora 3D. Para ello, se utilizan diferentes tecnolo-

gías: la fabricación por adición de material (Impresión 3D), la programación de una placa Arduino y la implementación y programación de sensores de visión y biomecánicos para la captación de movi-

principales nervios del brazo del paciente para dotar de sensibilidad, cambiando el cableado de las fibras nerviosas para controlar prótesis más, por ejemplo, o mejorando las interfaces cerebrales para

mientos. Se exploran diferentes soluciones de sensores basados en visión y electromiograma existentes en el mercado. Leap Motion cuenta con tres piezas fundamentales: las cámaras, los LEDs y el micro controlador. Las dos cámaras son una pieza clave puesto que son las encargadas de capturar las imágenes. Éstas tienen un sensor monocromático sensible a la luz infrarroja con longitud de onda 850 nm. Este sensor alcanza una velocidad de trabajo de 100 fps. Las cámaras disponen de un sensor CMOS que está compuesto por celdas. Esto permite además de una mayor velocidad de procesamiento y menor coste, reducir el tamaño del dispositivo notablemente con respecto a los sensores CCD. La precisión promedio general del controlador se sitúa en torno a los 0,7 milímetros, siendo la resolución del dispositivo mayor que en Kinect de Microsoft. El controlador puede realizar tareas como navegar por un sitio web, utilizando los gestos de pellizcar para hacer zoom en mapas de alta precisión y manipulación de escenas en 3D. Esta solución puede abrir nuevas posibilidades en aplicaciones de ayuda a personas con movilidad reducida. En los entornos de aplicación, una de las posibles aplicaciones es el control a distancia a partir de los brazos del usuario. Otro entorno de aplicación sería ayudar a los discapacitados mediante el control del brazo biónico a partir de un brazo hábil. Existen diversas iniciativas en este campo que pretenden mejorar el control de las prótesis insertando electrodos en los

permitir el control con el pensamiento. La mano fue presentada en la *Innovation Week* de Oslo y en *The 22nd MMVR (Medicine Meets Virtual Reality)* de Los Ángeles en 2016. En estos eventos se reconoció el interés del prototipo y su potencialidad como una solución funcional y de bajo coste.

REFERENCIAS

- [1] Jessica Stoller-Conrad. Controlling a Robotic Arm with a Patient's Intentions [en línea]. [California, USA]: California Institute of Technology, may 2015 [ref. de 25 noviembre 2016]. Disponible en Web <<https://www.caltech.edu/news/controlling-robotic-arm-patients-intentions-46786>>
- [2] Johanna Wilde. World's first implanted bionic arm on test in global competition [en línea]. [Göteborg, Sweden]: Chalmers University of Technology, October 2016 [ref de 15 octubre 2016]. Disponible en Web <<http://www.chalmers.se/en/departments/s2/news/Pages/World%E2%80%99s-first-implanted-bionic-arm-on-test-in-global-competition.aspx>>
- [3] Paulette Campbell. Modular Prosthetic Limb [en línea]. [Maryland, USA]: The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory LLC, 2017 [ref. de 15 octubre 2016]. Disponible en Web <<http://www.jhuapl.edu/prosthetics/scientists/mpl.asp>>
- [4] Weichert, Frank; Bachmann, Daniel; Rudak, Bartholomäus; Fissler, Denis (2013-05-14). "Analysis of the Accuracy and Robustness of the Leap Motion Controller". *Sensors* (Basel, Switzerland). 13 (5): 6380-6393. doi:10.3390/s130506380. ISSN 1424-8220.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto se ha realizado en colaboración con la empresa VISION 360.

Biogás hoy, biometano mañana

Biogas today, biomethane tomorrow

Dolores Hidalgo-Barrio^{1,2}, Jesús-M^a Martín-Marroquín^{1,2}, Francisco Corona-Encinas^{1,2}

¹ CARTIF Centro Tecnológico (España)

² ITAP. Universidad de Valladolid (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8482>

Los problemas causados por la disponibilidad futura de combustibles fósiles y la creciente preocupación por el calentamiento global, atraen cada vez más atención pública hacia el desarrollo y la utilización de fuentes de energía renovable no basadas en el petróleo.

Una de las alternativas en auge es la de producción de biogás (y su posterior refinado hasta biometano) a partir de materiales orgánicos residuales. La producción de biogás empleando la tecnología de digestión anaerobia está creciendo a nivel mundial y se considera como una solución energética en el escenario actual. Esta tecnología es económica, favorable al medio ambiente y es conocida como la más eficiente en comparación con todas las demás tecnologías de producción de energía a través de rutas biológicas o termoquímicas.

La digestión anaerobia es un proceso biológico complejo que convierte los materiales orgánicos en metano a través de tres pasos principales: hidrólisis, acetogénesis y metanogénesis. El biogás se compone principalmente de metano (CH₄) 40-75% y dióxido de carbono (CO₂) 15-60%, cantidades de trazas de otros componentes tales como agua (H₂O) 5-10%, sulfuro de hidrógeno (H₂S) 0,005-2%, siloxanos 0-0,02%, hidrocarburos halogenados (VOC) <0,6%, amoníaco (NH₃) <1% O₂ 0-1%, monóxido de carbono (CO) <0,6%, y nitrógeno (N₂) 0-2%. El biogás tiene diferentes aplicaciones, tales como fuente de calor, vapor y electricidad, combustible doméstico para cocinar, y se puede refinar a combustible para vehículos, o para la producción de productos químicos. Teniendo en cuenta todos estos aspectos, el biogás se convierte en un producto interesante para generar bioenergía y su producción es considerada como uno de los procesos más benéficos para el medio ambiente en el camino para reemplazar los combustibles fósiles.



Para potenciar la producción de biogás, se pueden aplicar diferentes estrategias, tales como pre-tratar los sustratos (procesos químicos, térmicos, enzimáticos) y/o co-digerir el sustrato (estiércol, lodos de depuradora) con otros residuos para lograr efectos sinérgicos que faciliten el proceso de digestión anaerobia. El digester en dos fases también se puede utilizar para optimizar el proceso.

El biogás producido a partir de materiales orgánicos ha venido tradicionalmente utilizándose directamente para generar energía, pero el gran volumen de CO₂ que contiene reduce su valor calorífico y limita su viabilidad económica. Por lo tanto, dependiendo del uso final, son necesarios diferentes pasos de tratamiento del biogás. Para algunas aplicaciones, como combustible para vehículos o la inyección de red, donde es importante tener un alto contenido de energía en el biogás, éste necesita ser mejorado. Es importante contar con un proceso optimizado de mejora en términos de bajo consumo de energía y alta eficiencia dando un alto contenido de metano en el biogás mejorado. Los pasos básicos de refinado del gas incluyen: (1) remoción de vapor de agua, (2) eliminación de H₂S, (3) eliminación de CO₂ y (4) eliminación de siloxanos y otras trazas.

El proceso de refinado del biogás ha ganado atención en los últimos años debido al aumento de los precios de los combustibles de origen fósil y los objetivos cada vez mayores de cuotas a alcanzar en la utilización de combustibles renovables

en la mayor parte de los países desarrollados.

Ya están comercialmente disponibles una gran variedad de tecnologías que cumplen la tarea de producir un flujo de biometano de calidad suficiente para actuar como combustible de vehículos o para ser inyectado en la red, y estas tecnologías han demostrado ser técnica y económicamente factibles. Sin embargo, aún se necesita de investigaciones intensivas para optimizar y desarrollar aún más estas tecnologías, así como para aplicar nuevos procesos al campo del refinado del biogás. Todas las tecnologías tienen sus propias ventajas y desventajas específicas, siendo claro el hecho de que ninguna es la solución óptima en todos los casos de producción de biometano. La elección correcta de la tecnología económica y técnicamente óptima depende en gran medida de la calidad y cantidad del biogás bruto a mejorar, de la calidad deseada del biometano y de la utilización final de este gas, de la operación de la planta de digestión anaerobia y de los tipos y continuidad de los sustratos empleados, así como de las circunstancias locales de la instalación.

REFERENCIA

- Hidalgo-Barrio, M., Martín-Marroquín, J., Corona-Encinas, F.. (2017). TRANSFORMATION OF BIOGAS INTO BIOMETHANE: REVIEW OF AVAILABLE TECHNOLOGIES. DYNA Energía y Sostenibilidad, 6(1). [13 p.]. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/ES8078>

La revista española DYNA sigue mejorando su prestigio internacional

The Spanish journal DYNA continues improving its international prestige

■■■■
José-María Hernández-Alava
Publicaciones DYNA S.L (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8519>

- Incrementa su factor de impacto casi un 80% con respecto al del año pasado, situándose en 0,541.
- Se sitúa entre las 70 mejores revistas del mundo en ingeniería multidisciplinar.
- Única en español en el exclusivo grupo de revistas de ingeniería general en Web of Knowledge (WoK).
- El valor del factor de impacto actual, indica que por cada dos artículos publicados en DYNA, uno de ellos es citado como referencia por las prestigiosas revistas incluidas en Web of Knowledge.

La revista de ingeniería DYNA aumenta más de un 70% su Factor de Impacto en el último informe JCR 2016 (calculado

en 2017), publicado en el mes de Junio de cada año por *Clarivate Analytics* (antes *Thomson Reuters*).

Clarivate Analytics se constituyó como una nueva compañía en octubre de 2016, al comprar a Thomson Reuters su negocio *Intellectual Property & Science business* que incluía entre otros productos la *Web of Science*, *Journal Citation Reports*...

Journal Citation Reports (JCR) es un informe obtenido a través una herramienta informática que evalúa la relevancia de las principales revistas científicas del mundo en base a su Factor de Impacto entre los investigadores. Se trata de un sistema de consulta incluido en la plataforma *Web of Knowledge (WoK)* que ofrece datos estadísticos de citas de más de 8000 revistas, entre ellos el Factor de Impacto, que permiten determinar la importancia relativa de las mismas dentro de sus categorías temáticas.

El factor de impacto es una medida de la importancia de una revista científica y se calcula generalmente con base en un

periodo de 2 años. Por ejemplo, el factor de impacto en el año 2016 para una determinada publicación puede calcularse como sigue:

A= Número de veces en que los artículos publicados en esta revista en el periodo 2014-2015 han sido citados en artículos de las publicaciones a las que da seguimiento WoK a lo largo del año 2016.

B= Número de artículos publicados en esta revista en el periodo 2014-2015.

→ Factor de impacto 2016 = A/B

DYNA está incluida dentro del grupo Ingeniería Multidisciplinar desde el año 2009 y la tendencia de su Factor de Impacto se consolida presentando una evolución estable y creciente como puede comprobarse en la Figura 1. En este grupo se incluyen las 85 revistas de ingeniería general más importantes del mundo, siendo DYNA la única revista en español dentro del mismo y posicionándose en el puesto 70, muy cerca del siguiente cuartil Q3.

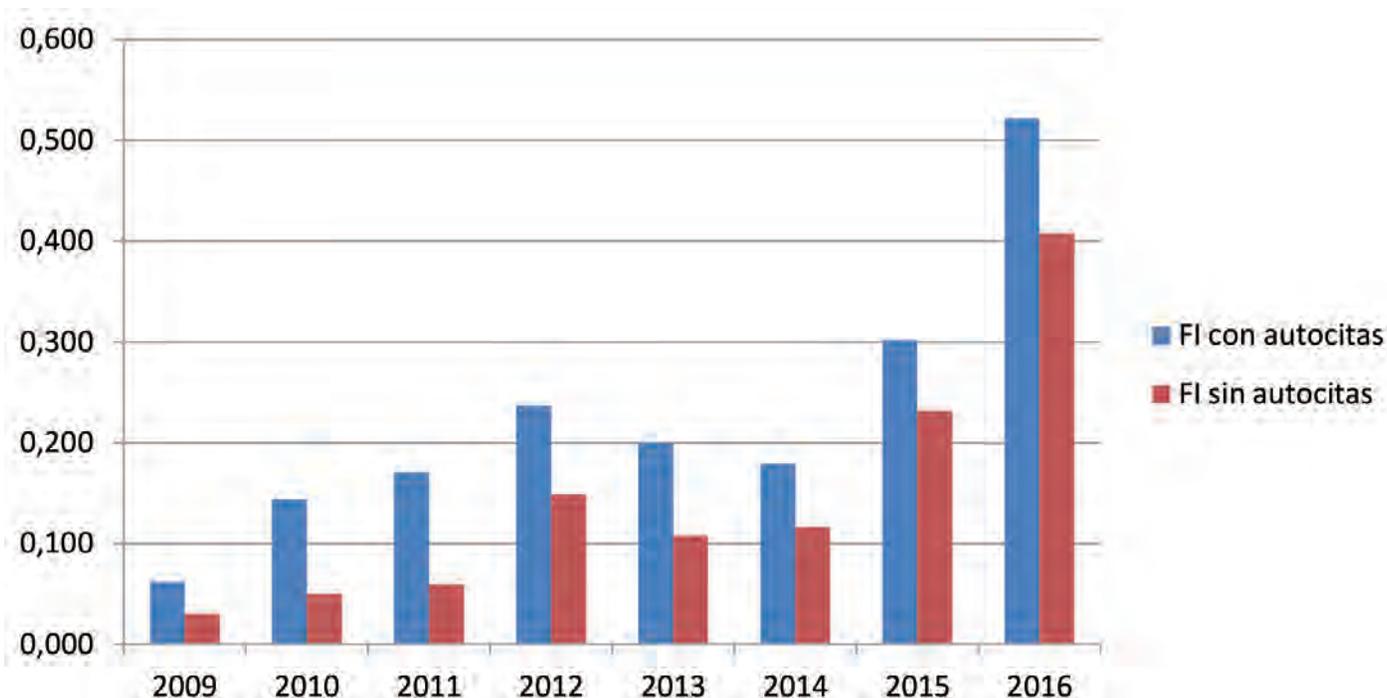


Fig.1: Evolución del Factor de Impacto (con autocitas y sin autocitas) desde 2009 hasta 2016

Proporción autocitas (FICA/FISA)

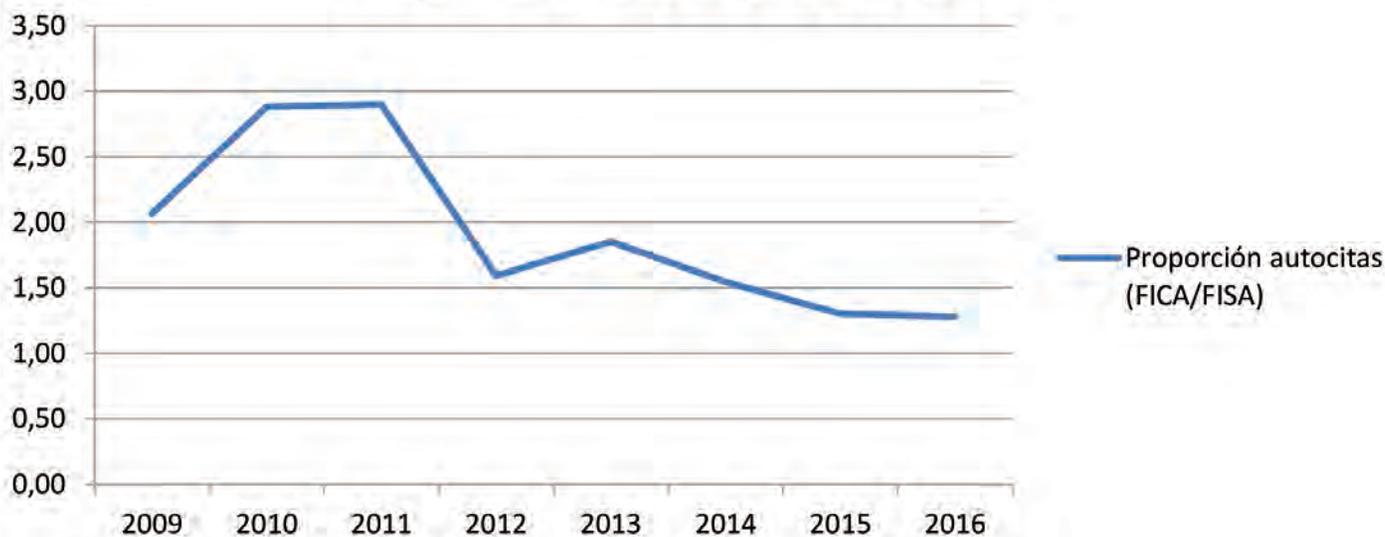


Fig. 2: Evolución del nivel de autocitas en el periodo 2009–2016

En el gráfico adjunto se puede ver la evolución en el periodo 2009–2016 del factor de impacto de DYNA, teniendo y no teniendo en cuenta las autocitas.

Se considera una autocita cuando un artículo publicado en la revista X, tiene una referencia a otro artículo de la misma revista X. Aunque en nº de autocitas de una revista en el inicio del cálculo de su factor de impacto puede ser elevado, este tiene que irse reduciendo progresivamente a lo largo de los años, hasta estabilizarse en un valor máximo de un 15%. Este porcentaje no aplica a revistas de contenido muy específico, o muy regional, para los que la escasez de revistas y de investigadores, hace que dicho nivel de autocitas sea superior, dada la particularidad del ámbito de investigación. Este indicador es vigilado de cerca por Clarivate Analytics, ya que un elevado nº de autocitas puede considerarse un indicio de una manipulación artificial del factor de impacto.

Desgraciadamente, los autores tienen tendencia a pensar que hacen un favor a DYNA cuando en los artículos que nos envían incluyen citas a artículos ya publicados en DYNA, pero no hay nada más lejos de la realidad. Es labor de esta editorial desde hace un par de años vigilar esta autocitación y tratar de justificarla con el autor en cada trabajo evaluado.

En la Figura 2 se puede comprobar como el nivel de autocitación entre 2009 y 2016 ha ido reduciéndose progresivamente.

Actualmente DYNA presenta un Factor de Impacto de 0.541 que ha supuesto casi un 80% de incremento frente al valor de 0.302 del año pasado. Este nuevo factor de impacto indica que por cada pareja de artículos que se publican en DYNA, 1 de ellos al menos es citado en alguna de las mejores revistas del mundo incluidas en *Web of Science*.

La revista DYNA editada por Publicaciones DYNA SL, es el Órgano Oficial de

Ciencia y Tecnología de la Federación de Asociaciones de Ingenieros Industriales de España (FAIIE).

Fundada en Bilbao en 1926, *Publicaciones DYNA* edita asimismo otras 3 revistas de mayor especialización en diferentes disciplinas de la Ingeniería: *DYNA Energía y Sostenibilidad* (Tecnologías energéticas y sostenibilidad), *DYNA Management* (Gestión organizacional) y *DYNA New Technologies* (Nuevas tecnologías emergentes).

La editorial quiere agradecer a todos sus grupos de interés (autores, evaluadores, consejos de redacción y asesores y suscriptores) su contribución a este importante logro.



www.dyna-energia.com



www.dyna-management.com



www.dyna-newtech.com

Evolución histórica en el desarrollo y fabricación de transformadores de potencia en la fábrica ABB de Córdoba

The historical evolution of the ABB power transformer plant located in Cordoba



Francisco Guerrero-Moreno
Francisco Montes-Tubio
Jose Martínez-García
Universidad de Córdoba (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8107>

1. INTRODUCCIÓN

Dentro del tejido industrial de Córdoba, se encuentra uno de los núcleos más importantes, a nivel nacional e internacional, en materia tecnológica y de desarrollo.

El objetivo principal de este artículo es intentar analizar y dar a conocer la evolución industrial y arquitectónica, tanto en su patrimonio histórico como su desarrollo tecnológico, desde sus orígenes hasta la actualidad, de manera que se pueda reconstruir históricamente la edificabilidad de la planta y poder demostrar la legitimidad urbanística histórica.

Como hipótesis fundamental se marca analizar los años constructivos de los edificios para poder relacionarlos con las distintas tecnologías empleadas en el proceso productivo a lo largo de las distintas etapas desarrolladas en el complejo fabril.

Dentro de las hipótesis a desarrollar en este artículo, son conocidas las distintas etapas:

- Secem (1917-1930).
- Cenemesa (1930-1970)
- Westinghouse, Cenemesa y ABB (1970-1991)
- Asea Brown Boveri (ABB) en la actualidad.

Asea Brown Boveri, S. A. (ABB), desde 1988, es una de las compañías de ingeniería eléctrica más importantes del mundo, con un doble origen empresarial: por un lado suizo Brown Boveri, Ltd. (BBC), y por otro sueco Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget (ASEA). Ambas compañías que nacieron en finales del siglo XIX, no se instalan en España hasta 1914 y 1912,

respectivamente.

ABB, se hace cargo de la industria eléctrica de Córdoba en el año 1990, tras un convenio con diversas entidades públicas y las empresas Constructora Nacional de Equipos Eléctricos, S.A. (CONELEC), Catalana de Maquinaria Eléctrica, S.A. (CADEMESA) y Constructora Nacional de Maquinaria Eléctrica, S.A. (CENEMESA).

En Córdoba, la Constructora Nacional de Maquinaria Eléctrica, S. A. (CENEMESA), se dedicaba a la fabricación de motores, generadores y transformadores eléctricos, desde 1930, como una sociedad anónima independiente. Y, anteriormente, desde 1917, como una línea de producción dentro de la Sociedad Española de Construcciones Electromecánicas, S. A., (SECEM), más conocida popularmente, en Córdoba, por la "Electromecánica" o la "Letro".

En 1970, la compañía estadounidense Westinghouse Electric Corp., que fue uno de los socios fundadores de CENEMESA, se convirtió en la propietaria de la empresa cordobesa al convertirse en el mayor socio capitalista. Esta situación se mantendrá hasta mediados de los 80, cuando vuelve este sector industrial a manos de CENEMESA, con la participación de CADEMESA y CONELEC.

Finalmente, en 1990 el Grupo ABB, se convierte en el propietario de la empresa de Córdoba. El centro de ABB en Córdoba, está dividido actualmente en tres lí-

neas de trabajo: *Power Product Transformer (PPTR)*, *Power Products High Voltage (PPHV)*, y *Power Service*.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Para la elaboración de la presente investigación, se ha tenido que emplear análisis bibliográficos de los registros de las distintas entidades involucradas en el desarrollo del complejo industrial.

Investigar los distintos organismos públicos como Industria, Gerencia, archivos municipales, para la obtención de los distintos expedientes administrativos que regulen la situación actual de la planta.

Paralelamente se ha realizado una reconstrucción analítica mediante fotografías aéreas y ortofotografía de las distintas etapas en la finca registrable aplicable, al estudio de la hipótesis a desarrollar en este artículo.

2.1. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA FABRIL EN CÓRDOBA. HIPÓTESIS INICIAL

El complejo industrial se encuentra localizado y asentado estratégicamente en la ciudad de Córdoba, ubicada al sur de España en un importante nudo de comunicaciones tanto aéreas, ferrocarril, carretera y cercano a puertos marítimos dotados de instalaciones para el gran tráfico internacional. Su localización permite la expedición de productos de gran tonelaje, destinados al mercado nacional y a la exportación.

El complejo en que se desarrollan las actividades del GRUPO ABB S.A. se encuentra implantado en dos parcelas contiguas sin separación física entre ambas. Estas parcelas lindan al norte y oeste con la Línea de Ferrocarril Córdoba - Málaga, al sur con terrenos de Suelo Urbanizable No programado (P.A.U. 0-1) y con el Ca-



Figura 1: Centro de ABB en Córdoba en la actualidad. Fuente: Elaboración propia



Figura 2: Vuelo aéreo 1956. Fuente: Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía



Figura 3: Vuelo aéreo 1976. Fuente: Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía

mino Viejo de Almodóvar, y al este con la parcela de uso industrial con referencia catastral 1138507UG4913N0001RX y con terrenos de Suelo Urbanizable No programado (P.A.U. 0-1).

Actualmente, el complejo industrial resulta del desarrollo y ampliación de la factoría mediante la ejecución de diferentes edificaciones. No obstante, desde un punto de vista urbanístico, la implantación del conjunto industrial en la parcela, cumple las determinaciones urbanísticas definidas por el vigente PGOU de Córdoba. Por consiguiente, la situación jurídica, en la que se encuentran las edificaciones del complejo, atiende a dos categorías, edificaciones amparadas en procedimientos administrativos con otorgamiento de li-

ciencia urbanística, y aquellas que carecen de ésta.

En virtud de lo establecido en el artículo 3.3 del decreto 2/2012, de 10 de enero, por el que se regula el régimen de las edificaciones y asentamientos existentes en suelo no urbanizable en la Comunidad Autónoma de Andalucía, "Las edificaciones aisladas terminadas con anterioridad a la entrada en vigor de la Ley 19/1975, de 2 de mayo, de reforma de la Ley sobre el Régimen del Suelo y Ordenación Urbana, y que no posean licencia urbanística para su ubicación en el suelo no urbanizable, se asimilarán en su régimen a las edificaciones con licencia urbanística siempre que sigan manteniendo en la actualidad el uso y las características tipológicas que tenían a la entrada en vigor de la Ley

citada y no se encuentren en situación legal de ruina urbanística."

El plano de zonificación del suelo del PGOU de Córdoba de 1958 establece como Zona Rural la parcela de referencia en la que se ubica actualmente las instalaciones del complejo industrial ABB S.A. Con la entrada en vigor del PGOU de Córdoba de 1986, la parcela de referencia modifica su régimen jurídico del suelo transformándose en Suelo Urbano. Por todo lo cual, queda manifiesto que el régimen jurídico del suelo para la parcela de referencia resulta asimilable a suelo no urbanizable, en el periodo de entrada en vigor del de la Ley 19/1975, de 2 de mayo, de reforma de la Ley sobre el Régimen del Suelo y Ordenación Urbana.



Figura 4: Plano de Zonificación del PGOU de Córdoba de 1958. Fuente: Gerencia Municipal de Urbanismo de Córdoba

Con el objeto de demostrar los hechos anteriormente manifestados, se adjuntan los documentos que a continuación se relacionan:

Vuelo Aéreo de 1956 (vuelo americano): con el objeto de identificar las edificaciones construidas con anterioridad a la Ley 19/1975, en el que se puede comprobar la existencia de algunas edificaciones que en la actualidad continúan en actividad.

Vuelo Aéreo de 1976-1978: Documentación extraída de La Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. Por lo que verifica que en esta época la práctica totalidad del complejo estaba totalmente construido.

Plano de Zonificación del PGOU de Córdoba de 1958.

Planos de Clasificación sistemas y gestión del suelo del PGOU de Córdoba de 1986.

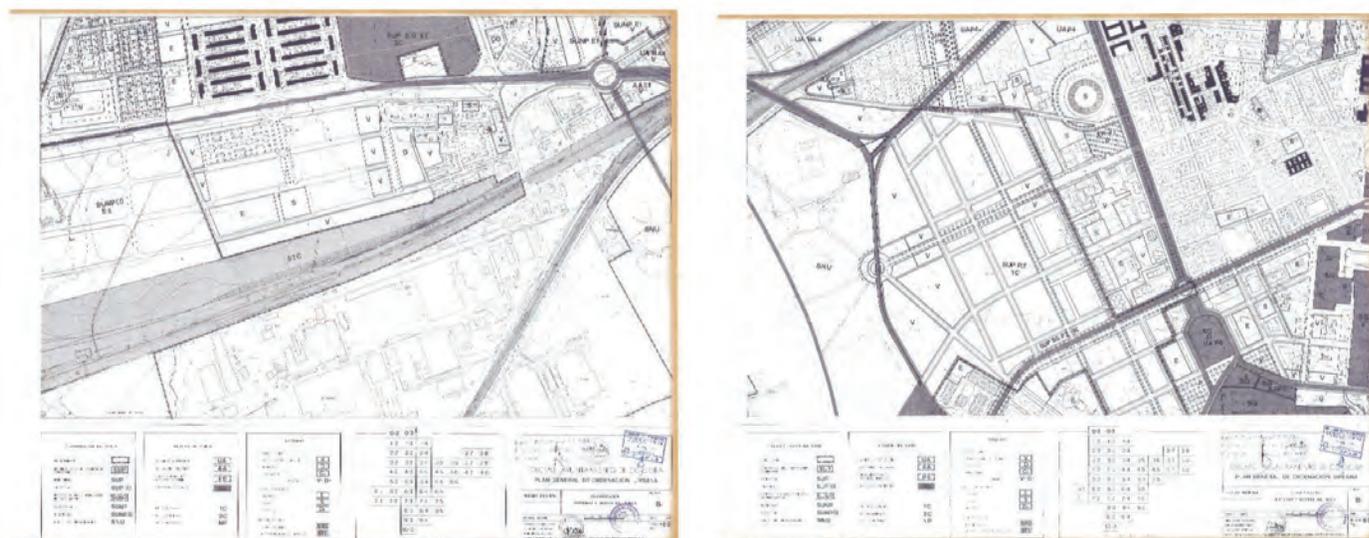


Figura 5: Planos de Clasificación sistemas y gestión del suelo del PGOU de Córdoba de 1986. Fuente: Gerencia Municipal Urbanismo Córdoba



Figura 6: Localización, sobre fotografía aérea reciente, del conjunto fabril de SECEM (abajo) y de las tres barriadas obreras, junto a la desaparecida de empleados (zona central, a la derecha). Buena parte de las naves que se pueden ver en esta toma ya no existe (Belén Vázquez Navajas y autor)

2.3. EVOLUCIÓN EN LOS EDIFICIOS. DESARROLLO JUSTIFICATIVO BASADO EN LOS EXPEDIENTES QUE OBRAN EN NUESTRO PODER

2.3.1 S.E.C.E.M

La Sociedad Española de Construcciones Electromecánicas S.A. "nació como un proyecto sólido, respaldado técnicamente por destacados grupos industriales franceses, y económicamente por grupos financieros españoles ligados al sector secundario" (SARMIENTO 1994b, 103). Cuando comenzó a producir en 1920 se convirtió de inmediato en la empresa líder del sector de transformados metálicos del cobre a nivel nacional y en una de las principales de Europa; además, hasta la década de 1970 fue la única planta de electrolisis de España (SARMIENTO 1992, 8). Nos encontramos ante una industria de dimensión nacional vinculada, sin embargo, a Córdoba, ciudad tradicionalmente agrícola. Por ello, desde su construcción se convirtió en la fábrica más destacada de la ciudad.

SECEM configuró en Córdoba un gran sistema de relaciones espaciales, adquiriendo terreno agrícola y dotándolo de nuevos usos: industrial y urbano. Asimismo, su proyección territorial fue muy importante, y a ella se debe en gran medida la articulación del extrarradio occidental (Exp. SF/C-05353-Doc. 008 1917,9).

2.3.2 CENEMESA

La Constructora Nacional de Maquinaria Eléctrica, S. A., (CENEMESA) se constituye en 1930, como una sociedad independiente de SECEM. Aunque ésta aportaría el 30% del capital inicial junto a la Sociedad Española de Construcción Naval, el Banco de Bilbao, Westinghouse Electric Int'l Co., y Le Materiel Electrique S.W.

Los primeros pasos de CENEMESA estuvieron marcados por la crisis económica mundial, que se inició con la espectacular caída de la Bolsa de Nueva York en 1929. A pesar de las dificultades, se realizaron varios proyectos ambiciosos como fue la reestructuración de sus naves y talleres.

En un primer momento, CENEMESA comenzó su producción en unas naves que pertenecieron a SECEM, posteriormente se edificarían nuevas naves y talleres, este conjunto sería conocido como "Fábrica 1".

En los alrededores de "Fábrica 1" se construyeron otros edificios que no tuvieron un uso industrial como fue la residencia del director de la fábrica, o la Escuela de Aprendices (en un primer momento ocupó una planta de la vivienda del director). Toda esta zona se encontraba ajardinada y también contaría con un huerto para suministrar comida a los residentes. Todo este recinto se rodeó por una tapia que separaría CENEMESA de la "Electromecánica".

Una consecuencia más de este periodo expansivo fue la construcción de nuevas naves por el aumento de la producción y la potencia de los productos elaborados en la fábrica, así como por la apertura de nuevas divisiones de trabajo.

La nueva fábrica de transformadores ("Fábrica 2") inicia su actividad en 1953. Aquí se comenzará a fabricar bajo licencia Westinghouse, transformadores de poten-



Figura 7: Vista aérea CENEMESA en Córdoba. Año 1945-1956. Apertura de nuevas divisiones de trabajo. Ampliación Fábrica 2 y 3. Fuente: Cenemesa



Figura 8: Westinghouse. Desarrollo de ampliación fábrica 2, y nave de Terminación y Plataforma. Año 1976. Fuente: Westinghouse

cia acorazados a partir de 1955 y se continuará con la construcción de transformadores de potencia de columnas. Además de la nave de montaje de transformadores, "Fábrica 2" contó con una nave para calderería, otra para corte de chapa magnética y otra dedicada a trabajos de carpintería, aislantes-bobinas, montajes, calderería y chapa magnética.

Paralela a "Fábrica 2" se construye una nueva nave "Fábrica 3", en sus talleres se iniciará la producción de equipos eléctricos y componentes o "aparellaje" para subestaciones eléctricas y centrales eléctricas (térmicas, nucleares, hidroeléctricas). También se realizarán interruptores de baja, media y alta tensión, toda la producción se realizaba en los talleres de Córdoba (Exp. SF/C-03258-Doc. 002, 1958).

A estas dos naves llegaban las vías del tren que facilitarían la carga y transporte del material realizado tanto en la División de Aparellaje ("Fábrica 3") como en la de transformadores ("Fábrica 2"). Para llevar a cabo el transporte de los transformadores era necesaria su carga en un vagón especial tipo Schnabel donde realizaba el viaje hasta su destino. En muchas ocasiones, tal periplo duraba meses debido a las enormes dimensiones del transformador, por la mala infraestructura de la red viaria española o por las condiciones climáticas que algunas veces ralentizaban la marcha e incluso llegaban a paralizarla.

Durante esta década hay que destacar los pedidos para RENFE de sesenta locomotoras tipo Alstom, además de 180 motores principales de tracción y 180 grupos

auxiliares. También se entregan los primeros reguladores de tensión en carga, bajo licencia Westinghouse. La potencia de los transformadores y alternadores fabricados por la sociedad sigue en aumento.

2.3.3 Westinghouse, Cenemesa y ABB (1970-1991)

El día 2 de junio de 1970, el centro de Córdoba cambia su denominación de CENEMESA por la de Westinghouse, S.A.

En los comienzos de este nuevo periodo, se introdujeron una serie de mejoras técnicas como fueron el "Autoclave" (horno para el secado de los transformadores) y el "Hot Oil Spray" (otro proceso para el tratamiento de transformadores acorazados). Además, se construiría una nueva nave utilizada como plataforma de ensayos y otra para terminación y montaje. Todas estas mejoras produjeron un gran salto cualitativo en la cadena de producción, ya que se redujeron los tiempos y se consiguió además un aumento de la potencia de los transformadores (Exp. SF/C-07591-Doc. 004, 1972).

Entre los pedidos más importantes servidos en esta época, destacan principalmente los siete transformadores monofásicos de 342 MVA a 342 KV fabricados para la central nuclear de Almaraz. Cobra relevancia las doce máquinas fabricadas para Eurodi. Dos transformadores de 400 MVA y cuatro de 200 MVA hasta 400 kV, con regulación en carga, a Iberduero, S.A. Dos autotransformadores trifásicos de 400 MVA de 400 kV enviados a la central nuclear de Santa María de Garoña. Y cua-

tro transformadores monofásicos de 387 MVA para la central nuclear de Trillo. Y en 1983, se recibe el pedido de dos reactancias de 150 MVA, a 400 kV para la central nuclear de Valdecaballeros. Como principal hito tecnológico fue la fabricación del Primer transformador columnas 280 kv. Fabricado en el año 1976 de potencia 40 Mva para Babcock & Wilcox.

Finalmente, Westinghouse abandona España en 1984 vendiendo el 51% de sus acciones al Grupo Arbobyl. Al abandonar Westinghouse sus líneas de negocios en España, el centro de Córdoba recupera el antiguo nombre de CENEMESA.

A partir de este momento se intentarán abrir nuevas líneas de producción para intentar revertir la situación de la empresa y consolidar los 900 puestos de trabajo que había en el centro de Córdoba, una de estas líneas consistió en producir autogiros monoplaza y biplaza.

Para ello, se llevó a cabo un convenio entre la Consejería de Economía y el presidente de CENEMESA, Pietro Fascione, por el cual se creaba la empresa HELICAR, S.A.

Se fabricaron turbinas eólicas denominadas FE-19, equipos con una altura de más de 30 metros.

En 1987, se fabrican y se prueban dos autogiros. Y aunque la empresa confiaba en conseguir una gran difusión de estos aparatos, por su bajo coste y versatilidad, la experiencia tuvo una duración corta.

Finalmente en el 1989 el Ministerio de Industria recibe dos opciones de compra sobre la fábrica, una de Alstom y otra por parte de ABB.



Figura 9: Plano de desarrollo edificabilidad de la planta de ABB en Córdoba, vinculando las edades de construcción. Fuente: Elaboración propia

2.3.4. Asea Brown Boveri (ABB) en la actualidad

El centro de Córdoba es adquirido por el Grupo ABB en 1990, tras llegar a un convenio extrajudicial con la administración pública y otras tres empresas (CENEMESA, CONELEC y CADEMESA) que hasta ese momento eran las propietarias de la planta. El grupo ABB, se instala en Córdoba formando tres empresas independientes (Trafosur, Subestaciones y Service). Esta división cesa en 2.001, dando como resultado ABB Power Technology, S.A., y más tarde, en 2.006, Asea Brown Boveri, S.A.

A partir de esta fecha, la empresa solo mantendrá una división en sus unidades de negocio. Por un lado, *Power Product Transformer* (PPTR), dedicado al sector de los transformadores de gran potencia, tanto acorazados como de columnas. Otra división, es *Power Product High Voltage* (PPHV), que realiza interruptores de alta tensión y aparellaje para subestaciones eléctricas. Y por último, *Power Service* que lleva a cabo el montaje, mantenimiento y la reparación de productos realizados en el centro.

ABB a su llegada a Córdoba, comenzó a introducir su metodología, sus avances tecnológicos y su experiencia en cálculo, diseño y fabricación de transformadores, aportando nuevas herramientas y una visión global de las soluciones para el mercado eléctrico. ABB también intentó poner a punto las instalaciones del centro y llevar a cabo la implantación de sistemas informáticos.

En 1998, ABB anunció una inversión en la planta de Córdoba de 2.000 millones de pesetas (12 millones de euros) debido entre otros motivos, al cierre de la planta de ABB en Muncie (EE.UU.) dedicada a producir transformadores de potencia Acorazado.

Esto provocó, que la planta de Córdoba se convirtiera en la única en elaborar este tipo de transformadores a nivel mundial. La calidad del trabajo desarrollado en Córdoba y la profesionalidad de sus trabajadores, produjo que el centro de Córdoba se hiciera cargo del mercado de transformadores acorazados por su dilatada experiencia. En el año 1999, el centro de Córdoba se convierte en "Centro de Excelencia" en la fabricación de transformadores Acorazados. A su vez, el cierre de la fábrica norteamericana de Muncie, hizo que en el año 2001 ABB Córdoba se convirtiera en la principal suministradora de transformadores acorazados a Estados Unidos.

En estos años, los transformadores se mueven en un rango de potencia de en-

tre 150-1000 MVA, y se producen unos 50 transformadores al año. Los clientes nacionales más destacados son Iberdrola, Endesa y Red Eléctrica Española (REE). Y las exportaciones tienen como principales destinos a EEUU o Sudamérica. La facturación de ABB Córdoba rondaba los 90-100 millones de euros, siendo esta un 18% del total de la facturación de ABB en España.

En el periodo 2000-2005, ABB realizó una inversión en torno a 12 millones de euros en Córdoba. Destinada, sobre todo, a la línea de transformadores acorazados y a la construcción de una nave de expediciones para el desmontaje de los transformadores previo a su traslado, que ahorraría tiempo en el proceso (Exp. SF/C-0281/03, 2003)

Hoy día el centro destaca por la producción de unos 60 transformadores de media al año, con un rango de producto de 200 hasta los 1.100 MVA a 525 kV. La facturación anual del centro es de unos 160 millones de euros y cuenta con alrededor de 400 trabajadores. ABB tiene una superficie total de unos 205.000 m², de los cuales 32.000 m² están dedicados a talleres y 5.100 m² a oficinas.

3. CONCLUSIONES

Tras las hipótesis iniciales, y referente al análisis de investigación desarrollado, podemos representar una recreación actualizada de todo el complejo fabril de transformadores, relacionando sus expedientes administrativos y licencias de actividades a lo largo de la historia basado en la necesidad operacional de la planta.

Tras analizar los ficheros históricos de la empresa, se puede afirmar que se han fabricado a lo largo de su historia en las distintas etapas reflejadas en este artículo del orden, de más de 3000 unidades que comprenden la evolución tecnológica de fabricación de los transformadores de Potencia en la planta de Córdoba.

Este artículo ha pretendido dar a conocer la relación respecto al análisis productivo de cómo se ha desarrollado a lo largo de los años el complejo fabril para adaptarse a un mercado competitivo y muy exigente.

A la vista de los resultados obtenidos, podemos comprobar las distintas fases y desarrollo que ha sufrido la planta para adaptarse a las mayores demandas tecnológicas para convertirse en un líder mundial en la fabricación de transformadores.

Por ello podemos representar un plano actualizado referenciando todos los expedientes y años constructivos del complejo.

PARA SABER MÁS

- [1] Sarmiento Martin, E. (1992): La electromecánica, una gran industria cordobesa (1917-1939), Córdoba.
- [2] Cano Sanchiz, J.M (2008): Arqueología industrial en Córdoba: La sociedad española de construcciones electromecánicas (Primera fase: 1917-1930). Anales de Arqueología Cordobesa 19, pp- 361-386
- [3] Expediente relativo al proyecto de urbanización de los terrenos lindantes con la Avenida de Medina Azahara propios de D. Diego Serrano Rodríguez. Año 1917
- [4] Expediente relativo a las obras solicitadas para Electro Mecánicas por D. Javier Vela. Año 1942
- [5] Expediente relativo a las obras de construcción de Nueva Planta de una nave solicitada por D. Dario de Carlos Bonaplata. Electro Mecánicas. Año 1956
- [6] Expediente relativo a las obras de reforma para instalar Economato solicitadas por D. Francisco Redondo Repulles. Año 1959
- [7] Expediente relativo a las obras de construcción de Nueva Planta de nave industrial solicitadas por D. José Cristóbal Sánchez Mayendia, como Director de Westinghouse, S.A. Año 1972
- [8] Expediente relativo a la petición de D. José Cristóbal Sánchez Mayendia, como Director de Westinghouse, S.A. para la desviación del Camino Viejo de Almodóvar, para ampliación de sus instalaciones industriales. Año 1972
- [9] Expediente relativo a las obras de construcción de Nueva Planta de Ampliación de la División de Transformadores de Potencia solicitadas por D. José Cristóbal Sánchez Mayendia, como Director de Westinghouse, S.A. Año 1972
- [10] Historia de 50 años Westinghouse. 190-1980.
- [11] Diario Córdoba. La fabricación de autogiros en Córdoba Miércoles 8 de Enero de 1986.
- [12] Grupo Cenemesa. Noticias nº5 Septiembre de 1987.
- [13] Diario ABC. La edad de oro del cobre Domingo 28 de Octubre de 2007.

AGRADECIMENTOS

La investigación expuesta en el presente artículo se ha realizado en el seno del Programa de Doctorado de Ingeniería Agraria, Alimentaria, forestal y de desarrollo rural sostenible para el grupo de Investigación en Diseño en la Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Córdoba.

Variación de la potencia en una microturbina hidráulica de flujo axial con respecto al número de álabes

Mechanical power variation in a hydraulic microturbine regarding the number of blades

Jorge A. Galindo-Luna¹, Juan C. García Castrejón¹, Laura L. Castro-Gómez¹, Gustavo Urquiza-Beltrán¹ y José M. Rodríguez-Lelis²

¹ Universidad Autónoma del Estado de Morelos (México)

² Centro Nacional de Investigación y Desarrollo (México)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8109>

1. INTRODUCCIÓN

La energía es una condición necesaria para el crecimiento de la economía, indispensable en la elaboración y uso de casi todos los bienes y servicios del mundo entero. En los primeros años del siglo XXI, los países alrededor del mundo estuvieron en la mira de nuevas energías y muchos de ellos en innovar la forma de generar energía. Las microturbinas hidráulicas son una opción para aprovechar los pequeños flujos de agua y las caídas de agua [1, 2] y generar energía [3]. Las Microturbinas hidráulicas son parte de un grupo de máquinas llamadas turbo-máquinas. Las turbomáquinas son dispositivos que transfieren energía, entre un fluido de trabajo y una parte mecánica en rotación. La parte rotatoria es un rodete o rotor con álabes. Dentro de este tipo de máquinas se encuentran los compresores, turbinas de gas, turbinas de vapor y turbinas hidráulicas. De acuerdo a la dirección del flujo, las turbomáquinas pueden ser clasificadas como máquinas de flujo axial (el flujo principal es paralelo al eje de rotación) o máquinas de flujo radial (el flujo principal es perpendicular el eje de rotación) [4].

En una turbina hidráulica, la energía cinética del fluido, generalmente agua, se transforma en energía mecánica en el rodete. En este grupo de máquinas, las hay de flujo radial como las turbinas Francis o de flujo axial como las turbinas Kaplan o Turbinas propela. Estas últimas pueden ser usadas en pequeñas caídas de agua [5], Si además se cuenta con un pequeño flujo de agua (en comparación con flujos para turbinas que generan MegaWatts) una microturbina es necesaria.

Actualmente se han realizado investigaciones experimentales para mejorar el desempeño de las microturbinas (1.75 m de caída de agua y un caudal de 75 l/s), algunas modificando el ángulo de los álabes [6]. En otra investigación experimental, se varió el ángulo de salida del álabes del rodete, encontrándose ángulos de salida donde la potencia y la eficiencia se afectan de manera positiva [7]. El número de álabes y su altura también ha sido motivo de investigaciones, reportando que la influencia del número de álabes es dominante en comparación a la altura del mismo, en particular se reportó que con mayor número de álabes para el rodete de este estudio, la eficiencia disminuye [8].

En este trabajo se realiza la investigación de una microturbina para determinar su desempeño en función del número de álabes en el rodete (6, 12, 14, 16 o 18 álabes). El diseño geométrico de la microturbina fue realizado utilizando el diseño de línea media de turbomáquina [9]. Este trabajo fue llevado a cabo usando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) la cual es una herramienta numérica para determinar el campo de flujo dentro del rodete con el cual se determinara el torque, la potencia y la eficiencia. El cómputo por CFD ha sido utilizado o recomendado para mejorar algunas microturbinas hidráulicas [10, 11, 12]. Se determinaron las curvas de potencia y eficiencia que están en función del número de álabes para el prototipo de microturbina que se propone. El rodete con 14 álabes produce más potencia que los otros rodetes evaluados.

2. ECUACIONES GOBERNANTES, CONDICIONES DE FRONTERA Y DISCRETIZACIÓN

Se consideró que el flujo en el interior de la microturbina es incompresible tridimensional e isotérmico a 25°C. El campo de flujo se determinó resolviendo numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas de Reynolds (RANS) Ec 1, 2, 3 [13].

Ecuación de la continuidad.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Ecuación de momento.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij}^{eff}) + \bar{G}_i \quad (2)$$

$$\tau_{ij}^{eff} = -\bar{p} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \quad (3)$$

El último término en la ecuación (3) es el tensor de esfuerzos de Reynolds que se modela por un modelo turbulencia. Para la turbulencia se tomó en consideración usar el modelo de turbulencia $k-\omega$, para lo cual se introducen dos nuevas variables dentro del sistema de ecuaciones.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + S_{ui} \quad (5)$$

Donde μ_{eff} es la viscosidad efectiva para la turbulencia y está definida por.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (6)$$

p' es la presión definida por.

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k + \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \quad (7)$$

El modelo $k-\omega$ asume que la viscosidad turbulenta está ligada a la energía cinética turbulenta y a la frecuencia turbulenta vía la relación:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (8)$$

Tanto k como ω se determinan con las ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta y la frecuencia turbulenta.

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta' \rho k \omega + P_{kb} \quad (9)$$

$$\frac{\partial (\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \omega \frac{\omega}{L} P_\omega - \beta \rho \omega^2 + P_{\omega b} \quad (10)$$

β' , α , β , σ_k , σ_ω y σ_ϵ son constantes y P_k es la tasa de producción de turbulencia debida a las fuerzas de viscosidad, el cual se modela de la siguiente manera:

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \left(3 \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \rho k \right) \quad (11)$$

Para flujos incompresibles ($\partial u_k / \partial x_k$) es muy pequeño y el segundo término a la derecha de la ecuación (9) no contribuye significativamente en la producción de turbulencia [14].

Condiciones de operación

Las condiciones de operación de la microturbina son como sigue: Carga (H) = 10 m, Velocidad de giro (N) = 1800 rpm, Diámetro de tubería (D)= 0.254 m, Densidad agua (ρ) = 998.2 kg/m³.

Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera para las diferentes zonas del modelo discretizado, se mencionan en la Tabla 1. Estas condiciones de frontera se utilizaron en cada una de las simulaciones realizadas.

Para llevar a cabo las simulaciones de la microturbina hidráulica se consideró una longitud en la sección de la tobera de 87 mm, la longitud del rodete de 85 mm, para ambas secciones un diámetro mayor (D_m) de 250 mm y un diámetro menor (D_m) de 110 mm. Para el rodete se realizaron geometrías con 6, 12, 14, 16 y 18 álabes, las cuales serán evaluadas usando el software CFX de ANSYS, el cual es una herramienta para analizar el comportamiento del fluido con lo cual se puede realizar el diseño de turbinas [15], además ha demostrado obtener resultados muy cercanos a los obtenidos de manera experimental [16, 17, 18, 19].

La discretización de la geometría de la tobera y del rodete fue realizada en ICEM-CFD. Se usó mallado libre, con elementos tetraédricos. Se realizaron varias mallas comenzando desde una burda (son pocos elementos) hasta llegar a una malla fina (muchos elementos), un ejemplo del discretizado de la geometría se muestra en el Fig. (1).

Análisis de independencia del tamaño de malla

Para la elección del tamaño de malla adecuado para los cálculos numéricos, se realizó un análisis de independencia del

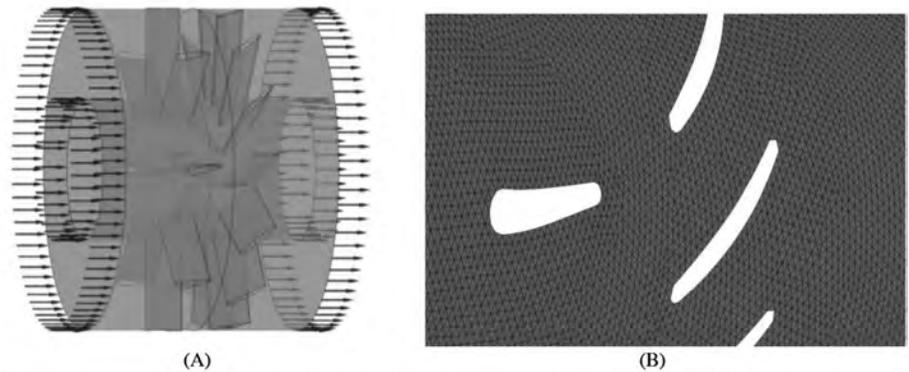


Figura 1: Geometría (A) y discretización de la microturbina con 8 álabes tobera y 14 álabes rodete (B)

tamaño de malla donde se utilizó el Índice de Convergencia de Malla (GCI por sus siglas en inglés) [20] para evaluar el porcentaje de error en la solución. Se calculó el GCI de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$GCI = \frac{3|\epsilon|}{r^P - 1} \tag{12}$$

- ϵ : diferencia relativa entre los resultados de una variable medida
- r : volumen promedio de los elementos de la malla
- P : es el orden del método usado, en este trabajo se utilizó el segundo orden

$$\epsilon = \frac{f_2 - f_1}{f_1} \tag{13}$$

- f_2 : torque de la malla gruesa
- f_1 : torque de la malla fina

$$r = \frac{h_2}{h_1} \tag{14}$$

- h_2 : volumen promedio de los elementos de la malla gruesa
- h_1 : volumen promedio de los elementos de la malla fina.

En la Tabla 2 se indica el número de elementos de cada geometría, la variable medida y el valor del GCI. De acuerdo a la teoría, para considerar que se cumple la independencia de malla usando el GCI, este valor debe ser menor del 10 % y en cada una de las geometrías esto se cumple, la nomenclatura corresponde a MT=

Micro-Turbina, 8T= 8 Álabes en la Tobera y 6R= 6 Álabes en el Rodete.

A partir de los resultados de las simulaciones numéricas se obtiene el Torque (consultar Tabla 2), con el cual se realizó el cálculo de la potencia hidráulica y eficiencia hidráulica.

$$P_h = (T_{TO} * \omega) \tag{15}$$

$$\eta_h = P_h / (\rho g H Q) \tag{16}$$

Donde P_h es la potencia hidráulica de la turbina sobre la flecha, ρ densidad, g gravedad, H es la carga y Q es el flujo volumétrico total, T_{TO} torque total de todos los álabes del rodete y ω velocidad angular de la turbina.

3. RESULTADOS

La potencia mecánica obtenida por CFD para los arreglos de la microturbina evaluada en este trabajo se muestra en el Fig. (2). La microturbina hidráulica es tipo propela con una sección de tobera

Geometría	Número de elementos	Torque (N/m)	GCI (%)
MT8T6R	6508790	140.045	2.48
MT8T12R	5824949	187.632	9.15
MT8T14R	7394176	187.904	6.93
MT8T16R	6463255	185.273	2
MT8T18R	6503599	175.331	2

Tabla 2: Valores del GCI para las geometrías evaluadas

	Tobera	Rodete
Fluido	Agua en estado líquido a 25° C.	
Tipo de movimiento	Estacionario	Rotacional
Álabe	Pared, no existe movimiento y la superficie es suave.	
Raíz del álabe		
Punta del álabe		
Entrada	Flujo másico: 550 kg/s total en la tobera. Intensidad turbulenta: 10%.	Interfase
Salida	Interfase	Presión calculada: 15 kPa. Intensidad turbulenta: 10%

Tabla 1: Condiciones asignadas en los cálculos numéricos

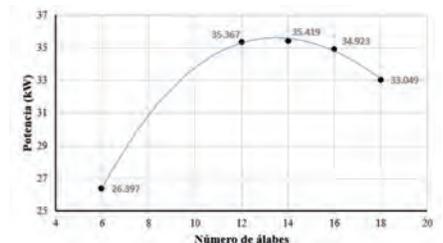


Figura 2: Valores de potencia hidráulica extraída del fluido para los arreglos evaluados

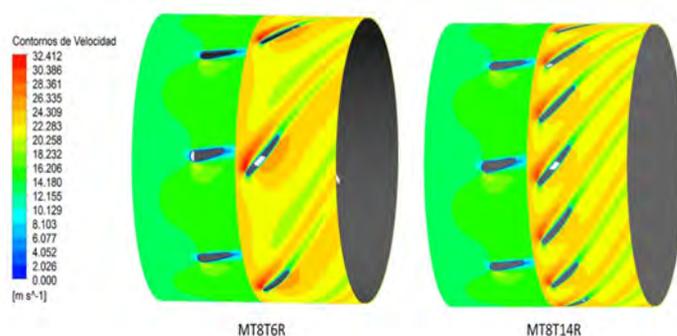


Figura 3: Corte meridional para contornos de velocidad absoluta (m/s) en la tobera y velocidad relativa (m/s) en el rodete a media altura del álabe

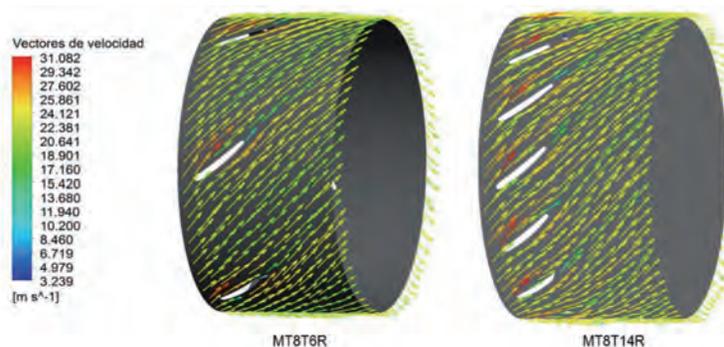


Figura 4: Vectores de velocidad relativa (m/s) en un plano circunferencial a media altura del álabe para MT8T6R y MT8T14R

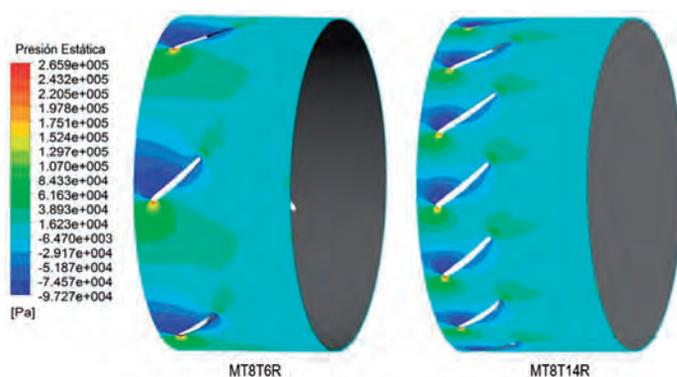


Figura 5: Contornos de presión estática (Pa) a media altura del álabe en el rodete, en un corte meridional

en la entrada. Cada una de las geometrías evaluadas cuentan con 8 álabes en la tobera y un número de álabes en el rodete (6, 12, 14, 16 y 18). Las microturbinas se nombraron como MT8T6R, MT8T12R, MT8T14R, MT8T16R y MT8T18R, donde 8T se refiere a 8 álabes en la tobera y el número de álabes es designado con el dígito antes de la letra B. La potencia mínima fue obtenida por la MT8T6R mientras que la potencia máxima de 35.419 kW se obtuvo con la MT8T14R.

En la Fig. (3) se presentan los contornos de velocidad para la MT8T6R (6 álabes) y la MT8T14R (14 álabes) en un plano circunferencial a media altura del álabe de la microturbina. La mínima potencia fue obtenida con la MT8T6R y en la Fig. (3), los contornos de velocidad muestran

zonas de baja velocidad (16-18 m/s) entre los álabes. En contraparte los contornos de velocidad para la MT8T14R (la cual tiene la máxima potencia) no presentan zonas con bajas velocidades entre los álabes.

Para la Fig. (4) se presentan los vectores de velocidad relativa para MT8T6R y MT8T14R. Los vectores de dirección coinciden con la pendiente de los álabes. Sin embargo, en el borde delantero del álabe la pendiente de los álabes necesita ser mejorada, porque hay ligeras discrepancias con la pendiente de los vectores de velocidad.

La representación de los contornos de presión son ilustrados en la Fig. (5) para la sección de rodete, mostrando que en la sección de los álabes existe una caída de presión, la cual se presenta mayormente

para la MT8T6R ya que en la zona de presión se presenta una presión estática de -10788 Pa. mientras que la MT8T14R solo se presenta hasta la parte media. Estos rangos de presión están presentes para cada uno de los álabes incluidos en ambas geometrías.

Los valores de la eficiencia hidráulica obtenidas por todas las microturbinas evaluadas son graficados en la Fig. (6). La MT8T14R tiene una eficiencia máxima de 65.05%, más sin embargo la MT8T12R y MT8T16R tienen valores de eficiencia cercanos a la MT8T14R.

4. DISCUSIÓN

Uno de los efectos provocados por la variación del número de álabes, es el incremento de la velocidad en cada uno de los canales de flujo, los contornos de velocidad en la Fig. (2) se obtuvieron para la geometría de 14 y 6 álabes, los cuales reportan la mayor y menor potencia y eficiencia respectivamente. De acuerdo a los contornos de velocidad, en la geometría MT8T14R, el fluido circula con mayor velocidad entre cada uno de los canales de flujo comparado con la geometría MT8T6R, lo cual es benéfico para el rodete provocando que aumente su rendimiento.

Los vectores de velocidad en el lado presión y succión del álabe (Fig. 4) muestran mayores incrementos de velocidad para la turbina MT8T14R, que para la MT8T6R.

La dirección del fluido en ambas microturbinas aún sigue la forma del álabe, esto puede apreciarse con los vectores de velocidad en la Fig. (4), los cuales también indican su magnitud, la dirección del flujo en ambos rodetes no cambia significativamente, lo cual muestra que variando el número de álabes en el rodete no se ve afectada la dirección del fluido.

La presión estática es una presión ejercida por el fluido independientemente de la velocidad y movimiento del mismo, los contornos de presión estática se tomaron a media altura de álabe como se ilustra en la Fig. (4), en la geometría MT8T14R esta variable es mayor que en la MT8T6R para el lado presión del álabe, y en la punta de entrada se presentan bajas presiones en la geometría MT8T6R, estas reducen el desempeño de la microturbina.

El aumento de la potencia referente al número de álabes presenta un comportamiento parabólico, lo cual indica que el diseño de la máquina y sus condiciones de operación llegan a utilizar la energía cinética del agua hasta un punto óptimo en base al número de álabes del rodete,

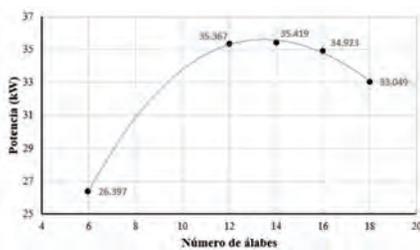


Figura 6: Valores de potencia hidráulica extraída del fluido para los arreglos evaluados

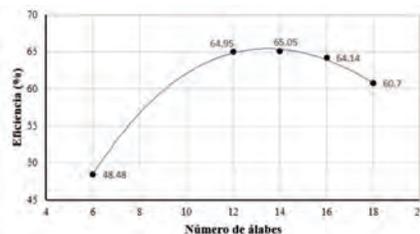


Figura 7: Eficiencia hidráulica calculada en cada una de las microturbinas hidráulicas investigadas

dando así una potencia de 35.419 kW. De acuerdo a la Fig. (2) el incremento y decremento en la potencia no es lineal.

Con un mayor número de álabes en el rodete, la cantidad de canales aumenta provocando que el fluido que circula por cada uno de ellos desarrolle mayor velocidad, sin embargo más canales en el rodete provocarían que el fluido sea cada vez más estrangulado causando que disminuya su desempeño, esto se puede apreciar en la Fig. (2 y 6) las cuales presentan la potencia y eficiencia hidráulica. Además se puede apreciar que los valores obtenidos para la microturbina con un rodete de 6 álabes presentan un desempeño muy inferior con respecto a la del rodete con 18 álabes tomando de referencia al rodete con 12 álabes.

Con el aumento del número de álabes en el rodete se impacta de manera significativa las partes móviles como rodamientos y los cojinetes entre otros, estas fuerzas causan fricción y pérdida de potencia.

De los valores obtenidos referentes a la eficiencia siguen una tendencia parabólica, indicando así un valor máximo de 65.05% referente a la microturbina de 14 álabes, sin embargo la microturbina con 12 álabes presenta una mínima diferencia del 0.01% de eficiencia, lo cual implicaría un par de álabes menos, menos peso y menos esfuerzos para las partes móviles lo cual es benéfico para el diseño.

5. CONCLUSIONES

Como muestran los resultados de CFD, la potencia de salida y la eficiencia son afectadas por el número de álabes, la máxima potencia (35.419 kW) y eficiencia

(65.05 %) fueron obtenidas con el prototipo de la microturbina hidráulica con 14 álabes en el rodete y 8 toberas a la entrada. El cómputo por CFD también muestra que con 16 y 18 álabes, la potencia y eficiencia decrecen, esto puede ser debido al incremento de la fricción en las paredes de los álabes.

Como muestran los vectores de velocidad, el ángulo a la entrada de los álabes podría modificarse para mejorar la potencia de salida y la eficiencia. Sin embargo, en este trabajo los ángulos de entrada del álabe son iguales a los ángulos de salida del álabe, esta característica hace fácil y barata la fabricación de los álabes del rodete.

PARA SABER MÁS

- [1] Alexander KV, Giddens EP, et al. "Axial-flow turbines for low head microhydro systems". *Renewable Energy*. Julio 2008. Vol. 34. p.35-47. (doi:10.1016/j.renene.2008.03.017).
- [2] Bilal Abdullah Nasir. "Design considerations of Micro-Hydro electrical power plant". *The international conference on technologies and materials for renewable energy, environment and sustainable, TMREES14*. Vol. 50. p19-29. (doi: 10.1016/j.egypro.2014.06.003).
- [3] Rombe Pasalli Y, Beni Rehiara A. "Design planning of Micro-hydro power plant in hink river". *4th International conference on sustainable future for human security, Sustain 2013*. Vol. 20. p55-63. (doi: 10.1016/j.proenv.2014.03.009).
- [4] Gorla R.S. R., Khan A.A. *Turbomachinery design and theory*. 10 edition. New York, 2003. 424p. ISBN: 0-8247-0980-2.
- [5] Polo E.M. *Turbomáquinas hidráulicas: Principios fundamentales*. 1 Edición, México, 1983. 259p. ISBN: 968-18-1564-5.
- [6] Punit Singh, Franz Nestmann. "Experimental optimization of a free vortex propeller runner for micro hydro application". *Experimental Thermal and Fluid Science*. Abril 2009. Vol. 33. p.991-1002. (doi:10.1016/j.expthermflusci.2009.04.007).
- [7] Punit Singh, Franz Nestmann. "Exit blade geometry and part-load performance of small axial flow propeller turbine: An experimental investigation". *Experimental Thermal and Fluid Science*. Enero 2010. Vol. 34. p.798-811. (doi:10.1016/j.expthermflusci.2010.01.009).
- [8] Punit Singh, Franz Nestmann. "Experimental investigation of the influence of blade height and blade number on the performance of low head axial flow turbines". *Renewable Energy*. Julio 2010. Vol. 36. p.272-281. (doi:10.1016/j.renene.2010.06.033).
- [9] JA Ariza-Espinoza. "Calculo de flujo en una microturbina hidráulica tipo Kaplan". Tesis Maestría. Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. 2012.
- [10] Ramos HM, Borga A., et al. "New design solution for low-power energy production in water pipe systems". *Water science and engineering*. Diciembre 2009. Vol. 2. p69-84. (doi:10.3882/j.issn.1674-2370.2009.04.007).
- [11] Samora I., Hasmatuchi V., et al. "Experimental characterization of a five blade tubular propeller turbine for pipe inline installation". *Renewable Energy*. April 2016. Vol. 95. p356-366. (doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.023)
- [12] Muis, Abdul, Sutikno Priyono, et al. "Design optimization of axial hydraulic turbine for very low head application". *Energy Procedia*,

2nd International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application, ICSEEA 2014. Abril 2015. Vol. 68. P263-273. (doi: 10.1016/j.egypro.2015.03.255).

- [13] Durbin P. A., Petterson Reif B.A. *Statistical Theory and Modeling for Turbulent Flows*, 2 edition, United Kingdom, 2010. 372p. ISBN :978-0-470-68931-8.
- [14] ANSYS CFX Solver Theory Guide, 2013.
- [15] Schleicher WC, Riglin JD, et al "Numerical characterization of a preliminary portable micro-hydrokinetic turbine rotor design". *Renewable Energy*. November 2014. Vol.76. p234-241. (doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.032).
- [16] Vishnu Prasad. "Numerical simulation for flow characteristics of axial flow hydraulic turbine runner". *2nd International Conference on Advances in Energy Engineering (ICAEE)*. 2011. Vol. 14. p2060-2065. (doi:10.1016/j.egypro.2011.12.1208).
- [17] Byung-Ha Kim, Joji Wata, et al. "Numerical and experimental studies on the PTO system of a novel floating wave energy converter". *Renewable Energy*. Diciembre 2014. Vol. 79. p111-121. (doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.029).
- [18] Nak Joong Lee, In Chul Kim. et al. "Performance study on a counter-rotating tidal current turbine by CFD and model experimentation". *Renewable Energy*. Diciembre 2014. Vol. 79. p122-126. (doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.022).
- [19] Nitin Kolekar, Arindam Banerjee. "Performance characterization and placement of a marine hydrokinetic turbine in a tidal channel under boundary proximity and blockage effects". *Applied Energy*. Marzo 2015. Vol. 148. p121-133. (doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.052).
- [20] Roache PJ. "Fundamentals of Computational Fluid Dynamics". Albuquerque, Nuevo México 1998. p.648. ISBN: 978-0913478097.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por su valioso apoyo al haber otorgado 2 becas: beca de doctorado y proyecto 206393 (apoyo complementario de adquisición de equipo científico).

Demanda potencial de mercancías en el corredor ferroviario transfronterizo extremeño

Freight potential demand of extremaduran cross-border rail corridor

Juan-Francisco Coloma-Miro y Marta García-García
Universidad de Extremadura (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8117>

INTRODUCCIÓN

La Red Transeuropea de Transporte (RTE-T) está compuesta por un conjunto de redes prioritarias de transporte que facilitan la comunicación de personas y mercancías a lo largo de toda la Unión Europea.

El eje 16 era un corredor ferroviario de mercancías de gran capacidad y altas prestaciones que estaba incluido desde 2003 en esta red: partía de los puertos de Sines y Algeciras, atravesaba la Península Ibérica y cruzaba el centro de los Pirineos por medio de un túnel de baja cota para llegar a París.

En diciembre de 2013 el Parlamento Europeo [1] establece un vuelco radical a los ejes prioritarios de la RTE-T reduciendo los 30 ejes iniciales a 9 para el período 2014-2020: una parte del eje 16, en concreto el corredor ferroviario de mercancías manchego-extremeño (Cofemanex), desaparece como eje de la Red Básica, pasando a pertenecer a la Red Global, de ejecución

no prevista hasta 2050.

Cofemanex forma parte de la línea de ferrocarril Madrid- Ciudad Real- Badajoz, tiene una longitud de 304 km y discurre de forma transversal (de este a oeste) por las comunidades de Castilla la Mancha (91 km) y Extremadura (213 km). Cofemanex se inicia en Puertollano (Castilla la Mancha) y finaliza en Badajoz (Extremadura) en la frontera con Portugal.

La reciente inauguración de las obras de ampliación del Canal de Panamá va a aumentar previsiblemente el tráfico de grandes buques mercantes que provienen de los principales puertos asiáticos, con lo que los puertos de Sines y Algeciras que sirven de entrada-salida a la península ibérica, ganarán mucho volumen de mercancías. Para poder garantizar el correcto traslado de los productos que parten del puerto de Sines hacia Europa será necesario que Extremadura posea una infraestructura ferroviaria de mercancías que permita la circulación de ferrocarriles de altas prestaciones, algo similar a lo descrito por Cano *et al* [2] para Valencia en el Corredor Mediterráneo.

En la Tabla 1 se desglosan las necesidades presupuestarias para la puesta en servicio (año 2017) del Cofemanex con sus instalaciones básicas logísticas y adicionalmente, para electrificar y dotar

al corredor de altas prestaciones durante sus 5 primeros años de explotación (2017-2021).

El objetivo de esta investigación ha sido determinar la demanda potencial de transporte de mercancías del Cofemanex para el año de su puesta en servicio (2017) y durante los 5 primeros de su explotación (2017-2021) para poder así justificar las inversiones de más de 240 M€ que son necesarios.

2. METODOLOGÍA SEGUIDA PARA LA OBTENCIÓN DE LA DEMANDA POTENCIAL DEL COFEMANEX

Para poder realizar una estimación adecuada de la demanda potencial del Cofemanex es necesario tener un conocimiento muy real y exhaustivo de las mercancías que se transportan en Extremadura, tanto por carretera como por ferrocarril. El año que se toma de referencia en este estudio es el 2014. La extrapolación de estas mercancías a los años de puesta en servicio del corredor (2017) y su explotación (2017-2021) se realiza a través de la correlación existente entre el PIB y el número de mercancías transportadas. Una vez conocidas las mercancías transportadas se deberán aplicar una serie de filtros (distintos entre el vagón convencional y el intermodal) para poder tener una estimación de los máximos captables por ferrocarril (escenario de máximos captables) [4].

Partiendo de la mercancía transportada por ferrocarril en 2014 y la estimación prevista sin trasvase carretera-ferrocarril (escenario tendencial) se crean dos subes-

COFEMANEX. INVERSIONES 1ª FASE. PERIODO 2014-2016. PUESTA EN SERVICIO 2017		
1	Renovación de vía	83.216.412,89 €
2	Señalización, instalaciones de seguridad y bloqueos de vía	18.200.000,00 €
3	Electrificación de la vía	20.372.330,60 €
4	Instalaciones logísticas. Plataforma Logística del Suroeste Europeo	24.950.000,00 €
5	Instalaciones logísticas. Conexiones ferroviarias Plataforma Logística Suroeste Europeo y Expacimérica	14.454.810,52 €
TOTAL INVERSION COFEMANEX. 1ª FASE		161.193.554,01 €
COFEMANEX. INVERSIONES 2ª FASE. EXPLOTACIÓN. PERIODO 2017-2021		
1	Adecuación de estructuras y electrificación de la vía	69.527.669,40 €
2	Adecuación de los PAET y 2ª Fase de las conexión ferroviaria Plataforma Logística y Expacimérica	10.010.000,00 €
TOTAL INVERSION COFEMANEX. 2ª FASE		79.537.669,40 €
TOTAL INVERSION COFEMANEX		240.731.223,41 €

Tabla 1: Inversiones necesarias para la puesta en servicio (2017) y explotación (2017-2021) del Cofemanex, Coloma[3]

cenarios intermedios de crecimiento (sub-escenario límite superior y sub-escenario límite inferior) que servirán de tránsito al escenario de máximos captables que según las previsiones del Ministerio de Fomento se obtendrá en 2020, pero que según esta investigación no se alcanzarán hasta el año 2025 en el Cofemanex.

El conocimiento de la evolución y previsiones de la demanda potencial del Cofemanex en el año de su puesta en servicio (2017) permitirá justificar la magnitud de las inversiones necesarias para su puesta en servicio y al final de su primera etapa de explotación (2017-2021) para las inversiones adicionales que lo convertirían en corredor ferroviario de altas prestaciones.

Es importante resaltar que para la el cálculo de la demanda potencial del Cofemanex se han tenido en cuenta las siguientes hipótesis:

- Tramo objeto de estudio Badajoz-Puertollano (Cofemanex) sea acondicionado y dedicado al transporte de mercancías según las actuaciones descritas en la Tabla 1.
- Puerto de Sines cumpla con sus expectativas de tráfico para 2016 de 1,7 Millones de TEUs [5]. El puerto de Sines espera incrementar un 28% su tráfico de contenedores gracias a la

puesta en marcha de la tercera esclusa del Canal de Panamá que permite el tránsito de los buques Post-Panamax (calado de 15 m).

- Se acondicione el tramo ferroviario de la red portuguesa Sines –Elvas previsto para finales del año 2019.

3. TRANSPORTE ACTUAL DE MERCANCÍAS EN EXTREMADURA

3.1. MODO CARRETERA

A través de la Encuesta Permanente del Transporte de Mercancías por Carretera (EPTMC) [6] se analiza el transporte interior total realizado por carretera en Extremadura en el año 2014, diferenciando aquellas mercancías que se consideran transportables en ferrocarril (bien en transporte intermodal mediante UTIs, o bien en vagón convencional) de aquellas que se han considerado no transportables en ferrocarril (animales vivos, determinadas cargas refrigeradas y congeladas, transportes militares, transacciones especiales, algunos artículos manufacturados y tractores, máquinas y aparatos agrícolas, y otros de menor significación). En la tabla 2 se incluyen las toneladas netas transportadas por carretera en Extrema-

adura según las distintas clases de mercancía y tipo de desplazamiento. Al total resultante de 33.661.354 t hay que añadirle el transporte internacional de 1.362.823 t por lo que se concluye que en el año 2014 en Extremadura se han movido un total de 35.024.177 t por carretera.

3.2. MODO FERROCARRIL

El transporte de mercancías en Extremadura se realiza exclusivamente por el corredor ferroviario manchego-extremeño (Cofemanex). En la tabla 3 se resume el volumen de mercancías con vagón convencional movido en el Cofemanex durante el año 2014.

El transporte intermodal del Cofemanex se gestiona a través de la estación logística de San Lázaro (Mérida) que en el año 2014 ha movido 187.200 t netas. El transporte de mercancías global que se realiza en el Cofemanex en el año 2014 ha sido la suma de las 360.776 t del vagón convencional y las 187.200 t del vagón intermodal, es decir, 547.976 t netas.

4. METODOLOGÍA DEL MODELO DE REDISTRIBUCIÓN MODAL

Para poder determinar los escenarios de transferencia potencial entre la carre-

Comunidad Autónoma y tipo de desplazamiento	TOTAL (miles de t)	Productos agrícolas y animales vivos	Productos alimenticios y forrajes	Combustibles minerales sólidos	Productos petrolíferos	Minerales y residuos para refundición
Extremadura						
Total transportado (a+b+c+d)	33.661	6.052	6.476	13	1.373	815
Total de origen (a+b+c)	26.739	5.091	4.136	13	1.094	642
Total de destino (a+b+d)	27.992	4.586	4.769	.	1.359	711
Intramunicipal (a)	7.595	831	688	.	147	487
Intermunicipal intrarregional (b)	13.475	2.794	1.742	.	932	51
Interregional (c+d)	12.592	2.427	4.046	13	293	278
Expedido (c)	5.670	1.466	1.706	13	14	105
Recibido (d)	6.922	961	2.340	.	279	173

Productos metalúrgicos	Minerales y materiales para construcción	Abonos	Productos químicos	Máquinas, vehículos, objetos manufacturados	Comunidad Autónoma y tipo de desplazamiento
					Extremadura
945	13.686	648	561	3.093	Total transportado (a+b+c+d)
782	12.545	278	207	1.952	Total de origen (a+b+c)
269	13.151	631	387	2.129	Total de destino (a+b+d)
7	5.198	47	3	188	Intramunicipal (a)
99	6.812	214	30	800	Intermunicipal intrarregional (b)
839	1.676	386	528	2.105	Interregional (c+d)
675	535	17	174	964	Expedido (c)
163	1.141	370	355	1.141	Recibido (d)

Tabla 2: Toneladas netas transportadas (miles de t) por carretera en Extremadura según la clase de mercancía transportada y tipo de desplazamiento. Año 2014[6]

Tipo de Trafico	Circulaciones semanales	Días de Explotación	Toneladas/año
Trafico de carbón	10	520	189.280
Tráfico de amoniaco	3	156	75.816
Tráfico de coque	2	104	40.560
Tráfico de cereal	1	52	26.000
Tráfico de chatarra	1	52	29.120
TOTAL			360.776

Tabla 3: Carga Origen/Destino Extremadura en el Cofemanex. Vagón convencional. Año 2014

tera y el ferrocarril se analizan datos de demanda referentes al año 2014 de estos dos modos de transporte tanto en el ámbito regional como el nacional e internacional. En relación al ferrocarril, se aplica la metodología de los modelos de redistribución modal sobre los datos relativos al transporte ferroviario de mercancías tanto en la técnica de vagón convencional, como de transporte intermodal ferroviario. Hay que tener en cuenta que el presente estudio se realiza para un grupo de mercancías, que se entiende que son las más susceptibles de ser captadas por el ferrocarril. Para ello, se ha homogeneizado la estructura de las bases de datos utilizadas [6], [7] y [8] para que las comparaciones sean lo más reales posibles. Con el fin de conocer cuáles son los posibles tráficos captables por el ferrocarril se ha realizado un proceso de aplicación de "filtros", en cada una de las técnicas de transporte ferroviario, los cuales consiguen minorar los volúmenes de mercancías en función de diversos parámetros considerados como necesarios para que el trasvase se lleve a cabo [4] y [9].

Los filtros se diferencian según el ámbito geográfico y la técnica de transporte ferroviario en:

- Transporte en vagón convencional y ámbito nacional
- Transporte intermodal en ámbito nacional e internacional.

Para la técnica del vagón convencional los filtros aplicados han sido:

- Filtro nº1. Tipo de mercancía. Para vagón convencional las mercancías seleccionadas como trasvasables son los abonos, autos y piezas, butano, cemento, cenizas, cereales, combustibles líquidos, combustibles minerales, maderas, materiales de construcción, papel, piedras y tierras, productos químicos, productos siderúrgicos, remolacha y sal.
- Filtro nº2. Volumen de la operación. Solo se tendrán en cuenta las relaciones de tráficos cuyo peso transportado en la operación supere las 24 t/envío reduciéndose a 12 t/envío

en el transporte de autos y piezas para tener en cuenta su baja densidad.

- Filtro nº3. Distancia recorrido. La longitud de recorrido debe superar los 150 km. En el caso de los combustibles minerales la distancia se reduce a 50 km.
- Filtro nº4. Volumen anual transportado. Solo se tendrán en cuenta relaciones de tráfico cuyos volúmenes de mercancía superen las 90.000 t/año en mercancías de cereales, remolacha, cementos, materiales de construcción, productos siderúrgicos, combustibles líquidos, papel, piedras y tierras. En el resto de productos el criterio se reduce a 30.000 t.
- Filtro nº5. Exclusión por relación de distancia entre ferrocarril y carretera. No se tiene en cuenta la transferencia en relaciones de tráficos donde la distancia del ferrocarril es 1,5 veces la distancia recorrida por carretera.

Para el vagón intermodal la técnica de filtros se hace de forma diferente. Por un lado la tipología de mercancía transportable es más amplia y por otro se considera el incremento de captación producido con el aumento de la distancia transportada. La relación de filtros aplicada para el vagón intermodal ha sido:

- Filtro nº 1. Tipo de mercancía. La selección de mercancías potencialmente trasvasables han sido: cereales, patatas, autos y piezas, materiales textiles, tabaco, papel, Aceites, maderas, sal, remolacha, materiales de construcción, animales y despojos: pieles, caucho, no comestibles, productos químicos, bebidas, máquinas y objetos manufacturados, frutas y alimentos perecederos, envases vacíos y cristalería.
- Filtro nº 2. División por distancia. Se ha tenido en cuenta la distancia de recorrido ya que la captación de tráfico varía en función de la distancia. La clasificación por distancia reali-

zada ha sido:

- Corta distancia: Distancias menores a 300 km
- Media distancia: Distancias comprendidas entre 300 km y 600 km
- Larga distancia: distancias mayores a 600 km
- Filtro nº 3. Porcentaje de captación. Tras realizar el primer filtro y clasificar las distancias, se procede a la hipótesis de unos porcentajes de captación sobre el volumen total de tráfico. Este porcentaje se considera creciente, a medida que la distancia aumenta:
 - Corta distancia: 10%
 - Media distancia: 20%
 - Larga distancia: 30%
- Filtro nº 4. Volumen mínimo por relación. Se han tenido en cuenta las relaciones "origen- destino" y "destino- origen": A-B, B-A
 - Corta distancia: se consideran las relaciones tanto en sentido A-B, como B-A, en donde el volumen transportado supere las 230.000 t/ año.
 - Media distancia: Se consideran las relaciones en sentido A-B, y B-A en donde el volumen anual transportado ascienda a 115.000 t.
 - Larga distancia: En el caso de larga distancia, las toneladas anuales transportadas en ambos sentidos (A-B, B-A) han de superar las 77.000 t. (Con un 30% de captación se alcanzarían las 23.000 t/año).
- Filtro nº 5. Selección de volumen. El volumen potencialmente captable por el ferrocarril que se ha tenido en cuenta para cada relación ha sido el más bajo de entre las relaciones origen / destino para así evitar descompensaciones de tráfico en ambos sentidos.
- Filtro nº 6. Exclusión por relación de distancia entre ferrocarril y carretera. Se han eliminado las relaciones

donde el trayecto realizado por el ferrocarril sea superior a 1,5 veces la longitud de recorrido por carretera.

5. TRASVASE MODAL CARRETERA-FERROCARRIL

Conocida la situación del transporte de mercancías en el Cofemanex para el año 2014 y la metodología de filtros seguida para el estudio de la redistribución modal, el siguiente paso es describir los diversos escenarios básicos de transferencia modal entre la carretera y el ferrocarril y/o la cadena intermodal de transporte terrestre (carretera/ferrocarril). Se definen dos escenarios básicos (tendencial y máximos captables) en función de unas características determinadas, los cuales delimitan los extremos de distribución modal de tráficos. Para obtener un conocimiento más amplio de la redistribución modal de tráficos, y como transición necesaria entre los dos escenarios principales, se consideran dos sub-escenarios intermedios que se han denominado sub-escenarios límite inferior y superior bajo dos hipótesis diferentes de captación de tráficos potencialmente transferibles de la carretera, lo cual genera una horquilla entre una captación más baja y otra de mayor volumen.

5.1. ESCENARIO TENDENCIAL

Este escenario se basa en la continuidad de los comportamientos de la demanda de transporte en los últimos años que ha generado el actual reparto modal de tráficos. Los criterios básicos para la definición de este son:

- Mantenimiento de las tasas de crecimiento medio anuales de los tráficos ferroviarios mediante el análisis de las series estadísticas de tráficos de las empresas de ferrocarril de mercancías.
- Análisis del crecimiento futuro de la movilidad de mercancías en función del Producto Interior Bruto (PIB) y del transporte de mercancías en Extremadura.

5.2. ESCENARIO DE MÁXIMOS CAPTABLES

Este escenario refleja, a través de la metodología basada en la imposición de

criterios de selección de tráficos (en base a los filtros de corte anteriormente descritos), las mercancías transportadas por el modo carretera que podrían ser susceptibles de ser trasvasadas al modo ferroviario. Los criterios básicos para la definición de éste se explican a continuación:

- Tráficos en el año de estudio (2014) que podrían ser susceptibles de transferencia modal.
- Tasas de crecimiento anuales estimadas mediante una proyección de la demanda en función del PIB y del transporte de mercancías en Extremadura.

En este escenario se estima que el 90% del volumen de las relaciones de las mercancías consideradas como captables en el escenario de máximos, son realmente transferibles al modo ferroviario en la técnica intermodal, mientras que en la técnica de vagón convencional, este porcentaje se reduce al 75% por razones de accesibilidad y especialización.

5.3. SUB-ESCENARIO LÍMITE SUPERIOR

Este escenario se fundamenta en la hipótesis básica de que el 70% del volumen de las relaciones de las mercancías consideradas como captables en el escenario de máximos, son realmente transferibles al modo ferroviario en la técnica intermodal, mientras que en la técnica de vagón convencional, este porcentaje se reduce al 50% (por razones de accesibilidad y especialización), de manera que existe un porcentaje de las mismas que por determinadas condiciones y circunstancias no harían factible dicho trasvase. Estas circunstancias pueden ser de ámbito infraestructural, de accesibilidad a la red ferroviaria, de ámbito geográfico o de otro tipo de factor cualitativo no contemplado en los requisitos mínimos establecidos en los filtros de la metodología aplicada, ya que éstos se basan en factores cuantitativos.

5.4. SUB-ESCENARIO LÍMITE INFERIOR

Este escenario se fundamenta en la hipótesis básica de que únicamente el 40% del volumen de las relaciones de las mercancías consideradas como captables,

son realmente transferibles al modo ferroviario en la técnica intermodal, mientras que en la técnica de vagón convencional, este porcentaje se reduce al 25%, de manera que existe un elevado volumen de las mismas que por determinadas condiciones y circunstancias no harían factible dicho trasvase. Al igual que en el Sub-Escenario anterior, los factores limitantes en los flujos que determinan que el 60% de las mercancías no se consideren captables, depende de factores como el emplazamiento de las mercancías, las instalaciones de los centros generadores o atractores de cargas, la citada accesibilidad ferroviaria, y de otros factores de entidad cualitativa que dificultan el acceso de las mercancías a la red ferroviaria.

A modo de resumen, los escenarios básicos de transferencia modal entre la carretera y el ferrocarril y/o la cadena intermodal de transporte terrestre (carretera/ferrocarril) han sido:

- Escenario Tendencial. Crecimiento en base a la tendencia histórica.
- Sub-Escenario límite inferior. 40% en vagón intermodal y 25 % en vagón convencional de captación de los tráficos potenciales.
- Sub-Escenario límite superior. 70% en vagón intermodal y 50 % en vagón convencional de captación de los tráficos potenciales.
- Escenario de máximos captables. 90% en vagón intermodal y 75 % en vagón convencional de captación de los tráficos potenciales.

6. PROGNOSIS DE TRÁFICOS. DEMANDA FUTURA

El estudio de los distintos escenarios de captación pretende establecer cuál puede ser la evolución de la demanda de transporte de mercancías, y cuáles pueden ser los efectos de dicha evolución sobre la transferencia modal. Para el análisis de la situación futura del transporte de mercancías en el Cofemanex y el establecimiento de los distintos escenarios se han utilizado dos criterios:

- Estimación Tendencial de la demanda de transporte en base a los datos de 2014 y a los crecimientos históricos.

TONELADAS NETAS TRANSPORTADAS	2017	2018	2019	2020	2021
Origen-Destino (O/D) en Extremadura	1.163.940	1.190.711	1.220.478	1.263.195	1.326.355
Operaciones en tránsito (O/D fuera de Extremadura)	1.225.588	1.253.776	1.931.745	1.999.356	2.099.324
Total	2.389.528	2.444.487	3.152.223	3.262.551	3.425.679

Tabla 4: Prognosis de la demanda del Cofemanex (2017-2021)

- Formulación de distintos escenarios de crecimiento del mercado del transporte para los distintos modos. Para el cálculo de la movilidad futura de las mercancías en el ámbito regional se relaciona el crecimiento de la movilidad de la carretera (modo del que se deducen las transferencias modales al ferrocarril) en función de la evolución del PIB regional, por ser una variable macroeconómica que alcanza altas correlaciones con dicha movilidad. Los coeficientes necesarios para realizar un pronóstico sobre la evolución del volumen de tráfico de 2017 hasta 2021 se obtienen a través de una regresión lineal que toma como variable independiente la variación del PIB real y como variable dependiente el volumen de tráfico regional de mercancías por carretera en toneladas-kilómetro según datos de la EPTMC para el periodo 2010-

2014. Los datos utilizados como variable independiente se refiere a la serie histórica del PIB real del INE, de 2010 hasta 2014 [10]. Las previsiones del PIB son las estimadas por la consultora de Analistas Financieros Internacionales (AFI) [11].

Con este procedimiento se han considerado unos crecimientos anuales de mercancías en el corredor para el escenario tendencial de:

- Año 1 (2017): 2,0% de crecimiento interanual
- Año 2 (2018): 2,3%
- Año 3 (2019): 2,5%
- Año 4 (2020): 3,5%
- Año 5 (2021): 5%

Aparte del proceso descrito anteriormente, es necesario recordar que para el año de la puesta en servicio del Cofemanex (2017) se han tenido en cuenta las siguientes hipótesis:

- Cofemanex sea acondicionado y dedicado al transporte de mercancías, según las actuaciones descritas en la tabla 1.
- La red ferroviaria Portuguesa en el tramo Sines-Badajoz sea acondicionada para el transporte de mercancías, (año 2019).
- El puerto de Sines cumpla con sus previsiones de tráfico, (1,7 MTEUs en 2016). Según Franco [12], se espera que el puerto de Sines en el año 2019 gestione 25.000.000 t y con la mejora de la infraestructura férrea, un 2,86 % sea transportado a través del Cofemanex para atravesar la península ibérica.

A continuación, se realiza una síntesis de los escenarios calculados a nivel regional en el modelo de redistribución modal de manera que se fija una evolución en los mismos de una forma progresiva. Se han elaborado las evoluciones de los tráficos en base a una horquilla de aproximación, de manera que hasta el año 2025 la evolución no se espera que se adapte completamente a ningún escenario en concreto sino que se sitúe entre diversos valores de estimación. Esta horquilla de aproximación queda delimitada en la parte superior por un crecimiento de los tráficos captables por el ferrocarril más rápidos que en la parte inferior. La evolución y el paso de un escenario a otro se representan en la Fig. 1.

La Tabla 4 contiene el resultado de la prognosis de la demanda de mercancías en el Cofemanex para los años de puesta en servicio (2017) y 5 primeros años de explotación (2017-2021).

Como se puede observar en la tabla 4, en la prognosis de la demanda se producen dos saltos destacados en los años 2017 y 2019. El incremento del año 2017 sobre la demanda actual se debe a las mejoras planteadas en el Cofemanex. El salto producido en el año 2019 se debe a la entrada en funcionamiento de la línea de altas prestaciones mixta del corredor portugués, lo cual, facilitará la entrada/salida de mercancía procedente del puerto de Sines.

En la Tabla 5 se muestra para el año de referencia 2019, el reparto porcentual de los distintos modos. Se pueden distinguir tres tipos:

- Ferrocarril. Mercancía ferroviaria.
- Carretera. Mercancía captada del modo carretera.
- Ferrocarril Sines. Mercancía adicional proveniente del Puerto a través de la línea Sines-Caia-Badajoz.

De la Tabla 5 se puede concluir que la mayor parte del tráfico ferroviario espera-

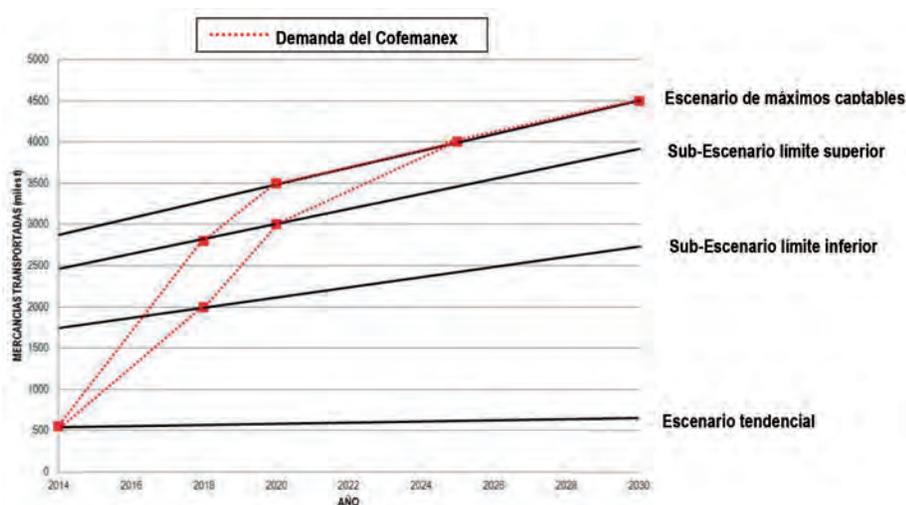


Fig. 1: Escenarios de demanda. Evolución de la demanda de transporte del Cofemanex

	MODO	Toneladas transportadas	%
O/D Extremadura	Ferrocarril	391.656	32
	Carretera	828.822	68
	Subtotal	1.220.478	
Tránsito	Ferrocarril	203.222	10
	Carretera	1.013.778	53
	Ferrocarril Sines	714.745	37
	Subtotal	1.931.745	
Total	Ferrocarril	594.878	19
	Carretera	1.842.600	59
	Ferrocarril Sines	714.745	22
	Total	3.152.223	

Tabla 5: Distribución modal de la Prognosis de Demanda. Año 2019

do en 2019 va a ser debido al tránsito de carretera a ferrocarril. De las 3.152.223 t previstas para ese año, 1.842.600 t proceden del tránsito de la carretera es decir un 59%. En el año 2014 en Extremadura se movieron por carretera 35.024.177 t por tanto, si no se le añade el incremento esperado para el año 2019, esto supondrá un 5,26 % del volumen total movido.

7. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

El estudio de la demanda potencial del transporte de mercancías en la construcción de un corredor ferroviario de altas prestaciones es fundamental para poder justificar las inversiones que son necesarias en su construcción y puesta en servicio. En esta investigación se describe la metodología seguida para cuantificar la demanda potencial de transporte de mercancías que conllevaría la puesta en servicio de un corredor de mercancías de altas prestaciones en Extremadura, aplicando una serie de filtros de vagón convencional e intermodal y añadiendo el efecto de la conexión férrea de mercancías transfronteriza Sines-Badajoz prevista para 2019.

Los estudios de transporte de mercancías realizados en esta investigación para el Cofemanex estiman que las mercancías captables por el corredor en el periodo 2017-2021 tendrán dos saltos destacados: en el año 2017 debido a la puesta en servicio del Cofemanex y en 2019, por la entrada en funcionamiento de la línea de altas prestaciones mixta del corredor portugués Sines-Caia-Badajoz.

Las 547.976 t netas transportadas en 2014 por ferrocarril ascenderán a 2.389.528 t en el año 2017 y a 3.152.223 t en el año 2019. Además los estudios estiman que la mayor parte del tráfico ferroviario esperado en 2019 va a ser debido al tránsito de carretera a ferrocarril. De las 3.152.223 t netas previstas para ese año, 1.842.600 t proceden del tránsito de la carretera es decir un 59%. En el año 2014 en Extremadura se han movido por carretera 35.024.177 t, por tanto, si no se le añade el incremento esperado para el año 2019, esto supondrá un 5,26 % del volumen total movido.

Los estudios del Ministerio de Fomento [4] marcan como captables un 15% de las mercancías que se transportan actualmente por carretera para el vagón convencional y un 11% para el vagón plataforma (intermodal). Por otro lado la prognosis de crecimiento prevista para el año 2020 según estos estudios, marcan escenarios de tránsito de la carretera al ferrocarril de 8,03% mínimo y de 10,33 % máximo. Por tanto el 5,26% estimado en el Cofemanex, refleja

que la prognosis de mercancías realizada es más conservadora que la llevada a cabo por el Ministerio de Fomento. Esto significa que para el año 2019 pudiera existir un volumen mayor de mercancías en el Cofemanex, lo que aumentaría aún más la necesidad de su puesta en servicio.

Es necesario resaltar que actualmente se encuentra en construcción la línea mixta de altas prestaciones (LAP) Madrid-Badajoz por Cáceres. Una vez que se ponga en servicio será otra línea complementaria de mercancías que hará que el transporte de mercancías por ferrocarril pueda acercarse al escenario de máximos captables. Por tanto caso de que el volumen de mercancías aumente y Cofemanex experimente un crecimiento superior o se alcance el escenario de máximos captables, podría utilizarse la LAP mixta Madrid-Badajoz para transporte de mercancías, una vez completado el necesario enlace ferroviario con la línea convencional Madrid-Aranjuez-Alcázar.

Por último indicar que otra forma de incrementar el transporte de mercancías por ferrocarril en Extremadura sería mejorando la interconexión con el puerto de Huelva, por lo que también debería ser prioritaria la mejora de las infraestructuras de la línea de Badajoz a Huelva (electrificación, pendientes, estructuras), como así se reconoce en el reciente Pacto por el Ferrocarril firmado entre la Junta de Extremadura y los Agentes Sociales [13]. De esta forma podrían añadirse a Cofemanex, mercancías procedentes del puerto de Huelva que podría utilizar la conexión Madrid-Ciudad Real.

PARA SABER MÁS

- [1] Unión Europea. Reglamento (UE) N° 1316/2013 del Parlamento Europeo y del Consejo de 11 de diciembre de 2013 por el que se crea el Mecanismo «Conectar Europa». *Diario Oficial de la Unión Europea*, 20 de diciembre de 2013, núm. 348, p.129.
- [2] Cano-Hurtado, J; Martínez-Perez, F; Blasco-Sánchez, M; Escoms-Martínez, A. (0). *The mediterranean rail corridor as an opportunity. Analysis and outlook of the soil for economic activities in the valencia province. Dyna, Dyna-acelerado(0)*. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7884>
- [3] Coloma, J.F. "Programación de la inversión". *Aspectos ingenieriles y técnicos de la construcción de la línea ferroviaria de mercancías de altas prestaciones en Extremadura y su efecto en la competitividad económica extremeña*. Tesis Doctoral. Director Díaz-Parralejo A. Universidad de Extremadura. Departamento de Ingeniería Mecánica, Energética y de los Materiales. 2015, Cáceres (España), pp. 783-791. DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.4767.6241>
- [4] Ministerio de Fomento. *Plan Estratégico para el impulso del Transporte Ferroviario de Mercancías en España*. Madrid (España), 2010.
- [5] Administração dos Portos de Sines e do Algarve S.A. Evolución de las mercancías movidas en el Puerto de Sines. Disponible en <http://www.apsinesalgarve.pt/es/estad%C3%ADsticas/mercanc%C3%ADas/>. Consulta 20/07/2016. Sines. (Portugal).

- [6] Ministerio de Fomento. *Encuesta permanente del transporte de mercancías por carretera*. Madrid (España), 2014.
- [7] Ministerio de Fomento. *Observatorio Transfronterizo España-Portugal*. Madrid (España), 2014.
- [8] Ministerio de Fomento. *Observatorio del ferrocarril en España*. Madrid (España), 2014.
- [9] Ministerio de Fomento. *Análisis, información y divulgación sobre la aportación del transporte por carretera a la intermodalidad*. Madrid. Disponible en http://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/TRANSPORTE_TERRESTRE/TRANSPORTE_INTERMODAL/. Consulta 20/07/2016. Madrid. España.
- [10] Instituto Nacional de Estadística (INE). *Contabilidad regional 2010-2014*. Madrid (España), 2015.
- [11] Analistas Financieros Internacionales (AFI). *Previsiones económicas*. Disponible en <https://www.afi.es/webAfi/secciones/1372597/Previsiones-economicas-Afi.html>. Consulta 21/07/2016. Madrid. España.
- [12] Franco, J. "El Puerto de Sines". En: *Actas del Curso Internacional de Verano Summex 2014 Infraestructura del transporte intermodal en Extremadura y la relación comercial con Portugal a través del puerto de Sines*. Universidad de Extremadura. Julio, 2014. España. Disponible en http://campusvirtual.unex.es/zonauex/evuex/pluginfile.php/469329/mod_resource/content/1/PuertodeSines_UniversidadExtremadura_2014-07-09_vfinal.pdf. Consulta 21/07/2016. Cáceres. España.
- [13] Junta de Extremadura, CC.OO Extremadura, CREEX, UGT-Extremadura. *Pacto social y político por el ferrocarril en Extremadura*. Badajoz (España), 2016. Disponible en http://www.extremadura.ccoo.es/comunes/recursos/10/doc276162_Pacto_Politico_y_Social_por_el_Ferrocarril_en_Extremadura.pdf

AGRADECIMIENTOS

Este artículo ha sido fruto del Convenio de Colaboración entre la Consejería de Fomento de la Junta de Extremadura y la Universidad de Extremadura para "el desarrollo de un Proyecto de Investigación sobre la adaptación de la línea ferroviaria existente, Ciudad Real-Badajoz, en su trazado extremeño, a una línea de mercancías de altas prestaciones en Extremadura y el análisis de los efectos ambientales y socioeconómicos en la región extremeña". También es necesario agradecer el trabajo y asesoría de Dr. Eladio Pascual Pedreño y la empresa española Consultrans, S.A.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/8117-1.pdf



Relación entre la crisis de la construcción y la accidentalidad de las obras en España (período 2002–2015)

The relationship between the construction sector crisis and their accident rates in Spain (period 2002–2015)

■■■■
José-Francisco Muñoz-Villalba¹, Iván Lidón²,
Rubén Rebollar²

¹ IDOM (España)

² Universidad de Zaragoza (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8210>

1. INTRODUCCIÓN

La importancia de los accidentes laborales en el sector de la construcción se ve reflejada en los numerosos artículos y publicaciones que han aparecido en la literatura en los últimos años. Se pueden encontrar estudios sobre cómo han evolucionado en el tiempo las causas de los accidentes [1], sobre la formación en materia de seguridad y la importancia que se le da a la seguridad durante las fases de diseño y ejecución del proyecto [2], sobre la percepción de los riesgos y la seguridad por parte de los trabajadores de la construcción [3], sobre las causas raíz de los accidentes [4], sobre la importante repercusión económica que los accidentes laborales tienen en los proyectos [5] o sobre los costes de prevención en la construcción [6]. También hay otros que analizan técnicas actuales de evaluación de riesgos y su incapacidad para ajustarse a las necesidades de seguridad en la construcción [7], otros que tienen que ver con mejoras de los estándares y normas de seguridad [8] dando más importancia a la fase de diseño, más protagonismo al cliente y fortaleciendo la cultura preventiva e incluso se pueden encontrar modelos matemáticos [9] con algoritmos para la clasificación de los accidentes más típicos en el sector de la construcción. Los estudios más avanzados llegan a proponer herramientas predictivas de accidentes [10].

En España, aproximadamente desde el año 1985, la industria de la construcción experimentó un notable crecimiento hasta el punto de que, en los primeros años del siglo XXI, la construcción era la locomotora económica estructural. Pero antes de acabar el primer decenio

del siglo actual, una serie de indicadores económicos (escasez de créditos, quiebra de empresas promotoras y constructoras, caída del precio de la vivienda, etc.) evidenciaron el rápido deterioro de la industria de la construcción en España, sin olvidar que aquellos acontecimientos estaban ocurriendo en el contexto de una crisis económica mundial. Es por ello que los conceptos "crisis económica" y "sector de la construcción" casi siempre han ido de la mano en los últimos años, ya que es comúnmente aceptado que el sector de la construcción ha sido uno de los sectores más castigados por la actual crisis. Y a la vez hay quien piensa que el sector de la construcción no solo es un sujeto pasivo de la crisis sino que es uno de los desencadenantes de la misma.

La relación crisis-construcción ha dado pie a muchos artículos de prensa, tertulias de radio y televisión, libros, y otros debates en diversos foros, ya que tiene una gran repercusión en la vida de los españoles: hipotecas, precios de la vivienda, paro, inversiones y otros muchos aspectos que afectan en la economía de las personas. Sin embargo, no se ha hablado tanto de la relación en cifras que hay entre la crisis de la construcción y la accidentalidad de las obras.

En lo referente a seguridad y salud laboral, el sector de la construcción ha sido tradicionalmente uno de los que peores cifras ha presentado, tanto en cifras absolutas como en índices de siniestralidad. Durante muchos años las estadísticas han mostrado que de cada tres trabajadores que mueren en el trabajo en España en todos los sectores de la economía, uno fallece en la construcción.

En declaraciones de prensa de la época se pueden leer interpretaciones contrapuestas de la evolución de la siniestralidad en España, como las que venían del Gobierno, de los sindicatos o de otras instituciones. Para ayudar a salvar discrepancias como las anteriores, en este trabajo se resumen algunos datos so-

cioeconómicos y de accidentalidad en la construcción, así como su evolución en el tiempo en los últimos años (período 2002–2015), con el objeto de establecer la relación entre ellos mediante un análisis objetivo, y plantear un escenario de accidentalidad actual en un momento en que los indicadores socioeconómicos parece que marcan un cambio de tendencia.

2. FUENTES DE DATOS

Para interpretar el significado de la evolución de la siniestralidad laboral es importante considerar cuáles son las características del entorno económico y laboral. El período analizado es el comprendido entre el año 2002 y año 2015.

De los numerosos indicadores socioeconómicos que manejan los ministerios, bancos y otras instituciones, para este trabajo se han considerado unos indicadores de carácter general (producto interior bruto y personas ocupadas), así como otros relacionados más directamente con el sector de la construcción (personas ocupadas en el sector de la construcción y producción interna de construcción). De entre todos aquellos indicadores que suelen aparecer en informes de la situación socioeconómica de un país o del sector de la construcción, los autores se han basado en su propia experiencia para la selección de aquellos que, en su opinión, reflejan de una manera más directa y sencilla dicha situación.

Estos datos se han obtenido de las siguientes fuentes:

- *Producto Interior Bruto* a precios de mercado (PIB): PIB del Instituto Nacional de Estadística (INE), base 2000, media de los cuatro trimestres.
- *Personas ocupadas* y personas ocupadas en el sector de la construcción: Encuesta de población activa (EPA) del Instituto Nacional de Estadística (INE), media de los cuatro trimestres.
- *Producción interna de construcción*: Asociación de Empresas Constructoras y Concesionarias de Infraestructuras (SEOPAN).

En cuanto a los indicadores de seguridad y salud laboral, se presentan datos tanto absolutos de accidentes con baja (presentados por una parte en el conjunto de sectores y particularizando en el sector

de la construcción, y también divididos según su gravedad), como los índices de incidencia.

El índice de incidencia (i.i.) es el número de accidentes por cada 100.000 trabajadores expuestos y afiliados a la Seguridad Social con las contingencias por accidentes de trabajo cubiertas, y se considera que es un sistema más ajustado de seguimiento de la siniestralidad laboral que las cifras absolutas de accidentes de trabajo, ya que permite interpretar las tendencias.

Estos datos se han obtenido de las siguientes fuentes:

- **Accidentes con baja** en el conjunto de sectores: Estadísticas del Ministerio de Empleo y Seguridad Social.
- **Accidentes con baja** en el sector de la construcción: Informes del Observatorio Estatal de Condiciones de Trabajo (OECT) del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) del Ministerio de Empleo y Seguridad Social.
- **Índices de incidencia:** Informes del Observatorio Estatal de Condiciones de Trabajo (OECT) del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) del Ministerio de Empleo y Seguridad Social.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS: EVOLUCIÓN EN EL PERIODO 2002-2015

3.1. INDICADORES SOCIOECONÓMICOS

El resumen de los datos socioeconómicos comentados anteriormente se presenta en la Tabla 1.

Llevando estos datos, tras ser normalizados, a gráficos de líneas, en la Figura 1 se ve la evolución en términos socioeconómicos, tanto a nivel general como en el sector de la construcción. En general, las líneas muestran un ciclo económico expansivo hasta el año 2006, cambiando la tendencia creciente a partir del año 2007 por lo que se puede marcar el año 2007 como el del comienzo de la crisis.

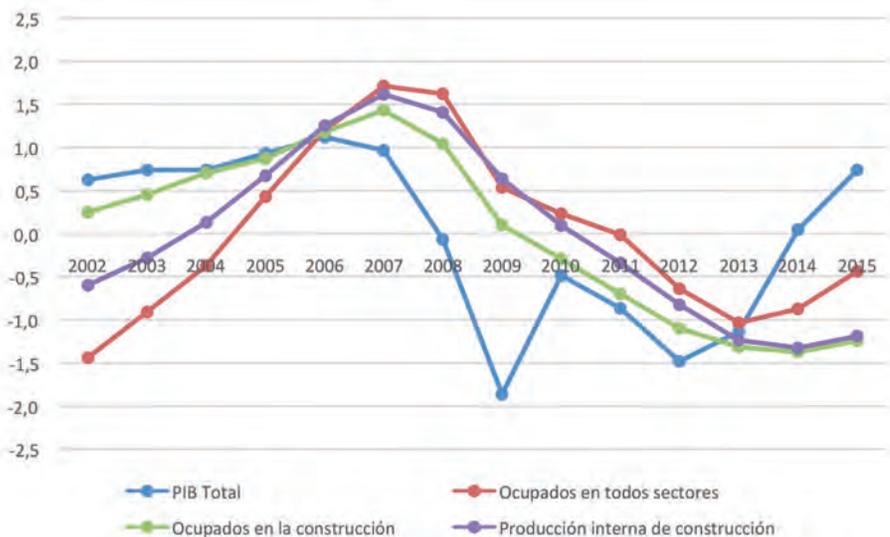


Figura 1: Gráficas normalizadas de la evolución de indicadores económicos en el periodo 2002-2015

Este mismo gráfico muestra cómo, a partir del año 2013 las caídas parece que se suavizan e incluso algunas llegan a crecer tímidamente hasta el año 2015.

3.2. INDICADORES DE ACCIDENTALIDAD

El resumen de los datos de accidentalidad se puede visualizar en la Tabla 2. En la misma se contabilizan por años los accidentes con baja, tanto en el conjunto de sectores como en la construcción, y para todos ellos diferenciados por la gravedad de los accidentes (leves, graves y mortales). Los datos anteriores no contabilizan accidentes *in itinere* (aquellos accidentes que se producen durante el desplazamiento desde el domicilio hasta el lugar de trabajo, y viceversa).

Pero el número de accidentes por sí solo no da una información completa, ya que no tiene en cuenta el número de personas ocupadas, que son las que están expuestas a los riesgos y que por tanto pueden sufrir los accidentes. Por ello la clave para relacionar la accidentalidad con los efectos de la crisis económica es el índice de incidencia ya que calcula el número de accidentes por cada cien mil trabajadores activos. La Tabla 2 también incluye los índices de incidencia tanto para el conjunto de sectores como particularizado para el

sector de la construcción.

En estos números se pueden extraer una serie de aproximaciones generales:

1. Por cada 1000 accidentes leves, se producen 10 accidentes graves y 1 accidente mortal.
2. De cada 3 accidentes laborales mortales, uno de ellos se produce en la construcción (aunque a partir de 2009 esta relación se torna menos desfavorable hacia el sector de la construcción, ya que pasa a ser 1 de cada 6).
3. El índice de incidencia en la construcción supera en más del doble al índice de incidencia del conjunto de sectores ($t=4,386$; $p=0,0005$).

De la Tabla 2 se pueden estudiar varias comparativas y varias tendencias, de las cuales se han trasladado a una gráfica de líneas, por considerarse de mayor relevancia, los datos normalizados de accidentes totales (accidentes con baja en jornada, excluidos los accidentes *in itinere*) y los índices de incidencia correspondientes, en ambos casos tanto para el conjunto de todos los sectores productivos como para el sector de la construcción. El resultado se puede ver en las Figuras 2 y 3.

En la Figura 2 se puede comprobar que en los años de la crisis, los accidentes laborales disminuyeron en proporción

Años	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
PIB Total (% Variación interanual)	2,9	3,2	3,2	3,7	4,2	3,8	1,1	-3,6	0,01	-1	-2,6	-1,7	1,4	3,2
Ocupados en todos los sectores (miles de personas)	16.630,3	17.295,9	17.970,8	18.973,3	19.939,1	20.579,9	20.469,7	19.106,9	18.724,5	18.421,4	17.632,7	17.139,0	17.344,2	17.886,0
Ocupados en la construcción (miles de personas)	1.980,2	2.101,6	2.253,2	2.357,2	2.542,9	2.697,4	2.459,9	1.889,8	1.651,4	1.403,9	1.161,3	1.029,5	993,5	1073,7
Producción interna de construcción (millones de €)	117.463	129.313	144.665	165.157	186.880	200.457	192.582	163.706	143.480	126.951	108.839	93.391	90.214	95.175

Tabla 1: Evolución de indicadores socioeconómicos en el periodo 2002-2015

Años		2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
Nº Accidentes con baja	Todos sectores	Total	938.188	874.724	871.724	890.872	911.561	924.981	804.959	617.440	569.523	512.584	408.537	404.284	424.625	449.223
		Mortales	1.101	1.020	968	935	947	826	810	632	569	551	452	447	467	500
		Graves	11.886	11.116	10.452	9.255	8.552	8.581	6.892	5.182	4.935	4.396	3.738	3.390	3.329	3.358
		Leves	925.201	862.588	860.304	880.682	902.062	915.574	797.257	611.626	564.019	507.637	404.347	400.447	420.829	445.365
	Construcción	Total	250.414	230.735	224.083	238.495	250.313	250.324	186.655	122.614	100.542	78.966	51.327	41.994	43.043	47.228
		Mortales	304	298	262	310	296	278	253	165	134	121	77	62	73	76
		Graves	3.518	3.482	3.343	2.973	2.958	2.952	2.076	1.329	1.180	962	692	490	524	556
		Leves	246.592	226.955	220.478	235.212	247.059	247.094	184.326	121.120	99.228	77.883	50.558	41.442	42.446	46.596
Índices de incidencia Construcción	Todos sectores	7.057	6.387	6.136	6.012	6.048	5.914	5.211	4.263	4.000	3.634	2.949	3.009	3.111	3.190	
	17.316	15.299	13.895	13.498	12.735	12.393	10.684	8.980	8.546	7.735	6.297	6.024	6.315	6.574		

Tabla 2: Cifras de la accidentalidad e índices de incidencia en el periodo 2002-2015

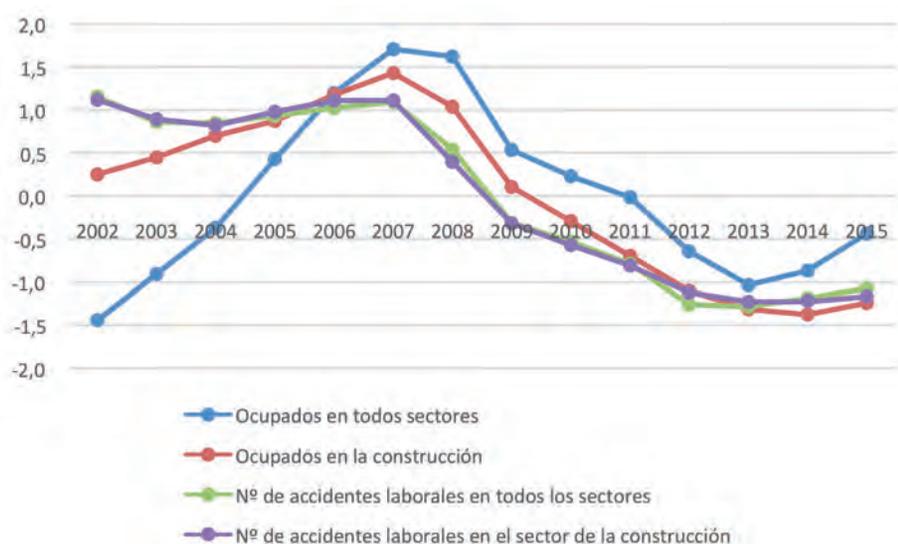


Figura 2: Gráficas normalizadas de la evolución del número de ocupados y de accidentes laborales, en el conjunto de sectores y en el sector de la construcción en el periodo 2002-2015

mayor al decrecimiento del empleo, tanto en el sector de la construcción como en el total de sectores. A partir del final de la crisis la tendencia de accidentes cambia y éstos vuelven a aumentar, nuevamente tanto en el sector de la construcción como en el resto de sectores, si bien aumentan en proporción menor al número de ocupados en cada caso.

En la Figura 3 se puede comprobar que, hasta el final de la crisis, el índice de incidencia del conjunto de sectores y el índice de incidencia tienen un descenso, destacando que en los primeros años de la crisis, la disminución de los dos índices de incidencia son mayores que antes de la crisis. En estos primeros años de la crisis (2007-2009) la caída del índice de inci-

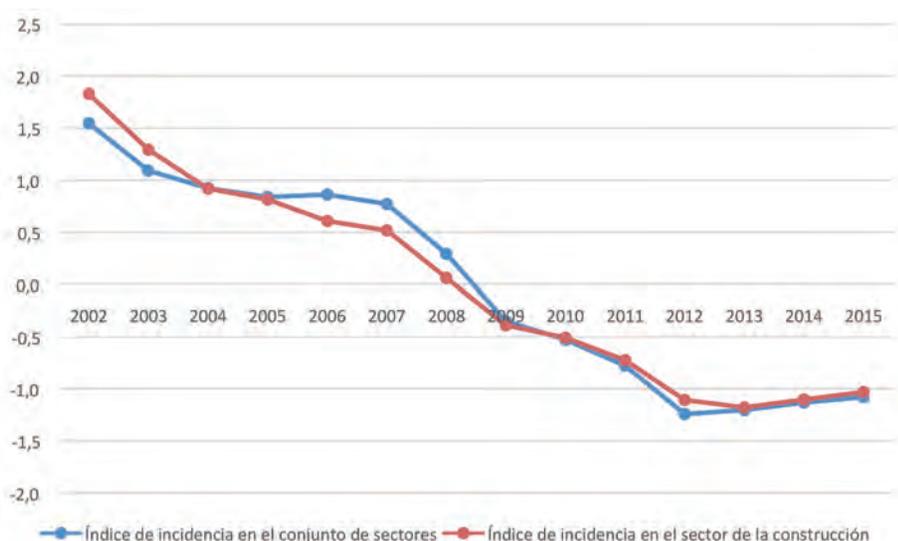


Figura 3: Evolución de los índices de incidencia en el periodo 2002-2015

dencia en el sector de la construcción fue mayor que el índice de incidencia del conjunto de sectores. A partir del año 2009 los dos índices siguen decreciendo hasta el final de la crisis, si bien en este periodo (2009-2013) el índice de incidencia del sector de la construcción disminuye menos que el índice de incidencia del conjunto de sectores.

Otra consideración importante es que, a partir del final de la crisis (2013), los índices de incidencia aumentan ligeramente.

4. DISCUSIÓN

En el análisis de las tablas y figuras anteriores se observa lo siguiente:

- Entre los años 2004 y 2007, el número de accidentes es creciente, tanto en el conjunto de sectores como en el sector de la construcción, al igual que la mayoría de indicadores socioeconómicos.
- No obstante, en este mismo periodo, y a pesar de que el número de accidentes iba aumentando año tras año, el índice de incidencia iba disminuyendo. Es decir, que el número de accidentes aumentaba en una proporción menor a la de las personas ocupadas, tanto en el conjunto de sectores como en el sector de la construcción.
- A partir del año 2007 y hasta el año 2012, el número de accidentes decrece, siguiendo las tendencias de los indicadores socioeconómicos (los años de la crisis).
- En este mismo periodo, el índice de incidencia seguía disminuyendo. Es decir, que el número de accidentes disminuía en una proporción mayor a la de las personas ocupadas, tanto en el conjunto de sectores como en el sector de la construcción.
- Entre los años 2002 y 2012, el índice de incidencia en el sector de la construcción ha disminuido un 5%

más que el índice de incidencia del conjunto de sectores.

- El número de accidentes mortales en la construcción se han reducido casi un 80% durante la crisis, mientras que el número de personas ocupadas en el sector descendía algo más de un 60%.

Por tanto, se puede concluir que durante la crisis en la construcción, la accidentalidad en España cayó, no sólo en términos absolutos (número de accidentes) sino también en términos relativos (índice de incidencia). El porqué de esta evolución puede dar origen a numerosas interpretaciones. A continuación se plantean algunas:

- Las diferentes estrategias y planes de actuación en la materia han dado sus frutos. De ellos, un pilar fundamental es la formación en prevención de riesgos laborales a todos los niveles, desde la formación a los trabajadores en el propio tajo, hasta la formación de nivel superior (según marca el REAL DECRETO 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención. BOE nº 2731/01/1997).
- Las técnicas preventivas también van mejorando, tanto por exigencias de la normativa como pueden ser los andamios (cumplimiento de RD 2177/2004, de 12 de noviembre, por el que se modifica el Real Decreto 1215/1997, de 18 de julio, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo, en materia de trabajos temporales en altura), como por evolución propia de la ciencia, como pueden ser nuevos materiales para redes y arneses.
- En épocas y situaciones difíciles sobreviven las empresas más fuertes y las que saben adaptarse a los cambios. Llevando este concepto, comúnmente aceptado, al sector de la construcción, las empresas que siguen trabajando a día de hoy son las más potentes en todos los aspectos, y probablemente también en materia de seguridad y salud hayan hecho bien las cosas. Aunque en algunos casos se pueda correr el riesgo de recortar las inversiones en seguridad y salud.
- En cuanto a los trabajadores de la construcción, el paro es mayor en trabajadores jóvenes y temporales, dos segmentos de edad y de tipo de

contrato en los que las cifras de accidentalidad suelen ser mayores. Por ejemplo, en el año 2007, la tasa de accidentes en trabajadores temporales en la construcción fue 2,5 veces mayor que a la tasa de accidentes con contrato indefinido. En ese mismo año, la tasa de incidencia del sector de edad de 16 a 30 años fue 1,3 veces superior a la del grupo de edad de 31 a 54, y 1,6 veces superior a la del grupo de edad de más de 55 años [11].

- Los plazos no suelen ser tan exigentes como antes. En general, se eliminan horas extraordinarias (por ejemplo en el sector de la construcción, las horas extras en el año 2015 fueron el 29% de las trabajadas en el año 2008) y se trabaja a un ritmo menor, reduciendo la exposición al riesgo [12].

Sin embargo, a partir del año 2013, cuando los indicadores socioeconómicos parece que marcan el final de la crisis (también en la construcción), los indicadores de accidentalidad (no sólo el número de accidentes sino también en índices de incidencia) cambian su tendencia hacia una ligera subida.

5. CONCLUSIONES

A partir de los datos empíricos obtenidos de las obras de construcción en relación con los accidentes que en ellas se producen y relacionando su evolución en el tiempo con la evolución de otros indicadores socioeconómicos, se ha comprobado que, en la época más dura de la crisis en España (periodo 2007-2013) la accidentalidad en el sector de la construcción ha disminuido, tanto en términos absolutos como en términos relativos. Esta tendencia ha cambiado a partir del año 2013 y, si bien el aumento del índice de incidencia no es alarmante, es importante volver a una tendencia a la baja.

Aunque la cultura y prácticas preventivas van mejorando (a destacar por ejemplo en los últimos años la renovación que se ha producido en los andamios y equipos de protección colectiva que han llevado a reducir de forma importante una de las causas más destacadas de los accidentes graves y mortales como son las caídas de altura), todavía queda mucho por esforzarse en otros aspectos (como la formación de los trabajadores, en que no prevalezcan los plazos sobre la seguridad, o en el uso de equipos de protección individual).

Por otra parte, si el accidente es la forma de siniestralidad laboral más impactante (por su ocurrencia repentina, principalmente), no hay que olvidar que existe otro elemento que produce bajas laborales, y que es la enfermedad profesional. Por tanto, también conviene ampliar este estudio teniendo en cuenta la evolución de las enfermedades profesionales en el sector de la construcción. De la misma forma, otra línea de estudio podría centrarse en los accidentes *in itinere*.

Por último, con objeto de centrar los esfuerzos de mejora en los casos más necesitados, se puede particularizar este estudio desde diferentes criterios relacionados con los accidentados, como pueden ser la edad, los años de experiencia, tipo de contrato o el territorio donde se produce el accidente.

PARA SABER MÁS

- [1] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Informe sobre el sector de la construcción (Periodo 2003-2007) [en línea]. Febrero 2009. Disponible en World Wide Web: <<http://www.oect.es/Observatorio/Contenidos/InformesPropios/Desarrollados/Ficheros/Informe%20construcción%202007.pdf>>
- [2] Swuste P, Frijters A, Guldenmund F. "Is it possible to influence safety in the building sector? A literature review extending from 1980 until the present". *Safety Science*. Vol. 50-5. p. 1333-1343. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2011.12.036>
- [3] Dingsdag DP, Biggs HC, Sheahan VL. "Understanding and defining OHS competency for construction site positions: worker perceptions". *Safety Science*. Vol. 46-4. p. 619-633. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2007.06.008>
- [4] Abdelhamid TS, Everett JG. "Identifying root causes of construction accidents". *Journal of Construction Engineering and Management*, 126(1): 52-60. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2000\)126:1\(52\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2000)126:1(52)).
- [5] Waehrer GM, Dong XS, Miller T, et al. "Costs of occupational injuries in construction in the United States". *Accident Analysis and Prevention*. November 2007. Vol. 39-6. p. 1258-1266. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2007.03.012>
- [6] López-Alonso M, Ibarrodo P, Rubio MC. "Análisis de los costes de prevención en obras de construcción". *Informes de la Construcción*. Vol. 67, 537, eo55. DOI: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.13.062>.
- [7] Pinto A, Nunes IL, Ribeiro RA. "Occupational risk assessment in construction industry, overview and reflection". *Safety Science*. Vol. 49-5. p. 616-624. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.01.003>
- [8] Spangenberg S. "Large Construction Projects and Injury Prevention". Doctoral Dissertation. National Research Centre for the Working Environment, Denmark & University of Aalborg, 2010. ISBN: 978-87-7904-214-8
- [9] Saurin TA, Costella MG, Costella MF. "Improving an algorithm for classifying error types of front line workers insights from a case study in the construction industry". *Safety Science*. Vol. 48-4. p. 422-429. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2009.12.014>
- [10] Muñoz J.F., Lidón I., Rebolgar R., Cano J.L. (2016). "Diseño de una herramienta para la evaluación de la seguridad laboral en obras". *DYNA*. Año 91, N.º 4. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7769>
- [11] Almodóvar A, Galiana L, Gómez-Cano M, et al. "Análisis del mercado laboral, condiciones de trabajo y siniestralidad. Una perspectiva según la edad". Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. P 44. NIPO: 272-13-046-5
- [12] Muñoz J.F. "Influencia de la crisis de la construcción en la accidentalidad de las obras". En *Actas del XIV International Congress on Project Engineering*, Madrid 30 de Junio - 2 de Julio 2010. P. 0828-0834. ISBN: 978-84-614-2607-2

Blockchain: retos y oportunidades más allá de bitcoin

Blockchain: challenges and opportunities beyond bitcoin

Giuseppe Psaila¹, Pablo García-Bringas²

¹ Università degli Studi di Bergamo (Italia)

² Universidad de Deusto (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8283>

1. PERSPECTIVA E INTRODUCCIÓN

En el año 2009 fue publicado, bajo el pseudónimo de *Satoshi Nakamoto*, un artículo titulado *Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System* [1], en el que se describía un sistema de pagos online que permitía el envío directo de dinero entre dos partes, a partir de la definición de una nueva moneda virtual, denominada *Bitcoin*.

El reto de desarrollar una moneda virtual no era entonces novedoso ni particularmente reciente. Es posible encontrar propuestas interesantes desarrolladas a mediados de la década de los noventa, desde *Pecunix* a *e-Gold*, pasando por todo tipo de monedas virtuales asociadas a aplicaciones de entretenimiento, como por ejemplo los *Linden Dollars* de *Second Life*, o los *Facebook Credits*.

Sin embargo, el sistema Bitcoin aportaba una novedad radical, al proponer un nuevo protocolo de intercambio de dinero público y completamente *descentralizado*; esto es sin intervención de intermediario alguno. Por primera vez dejaba de ser necesaria una institución financiera que asegurara la confianza de la transacción, y que evitara el omnipresente riesgo del *doble-gasto* (por supuesto, asegurando el uso exclusivo por parte de su legítimo dueño). En su lugar, en el caso de Bitcoin es la propia comunidad de usuarios quien se encarga de regular tanto la consistencia de las transacciones que se realizan, como la cantidad de moneda en circulación, como el valor de la misma.

Toda moneda es eficaz en la medida de la reputación que alcanza, de la *confianza* que el *mercado* deposita en ella. En particular, la confianza del sistema Bitcoin reside en su inseparable historial de transacciones, denominado *BlockChain*, o cadena

de bloques, que actúa como si de un *Libro Mayor* contable se tratase. Este histórico almacena de forma *distribuida, pública y sin mediación de intermediarios*, todas y cada una de las *transacciones* realizadas hasta la fecha en el sistema, agrupadas en bloques. Todo ello sin perder la propiedad del *anonimato* de dichas transacciones, o la *privacidad* de los usuarios.

Por diseño, la BlockChain es inherentemente resistente a la alteración de los datos validados y registrados, que no pueden ser modificados retroactivamente. Lo que se valida y registra en la BlockChain quedará ahí, *para siempre*. Además, está diseñada para ser altamente resistente a fallos *Bizantinos*: se da por hecho la posibilidad de que el sistema tenga que trabajar tanto con entidades honestas como deshonestas, y se incentiva desde el diseño el primero de los comportamientos, a la vez que se desincentiva y se hace inoperativo el segundo.

Estas propiedades hacen de la tecnología BlockChain una opción ideal para el registro de eventos, de actos legales o formales, privados o públicos, de registros médicos, seguros, etcétera. De hecho, puede considerarse como un auténtico *Notario Electrónico*. También es muy adecuada para llevar a cabo gestión de identidades, procesamiento de transacciones, creación de acuerdos o *contratos inteligentes* entre pares, gestión de derechos de autor, de propiedad intelectual de contenidos digitales, o para asegurar la operación consistente de dispositivos distribuidos en entornos industriales, o de sistemas logísticos, por poner tan sólo algunos ejemplos [5]. Todo ello sin necesidad de entidad central.

En definitiva, BlockChain provee unas elevadas capacidades de *desintermediación*, con enorme impacto potencial en un mundo globalizado. Sin ir más lejos, este año pasado, Marc Andreessen, uno de los más veteranos inversores de *Silicon Valley* llegó a afirmar que BlockChain representaba la innovación más importante desde la invención de Internet en sí misma, por su potencial para transformar el mundo

de la tecnología, así como el resto de sectores.

De momento, el mercado parece acompañar a estas expectativas. En los últimos años, este potencial no ha dejado de reflejarse, en forma de un extraordinario crecimiento en el volumen de negocio registrado en el sistema BlockChain. A fecha de Enero de 2017, se registran diariamente alrededor de 300.000 transacciones, por un importe conjunto superior a 61.000.000 de Dólares, en una tendencia que se mantiene ascendente. En estas fechas, existen más de 16.000.000 de Bitcoins en circulación. Del mismo modo, la valoración del Bitcoin en comparación con el Dólar, habiendo mantenido una tendencia extraordinaria durante todo el año pasado (por encima del 5% en todos los mercados, y con algunos casos por encima del 15%), ha llegado a superar a primeros de año la barrera psicológica de los 1.000 Dólares por Bitcoin, y también ha dejado atrás la cotización de la *onza de oro* en algunos mercados como el chino (1.166 Dólares en aquel momento). En todo el año 2016, la revalorización del Bitcoin frente al Dólar ha sido nada más y nada menos que de un 150% [2]. Y es que todo apunta a que el fenómeno BlockChain no ha hecho más que comenzar.

2. DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA BLOCKCHAIN. ¿CÓMO FUNCIONA?

La tecnología BlockChain se encuentra tan imbricada con Bitcoin que resulta difícil explicar la una sin la otra. En cualquier caso, BlockChain es aplicable a cualquier dominio de aplicación que requiera de funciones de registro seguro.

El objetivo principal que aborda y resuelve BlockChain es el de la *serialización* robusta, indiscutible, inalterable y perenne, de transacciones, económicas o de otro tipo, a partir del *consenso* de los usuarios [1]. BlockChain se constituye de esta forma en un inmejorable *Libro Mayor* contable, de carácter público. Y es que, suele decirse que es más fácil robar una galleta de una caja de galletas que se guarda en privado, que de un expositor público que está siendo observado continuamente por decenas de miles de usuarios. Además, en su aplicación al problema de la securización de transacciones económicas, Bloc-

kChain se enfrenta y da solución descentralizada a un problema largamente sufrido por todo tipo de entidades económicas: el *doble-gasto*. Al contrario de lo que ocurre con un *billete físico*, que no puede ser gastado dos veces, siendo innecesaria para ello la intervención de más entidad que emisor y receptor, tanto en el uso de monedas convencionales a través de medios digitales (desde plataformas de pago online a cajeros automáticos), como en el caso de monedas puramente virtuales, había venido siendo imprescindible contar con un agente intermedio que asegurase que una misma cantidad no se utilizara más de una vez. Este agente (habitualmente un banco u otro tipo de entidad con licencia financiera) puede operar y, en definitiva, todo el sistema se sostiene gracias a la confianza que se deposita en él, y en el registro centralizado que hace de todas las operaciones de las que es responsable. Gracias a este registro central se consigue que, por ejemplo, no sea posible extraer de un cajero automático la misma moneda dos veces. Sin embargo, esta hipótesis de partida de la confianza

inequebrable en la entidad central no siempre está clara. Algo parecido sucede en el caso de entidades no financieras, con sus propios retos, como pueden ser empresas de comercio online, o de otro tipo, administraciones públicas, individuos particulares, etcétera. Y aquí es precisamente donde surge la *magia*. En lugar del esquema clásico de registro centralizado, en el caso de Bitcoin es la propia comunidad de usuarios, a través de procesos de validación seguros (criptográficos), quien se encarga de validar y dar registro a las transacciones que se realizan.

En particular, el proceso técnico que se sigue a la hora de validar, registrar y dar efecto a una transacción de Bitcoin sigue los siguientes pasos fundamentales [1] [3]. La figura 1 ilustra todo este proceso.

1. Todo el mecanismo se pone en marcha cuando un usuario de Bitcoin desea realizar una *transacción*, que se caracteriza según una serie de parámetros, como destinatario, importe, etcétera.
2. Dicha transacción se incluye en un

bloque, junto con otras transacciones que se hayan producido en el mismo momento, dentro de un determinado intervalo temporal. El bloque pasa a ser la unidad fundamental de representación y gestión de información.

3. Ese bloque se *difunde* a todos los usuarios de la red de Bitcoin, y concretamente a sus respectivos *nodos* de operación.
4. Cada nodo de la red se encarga en este momento de *verificar* que la transacción deseada puede llevarse a cabo. Para ello, comprueba que el emisor de la moneda es verdaderamente su propietario, y que tiene suficiente saldo en su cuenta. Sólo tiene que rastrear el registro histórico BlockChain, buscando entradas y salidas de moneda de dicho emisor para asegurarse de que la transacción es viable. Por otro lado, como las transacciones pueden llegar a los diferentes nodos en diferentes órdenes, es necesario un sistema que construya un *orden suficiente*. Para ello, las transacciones producidas

How a blockchain works

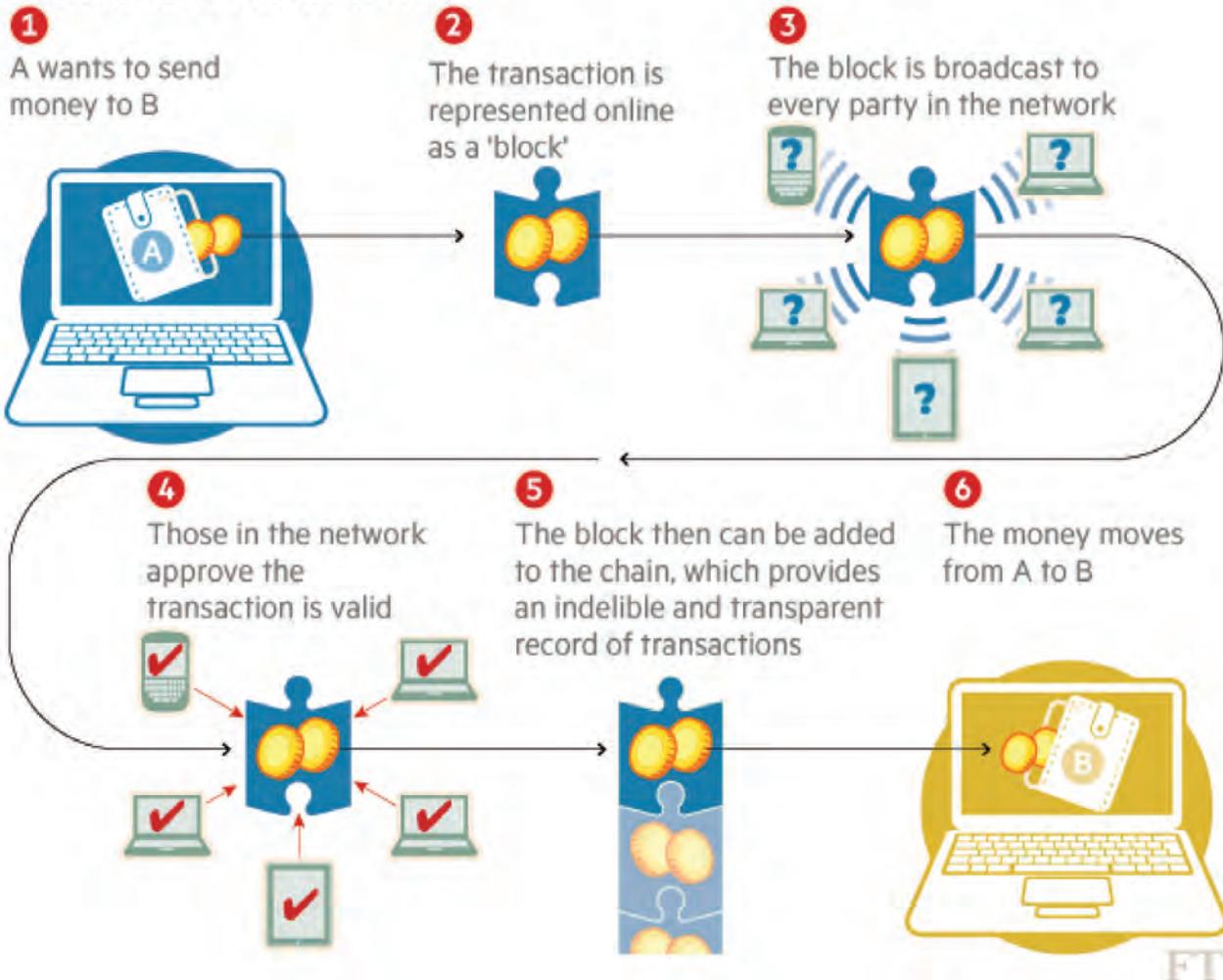


Fig. 1: Flujo de operación correspondiente a una transacción económica Bitcoin llevada a cabo sobre tecnología BlockChain. Fuente: Financial Times, 2016.

en un cierto intervalo de tiempo se agrupan en bloques que posteriormente se enlazan cronológicamente entre ellos, mediante un *enlazado criptográfico* que es lo que aporta la imposibilidad de alteración retroactiva. Dado que son múltiples los nodos de la red que se ponen a validar cada bloque, aparece la necesidad de *serializar* las aprobaciones que van produciéndose. Para ello, Blockchain utiliza un esquema de *Proof-of-Work*, que obliga a cada nodo a realizar una pesada tarea computacional de validación que posteriormente puede ser verificada fácilmente por el resto de nodos. En particular, utiliza el esquema de tipo *HashCash*, que se basa en un proceso aleatorio de prueba y error con *baja probabilidad individual de éxito* y de coste computacional *ajustable* (a medida que el equipamiento hardware va adquiriendo mayores cotas de rendimiento, en línea con la *Ley de Moore*, el coste computacional exigido a cada nodo de la red Bitcoin se va incrementando). En concreto, el modelo HashCash exige a los nodos verificadores que resuelvan un determinado *puzzle matemático* basado en la búsqueda de cierto tipo concreto de *hashes*, que habitualmente comienzan por un número controlado de *ceros*. Dada la baja probabilidad, individual, de éxito del proceso de verificación, resulta *imposible predecir cuál será* el nodo de la red que verifique y registre el siguiente bloque. En Enero del año 2017 se viene a tardar alrededor de 9 minutos en verificar cada bloque. Esta propiedad se introduce expresamente para evitar que un único agente pueda tener ningún control sobre la información que se registra en Blockchain, así como para dificultar al máximo una relación intencionada entre bloque a verificar y nodo verificador. Dada la exigencia de coste computacional que se pide a un nodo encargado de una verificación, este trabajo se *recompensa* mediante la *puesta en circulación* de cierta cantidad de moneda Bitcoin, en una analogía con la recompensa en oro que recibían los primeros *mineros* de ese mineral. De hecho, el término *miner* ha quedado ahí precisamente para referirse a nodos que están encargados de la verificación de bloques.

5. Una vez verificado un bloque, éste es retransmitido a todos los nodos de

la red, que pasan a ser conscientes de que las transacciones contenidas en él son válidas. Sólo en este momento puede pasarse a registrar el bloque en la Blockchain. Nodos que terminan su verificación más tarde producen bloques que se quedan *huérfanos*, y que no se enlazarán. En particular, cada bloque incluye un resumen criptográfico irreversible, conocido como *hash*, del bloque anterior. Conocida la información de un bloque, de sus transacciones, y del resumen hash del bloque anterior, el cálculo de su propio hash se realiza de una forma rápida y eficiente. Sin embargo, calcular una alteración en un bloque o en una transacción (alteración del importe, del receptor, etcétera) que encaje con un hash ya calculado es un problema computacionalmente intratable. Es comúnmente aceptado por la comunidad científica e industrial que la probabilidad de que pueda encontrarse controladamente una de estas *colisiones de hash*, en relación con una alteración malintencionada o negligente, es despreciable. Además, de cara a plantear un hipotético ataque contra Blockchain, a esto habría que añadir la cualidad anteriormente mencionada de que resulta igualmente imposible conocer qué nodo es el que va a verificar finalmente qué bloque. En definitiva, una vez que un bloque ya registrado es enlazado con los siguientes que se han ido verificando, y va quedando *enterrado* por nuevos bloques relacionados mediante esa cadena de hashes, su consolidación se hace plena.

6. Finalmente, puede procederse a ejecutar la transacción o transacciones incluidas en el bloque.

Como resultado de este proceso, el sistema Blockchain resulta en ese registro cronológico pública y universalmente verificado y aceptado. Un sistema que aporta una elevada confianza a la hora de registrar no sólo transacciones económicas de Bitcoin, sino de prácticamente cualquier otro dominio de aplicación.

3. VENTAJAS Y POTENCIALIDADES

Blockchain es una tecnología que ha resultado disruptiva en materia de eliminación de intermediarios, asegurando el mantenimiento de la confianza e incluso incrementando la misma [7]. Por ello, en

primer lugar, tanto el tiempo de ejecución, como los costes asociados a una transacción que ahora pasa a ser directa (verificación, ejecución, trazado, etcétera) se reducen extraordinariamente. Deja de tener sentido el concepto de *comisión*. Esta ventaja es especialmente importante en modelos de negocio que incluyan grandes volúmenes de transacciones, transacciones que deban realizarse con restricciones temporales, o transacciones sujetas a procesos de negociación dinámicos.

En segundo lugar, el grado de transparencia que proporciona el concepto de libro mayor público y universal supone en sí mismo un impulso del mayor nivel en la creación de confianza, elemento clave en muchos sectores, como por ejemplo en el sector bancario o en la administración pública. La combinación holística de ambas características puede suponer un antes y un después en todo sector, tecnológico o no tecnológico, en el que el registro de evidencias de proceso o de negocio tenga relevancia.

4. RIESGOS Y LIMITACIONES

Existen tres tipos de obstáculos fundamentales al crecimiento de Blockchain: un primer tipo de freno de carácter técnico-conceptual, y una segunda tipología más bien relacionada con el ordenamiento legal y de impacto en el *statu quo*. Además, la percepción que ha adquirido Bitcoin en los últimos años como refugio de conductas inconfesables tampoco ayuda a hacer avanzar el desarrollo de Blockchain [2] [7].

Así, por un lado, Blockchain debe abordar desde un punto de vista global el problema de la seguridad y la privacidad, sin pérdida de eficacia general. Habiendo demostrado sobradamente sus potencialidades en materia de registro, precisamente el carácter público de éste abre una importante incógnita en algunos sectores, en todo lo relacionado con el control de acceso a la información. Aunque todo el proceso de verificación incluye el uso de claves de seguridad, que aportan un nada desdeñable grado de privacidad y anonimato, aún parece necesario un mayor nivel de madurez en la tecnología de distribución, control y recuperación de esas claves, y en general de prevención de incidentes de seguridad. Frente al enfoque general de registro público, existen iniciativas que trabajan en la alternativa de aplicación de Blockchain *en privado* (en exclusiva para un determinado sector o entidad), pero se están encontrando con el reto principal de generar un incentivo

equivalente al que el esquema público aporta a la comunidad (hasta ahora pública) de *miners*. Evidentemente, sin ellos todo el esquema deja de sostenerse. Este reto también aparece en la potencial aplicación de BlockChain a sectores diferentes del económico-financiero, en el que el concepto de *moneda* no sea de aplicación.

Por otro lado, aunque el hecho de que el sector de aplicación nativo de BlockChain sea el económico-financiero (un sector precisamente muy sensible a todo lo relacionado con la regulación), aún es necesario un ejercicio global de desarrollo de nueva regulación específica, más allá de los pequeños ajustes o re-interpretaciones de la norma actual que hayan podido venir desarrollándose. Sólo de esta forma podrá proveerse a los diferentes sectores y negocios de un marco general que marque claramente las obligaciones y los derechos de usuarios y empresas, y que elimine al máximo las incertidumbres legales y de operación que aún existen. Por ejemplo, ahora mismo no existe regulación normativa alguna que proteja a los consumidores de ninguna manera. Una segunda derivada de este concepto aparece en forma de resistencia por parte de sectores y negocios establecidos al desarrollo de nuevas tecnologías, y que pueden -a través de esta componente regulatoria- incidir dramáticamente en la ralentización del desarrollo de BlockChain, incluso definitivamente. Afortunadamente, existe ya un cada vez más nutrido elenco de entidades financieras de primer nivel (como Visa, Goldman Sachs o Nasdaq) que han empezado a invertir decididamente en investigación, desarrollo y aplicación de estas tecnologías.

Finalmente, la percepción como producto *especulativo* y refugio de actividades potencialmente ilícitas que ha venido adquiriendo Bitcoin en los últimos años, gracias al alto grado de *opacidad* que proporciona (llega a tener una cierta consideración de *paraíso fiscal virtual* por parte de algunos expertos de talla mundial), también puede limitar de un modo determinante mayores niveles de desarrollo de BlockChain [2].

5. POTENCIALES DOMINIOS DE APLICACIÓN

Desde luego, el sector económico-financiero constituye un escenario ideal para el desarrollo tanto de la moneda virtual en general, como de BlockChain en particular. Sin embargo, el potencial de aplicación de esta última tecnología trasciende a lo económico, y presenta

multitud de aplicaciones que pueden enriquecer a otros sectores [3] [6]. Algunos de ellos son los siguientes:

1. Sector actuarial. BlockChain puede proporcionar a los activos asegurados de un registro de la máxima solidez, extremadamente difícil de destruir, replicar o alterar; por ejemplo, en relación con la identificación de propiedad, o del registro histórico de transacciones de un determinado bien o propiedad, que ahora podría verificarse con un alto nivel de confianza por terceras partes (compañías aseguradoras, cuerpos y fuerzas de seguridad del estado, propietarios, demandantes, etcétera).
2. Sector público: administración, notariado y registro público. En relación con el sector anterior, las acciones legales relacionadas con la verificación y registro de documento público, trámite administrativo, etcétera, pueden verse muy potenciadas con la aplicación de BlockChain. Siempre con la característica de la no necesidad de autoridad central, BlockChain puede proporcionar prueba de propiedad y autorización, prueba de existencia y validez, o prueba de integridad de documentación. También puede eliminar la necesidad del habitual traslado ineficiente (muchas veces manual) de documentación, elevando la seguridad y la privacidad de los documentos y de los procedimientos, y reduciendo los costes. También puede elevar la privacidad de profesionales o particulares que requieren del manejo o consulta de esa documentación. Las posibilidades que ofrece en materia de transparencia o de lucha contra el fraude son extraordinarias. Otra función fundamental de este sector, como es el caso del sellado de tiempo, puede asimismo verse elevada a un nivel cualitativo superior.
3. Tecnología, telecomunicaciones y contenidos digitales: gestión de derecho de autor y de explotación comercial. Sectores como el de la música o el cinematográfico, que han experimentado y están experimentando grandes cambios a partir de la evolución de la tecnología (como puede ser el caso del *streaming*), pueden apoyarse en BlockChain para mejorar la gestión de derechos de los contenidos que sirven, asegurando los derechos y obligaciones de los diferentes tipos de agentes (artistas,

compañías, publicistas, productores, distribuidores, espectadores, etcétera). Más allá de la gestión consistente de la información de propiedad intelectual y de explotación comercial, BlockChain también puede proporcionar la posibilidad de poner en marcha *contratos inteligentes* que pueden *automatizar* la contratación asociada a las interacciones de esos agentes, dando origen a una nueva definición del negocio en sí mismo. Otros sectores de distribución de productos o servicios también pueden verse favorecidos por BlockChain, de un modo análogo.

4. Salud y bienestar. El sector de la Salud está empezando a interesarse por la tecnología BlockChain, en relación con la mejora en la gestión de historiales clínicos e información administrativa sanitaria en general. Obvia señalar las grandes posibilidades que puede aportar un registro unificado, inalterable y seguro en aspectos como mejora de los procesos de gestión y clínicos, en la gestión del gasto farmacéutico y de las inversiones sanitarias en general, o en el soporte legal requerido en procesos de reclamación, entre otros.

6. APLICACIÓN A LA INDUSTRIA CONECTADA

Especial potencial de aplicación de BlockChain reside en el sector industrial, precisamente en una coyuntura actual muy proclive a la innovación y a la introducción de nuevas tecnologías, en particular tecnologías de la información y las comunicaciones (*TIC*). No en vano, compañías industriales de primer nivel global se encuentran inmersas en estos momentos en lo que algunos expertos denominan el desarrollo de la *Industria 4.0*.

Y es que la también llamada *Industria Conectada* es ya una realidad. Las diferentes corrientes tecnológicas están confluyendo aceleradamente en un efecto holístico llamado a constituir una auténtica *Cuarta Revolución Industrial*. Después de la máquina de vapor, la electricidad y la automatización de los procesos industriales, las TIC están constituyendo en la actualidad una transformación industrial que más allá de todo lo que se había conocido hasta ahora en materia de evolución. Más allá de la incertidumbre propia de los nuevos tiempos, nos encontramos sobre todo en un momento de grandes retos, de prometedoras oportunidades. *Conectividad, sensorización, ciber-seguridad,*

analítica de datos, implicación *directa* del cliente en la provisión de la tecnología, ingeniería *extremo-a-extremo*, nuevos perfiles y capacitaciones *profesionales*, implicaciones *legales* de los nuevos modelos de negocio, son las principales tendencias que están convergiendo e interpelando al tejido industrial y empresarial, en la continua misión de modernización y aseguramiento de la competitividad. Sobre ellas, la industria, la empresa, la Sociedad, están llamadas a construir buena parte del futuro.

Así, es precisamente en esta confluencia de tecnologías donde se revela que el denominador común no es otro que el de la necesidad de unos cimientos TIC sólidos a la vez que versátiles; garantes de confianza a la vez que flexibles. Hasta la fecha, las aproximaciones que se están planteando utilizando mucha tradición *clásica* de sistemas de información, con sus conocidas capacidades y limitaciones. Sin embargo, una visión más ambiciosa de la evolución tecnología en su aplicación al mundo industrial puede encontrar en BlockChain la herramienta perfecta para ir *más allá* [6]. La mayoría de plataformas de *Internet de las Cosas*, o *IoT* (concepto clave en esta revolución industrial en la que estamos), que se están proponiendo abogan por el clásico esquema *centralizado*, en el que un centro de control gobierna la operación y la interrelación de los diferentes sensores, dispositivos o células de fabricación. No obstante, este enfoque resulta limitado en aplicaciones más dinámicas en las que los distintos componentes deben mantener un cierto grado de autonomía. Precisamente para ello, BlockChain tiene la capacidad de constituirse como la base sobre la que implementar plataformas distribuidas de *IoT*, que a la vez aporten a los sistemas industriales unas elevadas prestaciones de seguridad y confiabilidad. En la misma línea, y gracias a su función principal de registro universal, puede proveerse de una especial aplicación de BlockChain al apartado de la *trazabilidad* (de materiales, productos, operaciones, etcétera); aspecto clave en todo entorno industrial.

A modo de ejemplo, en esta línea se encuentran trabajando dos grandes entidades globales, como son IBM y SAMSUNG, que han desarrollado la plataforma *ADEPT (Autonomous Decentralized Peer to Peer Telemetry platform)*, que usa elementos similares a BlockChain para construir una red *IoT* de dispositivos distribuida. En particular, *ADEPT* implementa protocolos muy interesantes de compartición P2P de archivos de operación (BitTorrent), con-

tratos de servicio y operación *inteligentes* (Ethereum) y mensajería P2P entre dispositivos (TeleHash). Con una combinación de todo ello, han planteado una tecnología capaz de cubrir de un modo intrínsecamente robusto, a la vez que interoperable, áreas industriales heterogéneas sujetas a cualquier tipo de realidad.

7. CONCLUSIÓN

En definitiva, BlockChain, la tecnología que se desarrolló para dar soporte a una moneda virtual, el Bitcoin, ha resultado aportar funcionalidades muy deseables no sólo en el mundo económico-financiero, sino también en otros sectores. La rupturista prestación de libro mayor contable inherentemente distribuido, robusto, verificable e inalterable, resulta muy atractiva en su aplicación a múltiples sectores, como el de la salud, las telecomunicaciones, el mundo de los seguros, y por supuesto el mundo industrial, entre otros. Habiendo superado ya el *pico de las expectativas sobredimensionadas*, y empezando a alcanzar cierta estabilidad, la aplicación solvente de BlockChain a otros dominios empieza a convertirse en una realidad. Muestra de ello es, tanto la creciente aparición de *start-ups* que buscan posicionarse con un valor diferencial alrededor de esta tecnología o alguno de sus derivados, como la creciente inversión que está dándose por parte de firmas de primer nivel mundial. Tanto la exploración de posibilidades de aplicación a los modelos de negocio existentes, como la exploración de nuevos modelos de negocio en sí mismos, son actualmente puntos calientes de desarrollo y aplicación de esta tecnología. Por supuesto, los riesgos asociados no son menores. Así pues, todo parece apuntar a que el fenómeno BlockChain sólo podrá observarse en su verdadera magnitud a lo largo de la próxima década.

PARA SABER MÁS

- [1] S. Nakamoto. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronics Cash System, <http://www.bitcoin.org>, 2009.
- [2] M. Nolte. Bitcoin en máximos. El Correo, Economía, 2017.
- [3] U. Berkeley. BlockChain Technology: Beyond Bitcoin. Sutardja Center for Entrepreneurship and Technology, Universidad de California - Berkeley, 2015.
- [4] Ernst and Young. Blockchain technology as a platform for digitalization. Ernst and Young Global, 2016.
- [5] European Commission. Blockchain applications and services. European Commission, Business Innovation Observatory, 2016.

- [6] D. Tapscott, A. Tapscott. The Blockchain Revolution: How the Technology Behind Bitcoin is Changing Money, Business and the World. ISBN 978-0670069972, 2016.
- [7] F. Brezo, P.G. Bringas. Issues and Risks Associated with Cryptocurrencies such as Bitcoin. International Conference on Social Eco-Informatics, ISBN 978-1-61208-228-8, 2012.

Estudio sobre la implantación de prótesis de reemplazo total de rodilla

Study on implantation of total knee replacement prostheses

Obed Cortés-Aburto¹, José-Alfredo Hernández-Pérez², Rafael Rojas-Rodríguez¹, Salvador-Antonio Arroyo-Díaz¹, Rita-Marina Aceves-Pérez¹, Marco-Antonio Canchola-Chávez¹
¹ Universidad Politécnica de Puebla (México)
² Universidad Autónoma del Estado de Morelos (México)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8137>

1. INTRODUCCIÓN

Los primeros intentos para tratar a pacientes afectados por osteoartritis de rodilla con una artroplastia, se remontan hacia mediados del siglo XIX, ya sea con el uso de un tejido suave colocado entre la superficie de la articulación o bien con la resección de una cierta cantidad de hueso, tanto del fémur distal como de la tibia proximal. Sin embargo, el concepto sobre el cual se fundamenta el reemplazo total de articulación se remonta al año 1880, en Berlín con Thormestockes Gluck [1]. Este cirujano impartió una serie de seminarios describiendo un sistema para reemplazar la articulación mediante una pieza hecha de marfil. Gluck creía que estas unidades podían adherirse al hueso, usando un cemento elaborado con colofonia, piedra pómez y yeso de París.

En México ha habido un auge en incentivar, a nivel nacional, la inversión de las empresas en actividades y proyectos relacionados con la investigación, desarrollo tecnológico e innovación a través de apoyos que tengan el mayor impacto posible sobre la competitividad de la economía nacional. Por ello, se ha implementado el Programa de Estímulos a la Innovación auspiciado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Una de las áreas que ha empezado a innovar es el área de fabricación de instrumental quirúrgico así como de implantes ortopédicos. En México ya se fabrican reemplazos totales de cadera, sin embargo, aún no se ha comercializado ningún reemplazo total de rodilla hecho en México. Ha habido algunos intentos por diseñar rem-

plazos totales de rodilla sin fundamentar la decisión en un análisis de las diversas características existentes en los modelos actuales y tampoco se ha analizado su desempeño de cada una de dichas mejoras.

En esta colaboración se pretende hacer un análisis de las perspectivas de comercialización en México para los reemplazos totales de rodilla. Primero, mostraremos cuáles son los componentes de un reemplazo total de rodilla. Se mostrarán las estadísticas de diversos organismos internacionales y los datos que se tienen en México respecto a los reemplazos totales de rodilla. De esa manera, se mostrará el nicho de oportunidad que existe en la fabricación de dichas prótesis quirúrgicas.

2. CARACTERÍSTICAS

Normalmente un reemplazo total de rodilla consiste de los siguientes componentes:

- Componente tibial
- Componente femoral
- Componente patelar
- Inserto tibial.

En la Figura 1 se muestran cada uno de estos componentes. A continuación, analizaremos las estadísticas que diversos organismos internacionales han publicado respecto a la cantidad de reemplazos totales de rodilla que se realizan en México y en Estados Unidos de América ya que están ligados por la cercanía y por el comercio bilateral.

3. ESTADÍSTICAS

De acuerdo con el *Annual Report 2016* del *American Joint Replacement Registry*

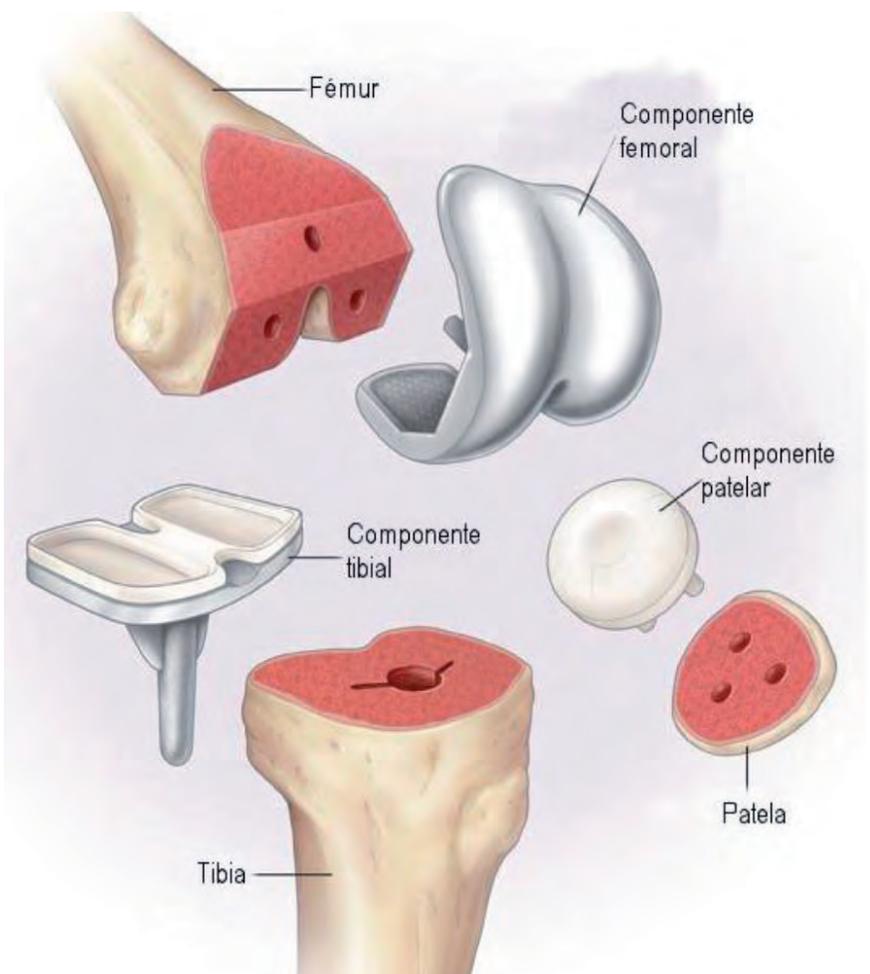


Figura 1: Componentes de un reemplazo total de rodilla (Modificada de [2])

[3] que refleja aproximadamente el 15% de los reemplazos totales de articulaciones realizados anualmente en todo Estados Unidos de América se realizaron 258 121 procedimientos de rodilla de los cuales el 61,1% (157 618) fueron realizados en mujeres y el 38,9% (100 503) en hombres. La edad promedio de los pacientes que experimentan una Artroplastia Primaria de rodilla fue de 66,4 con una desviación estándar de 9,8. Sin embargo, la edad promedio de la población que recibe una Artroplastia de Revisión de la rodilla es casi cinco años menor con 61,8 y una desviación estándar de 15,4. El 82% de las cirugías realizadas fueron procedimientos usando cementante. El 51,2% de los diseños de implante de rodilla fue con Estabilizado Posterior (50,3% promediando 2012-2015) y el 39,9% fue con retención del Ligamento Cruzado Posterior (41,8% promediando 2012-2015). En este reporte incluyen el diseño de inserto tibial Ultra Congruente con un 4,0% de procedimientos realizados en el 2015 (3,9% promediando 2012-2015).

En cuanto al material utilizado para el componente tibial de soporte de las artroplastias primarias durante el periodo de 2012 a 2015 el polietileno altamente entrecruzado disminuyó de un 60,9% hasta alrededor de un 45,3% y el polietileno convencional (Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular) disminuyó de un 36,5% hasta alrededor de un 30,8%. Al mismo tiempo hubo un incremento en el uso de un polietileno antioxidante o impregnado con vitamina E desde un 2,6% hasta un 24,0%. En el caso de las artroplastias de revisión, los componentes de polietileno altamente entrecruzado disminuyó de 45,6% hasta 37,6%, el polietileno convencional aumentó de 53,7% hasta 55,1% y el polietileno con antioxidante o con vitamina E aumentó desde 0,8% hasta 7,3% en el mismo periodo de 2012 a 2015.

De todas las artroplastias de rodilla reportadas se utilizaron diseños de soporte móvil en el 16,3% de las artroplastias primarias y en el 7,1% de las artroplastias de revisión. Los procedimientos en rodillas son los que predominan en cantidad en los Estados Unidos de América.

De acuerdo con el *National Hospital Discharge Survey 2010* [4] de los *Centers for Disease Control and Prevention*, en los Estados Unidos de América se realizan 719 000 reemplazos totales de rodilla, de los cuales 14 000 son en las edades de 15-44 años, 317 000 son en las edades de 45-64 años, y 385 000 son en más de 65 años de edad. Además, la tasa de reemplazo totales de rodilla aumentó tanto para hombres

(86%) como para mujeres (99%) mayores de 45 años desde 2000 hasta el 2010. Las mujeres tuvieron una tasa de reemplazos totales de rodilla durante el 2000 y el 2010 (33,0 y 65,5 por cada 10 000 habitantes, respectivamente) más alta que la de los hombres (24,3 y 45,3 por cada 10 000 habitantes, respectivamente). Por lo que se observa, la cantidad de reemplazos totales de rodilla es mayor en mujeres que en hombres.

De la Tabla 90 del *Health, United States, 2014* del *National Center for Health Statistics* [5] tomando en cuenta la edad y el sexo para diferentes años se obtiene la Tabla (1) para los hospitalizados por reemplazo total de rodilla. De acuerdo con este reporte, se obtiene la distribución de los reemplazos totales de rodilla realizados en Estados Unidos de América por edad y los resultados se muestran en la Tabla (2).

De acuerdo con las estadísticas de la OCDE (*Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico*) [6] bajo la cate-

goría *Health-Health Care Utilisation-Surgical procedures* para México se obtiene la Tabla (3) en cuanto al reemplazo de rodillas del 2004 al 2014.

Lamentablemente, para México no existe información tan detallada como para otros países. En Estados Unidos el costo de una artroplastia primaria de rodilla es de \$ 8 500 USD en promedio por paciente en el 2006 [7]. En tanto que en México, para el mismo año, el costo promedio de la prótesis total de rodilla primaria cementada era de \$ 22 552 MXN [8] (\$ 2 100 USD al tipo de cambio del 2006). Esto implicaba un costo del 25% aproximadamente en comparación con el de la operación en Estados Unidos. Sin embargo, de acuerdo con el sitio web *medicaltourism.com* auspiciado por la *Medical Tourism Association* [9] el costo en dólares en el 2015 de un reemplazo de rodilla en EUA era de \$ 35 000 USD y en México era de \$ 12 900 USD lo que genera un ahorro del 63%. Esto nos muestra que

Rango de edad	Cantidad de pacientes por cada 10,000 habitantes								
	Ambos sexos			Hombres			Mujeres		
	1990	2000	2010	1990	2000	2010	1990	2000	2010
Menos de 18	6.7	13.8	28.8	4.9	11.0	21.6	8.4	16.4	35.6
18-44									
45-64	6.7	12.7	37.1	5.8	8.7	27.8	7.4	16.4	46.0
65-74	33.2	65.4	108.3	26.4	64.5	84.0	38.6	66.0	129.3
75-84	28.4	59.3	86.2	19.5	48.7	80.4	33.9	66.3	90.4
Más de 85	12.4	22.9	34.0			31.3		16.2	35.3

Tabla 1: Hospitalizados por reemplazo total de rodilla en Estados Unidos

Rango de edad	Cantidad de altas de pacientes por reemplazo total de rodilla		
	Ambos sexos		
	2000	2005	2013
Menos de 18			
18-44			
45-64	95 902	199 682	288 955
65-74	110 961	177 306	255 495
75-84	79 138	121 865	125 790
Más de 85	10 122	15 784	16 880
Total	318 854	533 216	700 740

Tabla 2: Altas de pacientes por reemplazo total de rodilla

Año	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Número total de procedimientos	3 164	3 222	3 343	3 403	3 522	3 606	3 680	3 781	3 872	3 962	4 053

Tabla 3: Número de reemplazos de rodilla realizados en México

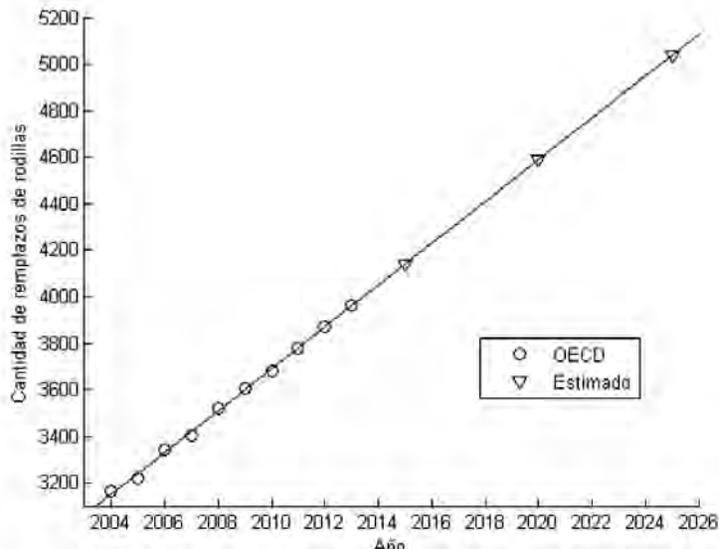


Figura 2: Estimación de la cantidad de reemplazos de rodillas que se estarían realizando en México en el 2015, 2020 y 2025 de acuerdo con los datos reportados por la OCDE

las estadísticas de los Estados Unidos son de gran importancia para las industrias mexicanas del ramo ortopédico así como para el ramo hospitalario, ya que una buena parte de los Reemplazos Totales de Rodilla de personas de Estados Unidos podría llegar a realizarse en México al disminuir aún más los costos.

También se reportaba en el 2013, que en México la cirugía para implantar estos reemplazos de rodilla podía generar un gasto de \$ 70 000-\$ 80 000 MXN (\$ 3 300 – \$ 3 800 USD, tipo de cambio actual) en un hospital del sector privado y que tan solo la prótesis tenía un costo de alrededor de \$ 30 000 MXN (\$ 1 500 USD, tipo de cambio actual), es decir, alrededor del 35% del costo total de la cirugía. El costo de la prótesis se eleva debido a que en México no hay fabricantes de implantes de prótesis de rodillas, por lo que normalmente se importan de Estados Unidos o Europa [10].

En cuanto al mercado local en México, de acuerdo con lo reportado en medios de difusión, en el 2010 el IMSS (*Instituto Mexicano del Seguro Social*) efectuaba 130 cirugías de reemplazo de cadera y de rodilla al mes, es decir, alrededor de 1 560 al año [11]. En el 2004 el Instituto de Seguridad Social y Servicios para los Trabajadores del Estado reportó que adquiriría anualmente 700 prótesis de reemplazo de rodilla [12]. También se reporta que la Secretaría de Salud mediante el programa Seguro Popular realizó 264 operaciones de rodilla a pacientes que habían presentado ninguna mejoría con algún tratamiento previo [13]. Lo cual nos muestra que los datos reportados por la OCDE no están tan incompletos. Si proyectamos los datos de la OCDE para estimar a futuro la cantidad

de reemplazos que se estarían realizando obtenemos la Fig. (2). De acuerdo con esta estimación en el año 2015 se estaban realizando alrededor de 4 100 reemplazos, para el 2020 serían alrededor de 4 600 y para el 2025 estarían superando los 5 000.

4. CONCLUSIONES

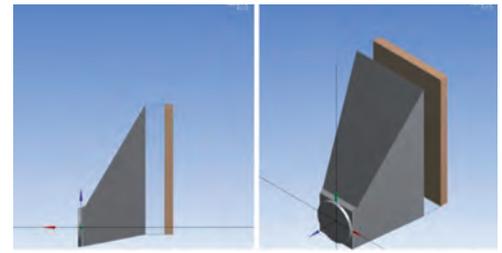
De acuerdo con el análisis realizado, se ve una gran oportunidad de comercialización en México para las empresas que se dedican a la fabricación de prótesis de rodillas. El fabricarlas en México lograría que el costo de producción se redujera, impactando en el costo de la cirugía ya que representa el 35% de dicho costo. Aunado a la demanda local del propio país, existe mucha probabilidad de que la demanda de reemplazos totales de rodilla de Estados Unidos sea dirigida en cierta proporción hacia México por la diferencia de costos en dicha cirugía.

PARA SABER MÁS

[1] Fokter S ed.. Recent Advances in Hip and Knee Arthroplasty. 1a Edición. Rijeka:InTech, 2012. 464p. ISBN: 978-953-307-841-0.
 [2] Sladov M. Total Knee Replacement Surgery (30 de noviembre de 2014). Recuperado el 4 de agosto de 2016 de <http://totalkneereplacementsurgery.net/blog/>
 [3] 2014 Annual Report of American Joint Replacement Registry.
 [4] Williams S N, Wolford M L, Bercovitz A. Hospitalization for total knee replacement among in patients aged 45 and over: United States, 2000–2010. NCHS data brief. 2015. No 210. Hyattsville, MD: National Center for Health Statistics.
 [5] Health, United States, 2014: With Special Feature on Adults Aged 55–64. Hyattsville, Maryland. National Center for Health

Statistics.
 [6] OECD. "Health care utilisation", OECD Health Statistics (database). DOI: <http://dx.doi.org/10.1787/data-00542-en>. [Consultado el 1 de Agosto de 2016].
 [7] Slover J, Espehaug B, Havelin L I, et al. "Cost-Effectiveness of Unicompartmental and Total Knee Arthroplasty in Elderly Low-Demand Patients". The Journal of Bone & Joint Surgery. 2006 Vol. 88-11 p. 2348-2355. DOI: <http://dx.doi.org/10.2106/JBJS.E.01033>
 [8] Patlán-Mares L S. "Resultados postquirúrgicos a corto plazo de Artroplastia Total de Rodilla en pacientes seleccionados o no por un Comité de prótesis de rodilla". Tesis de Especialista en Ortopedia. Universidad Veracruzana. 2008.
 [9] "Compare costs". Recuperado el 1 de agosto de 2016 de <http://medicaltourism.com/Forms/price-comparison.aspx>.
 [10] "Necesidad de implantes sobrepasa la demanda" (22 de septiembre de 2013). Milenio. Recuperado el 24 de noviembre de 2016 de http://www.milenio.com/negocios/Necesidad-implantes-sobrepasa-demanda_0_158384390.html.
 [11] "Coloca IMSS 130 prótesis de cadera y rodilla al mes". Notimex. Recuperado el 1 de agosto de 2016 de <http://www.aztecanoticias.com.mx/notas/salud/16833/coloca-imss-130-protesis-de-cadera-y-rodilla-al-mes>.
 [12] "Implanta el ISSSTE prótesis a pacientes que lo requieren" (11 de enero de 2004). Crónica. Recuperado el 1 de agosto de 2016 de <http://www.cronica.com.mx/notas/2004/103403.html>.
 [13] "Cubre el Seguro Popular la artroplastia de rodilla" (31 de diciembre de 2013). La Parada Digital. Recuperado el 24 de noviembre de 2016 de <http://aparadadigital.com/noticias-de-chihuahua-mexico.cfm?n=28734>.

Optimización del diseño de la geometría del conducto de entrada de calderas de plantas de ciclo combinado



Boiler inlet duct shape design optimization for combined cycle power plants



Isaac Prada-i-Nogueira¹, Francisco-Javier Álvarez-Ruiz², Fernando De-Cuadra³ y Alvaro Sánchez-Miralles³

¹ KeelWit Technology S.L. Avda. Presidente Carmona, 2 - 28020 Madrid. Tfno: +34 917 105836.

² AMEC Foster Wheeler Energía. Calle Gabriel García Márquez, 2 - 28232 Rozas de Madrid (Madrid).

³ ICAI. Institute for Research in Technology. Calle de Alberto Aguilera, 25 - 28015 Madrid. Tfno: +34 915 422800.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8250> | Recibido: 16/12/2016 • Evaluado: 21/12/2016 • Aceptado: 15/02/2017

ABSTRACT

• A particular kind of industrial boilers, referred to as Heat Recovery Steam Generators (HRSGs), are used in combined cycle power plants to recover part of the heat of the exhaust gases of a gas turbine to generate steam and power a steam turbine. Ever since the use of HRSGs for power plants, the shape design of the inlet duct at the entrance to these units, one of their most critical components, has followed greatly unchanged design guidelines. The contribution of this paper is twofold: on the one hand, it shows that there is substantial room for improvement in the shape design of the inlet ducts of HRSGs, in terms of achieving a lower pressure drop, a higher velocity uniformity and an important cost reduction of the unit; on the other hand, it shows how the application of the Combined Hybrid Direct Search (CHDS) algorithm, applicable in many fields for aerodynamic shape optimization involving big displacements, can find these improved designs, which can be quite unconventional and non-intuitive. The CHDS algorithm combines genetic, gradient and swarm search intelligence in every iteration. The results obtained for the two HRSG families presented show that there are optimum trade-off design points with simultaneous reductions in pressure drop of up to 20-25%, in lateral surface of up to 38% and in length of up to 16%, while having comparable velocity uniformities to the existing designs.

• **Keywords:** aerodynamic optimization, optimization methodology, multi-attribute, hybrid direct search, geometry parameterization, computational fluid dynamics, heat recovery steam generators.

RESUMEN

Un tipo particular de calderas industriales, denominado calderas generadoras de vapor por recuperación de calor (HRSGs, en sus siglas en inglés), se utiliza en centrales de ciclo combinado para recuperar parte del calor de los gases de escape de una turbina de gas, generar vapor y alimentar una turbina de vapor. Desde el comienzo del empleo de los HRSG para centrales eléctricas, el diseño de la geometría del conducto de entrada a estas unidades, uno de sus componentes más críticos, ha seguido pautas que han evolucionado muy poco. La contribución de este trabajo es doble: por un lado, muestra que existe un potencial sustancial para mejorar el diseño de la forma de los conductos de entrada de los HRSG, en términos de lograr una menor caída de presión, una mayor unifor-

midad de velocidad y una reducción importante del coste global de la caldera; por otro lado, muestra cómo la aplicación del algoritmo combinado de búsqueda directa híbrida (CHDS, en sus siglas en inglés), aplicable en muchos campos para optimización aerodinámica de geometrías, permitiendo grandes desplazamientos, puede encontrar estos diseños mejorados, que pueden ser bastante poco convencionales y no intuitivos. El algoritmo CHDS combina inteligencia genética, de búsqueda de gradiente y de búsqueda de enjambre en cada iteración. Los resultados obtenidos para las dos familias de HRSG presentadas muestran que hay puntos óptimos de diseño con reducciones simultáneas en la caída de presión de hasta el 20-25%, en superficie lateral de hasta el 38% y en longitud de hasta el 16%, manteniendo niveles de uniformidad de velocidad comparables a diseños existentes.

Palabras clave: optimización aerodinámica, metodología de optimización, multi-atributo, búsqueda directa híbrida, parametrización geométrica, dinámica de fluidos computacional, calderas generadoras de vapor por recuperación de calor.

1. INTRODUCCIÓN

Los generadores de vapor por recuperación de calor (HRSG, por sus siglas en inglés) para plantas de ciclo combinado son un equipo industrial clave en el sector de generación de energía. Están diseñados y fabricados por grandes empresas de ingeniería y su precio es elevado, tienen un gran tamaño y son cruciales para el rendimiento de la planta de energía. Sin embargo, el diseño de ciertos componentes críticos, como el conducto de entrada, ha permanecido prácticamente inalterado durante muchas décadas. El comportamiento de estos equipos se mide principalmente en términos de caída de presión en toda la unidad, uniformidad de la velocidad del flujo de gases de escape y capacidad de transferencia de calor.

En un HRSG, los gases de escape calientes de una turbina de gas fluyen a través de un conjunto de tubos (normalmente tubos con aletas) a través de los cuales se bombea agua. El calor del flujo de gas se transfiere al flujo de agua, que se transforma en vapor. Este vapor se puede utilizar directamente para aplicaciones industriales o para la generación de electricidad en una turbina de vapor, o para ambos (en las llamadas plantas de cogeneración).

La Figura 1 muestra un ejemplo de disposición de una central eléctrica de ciclo combinado, un ejemplo de un HRSG real y varios tipos de diseño de conducto de entrada, junto con una distribución de flujo de velocidad de ejemplo dentro de un HRSG.

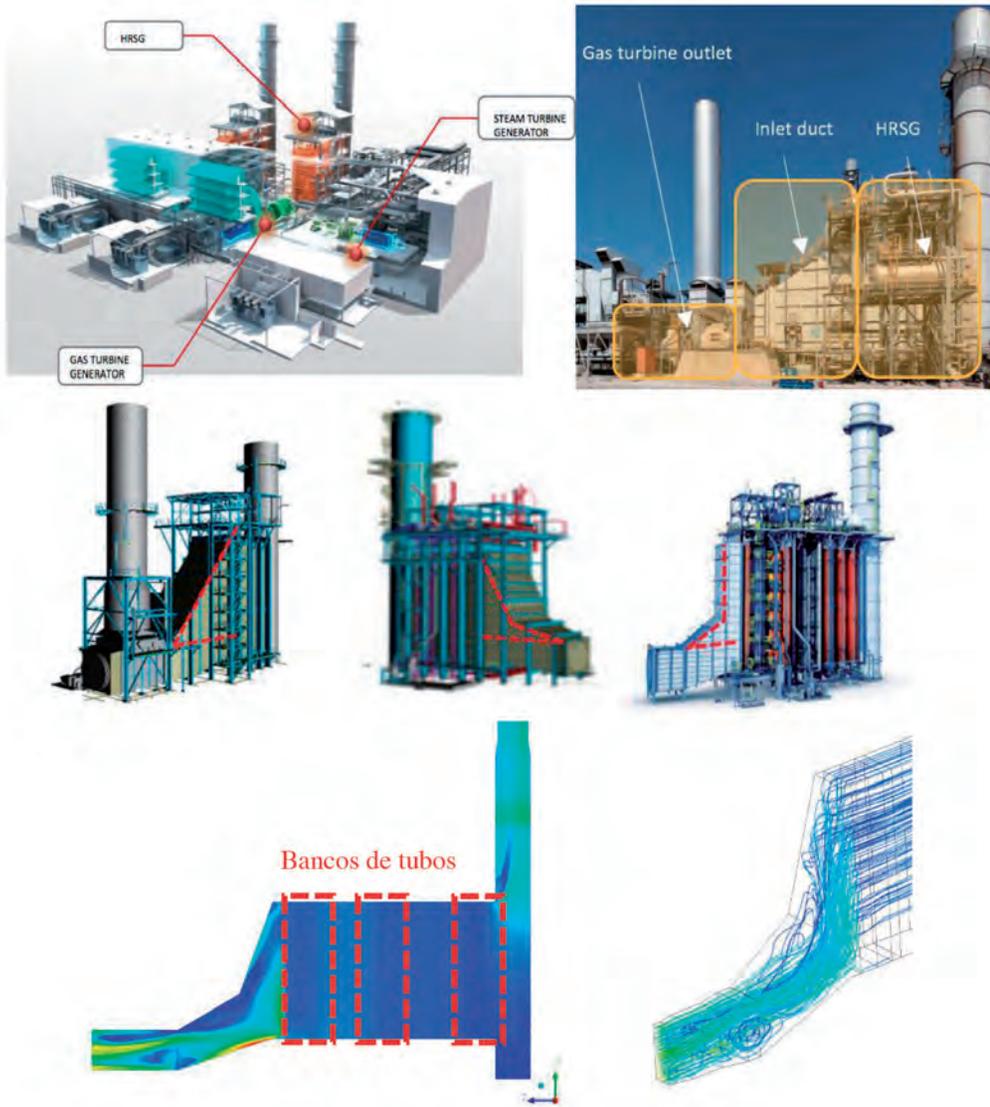


Fig. 1: Ejemplos de un diseño de planta de ciclo combinado y un HRSG real (arriba). A continuación, los tipos de diseño de conducto de entrada de HRSG más utilizados en la industria (de izquierda a derecha): conducto de entrada de ángulo único, conducto de entrada de ángulo doble y tipo de diseño alternativo que algunos fabricantes están empezando a utilizar. En la parte inferior, vista lateral de los contornos de velocidad en el plano medio de un HRSG típico (izquierda), que ilustra la posición de los diferentes bancos de tubos; vista isométrica detallada de las líneas de corriente de velocidad en el conducto de entrada (derecha). Los valores de velocidad varían de 0 (azul) a 100 m/s (rojo) - la escala detallada no se puede incluir por razones de confidencialidad

El principal desafío en esta aplicación es que el flujo de gases de escape que sale de la turbina de gas tiene que fluir hacia el HRSG, que tiene un área transversal mucho más grande, a través de una sección crítica y de longitud reducida, el denominado conducto de entrada. Esto introduce desprendimiento de flujo y, por tanto, no uniformidad en la turbulencia y la velocidad, lo que se puede observar en la Figura 1. Adicionalmente, el perfil de velocidad a la salida de la turbina de gas, dependiendo de su uniformidad de velocidad, turbulencia y otras características, influye de manera importante en el comportamiento del flujo a través del HRSG. A pesar de esto, todos los fabricantes intentan hacer que este conducto de entrada sea lo más corto posible, para que sus unidades sean más compactas, intentando mantener la caída de presión del gas y la uniformidad del perfil de velocidad dentro de ciertos límites. Además, la reducción del tamaño del conducto de entrada puede reducir considerablemente los costes de fabricación, ya que esta sección está construida de acero inoxidable, que es un material costoso (actualmente, el coste promedio de fabricación de un conducto de entrada de HRSG es de alrededor de 450 \$/m²).

A lo largo de las décadas, los conductos de entrada de HRSG han sido diseñados siguiendo en gran medida las mismas tendencias de diseño. Este trabajo se centra en la optimización del diseño de la geometría del conducto de entrada de diferentes familias de HRSG, gracias a la aplicación del algoritmo CHDS presentado en ¹.

En términos generales, el diseño de un conducto de entrada de HRSG siempre ha sido de uno de los dos tipos mostrados en la Figura 1 (centro izquierda y centro medio).

Sin embargo, ciertos fabricantes han empezado a usar diseños alternativos de conductos de entrada, como se puede ver en la Figura 1 (centro derecha), pero no se han realizado extensos análisis de diseño, hasta donde estos autores conocen, para comparar las diferentes alternativas de diseño de conductos de entrada.

Hay una serie de obras en el área de la dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) de modelado de un conducto de entrada de HRSG, pero no se ha encontrado un análisis de optimización de la geometría completa de este elemento crítico. El objetivo de estos trabajos es analizar la distribución del flujo de un diseño particular o los efectos de elementos introducidos en el conducto de entrada para mejorar la distribución del flujo, tales como

² y ³. Trabajos más generales en el campo del análisis CFD de HRSG completos se pueden encontrar en ⁴⁻¹⁰.

El objetivo de aplicar el algoritmo CHDS al diseño de un HRSG es generar geometrías optimizadas para los conductos de entrada de una amplia gama de familias de HRSG, lo que puede mejorar las líneas de tendencia de diseño actuales y ofrecer mejores niveles de prestaciones, con unidades más compactas y más cortas, manteniendo una buena uniformidad de velocidad en la entrada del HRSG. Esta es la principal contribución de este documento.

El artículo está organizado de la siguiente manera: la Sección 1 describe el problema de optimización del diseño de la geometría de un conducto de entrada parametrizado genérico de un HRSG; la Sección 2 describe los principales resultados obtenidos para dos familias de HRSG con el algoritmo de optimización CHDS y ofrece un análisis en profundidad de los resultados; finalmente, la Sección 3 resume las principales conclusiones extraídas de este trabajo y presenta los trabajos futuros que se llevarán a cabo en este ámbito.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE LA OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO GEOMÉTRICO

El objetivo de este trabajo es obtener diseños óptimos para el conducto de entrada de un conjunto de familias de HRSG. Este problema de optimización es multi-atributo o multi-objetivo, ya que el objetivo final es obtener los diseños de conductos de entrada que minimicen dos atributos: caída de presión total a través del conducto de entrada y no uniformidad de velocidad en el plano de salida del conducto de entrada.

La caída de presión se mide como la diferencia del promedio ponderado en flujo másico de la presión total entre la entrada y la salida del conducto de entrada.

La no uniformidad de velocidad se define como la diferencia entre la velocidad obtenida mediante el promedio ponderado por el área y la velocidad calculada mediante el promedio ponderado en flujo másico. Esta definición es simplemente una de las formas posibles de medir la no uniformidad de la velocidad. Otras definiciones alternativas serían, por ejemplo, la comprobación de la diferencia entre la velocidad máxima, la velocidad mínima y la velocidad media (como se hace para los índices de velocidad, por ejemplo). Sin embargo, estas definiciones alternativas, que implican el uso de los valores de velocidad máxima y mínima, pueden ser engañosas, ya que irregularidades menores de la malla, inevitables en la mayoría de las simulaciones de CFD, pueden dar valores falsos de velocidades máximas o mínimas. Estos valores son errores numéricos aceptables y pueden ser descartados fácilmente por el ingeniero al evaluar los resultados manualmente, pero no pueden ser detectados de manera sencilla por el código CFD al iniciar una optimización automática. Por lo tanto, se utiliza la definición indicada de no uniformidad de velocidad. Debe observarse que, estrictamente hablando, por no uniformidad de velocidad, no nos referimos solamente al hecho de que los valores de velocidad sean uniformes en el plano de salida del conducto de entrada, sino al hecho de que el flujo másico también se distribuya uniformemente. Esta "combinación" de uniformidad de velocidad y del flujo másico es precisamente lo que refleja la diferencia entre

la velocidad obtenida mediante el promedio ponderado por el área y la velocidad calculada mediante el promedio ponderado en flujo másico.

Ambos atributos se manejan por unidad de magnitud, por lo que el hecho de que los valores de magnitud absoluta de cada atributo tengan un rango diferente no afecta al proceso de optimización o a los resultados finales. Los diseños óptimos son aquellos que minimizan ambos atributos.

La geometría del conducto de entrada está parametrizada como se muestra en la Figura 2. Las variables utilizadas son: dos ángulos para la pared superior, dos ángulos para la pared lateral (idénticos en ambas paredes laterales), dos más para la pared inferior y la longitud total del conducto de entrada. Estas variables toman en consideración las modificaciones de diseño que son factibles en términos de fabricación y montaje en centrales eléctricas reales. Por ejemplo, las paredes curvas o un mayor número de ángulos intermedios no se consideran de interés y, por consiguiente, no se incluyen en este análisis.

3. PRINCIPALES RESULTADOS OBTENIDOS CON EL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN CHDS

Esta sección ilustra la aplicabilidad del algoritmo CHDS (como se describe en detalle en ¹) a otros campos en los que se puede utilizar con éxito la optimización de la geometría de un objeto o equipo y diferentes a los túneles de viento analizados en ¹. En concreto, se aplica CHDS a la optimización del diseño de los conductos de entrada del HRSG para centrales de ciclo combinado.

Aunque CHDS se explica en profundidad en ¹, aquí se incluye un breve resumen para mayor comodidad del lector. La Figura 4 (parte superior) ilustra los pasos principales seguidos por un procedimiento general de optimización CHDS:

1. La fase 0 es la fase de exploración de diseño, en la que se generan y calculan una serie de puntos de diseño para tener una representación inicial del espacio de los atributos (es decir, el espacio de prestaciones). Estos puntos pueden ser generados por medio de cualquier técnica de Diseño de Experimentos (DoE), u otros métodos.
2. Se calcula un primer frente de Pareto, para agrupar los diseños óptimos para la fase 0. El frente de Pareto es una herramienta muy útil para problemas de optimización verdaderamente multi-atributo, como se comenta a continuación.
3. Se genera automáticamente un umbral de tolerancia, definido por el diseñador, para agrupar los puntos candidatos que se seleccionarán para la siguiente fase. Se puede aplicar *clustering* para seleccionar puntos representativos entre un grupo de puntos de diseño muy similares (tanto en el espacio de variables como en el espacio de atributos).
4. Se realiza un cruzamiento (*crossover*) entre cada punto de diseño seleccionado y su(s) punto(s) más cercano(s) en el frente de Pareto. El cruzamiento está controlado por los denominados factores de incremento, que se ajustan automáticamente para mejorar la velocidad de optimización y el resultado final.
5. Por lo tanto, se genera un nuevo conjunto de puntos de diseño. Estos puntos constituyen la fase I.
6. Se calcula un nuevo frente de Pareto. La optimización ha tenido éxito si el nuevo frente de Pareto mejora el frente de Pareto de la fase 0.
7. Este procedimiento puede repetirse tantas veces (es decir, fases) como establezca el diseñador o el algoritmo.

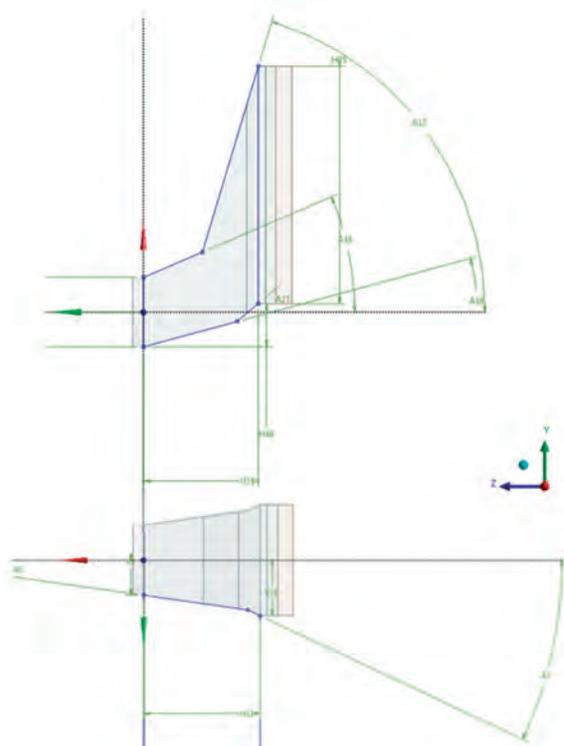


Fig. 2: Variables utilizadas para parametrizar un conducto de entrada general para diferentes familias de HRSG (vistas lateral y superior)

CHDS explora los conceptos de jerarquía de variables (permitiendo variables continuas y no continuas) y fases de optimización y combina la inteligencia de búsqueda de gradiente, genética y de enjambre para una verdadera optimización multi-atributo, estructurada, e híbrida por búsqueda directa.

La novedad del enfoque CHDS propuesto se deriva del hecho de que, a diferencia de la mayoría de los otros autores que han combinado algoritmos basados en gradiente y sin gradiente (ejemplos relevantes son ¹¹⁻¹³), CHDS no cambia de un tipo de algoritmo a otro dependiendo de cómo avanza la optimización, sino que combina elementos de los diversos tipos de algoritmos en cada fase.

El objetivo de esta sección es mostrar que CHDS puede aplicarse con éxito a la optimización de la geometría de los HRSG, resultando en diseños con mejores prestaciones, competitividad de costes y, en algunos casos, diseños bastante diferentes de los convencionales.

Este trabajo se ha llevado a cabo para varias familias de HRSG de un fabricante en particular y, por lo tanto, algunos de los resultados no se pueden mostrar completamente por razones de confidencialidad.

La principal preocupación de la mayoría de los fabricantes de HRSG hoy en día es satisfacer los requisitos del cliente final, e incluso mejorarlos para superar a sus competidores, a la vez que se reduce el coste total de la unidad. El requisito principal para un HRSG moderno es mantener la caída de presión en toda la unidad por debajo de un umbral máximo permitido, mientras se recupera el máximo calor disponible de la corriente de gases. Una ventaja competitiva adicional y muy importante, como se ha mencionado anteriormente, es poder satisfacer los requisitos de rendimiento con unidades más pequeñas (principalmente reduciendo la longitud total).

La aplicación del algoritmo CHDS a este caso particular de optimización del diseño ha producido resultados muy interesantes. En primer lugar, la Figura 3 presenta los resultados de dos alterna-

tivas de diseño diferentes. Se observa que vale la pena aplicar un esquema de optimización, ya que hay importantes posibilidades de mejora al cambiar la geometría.

La primera alternativa de diseño es el diseño que se utilizó para la central eléctrica real, en el caso particular de una de las familias de HRSG estudiadas, y que está actualmente en funcionamiento (plano superior de ángulo único para el conducto de entrada). Éste es un diseño más tradicional. Por otra parte, la segunda alternativa de diseño tiene un plano superior de doble ángulo para el conducto de entrada, que es una característica de diseño que muchos fabricantes introdujeron hace años, porque se suponía que tenía siempre un rendimiento mejorado sobre el diseño de ángulo único (también se muestra en este trabajo que el diseño de ángulo doble no siempre es mejor que el de ángulo único).

Los resultados de rendimiento de ambas alternativas de diseño, en términos de caída de presión y uniformidad de velocidad se muestran en la Figura 4. Hay una considerable mejora en términos de caída de presión con el diseño alternativo, por lo que vale la pena explorar más puntos de diseño para encontrar diseños óptimos, algunos incluso con geometrías poco convencionales.

La aplicación de CHDS tiene una fase 0 o fase de exploración de diseño que, en este caso, tiene 120 puntos de diseño. Estos puntos pueden obtenerse mediante técnicas de DoE, tales como *Latin Hypercube*, u otros métodos especialmente recomendados, por ejemplo en ¹⁴, para problemas similares a éste. En el caso de este trabajo, se utilizó un esquema de DoE propio, basado en la experiencia de los autores, pero el hipercono latino y otros métodos también se probarán en trabajos futuros.

Una vez finalizada la fase de exploración, CHDS lleva a cabo la optimización en sí. Los resultados de una optimización de una fase para dos familias de HRSG se representan en la Figura 4.

Una de las representaciones más poderosas para entender los resultados de la simulación de un problema de optimización de múltiples atributos es el frente de Pareto. El frente de Pareto muestra la familia de soluciones óptimas teniendo en cuenta todos los objetivos considerados (en este caso, la caída de presión total a través del conducto de entrada y la no uniformidad de velocidad en el plano de salida del mismo). Todas las soluciones en el frente de Pareto son igualmente óptimas, ya que el óptimo absoluto sería tener caídas de presión y no uniformidades de velocidad tan cerca de cero como fuera posible, y por lo tanto cada una de las soluciones en el frente de Pareto son una combinación óptima de caída de presión y uniformidad de velocidad.

En términos generales, los diseños con un valor reducido para el primer ángulo de la pared superior y un valor elevado para el segundo ángulo reducen la caída de presión, porque el flujo está más restringido y no se puede separar tan fácilmente. Sin embargo, la uniformidad de velocidad es peor debido al segundo ángulo abrupto de la pared superior. Por el contrario, si se aumenta el primer ángulo y se reduce el segundo ángulo, se producirá separación de flujo en algún punto y, por lo tanto, se incrementará la caída de presión, pero se mejorará la uniformidad de velocidad. Análisis similares pueden realizarse con el resto de las variables de diseño.

Antes de analizar los resultados de la Figura 4 se presenta una breve validación de los resultados del programa de CFD utilizado (ANSYS v17.0) para la evaluación de los HRSG. La siguiente tabla presenta la comparación de las caídas de presión proporcionadas por el fabricante y las obtenidas de la simulación CFD para cada uno de los bancos de tubos que se encuentran a lo largo de un HRSG. Ésta es una comparación típica para validar cualquier simulación CFD aplicada a un HRSG. Para mayor claridad, los bancos de tubos se muestran, para un ejemplo de simulación, en la Figura 1.

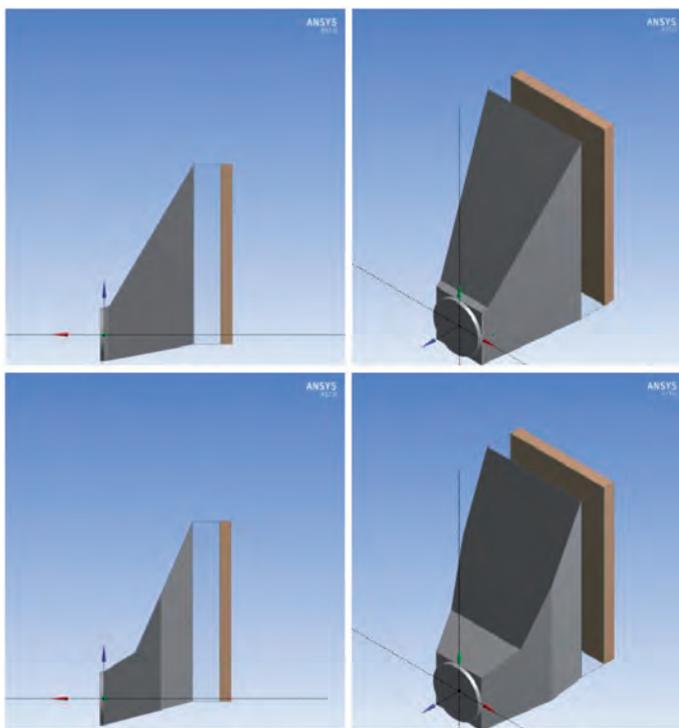


Fig. 3: Vistas laterales e isométricas de dos ejemplos de alternativas de diseño para el conducto de entrada de un HRSG (plano superior de ángulo único y plano superior de doble ángulo para el conducto de entrada). Éstos son el diseño actual real (arriba) y un diseño alternativo (abajo) para la primera familia de HRSG analizada

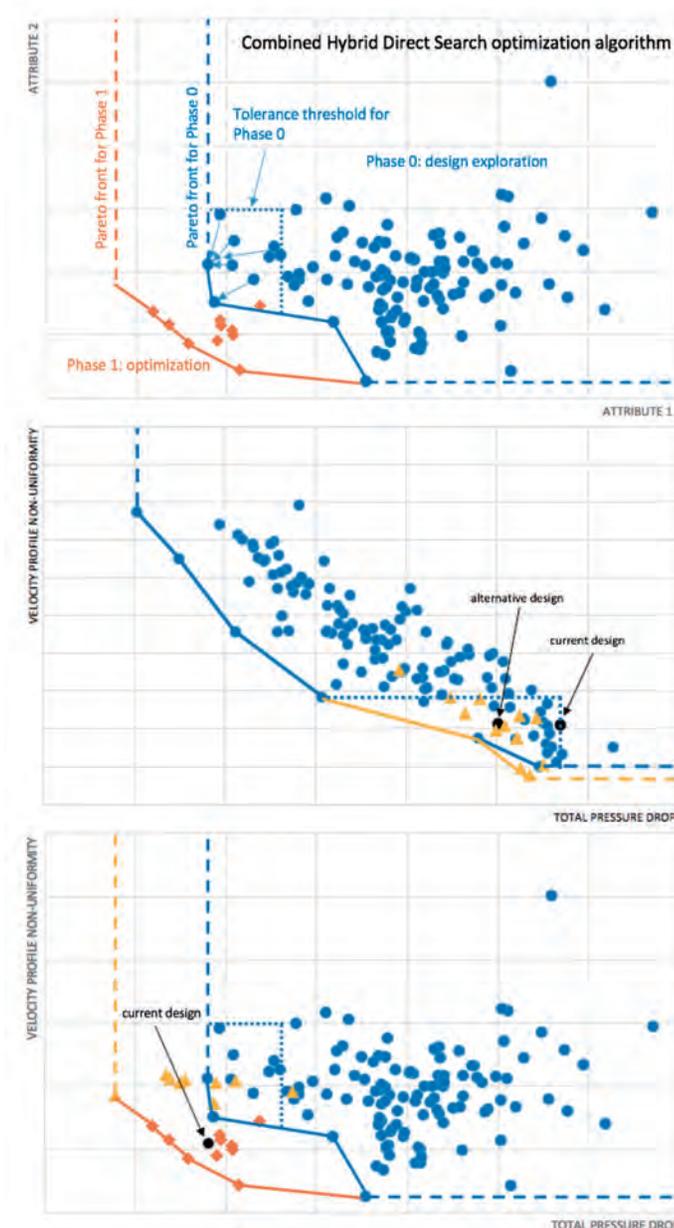


Fig. 4: Ilustración del procedimiento seguido por el algoritmo de optimización CHDS para una optimización de 1 fase (superior); Aplicación del algoritmo CHDS a la optimización de la forma del conducto de entrada de dos familias de HRSG (central e inferior). Se utilizan dos conjuntos de valores para los factores de incremento de las variables (como se explica en 1) para el proceso de cruzamiento: valores menores que 1 (puntos candidatos marcados con triángulos) y mayores que 1 (puntos candidatos marcados con diamantes)

Hay ciertos errores entre los valores proporcionados por el fabricante y los obtenidos de la simulación CFD. Estas diferencias se deben a la no uniformidad de la distribución de velocidades en la entrada de cada uno de los bancos de tubos (simulados como medios porosos), ya que las ecuaciones de los medios porosos asumen un perfil de velocidad homogéneo. Por otro lado, las caídas de presión proporcionadas son mediciones puntuales y sus valores se ven afectados por la posición exacta del sensor dentro del plano de entrada / salida de cada banco de tubos. En cualquier caso, los errores son muy aceptables, dada la aplicación y los valores de presión absoluta, lo que significa que los errores absolutos son de muy pocos Pascales.

Centrándose ahora en los resultados de la Figura 4, se puede observar cómo la aplicación del algoritmo CHDS ha producido una mejora sustancial de las prestaciones de los HRSG.

Aunque la fase 0 selecciona los puntos de diseño siguiendo un procedimiento que cubre el área de la región de búsqueda en la que

el diseñador está más interesado, esta fase en sí misma es una mera exploración de diseño y no una optimización como tal. La Fase I es la primera fase de optimización verdadera del algoritmo CHDS.

Cabe señalar, en cualquier caso, que el procedimiento de exploración de diseño incorporado al CHDS para llevar a cabo los análisis para la fase 0 ya es bastante bueno en muchos casos, ya que los puntos de diseño calculados producen buenos resultados y cubren una amplia área del espacio de los atributos. Por lo tanto, la fase 0 es en sí misma valiosa en el sentido de que los fabricantes no han realizado una exploración tan extensa de diferentes puntos de diseño, en la mayoría de los casos. Se puede ver que las tendencias de diseño actuales (es decir, usar un diseño de ángulo único o, alternativamente, considerar que un diseño de doble ángulo es siempre mejor) pueden ser engañosas o, al menos, no óptimas. Además, los diseños no convencionales y no intuitivos pueden superar a los diseños tradicionales.

Como ejemplo de esto, la Figura 5 y la Tabla 2 incluyen la comparación entre varios puntos de diseño representativos, de entre todos los simulados en la Figura 4.

En esta figura y tabla se puede observar cómo diseños muy similares (es decir, cercanos en el espacio de las variables) y que intuitivamente estarían muy cerca también en el espacio de los atributos (es decir, con unas prestaciones muy parecidas), pueden tener resultados bastante diferentes. Por otro lado, diseños muy diferentes pueden estar muy cerca en el espacio de atributos. Cabe destacar, en particular, que los diseños de ángulo doble no son necesariamente mejores que los diseños de ángulo único (por ejemplo, los puntos de diseño *d* y *g* están muy cerca en prestaciones). Esto significa que se requiere un análisis exhaustivo en cada caso, ya que las tendencias de diseño actuales pueden no ser siempre la mejor opción. Además, tanto la fase 0, como fase de exploración y, lo más importante, la fase I, pueden producir diseños no convencionales con mejores prestaciones (punto de diseño *i* y, especialmente, *j*).

Banco de tubos	Error [%]
#1	9
#2	9
#3	7
#4	3
#5	5
#6	1
#7	2
#8	4
#9	5
#10	5
#11	4
#12	4
#13	4
#14	4
#15	5
#16	5
#17	5
#18	5
#19	6
#20	8

Tabla 1: Error relativo entre las caídas de presión proporcionadas por el fabricante y las obtenidas del análisis CFD para los bancos de tubos de un HRSG usado como ejemplo

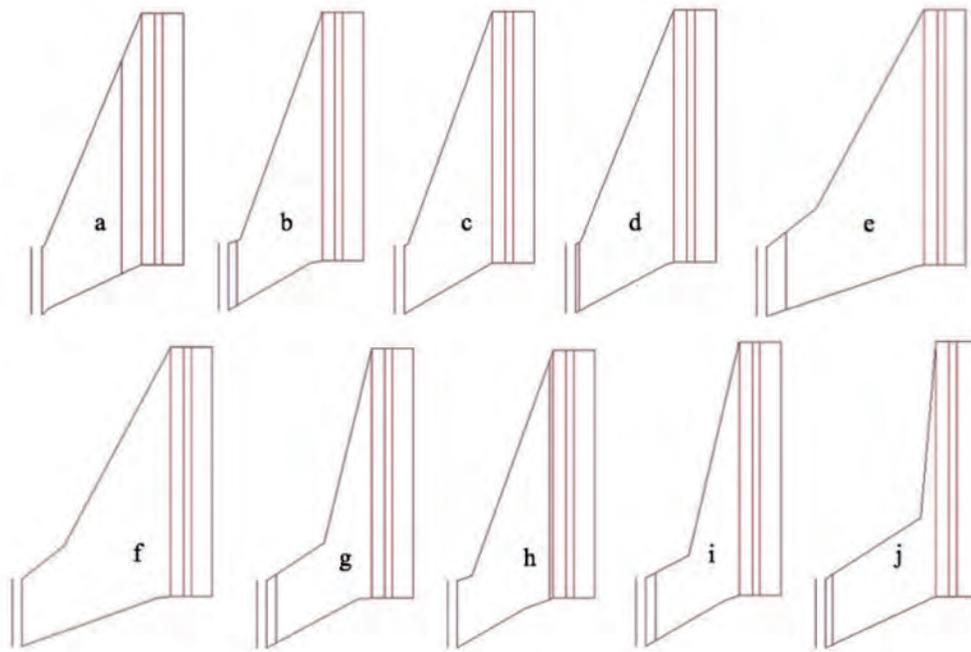


Fig. 4: Vista lateral de puntos de diseño de ejemplo que están muy cerca en el espacio de variables y también muy cerca en el espacio de atributos ("a" a "d"); muy cerca en el espacio de las variables y separados en el espacio de los atributos ("e" y "f"); bastante separados en el espacio de variables y muy cerca en el espacio de atributos ("g" y "h"); y puntos de diseño que son bastante poco convencionales (bastante disruptivos) y con unas prestaciones no intuitivas ("i" y, especialmente, "j")

Todos los resultados de la Figura 5 refuerzan la importancia de aplicar optimización, ya sea con CHDS u otros métodos, al problema del diseño del conducto de entrada de los HRSG.

En la Fase I, en su conjunto, los puntos de diseño mejoran los resultados de los puntos de diseño estudiados en la fase 0. Además, se puede observar cómo la aplicación de CHDS mejora el frente de Pareto obtenido en la fase 0. Las geometrías de los diseños óptimos obtenidos son, en algunos casos, bastante poco convencionales y no intuitivas, como se ve en la Figura 5. Todo esto ha permitido al fabricante tener un nuevo conjunto de directrices de diseño para sus diferentes familias de HRSG para los próximos años.

Además, el fabricante ha recibido frentes de Pareto, similares a los mostrados en la Figura 4, para cada una de sus principales

Diseño	Caída de p total	No uniformidad de v
a	72%	146%
b	72%	145%
c	72%	145%
d	75%	139%
e	98%	89%
f	96%	102%
g	71%	139%
h	73%	141%
i	64%	146%
j	60%	159%

Tabla II: Comparación entre diferentes diseños, para mostrar puntos de diseño que: están muy cerca en el espacio de variables y también muy cerca en el espacio de atributos ("a" a "d"); están muy cerca en el espacio de las variables y separados en el espacio de los atributos ("e" y "f"); están bastante separados en el espacio de variables y muy cerca en el espacio de atributos ("g" y "h"); y puntos de diseño que son bastante poco convencionales (bastante disruptivos) y con unas prestaciones no intuitivas ("i" y, especialmente, "j"). Todos los resultados son con respecto a los atributos del diseño actual de HRSG de la Figura 4 (medio)

familias de HRSG. Esto permite alcanzar un compromiso entre la caída de presión y la no uniformidad de velocidad, porque, para un tipo particular de HRSG, se pueden preferir puntos de diseño con menores caídas de presión totales, incluso a expensas de no uniformidades mayores, o viceversa. Las geometrías exactas obtenidas para los puntos óptimos de diseño no se pueden incluir en este documento por confidencialidad.

Para tener una mejor visión del verdadero potencial de CHDS para la optimización del diseño de geometrías, permitiendo grandes desplazamientos, el algoritmo se aplica a una segunda familia de HRSG, y se pueden observar resultados muy interesantes en la Figura 4 (abajo).

En particular, para este caso, la exploración de diseño realizada en la fase 0 (puntos candidatos marcados con círculos) abarca una amplia área de la región de

búsqueda, pero el diseño real existente, ya construido y en funcionamiento para esta familia HRSG particular, tiene mejores valores para ambos atributos que todos los demás candidatos. Esto significa que una mera exploración de diseño puede ser inadecuada o no suficientemente buena en algunos casos. Una vez que el CHDS calcula los puntos para la Fase I, las simulaciones muestran que los puntos candidatos mejoran considerablemente, no sólo frente a los puntos de la fase 0, sino, lo más importante, frente al diseño actual real de este HRSG.

Para este segundo ejemplo de HRSG, se ha realizado una prueba adicional. Los factores de incremento utilizados para obtener nuevos puntos de diseño candidatos para la Fase I a partir del cruzamiento de sus padres de la Fase 0 se modifican (los factores de incremento se explican en detalle en ¹). En particular, se utilizan dos conjuntos de valores: el primer conjunto (puntos candidatos marcados con triángulos) tiene factores menores que 1, lo que significa que el cruzamiento de las soluciones padre está entre ambos padres (en el espacio de las variables); el segundo conjunto (puntos candidatos marcados con diamantes) tiene factores mayores que 1, lo que significa que el cruzamiento de las soluciones de origen se encuentra más allá del punto de partida perteneciente al frente de Pareto (siempre se comprueba que los nuevos valores de las variables se encuentren dentro del rango de las mismas, según lo definido por el diseñador).

Para este caso, el uso de factores de incremento por encima de 1 produce mejores resultados, en general. Sin embargo, el mejor punto candidato en términos de caída de presión total se obtiene con un factor de incremento por debajo de 1. Por ello, CHDS explora automáticamente ambos conjuntos de valores, para tener una mayor probabilidad de alcanzar diseños óptimos.

Por último, para ilustrar mejor el rendimiento de los diseños óptimos, dos de los puntos de diseño en el frente de Pareto para cada familia de HRSG se presentan en la Figura 6. Se muestran los perfiles de velocidad a la salida del conducto de entrada, para representar el nivel de uniformidad logrado tras la optimización.

Debe tenerse en cuenta que, debido a las limitaciones de fabricación, coste y disposición de planta, comunes a los HRSG actuales, los diseños todavía tienen un nivel de desprendimiento de flujo y no uniformidad. A continuación, la uniformidad mejora a medida que los gases fluyen a través de los haces de tubos.

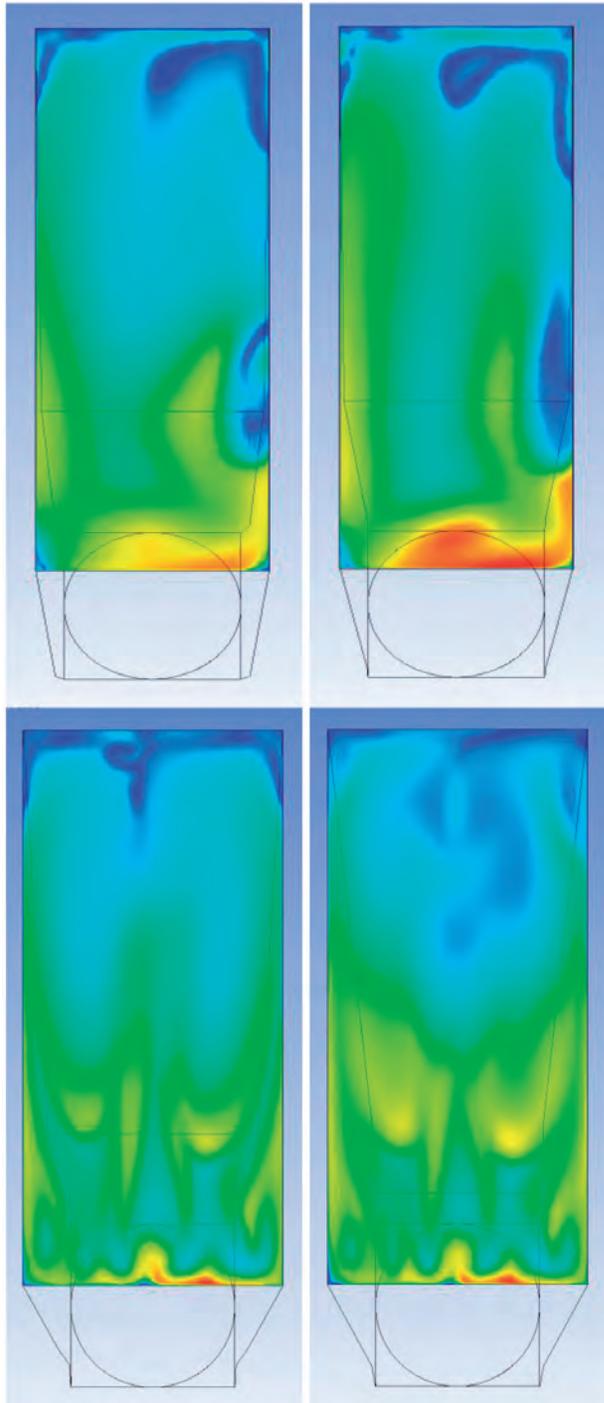


Fig. 6: Gráficos de contorno de velocidad para el plano de salida del conducto de entrada: contornos para los diseños recomendados, con uniformidad mejorada con respecto a los diseños actuales (izquierda); y para diseños con la peor uniformidad, pero dentro del frente de Pareto (derecha), para la primera familia HRSG (arriba) y para la segunda familia (abajo). Los valores de velocidad varían de 0 (azul) a 100 m/s (rojo) - la escala detallada no se puede incluir por razones de confidencialidad

[2] Ameri M, and Dorcheh FJ. "The CFD Modeling of Heat Recovery Steam Generator Inlet Duct". International Journal of Energy Engineering. 2013. Vol. 3-3. p74-79. DOI: <http://dx.doi.org/10.5963/IJEE0303003>.

[3] Lee BE, Kwon SB, and Lee CS. "On the Effect of Swirl Flow of Gas Turbine Exhaust Gas in an Inlet Duct of Heat Recovery Steam Generator". ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2002. Vol. 124. p496-502.

[4] Galindo-García IF, Vázquez-Barragán AK, and Rossano-Román M. "CFD Simulations of Heat Recovery Steam Generators Including Tube Banks". Proceedings of the ASME 2014 Power Conference POWER2014, Baltimore, Maryland, USA, July 28-31. 2014.

[5] Aslam Bhutta MM, Hayat N, Bashir MH, et al. "CFD Applications in Various Heat Exchangers Design: A Review". Applied Thermal Engineering. 2012. Vol. 32. p1-12.

[6] Galindo-García IF, Vázquez-Barragán AK, and Rossano-Román M. "CFD Simulations of a Heat Recovery Steam Generator for the Aid of Power Plant Personnel". Proceedings of the 20th International Conference on Nuclear Engineering and ASME 2012 Power Conference, Anaheim, California, USA, July 30-August 3. 2012.

[7] Shi X, Chriswindarto W, and Boyce D. "Application of CFD Modelling in HRSG Evase Design". Proceedings of the 2009 Power Conference, ASME, Albuquerque, New Mexico, USA, July 21-23. 2009.

[8] Hegde N, Han I, Lee TW, et al. "Flow and Heat Transfer in Heat Recovery Steam Generators". Journal of Energy Resources Technology. 2007. Vol. 129. p.232-242.

[9] Sundén B. "Computational Fluid Dynamics in Research and Design of Heat Exchangers". Heat Transfer Engineering. 2007. Vol. 28-11: p.898-910.

[10] Daiber J. "Fluid Dynamics of the HRSG Gas Side". Power Magazine, (<http://www.powermag.com/gas/534.html>). 2006.

[11] Guliashki V. "A Hybrid Direct Search - Quasi-Newton Method for the Inverse EIT Problem". Bulgarian Academy of Sciences. Cybernetics and Information Technology. 2008. Vol. 8-2.

[12] Hegazi HA, Nassef AO, and Metwalli S. "Shape Optimization of NURBS Modeled 3D C-Frames Using Hybrid Genetic Algorithm". ASME 2002 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. 2002. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT7357>.

[13] Hsiao CT, Chahine G, and Gumerov N. "Application of a Hybrid Genetic/Powell Algorithm and a Boundary Element Method to Electrical Impedance Tomography". Journal of Computational Physics. 2001. Vol. 173. p.433-454. DOI: <http://dx.doi.org/10.1006/jcph.2001.6866>.

[14] Krajnovic S. "Aerodynamic Optimisation of Vehicles Using Computational Fluid Dynamics and Response Surface Methodology". Paper presented at the 21st International JUMV Automotive Conference SCIENCE & MOTOR VEHICLES (Paper NMV0724), Beograd, Serbia. 2007.

[15] Prada-Nogueira I, De Cuadra F, and Sánchez-Miralles A. "Towards a General Model for Automatic and Flexible Design of Closed Wind Tunnels". Internal publication. Institute for Research in Technology IIT-15-154A. 2015. http://www.iit.upcomillas.es/publicaciones/mostrar_publicacion_working_paper.php.en?id=259.

[16] Paniagua J. "Aerodynamic Optimisation of the Nose Shape of a High-Speed Train". PhD diss. Technical University of Madrid. 2014.

[17] Zamorano-Rey G, Garro B, Fernández-Gámiz U, et al. "A Computational Study of the Variation of the Incidence Angle in a Vortex Generator". DYNA New Technologies. 2015. Vol. 2-1. p1-13. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT7357>.

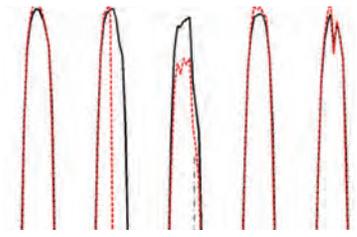
AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen especialmente a los ingenieros de investigación Dr. I. Serrano, P.J. Cancillo, E. Martín y J.M. Cáncer, de KeelWit Technology (ESPAÑA), por sus valiosas contribuciones, y a AMEC FOSTER WHEELER por su firme apoyo.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Prada-Nogueira I, De Cuadra F, and Sánchez-Miralles A. "General Model for Automatic Design Optimisation of Aerodynamic Components. Wind Tunnel Case Study". DYNA, 92(4). 442-448 DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8144>.

Enfoque para la detección y diagnóstico de fallos en sistemas de energía fotovoltaica basado en la distribución de Weibull



An approach for failure detection and diagnosis in photovoltaic power systems based on Weibull distribution function

Jesús Ferrero¹, Juan Gómez¹, Fernando Olivencia², Gonzalo Cerruela² y Adolfo Crespo¹

¹ Universidad de Sevilla. Avda. Camino de los Descubrimientos, s/n – 41092 Sevilla. Tfno: +34 954487215.

² Universidad de Córdoba. Dpto de Computación y Análisis Numérico. Campus de Rabanales. Edificio Albert Einstein – 14071 Córdoba. Tfno: +34 957218349.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8252> | Recibido: 19/12/2016 • Evaluado: 10/01/2017 • Aceptado: 29/03/2017

ABSTRACT

This paper proposes a method to predict photovoltaic (PV) energy production based on the hypothesis that during the hours of activity of the plant, its production behaves as a stochastic process with a Weibull distribution function of two parameters which take into account the characteristics of the photovoltaic plant and the weather parameters measured in real time by a sensor network. The versatility and accuracy of the model has been validated through the deployment of a real-time SCADA system. The system developed includes power generation prediction and real-time comparison between the power expected and the power measured, for failure detection. With the implementation of the proposed system was achieved a production improvement of more than 7% with respect to the periods with failures.

Keywords: Information Systems, photovoltaic; energy; prediction; failure, Weibull distribution.

RESUMEN

Este trabajo propone un método para predecir la producción de energía fotovoltaica (PV) basado en la hipótesis de que durante las horas de actividad de la planta, su producción se comporta como un proceso estocástico con una función de distribución Weibull de dos parámetros que tienen en cuenta las características de la Instalación Fotovoltaica y los parámetros meteorológicos medidos en tiempo real por una red de sensores. La versatilidad y precisión del modelo ha sido validada mediante el despliegue de un sistema SCADA en tiempo real. El sistema desarrollado incluye la predicción de generación de energía y la comparación en tiempo real entre la potencia esperada y la potencia medida, para la detección de fallos. Con la implementación del sistema propuesto se logró una mejora de la producción de más del 7% con respecto a los períodos con fallos.

Palabras clave: Sistemas de Información; Fotovoltaico; Energía; Predicción; Fallo, Distribución de Weibull.

1. INTRODUCCIÓN

La energía solar fotovoltaica presenta una gran variabilidad y dependencia de la naturaleza aleatoria de los fenómenos climatológicos, siendo muy importante conocer y predecir tanto la cantidad de energía generada como los fallos de los sistemas de producción para una integración práctica y exitosa en las redes de

transporte eléctricas [1]. La legislación de muchos países considera penalizaciones y bonificaciones económicas a los productores de energías renovables de acuerdo con el cumplimiento de su compromiso de producción y algunas investigaciones han estado enfocadas en el estudio de los mecanismos de coordinación para la integración en la red de diferentes fuentes de energía renovable [2,3].

En los últimos años el esfuerzo académico ha estado dirigido hacia el mantenimiento predictivo de las instalaciones para minimizar el impacto de la integración en las redes de transporte. La ejecución regular de tests de funcionamiento y el seguimiento continuo de la producción requiere un sistema de monitorización complejo, y el análisis estadístico de las series temporales de la producción necesita de una importante red de sensores distribuidos, registradores y otros dispositivos inteligentes, por lo que se requiere de un mantenimiento intensivo y de alto coste de los mismos, sólo justificado en grandes instalaciones fotovoltaicas. Para asegurar los beneficios, incrementando la eficiencia de la planta fotovoltaica, es muy importante desarrollar métodos efectivos para la detección temprana de fallos en el sistema.

Tradicionalmente, la detección automática de fallos en los sistemas fotovoltaicos requieren el registro y análisis de una gran cantidad de variables eléctricas, tales como las corrientes que circulan por los paneles solares y las tensiones de las cadenas constituidas por los mismos, conjuntamente con datos ambientales y de operación, como la radiación y la temperatura. Muchas investigaciones han estado orientadas al estudio de la relación existente entre la vida útil de los componentes de un sistema fotovoltaico y las condiciones de operación de estrés, tales como la presencia de humedad, altas temperaturas y elevadas tensiones de polarización, así como con las limitaciones del proceso, como el estado de las soldaduras, presencia de defectos en células fotovoltaicas, corrosión, etc. [4,5]. Algunas propuestas tratan de reducir la complejidad del algoritmo de detección de fallos utilizando un número limitado de variables y complejos análisis estadísticos [6].

Otras propuestas no utilizan redes de sensores en la planta, sino que la inferencia se basa en la comparación de la producción real con respecto a la estimada exclusivamente en función de la información disponible de irradiancia, la ficha técnica de los dispositivos instalados, la localización geográfica y otros parámetros estáticos. En [7] se propone un sistema de este tipo donde se estima la producción horaria de la planta en función de los mapas de radiación solar obtenidos por el satélite Meteosat-8, aplicando una versión mejorada del método Heliostat [8]. El operador del

sistema introduce la información de los principales componentes de la planta (fabricante, tipo y número de módulos). La energía realmente producida se registra con una periodicidad horaria y es analizada diariamente por el sistema automático de detección de fallos [9]. Este algoritmo detecta la ocurrencia de un error y avisa al operador.

Por otro lado, muchos estudios sugieren que las causas que afectan de forma más importante a la fiabilidad de la planta son los fallos en los inversores [10]. En las referencias [11,12] se analizan diferentes arquitecturas de inversores, concluyendo que el factor de estrés dominante en los mismos es la temperatura de operación, destacando que la presencia de dispositivos MOSFET es el punto más vulnerable.

Otros estudios sugieren que la principal causa de fallo en los inversores es la presencia de condensadores electrolíticos. En [13,14] se presenta una nueva tipología de inversor que evita el empleo de grandes condensadores. Algunos fallos son debidos a causas naturales, tales como rayos cerca de los módulos fotovoltaicos o como entradas de agua en un inversor integrado en el módulo.

En los inversores, una de las consideraciones más importantes está relacionada con la fiabilidad de la gestión térmica, ya que los componentes de conmutación y los condensadores son muy sensibles a la temperatura. Las nuevas propuestas de modelos están dirigidas a permitir a los fabricantes investigar estrategias innovadoras de gestión térmica.

Los problemas serios aparecen cuando el inversor fotovoltaico no se desconecta después de que la red se ha disparado. Por este motivo es importante analizar las relaciones entre el inversor y la red de CA y entre el inversor y el conjunto fotovoltaico para mejorar la fiabilidad del sistema fotovoltaico. En la referencia [5] se puede encontrar una revisión de los problemas de fiabilidad relacionados con los fenómenos de isla y la eficiencia del MPPT.

En la referencia [15] se propuso una metodología para mejorar la confiabilidad del inversor, basada en la descomposición de los subsistemas del inversor. Se requiere una gran cantidad de datos detallados de fallos de componentes para permitir descomposiciones más profundas de los subsistemas del inversor y un estudio más profundo de los modos de fallo. Es una estrategia que estudia sistemáticamente los efectos de los parámetros del diseño de los inversores en sistemas fotovoltaicos de tal manera que la fiabilidad se optimiza, tal y como se propuso en la referencia [11]. El procedimiento identifica los parámetros con mayor impacto en la confiabilidad, estableciendo las especificaciones de diseño del inversor de manera sistemática. Esta técnica tiene un alto costo computacional.

En la referencia [16] se describe un método para el cálculo de la tasa de fallo de un inversor conforme al estándar MIL-HDBK 217, en configuraciones de dos y tres etapas. Los transistores de conmutación fueron los elementos identificados como los más débiles, desde el punto de vista de la fiabilidad. Otros componentes, sin embargo, como las bobinas de inducción no contribuían significativamente a la tasa de fallo.

En la referencia [17] se proponen modelos de fiabilidad para inversores simples y en configuraciones en paralelo para determinar configuraciones óptimas. Aplicando un análisis de sensibilidad es posible identificar el efecto de los diferentes parámetros de diseño tanto en la fiabilidad como en el coste del Sistema

Para monitorizar y controlar un sistema fotovoltaico conectado a la red, comúnmente se usa un Sistema de Control de Supervisión y Adquisición de Datos (SCADA). Los sistemas SCADA tradicionales con arquitecturas similares se han descrito anteriormente

para diversas aplicaciones [9], [18], [19], [20]. Normalmente, el flujo de datos en un sistema SCADA se limita a las conexiones de campo fijo entre hardware y una estación maestra. Aplicaciones especiales como el control de grandes sistemas fotovoltaicos necesitan una amplia gama de dispositivos y componentes físicamente conectados.

Este trabajo propone un método y un sistema para realizar la predicción de la salida del generador fotovoltaico para comparar este valor con los registrados por un sistema de adquisición de datos, para detectar fallos y emitir un pre-diagnóstico.

El artículo se ha organizado de la siguiente manera: en la Sección 2 se presenta brevemente el estado de las técnicas de los modelos de predicción de energía fotovoltaica y se presentan tanto los aspectos teóricos como el modelo propuesto para monitorizar y controlar la planta conectada a la red fotovoltaica. La sección 3 describe la arquitectura del sistema propuesto. La sección 4 muestra los resultados experimentales para el modelo de predicción de energía y el comportamiento del sistema de detección de fallas. Finalmente, las principales conclusiones se resumen en la sección 5.

2. TEORÍA

La tecnología de fabricación de componentes para instalaciones solares fotovoltaicas está muy madura. Los principales elementos han sido estudiados en laboratorio y entornos controlados. La energía producida depende de los siguientes factores:

1. Especificaciones de los módulos, tales como la tensión y características de la corriente, los coeficientes térmicos de los semiconductores y las formas de interconexión y las tolerancias de las células fotovoltaicas. El efecto de este factor puede alterar la producción hasta en un 10% de la potencia nominal. Asimismo, esto origina una distribución irregular de las pérdidas de energía cuando se conectan módulos con similares pero no idénticas características, lo que hace que todos funcionen al nivel mínimo.
2. Factores ambientales que afectan significativamente al generador: radiación solar (directa y difusa), temperatura ambiente, suciedad de los paneles, y, en general, fenómenos atmosféricos como el viento o las precipitaciones.
3. Factores derivados del diseño de la instalación: seguimiento solar, la existencia de sombreados parciales o la correcta ventilación de los módulos, entre otros.

Aunque se han desarrollado modelos físicos para los diferentes componentes de una instalación solar fotovoltaica, la presencia de los citados factores hace que una caracterización práctica de la misma sea muy difícil. No es posible obtener analíticamente una función de transferencia para una predicción ajustada de la producción. Es más, considerar la degradación temporal de los componentes, la deposición de polvo en los módulos y/o el mantenimiento aplicado dificultan aún más esta posibilidad.

Por ese motivo, los investigadores han desarrollado diferentes propuestas para abordar esta problemática [21]. En la referencia [7] se propone un modelo para estimar la producción de energía como una función de la radiación y la temperatura ambiente, considerando que los módulos están trabajando en su punto de operación de máxima potencia [22], y unas aproximaciones de las pérdidas del sistema. La eficiencia de un generador fotovoltaico trabajando en condiciones de máxima potencia se puede caracterizar por un modelo paramétrico de la radiación y de la temperatura del dispositivo. Esta aproximación se basa en los trabajos [23,24] donde se demuestra su aplicación tanto en módulos convencionales como en los de capa fina.

Otros modelos físicos se basan en el conocido *modelo del doble diodo* [25], aplicado en diferentes líneas de investigación [26-30]. Este modelo es extendido con la aplicación de una red neuronal de tres capas en [31].

El empleo de sistemas inteligentes en la simulación del comportamiento de los paneles fotovoltaicos se desarrolla en [32,33], empleando redes neuronales [34], lógica difusa [35] e incluso sistemas híbridos [36]. Sin embargo, es difícil obtener un modelo que contemple todos los elementos de una instalación solar fotovoltaica.

Nuestra propuesta parte de la hipótesis de considerar que la producción de energía de un sistema generador fotovoltaico puede ser caracterizada durante las horas de actividad de la planta como un proceso estocástico con una *distribución de Weibull* de dos parámetros (1), en la que el factor de forma (β) es característico de la planta y su ubicación, y el factor (η) es dependiente de la temperatura (T) y del logaritmo neperiano de la radiación (R), de acuerdo al *modelo generalizado de Eyring* (2), comúnmente utilizado en los test acelerados en el ámbito de la teoría de la fiabilidad [37]. La contribución de Henry Eyring a la teoría de las reacciones químicas [38] condujo al desarrollo de un modelo muy potente de la degradación acelerada en condiciones de estrés, o equivalentemente, de la evolución del tiempo de supervivencia de un elemento en condiciones de estrés.

$$f(x) = \frac{\beta}{\eta} \times \left(\frac{x}{\eta}\right)^{\beta-1} \times e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta} \quad (1)$$

$$\eta(T, R) = \frac{1}{T} \times e^{(A+\frac{B}{T}+C \times R+D \times \frac{R}{T})} \quad (2)$$

El *modelo de Eyring* incorpora los principales factores que afectan tanto a los dispositivos semiconductores de los módulos fotovoltaicos como a los de la electrónica de potencia. Los cambios en la radiación y en la temperatura se consideran factores de estrés con respecto a la operación del sistema en condiciones normales

Para estimar la producción horaria de la planta se utilizó la mediana de la distribución de Weibull (3) obtenida mediante un ajuste MLE (*Maximun Likelihood Estimation*) de los datos históricos.

$$\hat{P} = \eta \times (\ln 2)^{\frac{1}{\beta}} \quad (3)$$

La incorporación de este algoritmo al SCADA del entorno de trabajo se realizó aplicando la metodología de desarrollo de sistemas SysML [39] sobre el agente Modelador.

3. ARQUITECTURA Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

El sistema propuesto utiliza la arquitectura del sistema abierto en lugar de un entorno controlado por un propietario. El sistema utiliza estándares y protocolos abiertos, distribuyendo así la funcionalidad a través de una WAN en lugar de una LAN que sólo se utiliza para la comunicación entre unidades terminales remotas asociadas con los sensores SCADA. El uso de una arquitectura abierta facilita la conexión de dispositivos periféricos de terceros, unidades de disco, impresoras, etc. La Figura 1 muestra un diagrama de la arquitectura general del sistema.

El nivel más bajo en la arquitectura del sistema está compuesto por los componentes de hardware SCADA: La Unidad Terminal Principal (MTU) tiene la función de recoger los datos de todas las unidades terminales remotas (RTU), que concentran la información de todos los sensores distribuidos en la estación fotovoltaica,

y proporciona una interfaz humana para el funcionamiento local. Se abre como un cluster de alta accesibilidad, lo que permite la extensión del sistema a otras estaciones fotovoltaicas.

Además, la arquitectura soporta hardware para implementar una arquitectura cliente-servidor de tres niveles donde: a) la capa de presentación está relacionada con servicios a los que los usuarios pueden acceder desde sus aplicaciones, como un sitio web, aplicaciones móviles, etc. b) la capa de aplicación incluye La lógica de negocio de nivel, nivel lógico o nivel medio, y c) la capa de base de datos, compuesta por el servidor de base de datos. Aquí la información se almacena y recupera independientemente de los servidores de aplicaciones o de la lógica empresarial.

El nivel de software en la arquitectura que consiste en los siguientes subsistemas:

- **Subsistema de Adquisición de Datos (DAS):** Este subsistema hace que los datos estén disponibles en línea. El servidor de adquisición de datos proporciona los otros subsistemas de la información que necesitan de los datos capturados por el sistema SCADA.
- **Subsistema administrativo (AS):** Incluye las funciones de configuración y la administración del sistema.
- **Servicios de aplicación de usuario (UAS):** proporciona todos los servicios necesarios exigidos por las aplicaciones cliente, tales como: servicio de plataforma específico y servicios de software ad-hoc.
- **Subsistema de planificación de recursos empresariales (ERP):** el sistema ERP permite gestionar todas las partes elementales de las funciones de gestión empresarial, incluida la información sobre los activos, el personal de la empresa y la planificación del mantenimiento. La información almacenada por el ERP se utilizó para el subsistema de mantenimiento predictivo para verificar si las diferencias entre la producción real y estimada se debían a la ocurrencia de una falla real o debido a un mantenimiento planificado.
- **Subsistema de mantenimiento predictivo:** Incluye el modelo predictivo de producción de energía y el procedimiento de detección de fallas.

3.1. SUBSISTEMA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO

El algoritmo fue implementado en los siguientes componentes dentro del subsistema de mantenimiento predictivo:

1. Modelador. En este módulo se analizan dentro de una ventana de tiempo predefinida las series R, T y P (producción

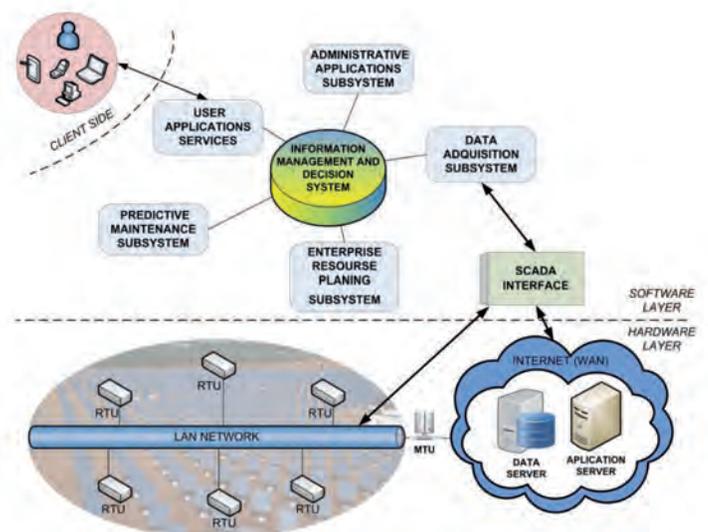


Figura 1: Arquitectura del Sistema

- real), generando varios modelos: uno para la predicción de la generación de energía (), otro para la predicción del comportamiento atmosférico en las siguientes 48 horas () y, por último, el umbral de la diferencia máxima de producción utilizado en el algoritmo de detección de fallo.
2. Predictor. Los modelos generados se utilizan para la predicción a medio y largo plazo de la producción de energía. La predicción del comportamiento atmosférico se utiliza con el fin de detectar fallos en los sensores ambientales.
 3. Detector de fallos. Este módulo compara la energía real con respecto a la estimada. Si la diferencia excede el umbral establecido, se envía una señal al módulo de localización de fallos.
 4. Localizador de averías. Una vez detectada la presencia de fallo por el detector de fallos, este módulo analiza las señales de alarma SCADA disponibles y utiliza estos datos en combinación con una red bayesiana para identificar el origen del fallo. La información de ERP se utiliza además para descartar que los errores del sistema se deban a un fallo real o a un tiempo de inactividad para un mantenimiento planificado.

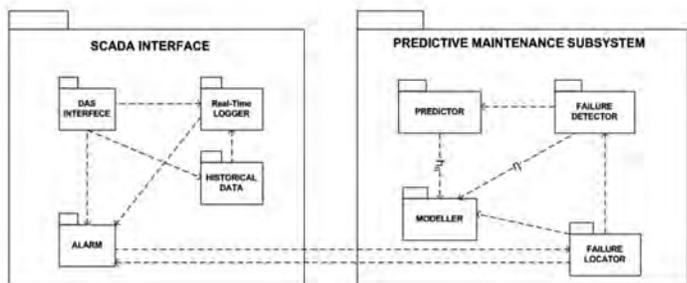


Figura 2: Subsistema de Mantenimiento Predictivo

Utilizando la información ofrecida por el SCADA y el modelo de predicción energética anteriormente descrito, es posible predecir la producción de energía y la posible ocurrencia de fallos en la planta.

El procedimiento de fallo analiza algunas propiedades de la pérdida de energía tales como cantidad, duración y frecuencia para clasificar el fallo. Por ejemplo, los defectos del inversor o del dispositivo de control producen un apagón total en la producción de energía; Una pérdida constante de energía puede ser causada por defectos en algunos módulos del seguidor solar, suciedad en la célula fotovoltaica o un error en los umbrales de la operación de configuración para el inversor. Cuando la pérdida de energía no es constante el fallo se debe a pérdidas de baja potencia, sombras, temperatura muy alta o sobrecalentamiento en los inversores.

Es factible discriminar entre las posibles causas que generan pérdidas de energía no constantes utilizando la información procedente de estaciones meteorológicas y de la información sobre las tareas de mantenimiento almacenadas en el sistema SCADA. Para estos casos se realiza una verificación adicional, descartando por ejemplo posibles fallos debidos a fallos falsos para desconexiones parciales para llevar a cabo tareas de mantenimiento.

Finalmente, el procedimiento de detección de fallos propone un plan de acción de acuerdo con la clasificación de fallos y habilita las alarmas en el sistema SCADA.

Las variables empleadas en el estudio, la radiación normal en los módulos fotovoltaicos y la temperatura interna del inversor, ya se contemplaban en el diseño del sistema de monitorización. Sin embargo, para completar esto, se ha implementado una red de sensores a posteriori, considerando la producción de las diferentes

cadena de conexión que componen el área de servicio del inversor (intensidad, tensión y potencia continua).

4. RESULTADOS

El sistema descrito en este trabajo ha sido implementado y validado en un auténtico parque solar ubicado en España. Esta planta fotovoltaica está constituida por 1.342 seguidores solares de dos ejes y 61 inversores, 6,1 MWp en total.

Para probar el modelo de predicción propuesto en las secciones 2 y 3 se eligió un generador fotovoltaico de 105,32 kWp (Pinst). La Figura 3 muestra las distribuciones de probabilidad obtenidas aplicando un ajuste de estimación de máxima verosimilitud (MLE) de los parámetros β , A, B, C y D para los registros de producción en dos meses (m1, m2) Condiciones estándar de 298 K y 1000 W / m2. La Tabla 1 muestra los valores obtenidos para los valores del ajuste.

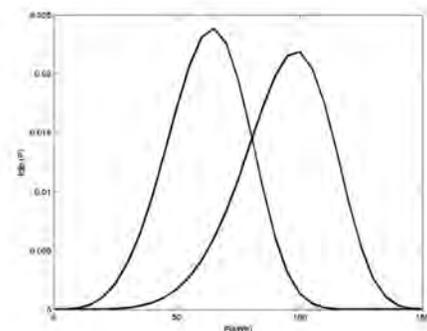


Figura 3: Distribuciones de Probabilidad para el ajuste MLE

A medida que las condiciones climáticas se hacen uniformes en el período analizado, el valor del parámetro β obtenido (forma del Weibull) es mayor. Es posible observar un comportamiento similar para el parámetro η en períodos de mayor producción.

Time	B	A	B	C	D
m1	5.95	7.21	-966.74	0.34	173.99
m2	4.31	29.22	-7337.79	-2.24	898.59

Tabla 1: Valores de los coeficientes para el ajuste MLE

Las formas de ambas distribuciones son muy similares; Por lo tanto, esto permite enfocar el modelo en la variación del parámetro de escala, como fue la hipótesis con el uso del modelo de Eyring para el parámetro de escala.

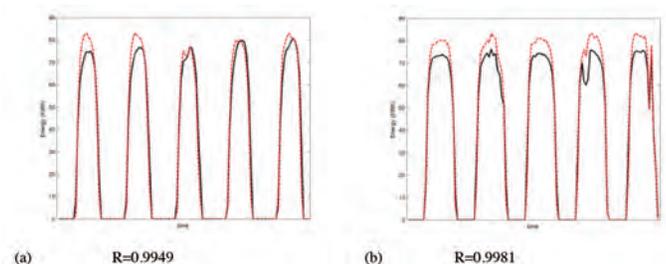


Figura 4: Valores de producción estimados (línea continua) y producción real (línea de puntos) en (a) m2, (b) m1

El coeficiente de correlación entre los valores de producción estimados y los reales se calcula de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$R = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (4)$$

La Figura 4 muestra los valores de producción estimados y reales para los primeros cinco días de m2 y m1. El error en la estimación de los datos de producción para m2 es de 1,33%, para el mes m1 es de 7,07%. Considerando el mes completo (m1), el error es 4.45%.

Para validar la propuesta se utilizaron periodos de tiempo cruzados como conjuntos de entrenamiento y validación (Figura 5). Se construyó un nuevo modelo utilizando los datos de producción para un periodo dado, y luego utilizando este modelo y los valores de temperatura y radiación, se predijo la producción de otro periodo. La Figura 5 (a) muestra los resultados obtenidos si aplicamos el modelo usando datos de producción del m1 considerando los registros de temperatura y radiación de los primeros cinco días del m2. Por el contrario, aplicando el modelo utilizando los datos de producción del m2 a los registros de temperatura y radiación de los primeros cinco días del m1 se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 5 (b).

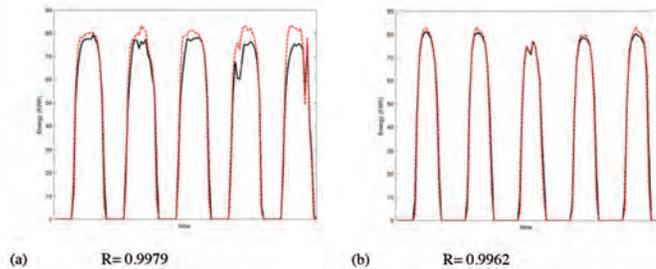


Figura 5: Valores estimados de producción (línea continua) y producción real (línea discontinua) en (a) m1, (b) m2

En la predicción de producción para el periodo de 5 días en m2 el error en la estimación fue de -2.21%, mientras que para todo el mes fue -2.90%. Para el segundo caso, el error fue de 5,30%. Los resultados muestran una alta correlación entre la producción real y la predicha por el modelo, que permitió establecer una línea de base para la producción real. La producción de línea de base es el resultado del análisis de las desviaciones en la relación de

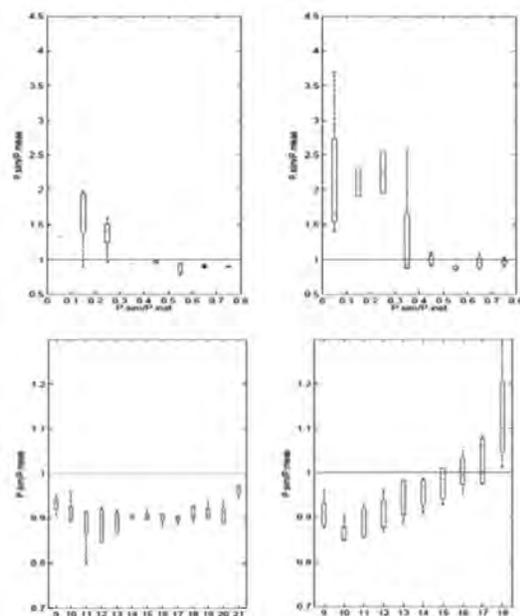


Figura 6. P simulado / relación P real versus punto de trabajo del generador fotovoltaico y hora del día para m1 (izquierda) y m2 (derecha)

potencia frente al punto de trabajo del generador fotovoltaico y la hora del día (ver Figura 6). Durante las horas centrales del día, la potencia prevista es superior al 90% de la medida. Por otra parte, cuando la potencia predicha es superior al 30% de la potencia de pico de la planta, también está por encima del 90% de la medida.

Si la producción real de la planta es inferior al valor resultante del modelo, el sistema puede detectar la existencia de un posible fallo, cuya naturaleza puede determinarse en base a la cantidad de energía perdida y su extensión en el tiempo, para generar una alarma apropiada en el sistema de gestión. Por ejemplo, un inversor o defectos del dispositivo de control producen un apagón total en la producción de energía; Una pérdida constante de energía puede ser causada por defectos en algunos módulos del seguidor solar, suciedad en la célula fotovoltaica o un error en los umbrales de la operación de configuración para el inversor. Cuando la pérdida de energía no es constante el fallo se debe a pérdidas de baja potencia, sombras, temperatura muy alta o sobrecalentamiento en los inversores.

La Figura 7 muestra un escenario de aplicación real del sistema propuesto, en el momento "B" el método detecta una pérdida abrupta de potencia, clasificada por el sistema como un fallo general de un inversor. El equipo de mantenimiento reemplazó el inversor roto por uno nuevo, y luego durante el periodo C el sistema detecta un fallo nuevo, en este caso debido a un error de configuración en los umbrales de operación para el nuevo inversor instalado. El equipo de mantenimiento después de recibir la segunda alarma, ajusta correctamente el inversor y el sistema sigue funcionando a plena capacidad.

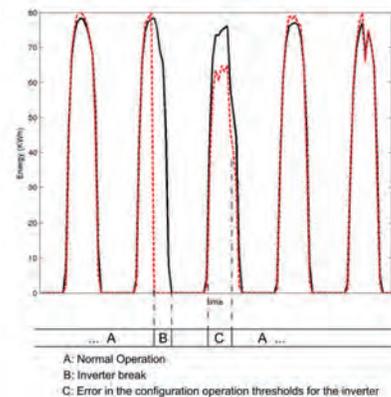


Figura 7: Producción estimada (línea continua) y real (línea discontinua)

5. CONCLUSIONES

Este trabajo propone un método estadístico para caracterizar un sistema fotovoltaico para modelar su comportamiento con respecto a las principales variables meteorológicas: radiación y temperatura, con las cuales es posible predecir la producción de energía fotovoltaica, considerando esto como un proceso estocástico con una función de distribución de Weibull.

Además, los modelos estadísticos obtenidos para diferentes periodos de tiempo (más de dos años de diferencia) tienen una alta correlación con la producción real en ausencia de fallos y delimitan un límite inferior muy aproximado de este valor, lo que permite desarrollar un método computacionalmente eficiente y efectivo para la detección de fallos en una aplicación SCADA.

Aunque existen modelos más precisos para estimar la producción de plantas, en los escenarios de previsión de predicción inmediata y previsión [40], [41], [42], el método desarrollado es muy útil por su simplicidad computacional y constituye una buena

referencia sobre la producción en el intervalo de tiempo de gran interés en la ausencia de fracaso, reemplazando el análisis estadístico avanzado y los complejos procesos de monitorización con series temporales sólo asequibles para grandes sistemas fotovoltaicos.

Debido a la simplicidad de este método, no será posible la autoadaptación dinámica de los parámetros a los datos de diferentes plantas ubicadas en diferentes entornos. Después de la investigación experimental, este modelo ha sido extrapolado con predicciones precisas a otras plantas fotovoltaicas, y sólo es aplicable en casos con las mismas condiciones operativas y ambientales.

A pesar de esta simplicidad, los técnicos de mantenimiento han generado rápidamente modelos adaptados a las diferentes condiciones operativas y ambientales de cada una de las plantas supervisadas, además de conocer el comportamiento modelado de diferentes tipos de inversores de potencia o de diferentes proveedores.

Mediante la aplicación de nuevas técnicas analíticas, como la Red Neural Artificial, será posible identificar sobre los diferentes datos ambientales, la proporcionalidad entre las combinaciones de variables de Eyring, que pueden ofrecer propiedades mejoradas en la naturaleza de la sensibilidad a la localización. Este importante aspecto de la propiedad de autoadaptación se incorporará en futuras ampliaciones del modelo, tras una exhaustiva investigación de la influencia de cada variable y el comportamiento interno de cada tipo de inversor. Sin embargo, este modelo simple puede descomponer la energía producida por las contribuciones de diferentes variables ambientales, cada una con su propia tasa y dependencia.

Este modelo ha sido probado con éxito en una planta solar fotovoltaica de 6,1 MWp en el sur de España, donde se han identificado y corregido fallos sutiles (fallos de fusibles en varias cadenas de paneles), alcanzando una mejora de producción superior al 7% con respecto a los períodos con fallos.

BIBLIOGRAFÍA

[1] H. Kanchev et al., 2011 "Energy Management and Operational Planning of a Microgrid With a PV-Based Active Generator for Smart Grid Applications," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 58, no. 10, pp. 4583-4592.

[2] R. Badawy et al., 2013 "A novel multi-agent system utilizing quantum-inspired evolution for demand side management in the future smart grid," *Integrated Computer-Aided Engineering*, vol. 20, no. 2, pp. 127-141.

[3] R. Badawy, B. Hirsch, and S. Albayrak, 2010 "Agent-based coordination techniques for matching supply and demand in energy networks," *Integrated Computer-Aided Engineering*, vol. 17, no. 4, pp. 373-382.

[4] E. D. Dunlop, D. Halton, and H. A. Ossenbrink, 2005 "20 years of life and more: where is the end of life of a PV module?," in *Photovoltaic Specialists Conference, 2005. Conference Record of the Thirty-first IEEE*, pp. 1593-1596.

[5] G. Petrone et al., 2008 "Reliability Issues in Photovoltaic Power Processing Systems," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 55, no. 7, pp. 2569-2580.

[6] D. Guasch, S. Silvestre, and R. Calatayud, 2003 "Automatic failure detection in photovoltaic systems," in *Photovoltaic Energy Conversion. Proceedings of 3rd World Conference on*, 2003, pp. 2269-2271 Vol.3.

[7] A. Drews et al., 2007 "Monitoring and remote failure detection of grid-connected PV systems based on satellite observations," *Solar Energy*, vol. 81, no. 4, pp. 548-564.

[8] A. Hammer et al., 2003 "Solar energy assessment using remote sensing technologies," *Remote Sensing of Environment*, vol. 86, no. 3, pp. 423-432.

[9] F. J. A. Cardoso, 1999 "A universal system for laboratory data acquisition and control," in *Real Time Conference, 1999. Santa Fe 1999. 11th IEEE NPSS*, pp. 140-143.

[10] A. B. Maish et al., 1997 "Photovoltaic system reliability," in *Photovoltaic Specialists Conference, 1997. Conference Record of the Twenty-Sixth IEEE*, pp. 1049-1054.

[11] F. Chan, and H. Calleja, 2009 "Design Strategy to Optimize the Reliability of Grid-Connected PV Systems," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 11, pp. 4465-4472.

[12] F. Chan, H. Calleja, and E. Martinez, 2006 "Grid Connected PV Systems: A Reliability-Based Comparison," in *Industrial Electronics, 2006 IEEE International Symposium on*, pp. 1583-1588.

[13] T. Shimizu, K. Wada, and N. Nakamura, 2006 "Flyback-Type Single-Phase Utility Interactive Inverter With Power Pulsation Decoupling on the DC Input for an AC Photovoltaic Module System," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 21,

no. 5, pp. 1264-1272.

[14] W. Bower, R. West, and A. Dickerson, 2006 "Innovative PV Micro-Inverter Topology Eliminates Electrolytic Capacitors for Longer Lifetime," in *Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on*, pp. 2038-2041.

[15] A. Ristow et al., 2008 "Development of a Methodology for Improving Photovoltaic Inverter Reliability," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 55, no. 7, pp. 2581-2592.

[16] F. Chan, and H. Calleja, 2011 "Reliability Estimation of Three Single-Phase Topologies in Grid-Connected PV Systems," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 58, no. 7, pp. 2683-2689.

[17] Y. Xiaoxiao, and A. M. Khambadkone, 2012 "Reliability Analysis and Cost Optimization of Parallel-Inverter System," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 59, no. 10, pp. 3881-3889.

[18] R. Singlachar, and B. Mukherjee, 1997 "An advanced PC-PLC-based SCADA system for a commercial medical cyclotron," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 399, no. 2-3, pp. 396-406.

[19] B. Dieu, 2001 "Application of the SCADA system in wastewater treatment plants," *ISA Transactions*, vol. 40, no. 3, pp. 267-281.

[20] M. Patel et al., 2004 "Development of a novel SCADA system for laboratory testing," *ISA Transactions*, vol. 43, no. 3, pp. 477-490.

[21] A. Orioli, and A. Di Gangi, 2013 "A procedure to calculate the five-parameter model of crystalline silicon photovoltaic modules on the basis of the tabular performance data," *Applied Energy*, vol. 102, no. 0, pp. 1160-1177.

[22] J. M. Blanes et al., 2013 "In-Site Real-Time Photovoltaic I-V Curves and Maximum Power Point Estimator," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 28, no. 3, pp. 1234-1240.

[23] J. F. Randall, and J. Jacot, 2003 "Is AM1.5 applicable in practice? Modelling eight photovoltaic materials with respect to light intensity and two spectra," *Renewable Energy*, vol. 28, no. 12, pp. 1851-1864, 2003.

[24] S. R. Williams et al., 2003 "Modelling long-term module performance based on realistic reporting conditions with consideration to spectral effects," in *Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of 3rd World Conference on*, pp. 1908-1911 Vol.2.

[25] I. Caluianu et al., 2009 "Photovoltaic energy generation under partially shading conditions," in *Advanced Electromechanical Motion Systems & Electric Drives Joint Symposium, 2009. ELECTROMOTION 2009. 8th International Symposium on*, 2009, pp. 1-6.

[26] K. F. Teng, and P. Wu, 1989 "PV module characterization using Q-R decomposition based on the least square method," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 36, no. 1, pp. 71-75.

[27] K. Araki, and M. Yamaguchi, 2003 "Novel equivalent circuit model and statistical analysis in parameters identification," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 75, no. 3-4, pp. 457-466.

[28] J. Merten et al., 1998 "Improved equivalent circuit and analytical model for amorphous silicon solar cells and modules," *Electron Devices, IEEE Transactions on*, vol. 45, no. 2, pp. 423-429.

[29] J. Merten et al., 1999 "The role of the buffer layer in the light of a new equivalent circuit for amorphous silicon solar cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 57, no. 2, pp. 153-165.

[30] T. Ikegami et al., 2001 "Estimation of equivalent circuit parameters of PV module and its application to optimal operation of PV system," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 67, no. 1-4, pp. 389-395.

[31] E. Karatepe, M. Boztepe, and M. Çolak, 2007 "Development of a suitable model for characterizing photovoltaic arrays with shaded solar cells," *Solar Energy*, vol. 81, no. 8, pp. 977-992.

[32] S. K. H. Chow, E. W. M. Lee, and D. H. W. Li, 2012 "Short-term prediction of photovoltaic energy generation by intelligent approach," *Energy and Buildings*, vol. 55, no. 0, pp. 660-667.

[33] G. Capizzi, C. Napoli, and F. Bonanno, 2012 "Innovative Second-Generation Wavelets Construction With Recurrent Neural Networks for Solar Radiation Forecasting," *Neural Networks and Learning Systems, IEEE Transactions on*, vol. 23, no. 11, pp. 1805-1815.

[34] A. Al-Amoudi, and L. Zhang, 2000 "Application of radial basis function networks for solar-array modelling and maximum power-point prediction," *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings*, vol. 147, no. 5, pp. 310-316.

[35] M. T. Elhagry et al., 1997 "Fuzzy modeling of photovoltaic panel equivalent circuit," in *Circuits and Systems*, *Proceedings of the 40th Midwest Symposium on*, pp. 60-63 vol.1.

[36] M. AbdulHadi, A. M. Al-Ibrahim, and G. S. Virk, 2004 "Neuro-fuzzy-based solar cell model," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 3, pp. 619-624.

[37] J. F. Gómez Fernández, Crespo Márquez, Adolfo, 2012 *Maintenance Management in Network Utilities*, London.

[38] H. Eyring, 1935 "The Activated Complex in Chemical Reactions," *The Journal of Chemical Physics*, vol. 3, no. 2, pp. 107-115.

[39] A. M. S. Friedenthal, and R. Steiner, 2011 *A practical guide to SysML the systems modeling language*.

[40] W. Chine, A. Mellit, V. Lughi, A. Malek, G. Sulligoi, A. Massi Pavan, 2016 "A novel fault diagnosis technique for photovoltaic systems based on artificial neural networks," *Renewable Energy*, 90, pp. 501-512.

[41] I.S. Kim, 2016 "On-line fault detection algorithm of a photovoltaic system using wavelet transform," *Solar Energy*, 126, pp. 137-145.

[42] E. Martínez-Cámara, E. Jiménez-Macias, J. Blanco-Fernández, J.C. Sáenz-Díez, 2013 "Failure detection and prediction in wind turbines by using SCADA data," *Dyna Energía y Sostenibilidad. Enero-Diciembre 2013*, vol. 2, no. 1, p. [10 p.], DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/ES5708>.

Fatigue life prediction of the axle box bearings for high-speed trains



Predicción de la vida a fatiga de la caja de rodamientos de eje para trenes de alta velocidad



Dekun Liu¹, Qiang Li¹, Weigang Hu¹ and Wu Pan²

¹ Key Laboratory of Vehicle Advanced Manufacturing, Measuring and Control Technology, Beijing Jiaotong University, 100044, Beijing, China, 11116336@bjtu.edu.cn

² Department of Mechanical Engineering, Michigan State University, East Lansing, MI, 48823, USA

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8414> | Recibido: 25/04/2017 • Evaluado: 25/04/2017 • Aceptado: 31/05/2017

RESUMEN

- La predicción exacta de la vida de los cojinetes es fundamental para asegurar el funcionamiento normal de los trenes de alta velocidad. Además, debido a sus altas velocidades de circulación, la carga sobre cojinetes en los trenes de alta velocidad es compleja y expuesta a condiciones muy duras; Por lo tanto, predecir la vida de los cojinetes basada en la carga fija usando un método tradicional es a menudo inexacta. Para resolver estos problemas, en este artículo se aplica la norma ISO 281:2007 de la Organización Internacional de Normalización y los métodos de cálculo de la vida útil de cojinetes de la teoría L-P que, combinados con la teoría del daño lineal de Miner, conforman un método de predicción de la vida útil de los cojinetes basado en la carga medida. A continuación, en base a técnicas de ensayo de carga en los muelles de la caja de ejes y su carcasa, se hacen mediciones sobre la caja de ejes de bogie de la línea del ferrocarril de la de alta velocidad CRH380AL, para calcular el historial temporal de carga del muelle y de la carcasa en una sección de línea de ferrocarril típica, así como la información de velocidad de marcha del tren. Finalmente, se calcula la vida prevista de la caja de ejes bajo la condición de marcha real utilizando este método. Los resultados se comparan con los obtenidos por el cálculo de vida usando la teoría clásica de Lundberg-Palmgren y el método de la norma ISO. Los resultados muestran que la vida de servicio calculada por el método de predicción de vida basado en la norma ISO es la más corta, en aproximadamente un octavo de la misma por el método estándar ISO; además, la vida calculada de servicio es significativamente más larga que la vida real de revisión de la caja actual del eje del tren de alta velocidad (2,4 millones de km), lo que indica que la vida calculada es razonable y segura. El método de cálculo de la predicción de la vida útil de los rodamientos se puede utilizar para guiar el diseño y la investigación teórica relacionada con cojinetes de caja de eje de tren de alta velocidad.
- **Palabras clave:** Tren de alta velocidad, caja de ejes, rodamiento cónico de doble fila, carga real medida, método de predicción de vida.

method based on the measured load. Then, on the basis of axle box spring and tumbler load testing technology, the railway line of the motor bogie axle box of CRH380AL high-speed train is measured to obtain the load time history of the spring and tumbler at the typical railway line section, as well as the running speed information of the train. Finally, the predicted life of the axle box bearing under the actual running condition is calculated using this method. Results are compared with the life calculation results using the classic Lundberg-Palmgren theory and the ISO standard method. Results show that the service life calculated by the life prediction method based on ISO standard is the shortest, which is approximately one eighth of that by the ISO standard method; moreover, the calculated service life is significantly longer than the actual overhaul life of the current high-speed train axle box bearing (2.4 million km), indicating that the calculated life is reasonable and safe. The proposed life prediction calculation method of the bearings can be used to guide the design and the related theoretical research of high-speed train axle box bearings.

Keywords: High-Speed Train, Axle Box, Double Row Conical Roller Bearing, Actual Measured Loadings, Life Prediction Method.

1. INTRODUCTION

As one of the most widely used and vulnerable parts of rotating machinery, the rolling bearing directly affects the reliability of the entire machinery operation [1]. The axle box bearing of high-speed trains is the key in ensuring the running quality and safety of the trains. Failure damage of the train bearing under high-speed running may cause huge economic losses and even lead to major disasters [2].

The fatigue life of bearing is a comprehensive reflection of its quality. Considering bearing fatigue life and reliability can prevent bearing failure accidents. Thus, bearing research have been focused on the accurate prediction of its service life. If the predicted service life is relatively long, there is a great potential of safety issues. Once the bearing fails prematurely, the entire train may breakdown or encounter accidents. On the other hand, if the predicted service life is remarkably short, the bearing will be replaced too early, which greatly increases the maintenance cost and causes significant waste of high-quality resources. The first theoretical basis for the formulation of a bearing life model was provided by the seminal work of Lundberg and Palmgren [3]. Lundberg-Palmgren (L-P) theory has been extensively used since the 1950s. Despite its wide acceptance, L-P theory contains several

ABSTRACT

Accurate life prediction of bearings is critical in ensuring the normal run of high-speed trains. However, due to their high running speed, the bearing load of the high-speed trains is complex and exposed to hostile conditions; thus, predicting the life of the bearings by the fixed load using a traditional method is often inaccurate. To solve these problems, the International Organization for Standardization (ISO) 281:2007 and L-P theory bearing life calculation methods are applied in this study, combined with the Miner linear damage theory to propose a bearing life prediction

Nomenclature			
<i>List of symbols</i>		k	number of columns of the rollers
i, j	running indices	a_i	modified coefficient of the reliability life
ϕ_j	azimuth angle of j^{th} roller	a_{ISO}	life correction coefficient
F_r, F_a	radial and axial loads	C	basic rated dynamic load in ISO method
Q_j	contact load of j^{th} roller	b_m	rated coefficient of the commonly used high-quality hardened bearing steel and good processing method
δ_r, δ_a	radial and axial displacements of bearing	f_c	coefficient related to the geometry, manufacturing precision, and materials of the bearing parts
α	nominal contact angle	P	equivalent dynamic load in ISO method
Z	number of rollers in the single-row bearing	e_c	contamination coefficient
C_i, C_e	rated dynamic loads of the inner and outer raceways in L-P method	C_u	fatigue load limit
P_i, P_e	equivalent loads of the inner and outer raceways in L-P method	κ	viscosity ratio
λ	stress concentration factor	C_0	basic rated static load
D_{we}	roller diameter	m	total load data points
D_{Dw}	pitch circle diameter of the bearing	θ	bearing temperature
L_{we}	effective length of the roller	β	viscosity-temperature coefficient
K_t	load-displacement stiffness coefficient	D	fatigue damage
n	load-displacement exponent		

limitations. Thus, several researchers have modified and extended the L-P theory. These studies have gradually formed the International Organization for Standardization (ISO) method. The latest ISO 281:2007 [4] has been widely applied in engineering. However, the ISO standard method can only calculate the reference rated life of bearing under a fixed load. Hence, this method is not capable of estimating the bearing life in complex loading conditions, such as in high-speed train axle box; it can not reflect the actual bearing life in actual complex varying load conditions. Therefore, a new bearing life prediction method is necessary to accurately calculate the bearing life under complex varying load conditions.

2. STATE OF THE ART

Fatigue is the predominant mode of failure in rolling element bearings; thus, the life of bearings is governed by its Rolling Contact Fatigue (RCF) life. Given the special nature of RCF and its inability to relate directly to classic component fatigue, most of the early works in determining the service life of rolling bearings were based on empirical results and equations. For the past several decades, significant efforts have been devoted to improve the fatigue life calculation method for bearings [5–6].

Recently, several researchers developed equations for calculating bearing fatigue life based on different stress-life criteria [7–8]. Espejel et al. [9] developed a model for predicting rolling bearing life, which explicitly separates the survival of the raceway surface from the subsurface fatigue risk of the rolling contact. This model can account for the operating conditions of the bearing (e.g., load and lubrication conditions, as well as bearing geometry). In many applications, rolling bearings are subjected to highly varying loads and high-level vibrations. In such conditions, bearing failures occur significantly earlier than in conventional conditions [10]. An alternative method for estimating bearing fatigue life was developed. This method is applicable for general loading conditions because it accommodates a detailed information of contact pressure and load distribution in the rollers [11]. Therefore, the method can be used to estimate the bearing rated life using a quasi-static bearing model [12–13]. The original fatigue

life equation was modified for the life estimation of tapered roller bearings with time-varying characteristics [14].

The load on high-speed trains is complicated and random. For unfixed conditions of the bearing load, such as in high-speed train bearing, Chen et al. [15] developed the 2D bearing life calculation method of metro vehicles, considering load and track conditions. The idea was to convert the complex varying load into an equivalent one by dividing the load and track conditions in calculating the service life; however, the divided load conditions failed to describe the entire load-time varying condition, leading to inaccurate life prediction. Ruitian et al. [16] studied the influence of partial load on the probability life of axle bearing of railway cargos. Juping et al. [17] obtained the design evaluation load of bearing through domestic and foreign standards of rail vehicles to calculate the reliability life; however, in these standards, the load is expressed in a simple equation that is related to the axle load rather than the load spectrum; hence, it cannot predict the bearing life accurately either. Thus, designing accurate models to estimate the service life of rolling-element bearings under varying loads and vibrations is essential.

This section provides a review on the recent development of rolling bearing fatigue life calculation. The remainder of this paper is organized as follows. Section 3 describes two typical bearing life calculation models of the L-P theory and ISO standard. Then, a new fatigue life prediction method based on the actual measured loadings is proposed. Section 4 presents a real engineering experiment of calculating the fatigue life of bearings of high-speed trains axle box using the three methods. Results and discussion of different life calculation methods are also presented. Section 5 concludes the paper.

3. METHODOLOGY

3.1 LIFE CALCULATION METHOD OF L-P THEORY

Lundberg and Palmgren proposed the life prediction model based on subsurface stress. However, this method needs to calculate the contact load between each roller and the raceway. The axle box bearing of high-speed trains is a double-row conical roll-

ing bearing. Multiple variables are involved in determining the stress of a conical rolling bearing. Especially for a double-row conical rolling bearing, variables are related to one another. Therefore, the double-row conical rolling bearing is a complicated system. In engineering, the statics method is also practical for analysis [18].

L-P theory calculates the line contact situation according to load distribution. After obtaining the internal load distribution of the bearing, the equivalent loads of the inner and outer raceways are calculated as follows:

$$P_i = \left(\frac{1}{Z} \sum_j Q_j^4 \right)^{1/4} \quad P_e = \left(\frac{1}{Z} \sum_j Q_j^{4.5} \right)^{2/9} \quad (1)$$

Then, the fatigue life of the bearing can be obtained as follows:

$$L_{10} = (L_i^{9/8} + L_e^{9/8})^{-8/9} \quad (2)$$

$$L_i = \left(\frac{C_i}{P_i} \right)^4 \quad L_e = \left(\frac{C_e}{P_e} \right)^4 \quad (3)$$

where L_i and L_e ($\times 10^6$) are the service lives of the inner and outer raceways, respectively; L_{10} ($\times 10^6$) is the service life under a reliability of 90%; and C_i and C_e (N) are the rated dynamic loads of the inner and outer raceways, respectively. For centripetal rolling bearing, the basic rated dynamic load between the raceways and the rollers are expressed as

$$C_{i,e} = 552k\lambda \frac{(1 \mp \gamma)^{29/27}}{(1 \pm \gamma)^{1/4}} \left(\frac{D_{we}}{D_{pw}} \right)^{2/9} D_{we}^{27/29} L_{we}^{7/9} Z^{-1/4} \quad (4)$$

where λ is the stress concentration factor, which is 0.7 according to the empirical data; γ is the structural parameter, $\gamma = D_{we} \cos \alpha / D_{pw}$; D_{we} (mm) is the roller diameter used for the rated load calculation; D_{pw} (mm) is the pitch circle diameter of the bearing; k is the number of columns of the rollers; L_{we} (mm) is the effective length of the roller used for the rated load calculation. The symbols above and below “ \pm ” are suitable for the inner and outer raceways, respectively.

3.2 LIFE CALCULATION METHOD OF ISO STANDARD

L-P theory can well predict the bearing life based on the sub-surface origin; however, it needs to first calculate the load distribution inside the bearing, which is a complex process that involves a large amount of calculation. Thus, ISO has presented a simplified algorithm based on the L-P theory. The internal load distribution of the bearing adopts the standard one. The latest ISO standard adopts the bearing life theory of Svenska Kullager Fabriken (SKF) Company. The modified life equation of its bearing is

$$L_p = a_1 a_{ISO} \left(\frac{C}{P} \right)^{10/3} \quad (5)$$

where a_1 is the modified coefficient of the reliability life; a_{ISO} is the life correction coefficient based on the system method; C (N) is the basic rated dynamic load; and P (N) is the equivalent dynamic load.

3.2.1 Basic Rated Dynamic Load

The radial basic rated dynamic load of the centripetal rolling bearing is

$$C = b_m f_c (k L_{we} \cos \alpha)^{7/9} Z^{3/4} D_{we}^{29/27} \quad (6)$$

where b_m is the rated coefficient of the commonly used high-quality hardened bearing steel and good processing method; f_c is the coefficient related to the geometry, manufacturing precision, and materials of the bearing parts; and α ($^\circ$) is the nominal contact angle.

3.2.2 Equivalent Dynamic Load

In ISO standard method, the life calculation adopts the ideal load distribution. Thus, the equivalent dynamic load of the centripetal rolling bearing with $\alpha \neq 0^\circ$ under the constant radial and axial loads is

$$P = XF_r + YF_a \quad (7)$$

The values of X and Y are shown in Table I (see section: supplementary material). e is applicable to the limit value of F_a/F_r with different X and Y .

3.2.3 Life Correction Coefficient

a_{ISO} is the correction coefficient based on the system method of life calculation, considering the complicated relationship among the fatigue limit of the bearing steel, lubrication, contamination, and equivalent dynamic load of the bearing. It is the complex function of contamination coefficient e_c , fatigue load limit C_u , equivalent dynamic load P , and viscosity ratio κ .

C_u is defined as the load when the contact point with the largest load of the raceway only reaches the fatigue stress limit. It is generally obtained from the chamber of bearing manufacturing. The ISO standard gives a simplified calculation method to simply estimate the fatigue load limit C_u of the rolling bearing with the basic rated static load C_0 .

Life reduction caused by the contaminants in the lubricant membrane can be considered through the contamination coefficient e_c . Its value can be obtained from the table of the standard according to the actual contaminated situation.

Lubricant effectiveness mainly depends on the separation degree of the rolling contact surface. This type of separation condition can be expressed by the viscosity ratio κ . The standard provides two calculation methods of κ . The viscosity ratio is adopted for calculation based on the actual situation of the high-speed train axle box bearing. In other words, the lubrication state on the working surface of the bearing can be expressed by the viscosity ratio (i.e., the ratio of the actual motion viscosity ν to the reference motion viscosity ν_1).

$$\kappa = \frac{\nu}{\nu_1} \quad (8)$$

3.3 NEW LIFE CALCULATION METHOD BASED ON MEASURED LOAD

The time history and running speed information of the axle box spring and tumbler of the high-speed train when actually running is obtained. The spring load is approximated to the radial load of the bearing. The axial load is approximately obtained by the tumbler load [19]. Then, the equivalent load P_i can be calculated. The running speed information of the train is converted into the

bearing rotating speed. The bearing rotating speed in the sampling interval is assumed to be constant to obtain the number of rotating turns of the bearing in the sampling interval l_{pi} . The corresponding bearing life rings L_{pi} can be calculated using ISO standard or L-P theory. According to Palmgren–Miner linear damage cumulative law [20], the damage degree intensifies with the increase of rotating turns of the inner and outer rings when the rolling bearing is under load. When the damage value $D = 1$, fatigue damage of bearing occurs. The life when the damage occurs under the running condition is the predicted bearing life based on the measured load.

$$L = \frac{\sum_{i=1}^m l_{pi}}{D} = \frac{\sum_{i=1}^m l_{pi}}{\sum_{i=1}^m \frac{l_{pi}}{L_{pi}}} \quad (9)$$

The parameters required in the equation are discrete data. i is the load points series, and m is the total load points. The corresponding bearing turns l_{pi} can be calculated as long as high-precision sampling frequency is used to obtain the real-time changing discrete load P_i and real-time rotating speed P_r . The life turns of the bearing L_{pi} can be calculated using discrete load P_i through the ISO standard or L-P theory method. In summary, analysis process of life calculation method as shown in Fig. 1.

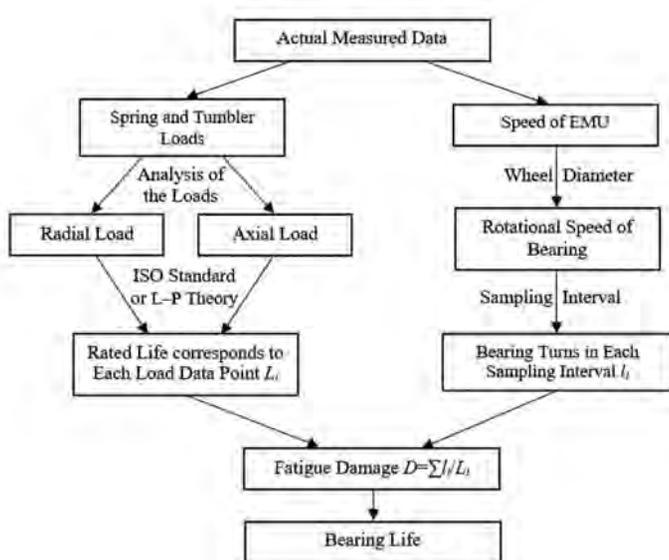


Fig. 1. Analysis Process of Life Calculation Method

3.4 EXPERIMENTAL MEASUREMENT FOR LIFE CALCULATION

For testing the axle box spring and tumbler load directly and accurately, the axle box spring and tumbler of the CRH380AL high-speed train were made into sensors according to the professional force sensor-making in research institute [21]. They were installed on the high-speed train bogie to complete the preparation for the railway line test. After installing the calibrated spring and tumbler force sensors, the installation and wiring were performed on site, as shown in Figs. 2 and 3 (see section: supplementary material). The spring and tumbler measuring positions on this type of high-speed train are shown in Fig. 4.

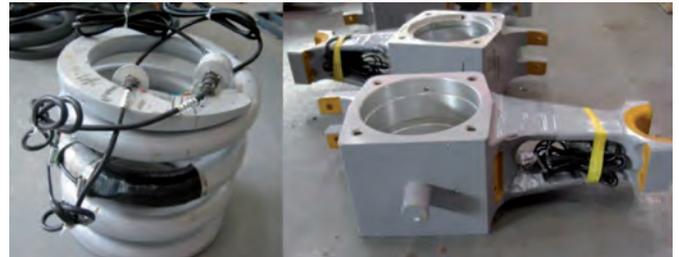


Fig. 4. Measuring Points of Spring and Tumbler Loads

In the entire testing process, various jamming signals were entered into the data collection system of the test link to interfere with the signal. Then, specific data processing software was used to improve the signal-to-noise ratio. The electrical signal is con-

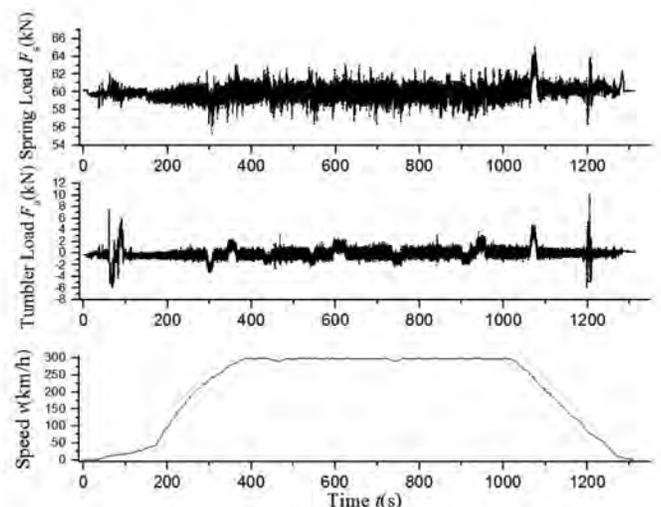


Fig. 5. Variations of Spring Load, Tumbler Load, and Train Running Speed over Time

Parameter	Value
Nominal contact angle $\alpha/(\circ)$	9
Rated coefficient of contemporary common high-quality hardened bearing steel and good processing method b_m	1.1
Coefficients related to the geometry, manufacturing precision, and materials of bearing parts f_c	84.3
Column number of the rollers k	2
Effective length of the roller L_{we}/mm	52.8
Roller number of a single bearing Z	19
Diameter of the roller D_{we}/mm	19
Pitch diameter of the roller group D_{pw}/mm	185
Contamination coefficient e_c	0.8
Grease movement viscosity $v/(mm^2/s)$	39.6(40 °C) 7.21(100 °C)

Table II. Values of Related Parameter Symbols

verted into the load value to obtain the accurate test results. The experiment tested the track of the high-speed train from Beijing to Taiyuan (train number G615). This experiment intercepted a section of a typical line from Baoding to Dingzhou, stretched for 62 km (including the acceleration speed, uniform speed, and slowdown conditions), and obtained the time history of the spring load F_s and the tumbler load F_a of an axle box bearing on the motor bogie. Simultaneously, the Global Positioning System(GPS) was set on the train to collect the running speed signal v . In Fig. 5, the spring and the tumbler loads had great fluctuations at the starting and stopping stages. When the axle box of the high-speed train ran normally, the radial load fluctuated at approximately 60 kN with the maximum amplitude of 6 kN; and the axial load fluctuated at nearly 0 kN with the maximum amplitude of 12 kN. The parameter symbols and values for the test are presented in Table II.

4. BEARING LIFE CALCULATION AND RESULT ANALYSIS

4.1 THEORETICAL CALCULATION OF THE TRADITIONAL LIFE

The basic calculation parameters of the bearing can be obtained through the equations in Section 3.2, the calculation value as presented in Table III.

Parameter	Calculation value (kN)
Basic rated dynamic load C	740.52
Basic rated static load C_0	1488.65
Fatigue load limit C_u	150.95
Rated dynamic load of inner raceway C_i	94.93
Rated dynamic load of outer raceway C_e	124.29

Table III. Calculation Values of Relevant Parameters

The static analysis method is used to calculate the bearing load distribution. Column 1 roller and Column 2 roller are in the axial load direction of the double-row conical rolling bearing. The rollers in the columns are numbered to illustrate the expression of the load distribution. Bearing loads and roller numbers are shown in Fig. 6.

According to the measured data of the axle box spring and tumbler in Section 3.4, the maximum radial load of the axle box bearing is 66 kN, the maximum axial load is 12 kN, the average radial load is 60 kN, and the average axial load is 0 kN. The internal load distribution of the double-row conical rolling bearing is solved under the action on the maximum and average radial and axial loads. The calculation results are shown in Fig. 7.

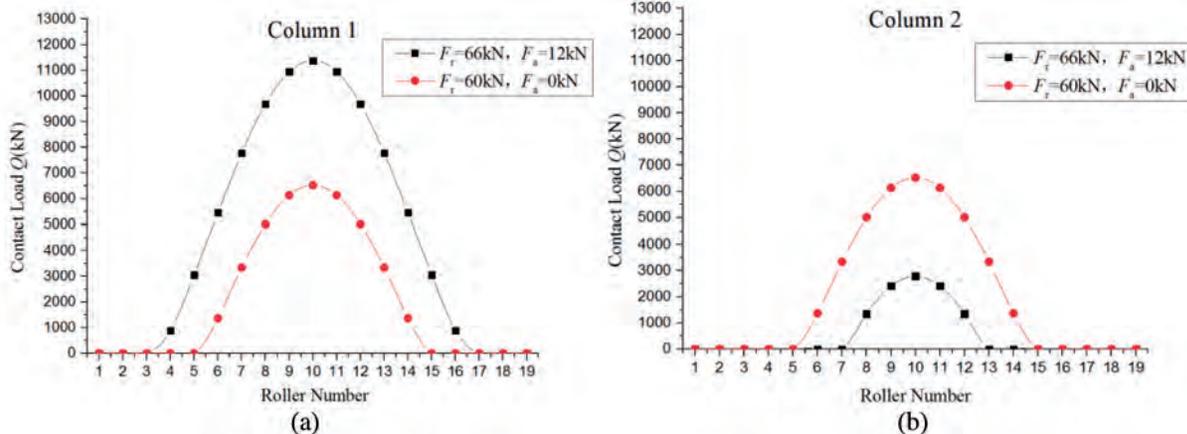


Fig. 7. Load Distribution of the Double Row Conical Roller Bearing. (a) Load Distribution of Column 1 Rollers. (b) Load Distribution of Column 2 Rollers

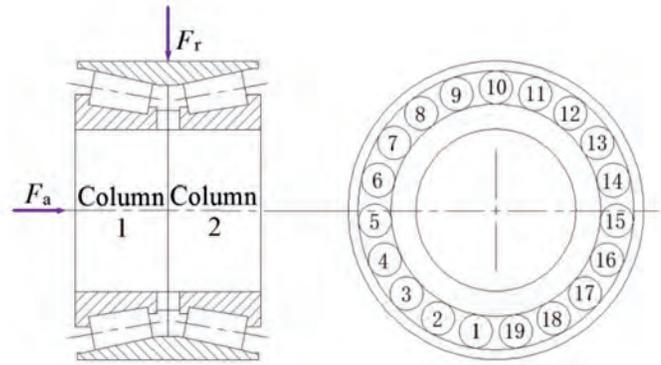


Fig.6. Schematic of the Double Row Conical Roller Bearing Loads and Roller Number

The internal load distribution of the bearing considers the numerical calculation results of the average radial and axial loads. The equivalent dynamic loads of the inner and outer raceways are calculated using Equation (1) to obtain $P_i = 4.25 \text{ kN}$ and $P_e = 4.40 \text{ kN}$. Thus, the life turns of the bearing under 90% the reliability are

$$L_{10} = (L_i^{-9/8} + L_e^{-9/8})^{-8/9} = 191532.89 \times 10^6 \quad (10)$$

Based on the wheel diameter of 860 mm, the life turns of the bearing can be converted into the life mileage, as shown as follows:

$$\text{km } L_{10}' = 860 \times 10^{-6} \times \pi L_{10} = 51746.99 \times 10^4 \text{ km} \quad (11)$$

According to the ISO standard method, among the mileage data, the average equivalent dynamic load of 65.8 kN can be calculated based on the equivalent dynamic load data in Fig. 7. The working temperature is 70 °C under the normal running speed of 300 km/h. Then, the life turns of the bearing under the reliability of 90% is

$$L_{10p} = a_1 a_{\text{ISO}} \left(\frac{C}{P}\right)^{10/3} = 159714.12 \times 10^6 \quad (12)$$

The life turns of the bearing is likewise converted into the life mileage of $43151.04 \times 10^4 \text{ km}$.

4.2 BEARING LIFE CALCULATION USING THE PREDICTION METHOD BASED ON MEASURED LOADS

In the ISO standard method, service life is calculated using the ideal load distribution. Then, the equivalent dynamic load can be calculated, as illustrated in Fig. 8 (see section: supplementary material).

According to the actual contamination state of the bearing, the contamination coefficient uses $e_c = 0.8$. Then, the life correction coefficient a_{ISO} can be determined by the lubrication condition (expressed by the viscosity ratio κ) on the working surface of the bearing and the equivalent dynamic load P . The corresponding relation of the life correction coefficient a_{ISO} is shown in Fig. 9 (see section: supplementary material). The limit range of the life correction coefficient a_{ISO} is 0.1 to 50, and the maximum is 500 times greater than the minimum, indicating its great influence on the rated life of the bearing.

The bearing rotating speed under the running condition can be calculated by the running speed and the wheel diameter; however, no relevant data were obtained on the actual bearing temperature. Nevertheless, the data were selected between the two stations of the train in the high-speed running with short residence time. The working temperature in the data section can be assumed to be unchanged, and the working temperature is 70 °C. The power law empirical relation, which can accurately describe the viscosity-temperature characteristics of the bearing grease [22], is adopted to calculate the viscosity at 70 °C. The relation is expressed as follows:

$$v = \mu_{50} / (50 / \theta)^\beta \quad (13)$$

where v (mm²/s) is the motion viscosity of the grease; θ (°C) is the bearing temperature; μ_{50} is the viscosity at 50 °C; and β is the viscosity-temperature coefficient.

The viscosity data of 40 °C and 100 °C were substituted into Equation (13). Then, $\mu_{50} = 26.1542$ mm²/s and $\beta = 1.859$ were obtained, and the movement viscosity of 13.99 mm²/s under 70 °C/s was calculated. The viscosity ratio was obtained using Equations (8). The viscosity ratio and the bearing rotating speed are illustrated in Fig. 10 (see section: supplementary material).

During the running of the train, the equivalent dynamic load and the viscosity ratio change in real time; thus, the life correction coefficient a_{ISO} also varies over time. The life correction coefficient a_{ISO} can be solved based on the viscosity ratio κ and corresponding equivalent motion load P .

The variations of the life correction coefficient a_{ISO} over the running time is shown in Fig. 11 (see section: supplementary material). The value of the life correction coefficient a_{ISO} ranges from 0.1 to 50, indicating a large difference. The value of a_{ISO} is minimal in the low-speed stage compared with the running speed. The life correction coefficient a_{ISO} also becomes gradually large with the increase of the running speed. The value of a_{ISO} in the typical running mileage is usually large, indicating that the running condition of the bearing is generally good.

The ISO standard provides the reliability life correction coefficient. The reliability considers 90%, i.e., $a_1 = 1$. Thus, the correction rated life of the bearing is calculated, as depicted in Fig. 12 (see section: supplementary material).

Based on the L-P theory method, the equivalent dynamic load of inner raceway and outer raceway can be calculated. Then, the rated life of the bearing can also be calculated, as illustrated in Figs. 13 and 14 (see section: supplementary material).

According to the actual wheel diameter of 860 mm, the train speed can be converted to the rotating speed of the axle box bearing. The sampling frequency of the speed signal is 50 Hz; thus, the time interval between two sampling points is $\Delta t = 0.02$ s. Given that the rotating speed and the equivalent load are constant within 0.02 s, the rotating turns of the bearing in each data point interval Δt can be converted as follows:

$$l_p = \frac{5}{18} \times \frac{\Delta t \times v}{0.86\pi} = \frac{5}{18} \times \frac{0.02v}{0.86\pi} \quad (14)$$

A total of 65528 data points was collected in the entire mileage, which divided the running time of the train into 65528 segments. The rotating turns of the bearing and the corresponding correction rated life in each segment were solved, as shown in Fig. 15 (see section: supplementary material). Then, the damage value of the axle box bearing of the train in this section can be solved.

$$D_{ISO} = \sum_{i=1}^{65528} \frac{l_{pi}}{L_{pi}} = 5.83 \times 10^{-7} \quad (15)$$

$$D_{L-P} = \sum_{i=1}^{65528} \frac{l_{pi}}{L_{p2i}} = 1.49 \times 10^{-7} \quad (16)$$

Thus, the predicted life of the bearing under the reliability of 90% in the line is

$$\text{km } L_{ISO} = \frac{\sum_{i=1}^{65528} l_{pi}}{D_{ISO}} \times \pi \times 860 \times 10^{-6} = 5216.71 \times 10^4 \text{ km} \quad (17)$$

$$\text{km } L_{L-P} = \frac{\sum_{i=1}^{65528} l_{pi}}{D_{L-P}} \times \pi \times 860 \times 10^{-6} = 20410.97 \times 10^4 \text{ km} \quad (18)$$

4.3 COMPARATIVE ANALYSIS OF THE CALCULATION RESULTS

Table IV lists the bearing life under the reliability of 90% using the four methods.

Method	Life L_{10} (10000 km)
L-P theory	51746.99
ISO standard	43151.04
Proposed method based on L-P theory	20410.97
Proposed method based on ISO standard	5216.71

Table IV. Life Comparison Using the Different Life Calculation Methods

After comparing the life calculation results of L-P theory and the ISO standard method, the latter disregards the accurate load distribution but only provides an approximately standard load distribution, which may underestimate the bearing fatigue life. The predicted bearing life using the new method based on ISO standard is the shortest, because it considers the lubrication state of the train bearing under the low and other speeds while those traditional methods only considers the normal working speed. Under the low-speed condition, the reference motion viscosity is large, leading to a minimal viscosity ratio. However, the viscosity ratio reflects the important parameters of the lubrication state of the bearing, which results in the reduction of the bearing life. On the contrary, the new method based on ISO standard and in combination with the damage fully considers the complex load variations of the bearing in the actual operation. The predicted life result is relatively conservative and safe.

The data adopted in the test experiment were collected in the high-speed improved section where the train runs. Many extreme conditions, limited by the short mileage of the line section, are dis-

garded; thus, it cannot comprehensively reflect the entire service life. The measured axle box bearing is installed in the first-class compartment rather than the place with the most capacity and worst load conditions; hence, the predicted life is long. The requirements on the high-speed train bearings are considerably restricted. At present, bearing maintenance is only conducted at Level 3 maintenance (1.2 million km) and above. Bearing replacement is performed at Level 5 maintenance (2.4 million km). The calculation results show that the high-speed train bearings have adopted a large safety allowance in response to extreme conditions.

5. CONCLUSION

To predict the bearing life of high-speed trains accurately under a time-dependent varying load, a new life calculation method is proposed using the axle box spring and tumbler sensor based on the real vehicle line test data and combined with Miner's linear damage theory. The following conclusions can be drawn from this study:

- (1) From the load distribution of the double-row conical rolling bearing on the axle box under different radial and axial loads, the radial load can increase the contact load of the double-row rollers and the axle load can cause the double-row rollers of the bearing under a partial load.
- (2) From the test data, when the axle box of the high-speed train runs normally, its radial and axial loads widely fluctuate. The radial load fluctuates at approximately 60 kN with the maximum amplitude of 6 kN. The maximum fluctuation amplitude of the axial load is 12 kN. Therefore, the service life calculated with the fixed load using the traditional ISO and L-P theory methods is inaccurate.
- (3) From the results of the different life calculation methods, the traditional methods of ISO standard and L-P theory disregard the influence of the dynamic varying load of the bearing on the service life and underestimate its actual life. The new method proposed in this paper considers the real-time load and speed variations of the train in the actual running condition. The predicted life of the proposed method based on ISO standard is the shortest, which is approximately one-eighth of that using the ISO standard method; thus, the predicted life using the proposed method is relatively conservative and safe.

The conclusions in this study provide a guideline for designing the axle box bearings of high-speed trains and conducting relevant theoretical studies. However, the measurement of the actual load of the bearing is required when using the method proposed in this study. The axle box bearing load in this study is measured by converting the spring and tumbler into the sensor; but for the motor gearbox bearing and others with complex bearing structure, directly measuring the actual load is difficult, which will affect its application to a certain extent. Load identification methods may be used to obtain the complex bearing loads, and this issue will be considered in future research works.

BIBLIOGRAPHY

- [1] Shouqiang K, Danyang M, Yujing W, et al. "Method of assessing the state of a rolling bearing based on the relative compensation distance of multiple-domain features and locally linear". *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2017. Vol. 86. p. 40-57. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.10.006>
- [2] Amini A, Entezami M, Huang Z, et al. "Wayside detection of faults in railway axle bearings using time spectral kurtosis analysis on high-frequency acoustic emission signals". *Advances in Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 8-11. p. 1-9. DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/1687814016676000>

- [3] Lundberg G, Palmgren A. "Dynamic Capacity of Rolling Bearings". *Acta Polytechnica, Mechanical Engineering Series*, Royal Swedish Academy of Engineering Sciences. 1947. Vol. 1. No. 3, p 1-52.
- [4] ISO 281:2007 "Rolling Bearings – Dynamic Load Ratings and Rated life," Second Edition, February 15, 2007.
- [5] Arakere N K. "Gigacycle Rolling Contact Fatigue of Bearing Steels: A Review". *International Journal of Fatigue*. 2016. Vol. 93. p. 238-249. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.06.034>
- [6] Hong S W, Tong V C. "Rolling-Element Bearing Modeling: A Review". *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2016. Vol. 17-12. p. 1729-1749. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12541-016-0200-z>
- [7] Tong V C, Hong S W. "Study on the Stiffness and Fatigue Life of Tapered Roller Bearings with Roller Diameter Error". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. In Press. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/1350650116649889>
- [8] Nagatani H. "Improved Method of Roller Bearing Fatigue Life Prediction Under Edge Loading Conditions". *Tribology Transactions*. 2010. Vol. 53-5. p. 695-702. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/10402001003699593>
- [9] Morales Espejel G E, Gabelli A. "A Model for Rolling Bearing Life with Surface and Subsurface Survival: Sporadic Surface Damage from Deterministic Indentations". *Tribology International*. April 2016. Vol. 96. p. 279-288. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2015.12.036>
- [10] Jacobs W, Van Hooreweder B, Boonen R, et al. "The Influence of External Dynamic Loads on the Lifetime of Rolling Element Bearings: Experimental Analysis of the Lubricant Film and Surface Wear". *Mechanical Systems and Signal Processing*. January 2016. Vol. 74. p. 144-164. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.04.033>
- [11] Tong V C, Hong S W. "Fatigue Life of Tapered Roller Bearing Subject to Angular Misalignment". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. February 2016. Vols. 230-2. p. 147-158. DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/0954406215578706>
- [12] Kabus S, Hansen M R, Mouritsen O. "A New Quasi-Static Cylindrical Roller Bearing Model to Accurately Consider Non-Hertzian Contact Pressure in Time Domain Simulations". *Journal of Tribology*. October 2012. Vol. 134-4. Paper No. 041401(1-10). DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.4007219>
- [13] Kabus S, Hansen M R, Mouritsen O. "A New Quasi-Static Multi-Degree of Freedom Tapered Roller Bearing Model to Accurately Consider Non-Hertzian Contact Pressures in Time-Domain Simulations". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*. January. 2014. Vol. 228-2. p. 111-125. DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/1464419313513446>
- [14] Houper L, Chevalier F. "Rolling Bearing Stress based Life -Part I: Calculation Model". *Journal of Tribology*. April 2012. Vol. 134-2. Paper No. 021103. DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.4006135>
- [15] Chen Y, Hui W, Gang S, et al. "Two-dimensional calculation method for the life of metro axle box bearing". *Journal of East China Jiaotong University*. 2014. Vol. 5. p. 1-5. DOI: <http://dx.doi.org/10.16749/j.cnki.jecjtu.2014.05.004>
- [16] Ruitian Z, Yongxiang Z, Hui C. "Skewed loading effect on the probabilistic lives of journal bearing of railway wagon". *Journal of Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 51-24. p. 177-183. DOI: <http://dx.doi.org/10.3901/jme.2015.24.177>
- [17] Juping Y, Yongxiang Z, Hui C, et al. "Reasonable load sets for design assessment on journal/axle box bearings of railway vehicles related to probabilistic lives". *Journal of Mechanical Engineering*, 2015. Vol. 51-18. p. 191-197. DOI: <http://dx.doi.org/10.3901/jme.2015.18.191>
- [18] Jiasen Y, Longquan Z, Sanxing Z, et al. "Analysis on load distribution of high-speed railway axle box bearings". *Bearing*. 2012. Vol. 10. p. 12-16. DOI: <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1000-3762.2012.10.003>
- [19] Dekun L, Qiang L, Xi W, et al. "Life Prediction Method for EMU Axle Box Bearings Based on Actual Measured Loadings". *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. November 2016. Vol.52-22. p.45-54. DOI: <http://dx.doi.org/10.3901/JME.2016.22.045>
- [20] Miner M A. "Cumulative damage in fatigue". *Journal of Applied Mechanics*. 1945. Vol. 12. p. A159-164.
- [21] Zunsong R, Shouguang S, Qiang L, et al. "Axle spring load test and dynamic characteristics analysis of high speed EMU". *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. May 2010. Vol. 46-10. p. 109-115. DOI: <http://dx.doi.org/10.3901/JME.2010.10.109>
- [22] Yanjuan Z, Jianmei W, Min C, et al. "Research on viscosity-temperature characteristic of the lubricating oil of oil film bearing". *Lubrication Engineering*. 2014. Vol. 39-3. p. 75-78. DOI: <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.0254-0150.2014.03.017>

ACKNOWLEDGEMENTS

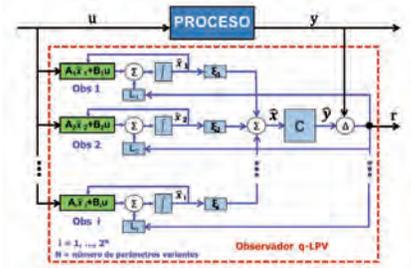
This study was supported by the national key research and development program of china for the financial support under Grant Nos. 2016YFB1200403.

SUPPLEMENTARY MATERIAL

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/8414-1.pdf



Diagnóstico de fallos en el control y compensación de la medición por sensores virtuales en una central termoeléctrica



Fault diagnosis in control and measurement compensation by virtual sensors in a thermal power plant



Guadalupe Madrigal-Espinosa^{1,2}, Carlos M. Astorga-Zaragoza², Manuel Adam-Medina², Gloria-Lilia Osorio-Gordillo², Miguel Vázquez-Román¹

¹ Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias. Reforma 113 Col. Palmira - 62490 Cuernavaca, Mor. (México). Tel +777 3623811.

² Tecnológico Nacional de México. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Dpto. de Ingeniería en Electrónica. Interior Internado Palmira, s/n - 62490 Cuernavaca, Mor. (México).

DOI: <https://doi.org/10.6036/8238> | Recibido: 07/12/2016 • Evaluado: 09/12/2016 • Aceptado: 02/03/2017

ABSTRACT

- In this work the system of fault diagnosis in control and measurement compensation by virtual sensors in a thermal power plant is presented. The diagnostic system is applied to control systems of the power plant, to compensate for faulty sensor measurements. The design is based on Luenberger-like observers for Linear Parameter-Varying (LPV). An LPV model of the steam generator and turbine is parameterized with real data from the operation of a power plant and represents the dynamic behavior of the pressure in the first stage of the turbine, drum pressure, superheated steam pressure and electrical power. The main contribution of this work is to show that the proposed diagnostic system is suitable for real plant applications. In this sense, the performance of the diagnostic system is evaluated adequately in a scenario by using a simulator that emulates the real operation of a power thermal plant.
- **Key Words:** Observer, Fault diagnosis, Nonlinear model, LPV model, Virtual sensor, Power thermal plant.

RESUMEN

En este trabajo se presenta el sistema de diagnóstico de fallos en el control y compensación de la medición por sensores virtuales en una central termoeléctrica. El sistema de diagnóstico se aplica en sistemas de control de la central para la compensación de las mediciones de sensores con fallos. El diseño se basa en observadores tipo Luenberger para sistemas Lineales con Parámetros Variables en el tiempo (LPV). Un modelo LPV del generador de vapor y la turbina se parametriza con datos reales obtenidos de la operación de una central y representa el comportamiento dinámico de las variables de presión de la primera etapa de la turbina, presión en el domo, presión del vapor sobrecalentado y potencia eléctrica. Se muestra la viabilidad de que el sistema de diagnóstico sea implantado en el proceso real, en función de los resultados obtenidos al evaluar su desempeño en un simulador que emula la operación real de una central termoeléctrica.

Palabras Clave: Observador Luenberger, Diagnóstico de fallos, Modelo no lineal, Modelo LPV, Sensor virtual, Central Termoeléctrica.

1. INTRODUCCIÓN

Las centrales termoeléctricas tienen una participación muy importante en el proceso de generación de electricidad, contri-

buyendo además a la seguridad, estabilidad y operación eficiente de las redes eléctricas de potencia. Estas centrales se integran por una o varias unidades de generación de energía eléctrica, en las cuales los generadores de vapor son equipos complejos e importantes por los procesos que realizan durante la operación de las unidades.

Debido a la gran cantidad de sensores y actuadores en los sistemas de control de un generador, el fallo de alguno de ellos puede tener efectos significativos sobre la unidad como puede ser su salida de operación o el daño a equipos o partes de la misma. Para evitar esto, se requiere que los sistemas de control se adapten a las condiciones que originan los fallos, por lo que es necesario detectarlos rápidamente a fin de mitigar sus efectos mediante acciones correctivas. En la mayoría de los casos se recurre a la redundancia física [1] para mantener la operación confiable y eficiente de la unidad en presencia de fallos en sensores de los sistemas de control. Sin embargo, el uso de sensores físicamente redundantes incrementa las necesidades de mantenimiento con el correspondiente costo que estas tareas implican. Una alternativa que permite reducir estos costos es el uso de nuevas tecnologías de sistemas de diagnóstico de fallos y de control tolerante a los mismos, con base en el concepto de redundancia analítica [2].

Algunos ejemplos de sistemas de diagnóstico de fallos diseñados con base en modelos simplificados de generadores de vapor de centrales termoeléctricas han sido reportados en [3], [4] y [5], donde las tareas sólo se limitan a la detección y/o localización del fallo, sin incidir sobre los sistemas de control o sobre los sensores fallados. El diseño de estos sistemas está basado en modelos lineales [3] o en modelos no lineales linealizados para un solo valor de demanda de carga eléctrica [4] y [5]; sin embargo las unidades de generación operan en un amplio rango de cargas: bajas, medias y altas. Aun cuando en estos trabajos se muestra el buen desempeño de los sistemas de diagnóstico, los resultados de evaluación fueron obtenidos de pruebas de simulación realizadas sobre los mismos modelos simplificados con los que fueron diseñados. Una clase de modelo que representa las dinámicas no lineales complejas de un proceso en todo su rango de operación, a la vez que permite el uso de metodologías para sistemas lineales, son los LPV [6]. Modelos LPV para procesos industriales han sido usados en el diseño de sistemas de diagnóstico de fallos; por ejemplo en [7] para una celda de combustible y en [8] para actuadores de aviones. Sin embargo, no se han encontrado en la literatura diseños de sistemas de diagnóstico de fallos con sensores virtuales y basados en modelos LPV para generadores de vapor de unidades de generación de energía eléctrica.

La relevancia de este trabajo radica en demostrar la viabilidad de implantar un sistema de diagnóstico de fallos en el control y compensación de la medición por sensores virtuales, en adelante SDFSV (Sistema de Diagnóstico de Fallos y Sensores Virtuales), en la Unidad nº4 de la Central Termoeléctrica Gral. Francisco Villa, localizada en México, a partir de los resultados que se obtienen al evaluar el SDFSV en un simulador que emula la operación real de la Unidad nº4. El diseño del SDFSV se realiza con base en un modelo simplificado de tipo LPV, para considerar todo el rango de operación no lineal del generador de vapor; también, en observadores tipo Luenberger para la generación de los residuos, en un umbral fijo de detección para eliminar las falsas alarmas y en sensores virtuales que se construyen a partir del modelo no lineal con información que se obtiene de un análisis estructural. La representación LPV se deriva de un modelo no lineal simplificado que se parametriza con datos reales de la Unidad nº4 para distintas demandas de carga eléctrica. La aplicación del SDFSV se realiza sobre los sistemas de control de la Unidad nº4 para la compensación de las mediciones de sus sensores; los resultados demuestran que los sistemas de control mantienen su buen desempeño.

2. MODELADO DEL GENERADOR DE VAPOR

La representación matemática no lineal que modela el proceso de generación de vapor se deriva de principios físicos de balances de masa y energía, [9], [10] y [11], y del análisis de las características dinámicas operativas de la Unidad nº4, con capacidad de generación de 158 MW. El modelo se parametrizó con datos reales de la operación de la unidad, para representar de manera simplificada la dinámica del generador de vapor y las turbinas de la unidad, en todo su rango de operación; esto es, demandas de carga eléctrica bajas (de 80 a 100 MW), medias (de 100 a 140 MW) y altas (de 140 a 158 MW). El modelo no lineal de la Unidad No.4 se integra por cuatro ecuaciones diferenciales y dos ecuaciones algebraicas, y contiene cuatro variables de estado (f_{VM} , P_D , P_T y P_0), cuatro variables de salida (P_{1a} , P_D , P_T y P_0) y dos variables de entrada (u_1 y u_2).

$$\dot{f}_{VM} = \frac{K_H u_1 - f_{VM}}{t_H} \tag{1}$$

$$\dot{P}_D = \frac{f_{VM} - K\sqrt{P_D - P_T}}{C_D} \tag{2}$$

$$\dot{P}_T = \frac{K\sqrt{P_D - P_T} - m_s}{C_{SH}} \tag{3}$$

$$\dot{P}_0 = \frac{K_{P_0} m_s - P_0}{t_{P_0}} \tag{4}$$

$$P_{1a}(t) = K_\alpha f_{VM}(t) - K_\beta \tag{5}$$

$$m_s = (K_1 u_2 + K_2) P_T \tag{6}$$

Los valores de las constantes de tiempo t_{P_0} y t_H y de los parámetros C_D , C_{SH} , K , K_{P_0} y K_H se ajustan en condiciones de carga máxima (158 MW) siguiendo los lineamientos establecidos en [10] y [11]. Los valores de los parámetros K_1 y K_2 se determinan de las curvas de diseño del fabricante de la válvula de vapor principal de la Unidad nº4. Los valores de los parámetros K_α y K_β se obtienen de la curva de relación que usa como señal de prealimentación

el control maestro de combustible de la unidad, con base en la medición de P_{1a} ; esta medición también corresponde a la presión del vapor que ya realizó un trabajo sobre la primera etapa de la turbina y sale exhausto con un valor menor al valor nominal de P_T .

La nomenclatura de las variables y parámetros del modelo no lineal es la siguiente.

SÍMBOLOS	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
f_{VM}	kg/s	Flujo de vapor en la mezcla agua-vapor.
P_D	Pa	Presión del domo.
P_T	Pa	Presión de vapor sobrecalentado que entra a la turbina.
P_0	MW	Potencia eléctrica.
P_{1a}	Pa	Presión de vapor en la primera etapa de la turbina.
m_s	kg/s	Flujo de vapor principal.
u_1	Fracción (0-1)	Apertura de la válvula de combustible.
u_2	Fracción (0-1)	Apertura de la válvula de vapor principal.
K	kg/(Pa • s)	Constante que relaciona la interacción entre P_D , P_T , m_s y f_{VM} .
K_{P_0}	(MW • s)/kg	Constante que relaciona P_0 con m_s .
K_H	kg/s	Constante que relaciona f_{VM} con u_1 .
K_1, K_2	kg/(Pa • s)	Constantes que relacionan u_2 y P_T con m_s .
K_α	(Pa • s)/kg	Constantes que relacionan P_{1a} con f_{VM} .
K_β	Pa	
C_D	kg/Pa	Constante que relaciona la masa de vapor en paredes de agua y domo con P_D .
C_{SH}	kg/Pa	Constante que relaciona la masa de vapor en el sobrecalentador con P_T .
t_{P_0}	s	Constante de tiempo de P_0 .
t_H	s	Constante de tiempo de la energía calorífica en el hogar hacia la mezcla agua-vapor en paredes de agua.

2.1. REPRESENTACIÓN LPV

Con el modelo no lineal dado en las Ecs. (1) a (6) se obtiene la siguiente representación cuasi-LPV (q-LPV Politépico) con fallos en sensores [6], [12]. Se le denomina q-LPV debido a que los parámetros variables en el tiempo dependen de las variables de estado.

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^M \xi_i(\rho(x(t))) [A_i(\rho(x(t)))x(t) + B_i(\rho(x(t)))u(t)] \tag{7}$$

$$y(t) = Cx(t) + f(t) \tag{8}$$

$$\text{donde } \sum_{i=1}^M \xi_i(\rho(x(t))) = 1, \quad \xi_i(\rho(x(t))) \geq 0, \quad \forall i \in \{1, \dots, M\} \tag{9}$$

$x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^m$ y $y(t) \in R^p$ son el vector de estado, el vector de entrada y el vector de salida respectivamente. $A_i(\rho(x(t)))$, $B_i(\rho(x(t)))$ y C son matrices conocidas de dimensiones apropiadas. $\rho(x(t)) = [P_1(x(t)), \dots, P_N(x(t))]$ es el vector de parámetros variables en el tiempo, que evolucionan dentro de un politopo convexo P de M vértices ($M = 2^N$) tal que $\rho(x(t)) \in \text{Co}\{P_1, \dots, P_N\}$; N es el número

ro de parámetros variables del vector $p(x(t))$. Cada componente ρ_k está acotado dentro del intervalo $[\underline{\rho}_k, \bar{\rho}_k] \forall k \in \{1, \dots, N\}$, donde $\bar{\rho}_k$ es el valor máximo del parámetro variable y $\underline{\rho}_k$ el valor mínimo. $\xi_i(\rho(x(t)))$ son funciones de ponderación.

Para el modelo no lineal de la Unidad n°4 se definen los siguientes dos parámetros variables en el tiempo:

$$\rho_1(x(t)) = \frac{1}{\sqrt{P_D(t) - P_T(t)}} \quad ; \quad [\bar{\rho}_1, \underline{\rho}_1] \quad (10)$$

$$\rho_2(x(t)) = P_T(t) \quad ; \quad [\bar{\rho}_2, \underline{\rho}_2] \quad (11)$$

Se observa que estos parámetros dependen de las variables de estado P_D y P_T , las cuales son medibles en línea. Con dos parámetros variables ($N = 2$), el politopo tiene cuatro vértices ($M = 4$) sobre los cuales se definen las siguientes funciones de ponderación $\xi_i(\rho(x(t)))$ ($i = 1, \dots, M$) de acuerdo con lo establecido en [12].

$$\xi_1(\rho(x(t))) = F_{11}(\rho(x(t))) * F_{21}(\rho(x(t))) \quad (12)$$

$$\xi_2(\rho(x(t))) = F_{11}(\rho(x(t))) * F_{22}(\rho(x(t)))$$

$$\xi_3(\rho(x(t))) = F_{12}(\rho(x(t))) * F_{21}(\rho(x(t))) \quad (13)$$

$$\xi_4(\rho(x(t))) = F_{12}(\rho(x(t))) * F_{22}(\rho(x(t)))$$

Las funciones se definen como:

$$F_{j1}(\rho(x(t))) = \frac{\rho_j(x(t)) - \underline{\rho}_j}{\bar{\rho}_j - \underline{\rho}_j}$$

$$F_{j2}(\rho(x(t))) = \frac{\bar{\rho}_j - \rho_j(x(t))}{\bar{\rho}_j - \underline{\rho}_j} \quad (14)$$

con $j = 1, \dots, N; i = 1, 2$

y satisfacen las siguientes condiciones:

$$F_{j1}(\rho(x(t))) + F_{j2}(\rho(x(t))) = 1 \quad (15)$$

$$1 \geq F_{j1}(\rho(x(t))) \geq 0; \quad 1 \geq F_{j2}(\rho(x(t))) \geq 0 \quad (16)$$

Los vectores de variables de estado $x(t)$, de entradas $u(t)$ y de salidas $y(t)$, y la matriz C son:

$$x(t) = \begin{bmatrix} f_{VM}(t) \\ P_D(t) \\ P_T(t) \\ P_o(t) \end{bmatrix}, \quad u(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix}, \quad y(t) = \begin{bmatrix} P_{1a}(t) \\ P_D(t) \\ P_T(t) \\ P_o(t) \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$C = \begin{bmatrix} K_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Las matrices A_i y B_i en los vértices del politopo son:

$$A_1 = A_2 = \begin{bmatrix} -1/t_H & 0 & 0 & 0 \\ 1/C_D & -K\bar{\rho}_1/C_D & K\bar{\rho}_1/C_D & 0 \\ 0 & K\bar{\rho}_1/C_{SH} & -K\bar{\rho}_1/C_{SH} - K_2/C_{SH} & 0 \\ 0 & 0 & K P_o K_2/t_{P_o} & -1/t_{P_o} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$A_3 = A_4 = \begin{bmatrix} -1/t_H & 0 & 0 & 0 \\ 1/C_D & -K\rho_1/C_D & K\rho_1/C_D & 0 \\ 0 & K\rho_1/C_{SH} & -K\rho_1/C_{SH} - K_2/C_{SH} & 0 \\ 0 & 0 & K P_o K_2/t_{P_o} & -1/t_{P_o} \end{bmatrix}$$

$$B_1 = B_3 = \begin{bmatrix} K_H/t_H & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -K_1\bar{\rho}_2/C_{SH} \\ 0 & K P_o K_1 \bar{\rho}_2/t_{P_o} \end{bmatrix} \quad (19)$$

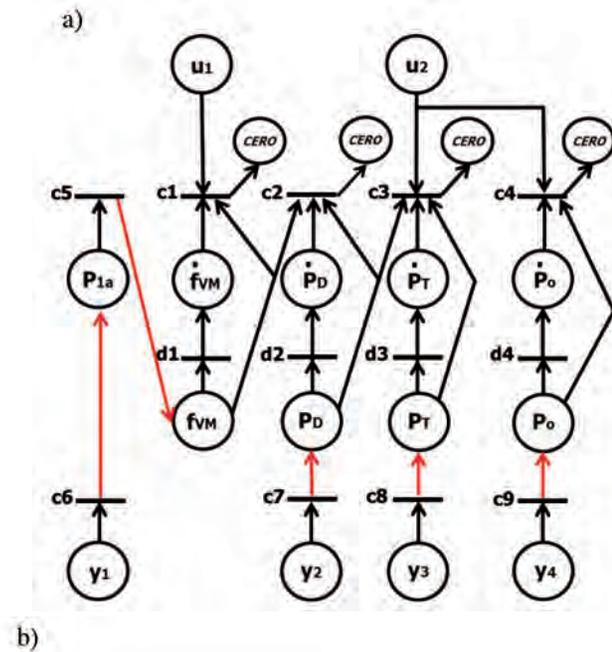
$$B_2 = B_4 = \begin{bmatrix} K_H/t_H & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -K_1\rho_2/C_{SH} \\ 0 & K P_o K_1 \rho_2/t_{P_o} \end{bmatrix}$$

3. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

La metodología de análisis estructural [15] se empleó para determinar las relaciones entre las variables conocidas (entradas o salidas medibles, o parámetros de valor conocido) y las desconocidas (variables de estado y algebraicas) del modelo no lineal de la unidad de generación, con el propósito de determinar información redundante útil para el diseño del SDFSV. Esta metodología permite conocer las relaciones entre los distintos componentes de un sistema y las restricciones que puedan existir sobre sus variables, representando estas relaciones mediante un grafo bipartito o una matriz de incidencia. Para el modelo no lineal de las Ecs. (1) a (6) se definieron las siguientes restricciones (*ci's* y *di's*), sin considerar el vector de fallos en sensores.

El grafo bipartito que se obtiene se presenta en la Fig. 1a. Cada variable se representa por un círculo y cada restricción por una barra; las líneas de conexión entre círculos y barras representan la relación de cada variable con alguna de las restricciones *ci's* o *di's*. Cuando en una restricción sólo existen variables de entrada, se adiciona un nodo (círculo) denominado CERO para representar la salida de la restricción. La relación de una variable desconocida con una restricción, a partir de la cual la variable puede calcularse, se define como una paridad ("*Matching*") [14]; en el grafo se identifican como la línea única que sale de una restricción (barra) y llega a una variable desconocida (círculo). Las direcciones de las líneas de conexión se establecen a partir de las paridades identificadas. El propósito principal del concepto de paridad es identificar las partes del sistema que contienen información redundante, [15], [14]. Las variables desconocidas que pueden ser conectadas de varias formas, podrán ser determinadas a partir de más de una restricción [13].

$$\begin{aligned}
 c1: \quad & \dot{f}_{VM} - \frac{K_H u_1 - f_{VM}}{t_H} = 0 \\
 d1: \quad & \dot{f}_{VM} - \frac{d}{dt} f_{VM} = 0 \\
 c2: \quad & \dot{P}_D - \frac{1}{C_D} f_{VM} + \frac{K \rho_1(t)}{C_D} P_D - \frac{K \rho_1(t)}{C_D} P_T = 0 \\
 d2: \quad & \dot{P}_D - \frac{d}{dt} P_D = 0 \\
 c3: \quad & \dot{P}_T - \frac{K \rho_1(t)}{C_{SH}} P_D + \left(\frac{K \rho_1(t)}{C_{SH}} + \frac{K_2}{C_{SH}} \right) P_T + \frac{K_1 \rho_2(t)}{C_{SH}} u_2 = 0 \\
 d3: \quad & \dot{P}_T - \frac{d}{dt} P_T = 0 \\
 c4: \quad & \dot{P}_O - \frac{K_2}{t_{P_O}} P_T + \frac{P_O}{t_{P_O}} - \frac{K_{P_O} K_1 \rho_2(t)}{t_{P_O}} u_2 = 0 \\
 d4: \quad & \dot{P}_O - \frac{d}{dt} P_O = 0 \\
 c5: \quad & P_{1a} - K_\alpha f_{VM} + K_\beta = 0 \\
 c6: \quad & y_1 - P_{1a} = 0 \\
 c7: \quad & y_2 - P_D = 0 \\
 c8: \quad & y_3 - P_T = 0 \\
 c9: \quad & y_4 - P_O = 0
 \end{aligned}$$



		f_{VM}	P_D	P_T	P_O	P_{1a}	u_1	u_2	y_1	y_2	y_3	y_4
c_5		1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
c_7		0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
c_8		0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
c_9		0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
c_6		0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
$RR1$	c_1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
$RR2$	c_2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
$RR3$	c_3	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
$RR4$	c_4	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0

Fig. 1: Análisis estructurado de la Unidad n°4; a) Grafo Bipartito; b) Matriz de incidencia

La matriz de incidencia (Tabla 2) se obtiene de la información contenida en el grafo bipartito (Fig. 1b) donde cada columna corresponde a un círculo, cada fila a una barra y la línea que une un círculo con una barra se representa con el número uno en la matriz [16]. Se observa que todas las variables desconocidas tienen una relación con alguna restricción; esto se representa en la matriz con un "1" en la intersección de la columna y fila correspondiente; las paridades se representan con el número uno en romano ("I"). Analizando la matriz de incidencia se observa que las restricciones c_1 , c_2 , c_3 y c_4 y las variables f_{VM} , P_D , P_T , P_O , m_s , y P_{1a} no tienen asociada una paridad y por lo mismo son usadas como relaciones de redundancia analítica (RRA). Estas RRA's al contar con un número de variables mayor que el número de restricciones, contienen información redundante que puede ser usada para el diagnóstico de fallos y el diseño de los sensores virtuales. Se observa que f_{VM} puede ser calculada de manera redundante a través de las restricciones c_1 y c_2 , y que P_D se puede calcular a partir de las restricciones c_2 y c_3 . También, se observa que la variable P_T puede ser calculada de las restricciones c_2 , c_3 y c_4 , y que la variable P_O sólo puede ser calculada a partir de la restricción c_4 .

4. SISTEMA DE DIAGNÓSTICO DE FALLOS CON SENSORES VIRTUALES

Desde su puesta en servicio, la Unidad n°4 opera en un esquema de control de Caldera en Seguimiento y los sensores que miden las variables P_T , P_{1a} y P_O no tienen redundancia física. Conforme a lo establecido en [1], estas mediciones deben ser redundantes para que el fallo en un sensor no afecte la operación de la unidad. Como una alternativa, se propone integrar al esquema de control un SDFSVM que realice el diagnóstico del fallo y tome las acciones necesarias para compensar la medición en sensor fallado (Fig. 2), a fin de mantener el buen desempeño del sistema de control.

El SDFSVM está constituido por un generador de residuos, una lógica de detección y localización de fallos, un conjunto de sensores virtuales, para compensar las mediciones de las variables P_T , P_{1a} y P_O , y una lógica de compensación de sensores (Fig. 3).

Un sensor físico presenta un fallo cuando el residuo, que se genera al comparar su medición con el valor de la variable estimada por el observador, sobrepasa el umbral fijo de detección; esto para garantizar que no se trate de una falsa alarma. Entonces, la lógica de detección determina un síntoma del fallo. La lógica de localización compara el síntoma en una matriz de firma de fallos, para identificar cual es el sensor fallado. La lógica de compensación de

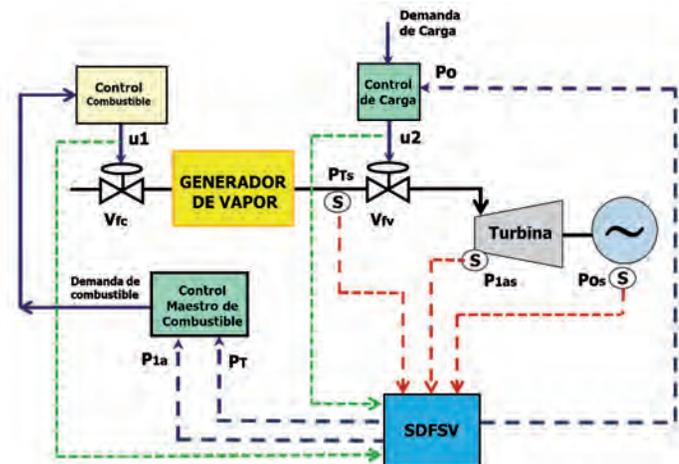


Fig. 2: SDFSVM integrado al esquema de control de Caldera en Seguimiento de la Unidad n°4

sensores ejecuta la acción para sustituir la medición del sensor físico fallado con la medición del sensor virtual correspondiente.

En el diagrama conceptual del SDFS (Fig. 3) y representa el vector de valores reales de las variables de la unidad, y_m el vector de variables de salida medidas a través de los sensores físicos, y_v el vector de variables de salida estimadas con los sensores virtuales, u representa el vector de variables de entrada, r el vector de residuos, f el vector de fallos detectados y s el vector de síntomas que permiten localizar los sensores fallados. S representa los sensores físicos.

El generador de residuos se diseñó con base en el siguiente observador tipo Luenberger extendido, considerando la representación q-LPV dada en (7) y (8).

$$\hat{\dot{x}}(t) = \sum_{i=1}^M \xi_i(\rho(x(t))) (A_i \hat{x} + B_i u + L_i (y - \hat{y})) \quad (20)$$

$$\hat{y}(t) = C \hat{x}(t) \quad (21)$$

$$r(t) = y(t) - \hat{y}(t) \quad (22)$$

Aquí, $\hat{x}(t)$ es el vector de estado estimado, $\hat{y}(t)$ es el vector de salidas estimadas y $r(t)$ es el vector de residuos. $\rho(x(t))$ es el vector de parámetros variables en el tiempo y $\xi_i(\rho(x(t)))$ son funciones de ponderación.

Las matrices L_i son las ganancias de los observadores en cada vértice del politopo. Estas matrices se calculan mediante el método de colocación de polos, de manera que se cumpla que las

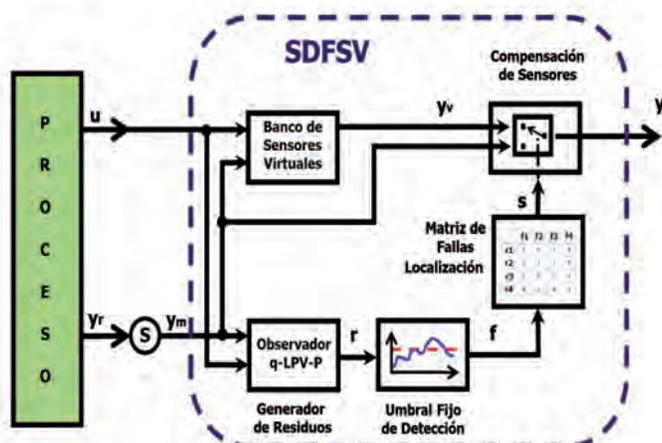


Fig. 3: Diagrama conceptual del SDFS

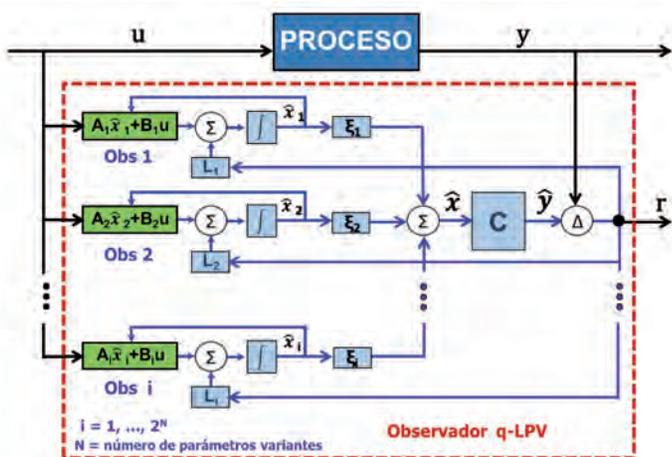


Fig. 4: Diagrama esquemático del Observador q-LPV

matrices $(A_i - L_i C)$ tengan valores propios con parte real negativa.

El criterio para colocar los polos es que la dinámica de los observadores sea más rápida que la dinámica del modelo; es decir, los valores absolutos de los valores propios de las matrices $(A_i - L_i C)$ deben ser mayores que los valores absolutos de los valores propios de las matrices A_i del modelo LPV dado en (7) y (8).

5. PRUEBAS DE EVALUACIÓN

Para la evaluación del SDFS en las condiciones más cercanas a la operación real de la Unidad n°4 se utilizó un simulador construido en la plataforma Matlab/Simulink que emula el proceso de generación de vapor de una central termoeléctrica, con base en un modelo no lineal de alto orden de veintinueve variables de estado (en adelante el simulador de referencia) [17], integrado por los módulos mostrados en la Fig. 5. Este simulador se adecuó para emular la operación de la Unidad n°4 y se empleó en la evaluación

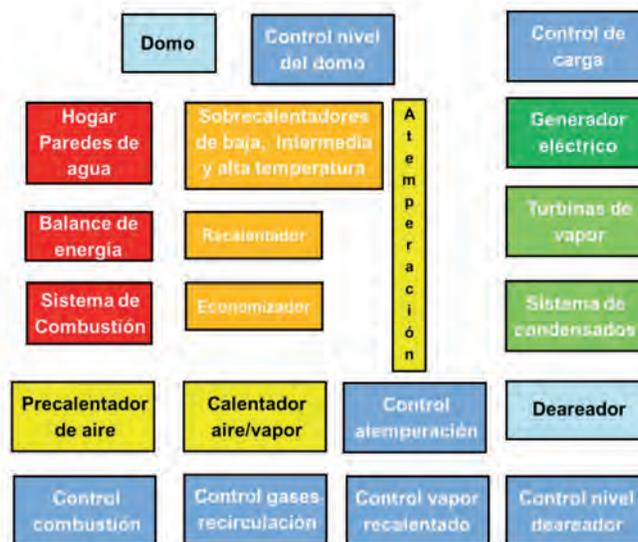


Fig. 5: Módulos del simulador de referencia para evaluación del SDFS

de los sistemas de control y en el ajuste de los controladores, durante los proyectos de modernización de los sistemas de control de los generadores de vapor de las Unidades No. 4 y No. 5 de la central, en los años 2014 y 2016 respectivamente.

Para las pruebas de validación se definieron los siguientes escenarios, considerando solamente fallos en la medición del sensor físico de P_r : a) SDFS en condiciones libre de fallos; b) Sistema de control con el sensor fallado y sin compensación del sensor virtual; c) Sistema de control con el sensor fallado y con compensación del sensor virtual.

En el escenario a) las pruebas se realizaron con diferentes demandas de carga eléctrica (baja, media y alta), modificando de forma programada la variable u_r . Para los escenarios b) y c) las pruebas al SDFS se realizaron para una demanda de carga eléctrica media, con las condiciones iniciales siguientes.

$$y_0 = \begin{bmatrix} P_{1a,0} \\ P_{D,0} \\ P_{T,0} \\ P_{o,\bar{a}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7,2 \text{ MPa} \\ 13,03 \text{ MPa} \\ 12,51 \text{ MPa} \\ 120 \text{ MW} \end{bmatrix} \quad u_0 = \begin{bmatrix} u_{1,0} \\ u_{2,0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,23 \\ 0,73 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Los estados del observador se establecieron en condiciones iniciales de valor cero. El fallo en el sensor P_r se consideró de tipo abrupto, en forma de pulso y de un valor de -10% (-1,4 Mpa) del rango de medición de la variable P_r sobre su valor de operación. El fallo ocurre a los 1000 segundos (16,67 minutos) y desaparece a los 3000 segundos (50 minutos).

5.1. RESULTADOS

Por razones de espacio sólo se presentan los resultados para la variable P_T , por ser ésta la variable crítica en el esquema de control.

a) SDFVS en condiciones libre de fallos en sensores.

En la Fig. 6 se muestra el comportamiento de la variable u_2 (Fig.6a), la variable u_1 (Fig. 6b), la variable P_r (Fig. 6c), y el valor absoluto de su residuo (Fig. 6d). Se observa el buen desempeño del observador q-LPV dado que la variable P_r estimada converge

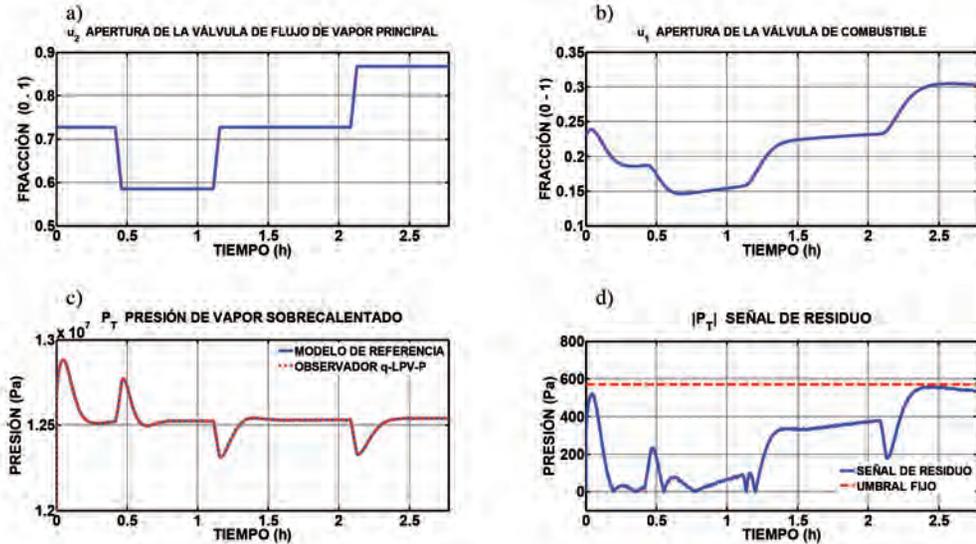


Fig. 6: Desempeño del SDFVS en condiciones libre de fallos en sensores

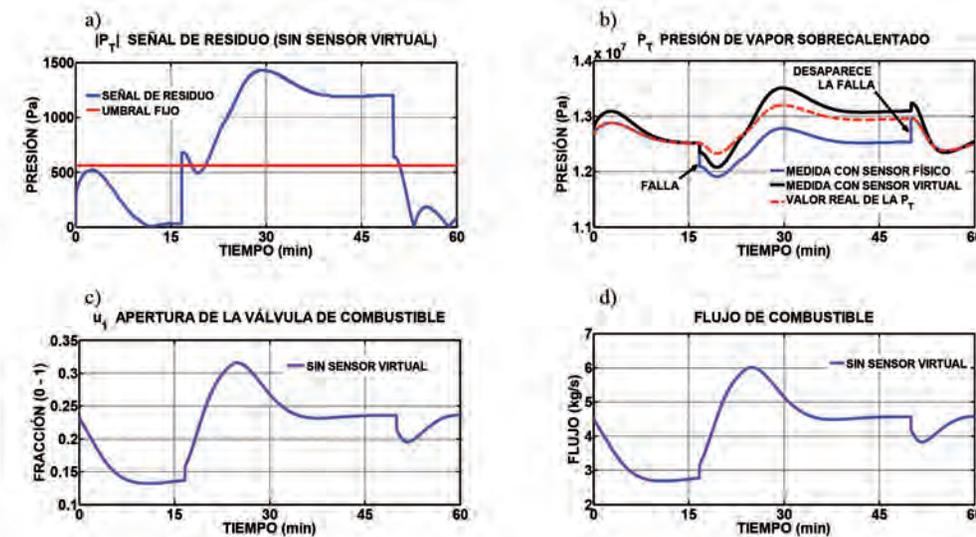


Fig. 7: Desempeño del SDFVS integrado al sistema de control, con el sensor de P_r fallado y sin compensación del sensor virtual

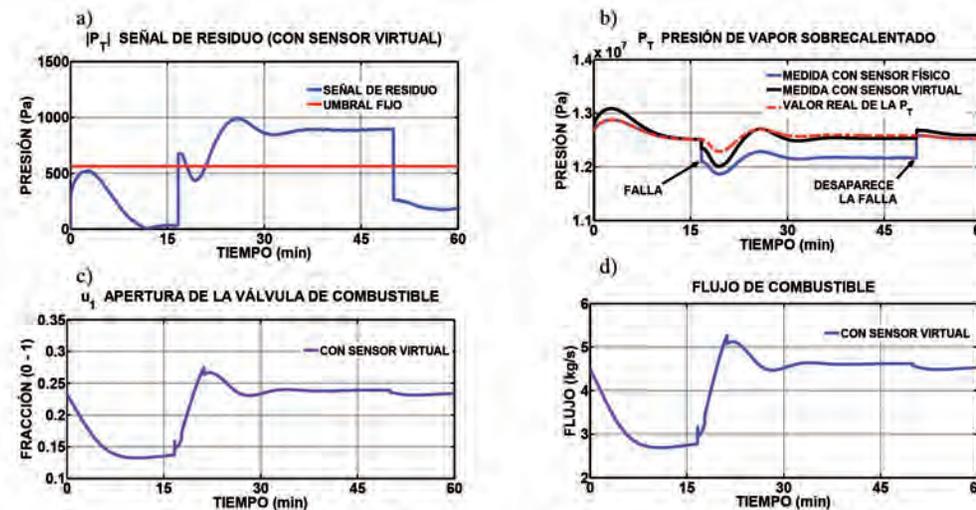


Fig. 8: Desempeño del SDFVS y del Sistema de control, con el sensor de P_r fallado y compensación del sensor virtual

al valor real de esa variable en la Unidad nº4 (líneas azul y rojo en la Fig. 6c), para cualquier demanda de carga eléctrica. Se observa que la señal de entrada u_1 se adapta a las exigencias de los cambios de u_2 , para mantener la P_T en su valor de referencia. El umbral fijo (línea color rojo en la Fig. 6d) se determinó a partir del máximo valor absoluto de la señal de residuo de P_T .

Para los propósitos de esta prueba, el sistema SDFSVM se limitó para no compensar la medición del sensor fallado. En la Fig. 7 se observa que al ocurrir el fallo en el sensor físico, la señal de residuo $|P_T|$ (línea azul en Fig. 7a) rebasa el umbral fijo (línea roja). Debido a que el sistema SDFSVM no compensa la medición de P_T , el sistema de control mantiene la variable P_T (línea color azul en la Fig. 7b) en el punto de referencia.

Sin embargo, el desempeño del sistema de control no es correcto debido a que el valor real de la P_T de la Unidad nº4 se encuentra en un valor mayor (línea color rojo de la Fig. 7b) al del punto de referencia (12,51 MPa); este valor de la P_T no es aceptable en condiciones reales para nivel de carga eléctrica considerado, ya que como se observa en la Fig. 7c el sistema de control provoca un valor mayor de la variable u_1 y por lo mismo un mayor flujo de combustible (Fig.7d). Se observa que la medición de P_T con el sensor virtual (línea color negro en la Fig. 7b) es cercana a su valor real (línea color rojo en la Fig. 7b). Al desaparecer el fallo, el sistema de control recupera su buen desempeño y las tres mediciones de P_T presentan un valor similar (Fig. 7b).

En la Fig. 8 se observa que al ocurrir el fallo en el sensor físico de medición de la P_T , la señal de residuo $|P_T|$ (línea color azul en la Fig. 8a) rebasa el umbral fijo (línea color rojo en la Fig. 8a). El sistema SDFSVM actúa compensando la medición del sensor físico con la medición del sensor virtual. Después del transitorio provocado por el fallo, el valor real de la P_T (línea color rojo en la Fig. 8b) se mantiene en el valor de referencia (12,51 MPa), cercano al valor estimado con el sensor virtual (línea color negro en la Fig. 8b). El sensor físico fallado proporciona una medición de P_T diferente al valor de referencia (línea color azul en la Fig. 8b).

El sistema de control ajusta la variable u_1 (Fig. 8c) en menor tiempo (aproximadamente en 25 s) que en el caso anterior (aproximadamente en 35 s) (Fig. 7c), con menor consumo de combustible (Fig. 8d) con respecto al caso anterior (Fig. 7d). Esta acción contribuye a mantener el buen desempeño del esquema de control.

Al desaparecer el fallo, el sistema SDFSVM deja de compensar la medición con el sensor virtual y ejecuta la acción de regresar el sensor físico a operación. El sistema de control conserva su buen desempeño al mantener el valor real de la P_T en su valor de referencia (línea color rojo en la Fig. 8b).

6. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó el diseño del SDFSVM que permite detectar y localizar fallos, y compensar la medición de sensores fallados en el esquema de control de Caldera en Seguimiento de la Unidad nº 4. Se demostró que la implantación del sistema SDFSVM en el proceso real es factible y que contribuiría para que la Unidad nº 4 operara de manera segura y confiable en presencia de fallos, al contar con redundancia (analítica) en los sensores del esquema de control. El diseño del SDFSVM se basó en un modelo simplificado q-LPV y su validación se realizó en un simulador que emula la operación real de la Unidad nº4, en todo su rango de cargas eléctricas. Los resultados obtenidos de estas pruebas de validación demostraron la funcionalidad del SDFSVM en presencia de fallo en el sensor de P_T , logrando que esta variable permanezca en su valor de referencia y que el esquema de control contribuya a una operación estable de la unidad.

El SDFSVM favorece al buen desempeño del esquema de control en presencia de un fallo en un sensor, al compensar la medición del sensor físico fallado con la medición del sensor virtual correspondiente, garantizando así una correcta medición de cualquiera de las variables $P1a$, P_T y P_o . La implementación del umbral fijo robusteció el desempeño del SDFSVM, al no permitir que éste considerara como fallos los cambios en la variable u_2 , por condiciones de variación en la demanda de carga eléctrica a la unidad.

Como continuación de esta investigación se están realizando trabajos relacionados con los diseños de un sistema de diagnóstico de fallos en actuadores, un umbral adaptable considerando las variaciones en la demanda de carga eléctrica y un sistema de control tolerante a fallos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Comisión Federal de Electricidad (CFE). "Instrumentación, control y automatización". CFE-G0000-21. México. 1987. http://lapem.cfe.gob.mx/normas/carga_pagina.asp?pag=G0000-21.pdf.
- [2] Isermann R. "Perspectives of automatic control". Control Engineering Practice. 2011. Vol. 19, pp. 1399-1407. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2011.08.004>.
- [3] Addeh-Gelief M, Zakouk S. "Application of multi-Model fault diagnosis for an Industrial system". 21st Mediterranean Conference on Control & Automation (MED). Patanias-Chania, Crete, Greece. 2013, DOI: <https://doi.org/10.1109/MED.2013.6608755>.
- [4] Khoshnevisan L, Momeni H R, Ashraf-Modarres A. "Implementation of an innovative simplified sliding mode observer-based robust fault detection in a drum boiler system" International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering. 2011. Vol. 5, Núm 1, pp. 42-46, 2011. <http://www.internationalconferencecenter.org/publication/12199>.
- [5] Khoshnevisan L, Momeni H, Ashraf-Modarres A. "Introduction of a robust fault detection filter model based on continuous Kalman filter for a real drum boiler system". International Journal of Modeling and Optimization, 2012. Vol. 2, Núm. 4, p. 539-543. DOI: <https://doi.org/10.7763/IJMO.2012.V2.178>.
- [6] Briat C. Linear parameter-varying and time-delay systems - analysis, observation, filtering & control., Springer-Verlag., 2015, DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-44050-6>.
- [7] De Lira S, Puig V, Quevedo J, et al. "LPV observer design for PEM fuel cell system: Application to fault detection". Journal of Power Sources. 2011. Vol. 196, p. 4298-4305. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.11.084>.
- [8] Varga A, Ossmann D. "LPV model-based robust diagnosis of flight actuator faults". Control Engineering Practice. 2014. Vol. 31, p. 135-147. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2013.11.004>.
- [9] Cheres E. "Small and medium size drum boiler models suitable for long term dynamic response". IEEE Transactions on Energy Conversion. 1990. Vol. 5, Núm. 4, pp. 686-692. DOI: <https://doi.org/10.1109/60.63140>.
- [10] De Mello F. "Boiler models for system dynamic performance studies". IEEE Transactions on Power Systems. 1991. Vol. 6, Núm 1, pp. 66-74. DOI: <https://doi.org/10.1109/59.131048>.
- [11] Zhong-Xu H, Xiao-Hong Q, Zhi Z, et al. "A dynamic non-linear simulation model of boiler turbine coordinated control systems and its application". International Conference on Electrical Engineering. China. 2005. <https://es.scribd.com/document/74548647/A-Dynamic-Non-Linear-Simulation-Model-of-Boiler-Turbine-Coordinated-Control-System-and-Its-Application-1>.
- [12] Nagy A, Mourot G, Marx B, Ragot J, et al. "Systematic multimodeling methodology applied to an activated sludge reactor model". Industry Engineering Chemistry Research. 2010. Vol. 49, Núm. 6, pp. 2790-2799. DOI: <https://doi.org/abs/10.1021/ie8017687>.
- [13] Blanke M, Kinnsert M, Lunze J, et al. Diagnosis and fault-tolerant control., Springer-Verlag. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-35653-0>.
- [14] Izadi-Zamanabadi R, Blanke M. "Structural analysis for diagnosis - The matching problem". Proceedings of the 15th Triennial World Congress. Barcelona, España, 2002. <https://doi.org/10.3182/20020721-6-ES-1901.00792>.
- [15] Izadi-Zamanabadi R, Larsen J. "A fault tolerant control supervisory system development procedure for small satellites: The AAUSAT-II case". 17th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace. 2007. <https://doi.org/10.3182/20070625-5-FR-2916.00050>.
- [16] Derdour Y, Haffaf H, Bouazza K. "Application of the structural analysis on a three axis manipulator robot". Computer Science and Engineering. 2013. Vol. 3, Núm. 2, pp. 15-23. DOI: <https://doi.org/10.5923/j.computer.20130302.01>.
- [17] Delgado M, Suárez D, Moreno J. "A PDE model of a waterwalls steam generation process". ISA Transactions. 2008. Vol. 47, pp. 374-385. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2008.07.002>.

AGRADECIMIENTOS

A la Central Termoeléctrica Gral. Francisco Villa, al Instituto de Nacional de Electricidad y Energías Limpias, y al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, por las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo.

Optimización paramétrica del proceso de engatillado lineal por roldana para chapas metálicas



Parametric optimization of linear roll-hemming process for metal sheets

Pablo Alberto Limon-Leyva¹, Elías Rigoberto Ledesma-Orozco², Eduardo Aguilera-Gómez², Héctor Plascencia-Mora², Antonio de Jesús Balvanti-García², José Angel Diosdado-De la Peña²

¹ Instituto Tecnológico de San Luis Potosí. Departamento de Estudios de Posgrado e Investigación. Av. Tecnológico, s/n – 78437 San Luis Potosí (México).

² Universidad de Guanajuato. Departamento de Ingeniería Mecánica Campus Irapuato-Salamanca. Carretera Salamanca -Valle de Santiago, Km 3.5 - 36885 Comunidad de palo blanco, Salamanca, Guanajuato (México).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8225> | Recibido: 28/11/2016 • Evaluado: 29/11/2016 • Aceptado: 30/03/2017

ABSTRACT

- The present work, focus on the parametric optimization of geometric parameters for Roll Hemming process. Here, the parameters of interest are the Roller radius, the angle for pre-hemming stage and the fillet radius. The main objective is to improve the quality parameters of the process: Roll-In, Roll-Out and wrinkling. Furthermore, a comparison between results generated, in numerical and experimental studies, with optimum and non-optimal parameters, is presented. Finite Element Analysis (FEA) Software, ANSYS Workbench 15[®] was implemented for numerical simulation of the process. For the experiments, a 6 degree of freedom (DOF) NACHI SRA210 industrial manipulator was used. From numerical results, 2 Rollers were developed with optimum (10.18 mm of radius) and non-optimal (25 mm of radius) parameters. Multiple tests of roll hemming in straight paths were performed on several 0.9 mm thick Aluminum sheets 6011 (120 x 100 mm²). Similar to simulation, the analysis of the obtained results shows that the Roller with optimum parameters generates the best quality in hemmed samples.
- **Keywords:** Parametric Optimization, Roll Hemming, Industrial Manipulator, Finite Element Analysis.

RESUMEN

El presente trabajo se enfoca en la optimización paramétrica de las variables geométricas del engatillado, tales como: el radio de la roldana, el ángulo de pre-engatillado y el radio del doblado del panel exterior para crear la ceja con el fin de generar una mejora en los parámetros de calidad del proceso: enrollamiento de la pestaña (Roll-in), desenrollamiento de la pestaña (Roll-Out) y arruga.

Adicionalmente, se muestra la comparación de los resultados iniciales (no óptimos) y óptimos, obtenidos tanto en simulación numérica como en pruebas experimentales. Las simulaciones del proceso se llevaron a cabo implementando el software de análisis por elemento finito, ANSYS Workbench 15[®]. Para las pruebas experimentales se utilizó una estación de trabajo consistente en un manipulador industrial de 6 grados de libertad (GDL) NACHI SRA210, sobre el que se montó un herramental de soporte para la roldana. A partir de los parámetros determinados en simulación, se fabricaron dos roldanas, uno con parámetros óptimos (10.18 mm de radio) y el otro con los parámetros iniciales (25 mm de radio). Se realizaron pruebas de engatillado lineal sobre chapas de aluminio 6011, de 0.9 mm de espesor y dimensiones de 120 x 100

mm². El análisis de los resultados experimentales obtenidos muestra que, al igual que en simulación, la roldana con parámetros de engatillado óptimos genera una mejora, en los tres parámetros considerados de calidad de engatillado, en comparación con la calidad obtenida con la roldana de parámetros iniciales.

Palabras clave: Optimización paramétrica, Engatillado por roldana, Manipulador industrial, Análisis por elemento finito.

1. INTRODUCCIÓN

El conformado de metales comprende una amplia variedad de procesos de manufactura que consisten en la deformación plástica de una pieza inicialmente plana (comúnmente una chapa), sobre la cual se genera una geometría deseada por medio de múltiples herramientas [1]. Debido al alto costo de inversión para la realización de investigaciones experimentales, nuevas alternativas como los estudios numéricos, incluyendo el análisis por elemento finito, han sido propuestos para el análisis y optimización de diversos procesos de manufactura [2-6].

En la industria automotriz, una alternativa para los procesos tradicionales de ensamblaje, como la soldadura, es el engatillado de cierres de carrocerías (cofres, puertas, etc.): este proceso de formado sirve para aumentar la rigidez de la parte engargolada, mejorar los bordes de las estructuras y, por último, para unir los paneles interiores y exteriores. El proceso de engatillado puede llevarse a cabo a través de tres métodos: engatillado con dados de movimiento vertical (die hemming), engatillado de mesa con dados de movimiento vertical y horizontal (*table-top hemming*), y engatillado por roldana (*roll-hemming*), [4, 5]. El engatillado con dados de movimiento vertical se lleva a cabo en tres etapas, la etapa de doblado a 90°, pre-engatillado y engatillado final, las cuales se realizan en una prensa con un patrón de movimiento vertical [5]. De manera similar, el engatillado de mesa con dados de movimiento vertical y horizontal se realiza empleando una prensa, sin embargo, el movimiento del herramental puede ser horizontal, vertical o una combinación de ambos. La desventaja de este método es el alto costo de inversión, ya que cada configuración de herramientas genera un solo tipo de producto (los dados no son intercambiables) [5,6]. El engatillado por roldana emplea una roldana conducida a lo largo de una trayectoria dada. El estudio de los diferentes métodos para el engatillado de materiales ha sido ampliamente reportado en la literatura [7-14]. Sin embargo, los procesos típicos del engatillado, como el engatillado con dados de movimiento vertical y el engatillado de mesa con dados de mo-

vimiento vertical y horizontal, tienen un alto costo de inversión al requerir herramientas específicas para cada aplicación.

En comparación con los procesos antes mencionados, las principales ventajas del engatillado por roldana son su bajo costo de inversión y flexibilidad de producción, al requerir únicamente cambios en la trayectoria de la roldana para distintas aplicaciones. Recientemente, diversos autores han reportado estudios numéricos y experimentales para la optimización del proceso de engatillado [15-20]. Sin embargo, la caracterización de la influencia de los parámetros geométricos sobre la calidad del engatillado en distintos materiales es un problema sin resolver y sigue siendo de gran relevancia para la industria del conformado de metales.

Para resolver los problemas que se tienen en torno a la calidad de productos engatillados, los esfuerzos realizados por la industria automotriz en conjunto con múltiples investigadores se han enfocado en estrategias estadísticas. El diseño de experimentos (DOE por sus siglas en inglés) ha sido una de las estrategias más reportadas en la literatura [4, 5, 10, 20]. Los autores de [20] inicialmente presentan una metodología de simulación para comparar su modelo propuesto con los resultados de Hu et al. [21], mostrando una diferencia máxima de 2.14% en los resultados de la fuerza máxima en la roldana. Adicionalmente, utilizaron un DOE completo de dos niveles (2^k) para determinar la influencia de parámetros como la velocidad de avance, diámetro de la roldana, ángulo de pre-engatillado y el radio de doblez sobre parámetros de salida como la fuerza máxima de la roldana y los parámetros de calidad del proceso: enrollamiento de la pestaña, desenrollamiento de la pestaña y arruga. Para estos últimos, las gráficas de interacciones que reportaron muestran fuertes relaciones entre el enrollamiento, desenrollamiento de la pestaña y la arruga respecto al diámetro de la roldana, ángulo de pre-engatillado y el radio de doblez. Por ello, en el presente trabajo se consideran éstos últimos y se descarta el análisis de la velocidad de avance y no se evalúa la fuerza máxima sobre la roldana.

1.1. ENGATILLADO POR ROLDANA

El proceso de engatillado por roldana emplea una o más roldanas, las cuales son guiadas comúnmente por un manipulador a lo largo de una trayectoria dada, ver Figura 1a. El uso de un robot industrial permite el seguimiento de múltiples trayectorias que incluyan diferentes rotaciones y traslaciones. Lo anterior facilita el engatillado de una gran variedad de geometrías, ya sean rectas o curvas, en 2 ó 3 dimensiones. Este proceso ofrece también la ventaja de variar el número de pasos a conveniencia, con el fin de mejorar la calidad del engatillado. El costo por operación en el engatillado por roldana es bajo en comparación con los otros

métodos de engatillado (*Die-Hemming* y engatillado table-top), representando una alternativa factible para la automatización del proceso [22, 23].

Para la industria, predecir la forma final y la calidad de la superficie del producto son retos críticos en el desarrollo e implementación de los procesos de manufactura. La calidad de los productos engatillados, depende de parámetros dimensionales y superficiales. Dichos parámetros incluyen: las deformaciones en el área interior y exterior a lo largo del borde del producto, tales como arruga y grietas (Figura 1a), retroceso (*Recoil*) y comba (*Warp*), ver Figura 1b, así como también el empalme entre el radio exterior del engatillado y la ceja original del panel (enrollamiento de la pestaña), la separación entre el radio exterior del engatillado y la ceja original del panel (desenrollamiento de la pestaña), ver Figura 1c.

En este trabajo, se propone la optimización del proceso de engatillado por roldana en función del diámetro de la misma, el ángulo de entrada de la roldana para el pre-engatillado y el radio del doblez inicial. Para el análisis numérico se utilizó el módulo de LS-DYNA® incluido en la interfaz gráfica de ANSYS Workbench® [24-26]. El esquema de optimización desarrollado para el proceso de engatillado se basa en la minimización de los parámetros de calidad del proceso: enrollamiento de la pestaña, desenrollamiento de la pestaña y la formación de arruga. Finalmente, se propone un estudio comparativo entre pruebas de engatillado lineal, tanto numéricas como experimentales, con parámetros óptimos y no óptimos. Para la simulación del proceso de engatillado se modelaron probetas planas de Aluminio 6011, tanto para el panel exterior como para el interior, como se describe en la siguiente sección.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1. MATERIAL

La caracterización del material considerado, aluminio de la serie 6000 (Al-6011) para uso automotriz, se llevó a cabo en base a la norma ASTM E8, por medio de pruebas de tensión uniaxial a 0°, 45° y 90° con respecto a la dirección de rolado. El modelo de material seleccionado para los paneles interior y exterior en la simulación del proceso fue Barlat 3 Parámetros, debido a que es el que mejor representa el comportamiento plástico del material utilizado [27]. Las propiedades mecánicas obtenidas para el aluminio Al-6011 se muestran en la Tabla 1. Excepto por el exponente de Barlat que se determina por la estructura cristalina del material [27], los parámetros de esta tabla se obtienen de las pruebas realizadas en base a la norma ASTM E8 y el procedimiento de ajuste por regresión lineal en base logarítmica detallado en [28]. Estos

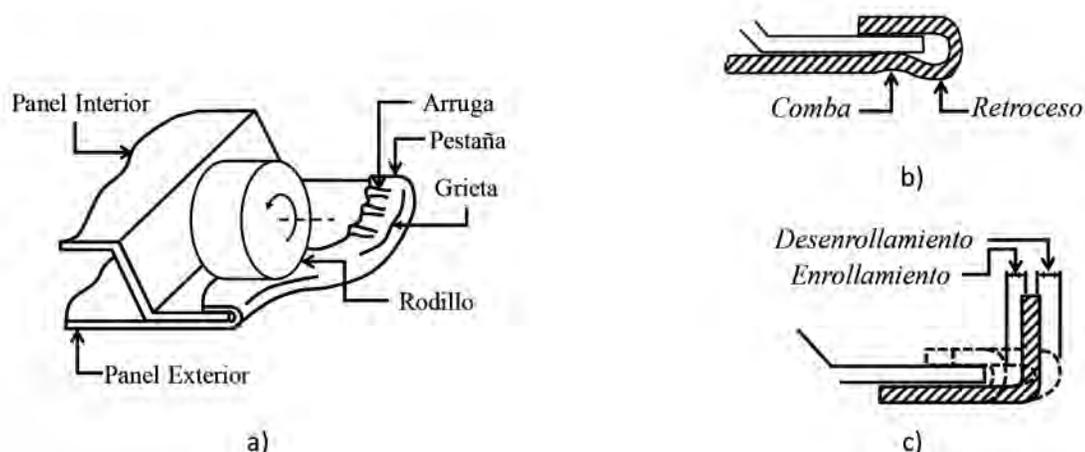


Fig. 1: Proceso de engatillado por roldana (a) y parámetros de calidad: b) comba y retroceso; c) enrollamiento y desenrollamiento de la pestaña

parámetros describen los componentes de la función de formación de plasticidad desarrollado por Barlat y Lian [29], la cual describe la anisotropía plana para un estado general de esfuerzo plano y puede escribirse de la siguiente manera:

$$f = a|K_1 + K_2|^m + a|K_1 - K_2|^m + c|2K_2|^m = 2\bar{\sigma}^m \quad (1)$$

donde:

$$K_1 = \frac{\sigma_{xx} + h\sigma_{yy}}{2}, \quad K_2 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} - h\sigma_{yy}}{2}\right)^2 + p^2\sigma_{xy}^2} \quad (2)$$

donde, c y h pueden determinarse usando los valores r obtenidos de las pruebas de tensión uniaxial en las tres diferentes direcciones, r_{00} , r_{45} y r_{90} como sigue:

$$a = 2 - c = 2 - 2\sqrt{\frac{r_{00} - r_{90}}{1 + r_{00} + r_{90}}} \quad (3)$$

$$h = \sqrt{\frac{r_{00} - 1 + r_{90}}{1 + r_{00} - r_{90}}} \quad (4)$$

Propiedad	Unidad	Valor
Densidad (ρ)	Kg/m ³	2770
Módulo de Elasticidad (E)	GPa	70
Razón de Poisson (ν)	-	0.3
Constante de endurecimiento (K)	MPa	533
Exponente de endurecimiento (n)	-	0.261
Resistencia a la cedencia (S_y)	MPa	151
Exponente de Barlat (m)	-	8
Coefficiente Lankford a 0° (r_{00})	-	0.780
Coefficiente Lankford a 45° (r_{45})	-	0.527
Coefficiente Lankford a 90° (r_{90})	-	0.599

Tabla 1: Propiedades mecánicas del material

Sin embargo, p no puede calcularse analíticamente, por lo que se ajusta a través del procedimiento descrito por Diosdado De la Peña et al. [28].

2.2. ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO (AEF)

El modelo del panel exterior consiste en una chapa plana de aluminio con una ceja de 10 mm, la cual está doblada a 90° con un radio constante. El panel interior es una chapa totalmente plana del mismo material y espesor (0.9 mm) que el panel exterior. Las características geométricas del panel exterior fueron de 120 x 100 mm², mientras que el panel interior es un recuadro de 100 x 100 mm² (ver Figura 2). Ambos paneles fueron modelados para la simulación como elementos deformables.

Para la simulación, se consideró un coeficiente de fricción estática de 0.1 para los contactos entre todas las partes involucradas en el proceso [20, 21, 30]. Dicho coeficiente fue definido para generar el giro de la roldana a lo largo de su eje de giro cuando entra en contacto con la chapa. Las simulaciones del proceso se llevaron a cabo con un análisis explícito en el software de Análisis por Elemento Finito, ANSYS 15®. Ambos paneles fueron modelados utilizando elementos tipo cascarón (*Shell*) con un tamaño de 1 mm. En la zona del doblado de ceja del panel exterior se refinó la malla con elementos de 0.12 mm, con el fin de mejorar los resultados obtenidos en el proceso (ver Figura 2a). El tamaño de la malla se determinó a partir de un análisis de sensibilidad de malla desde 5 a 0.5 mm, en la sección gruesa, donde la diferencia máxima entre los resultados obtenidos con el elemento más pequeño y el reportado aquí fue de 7.5%, requiriendo sólo 4 horas para su solución que representa aproximadamente el 23% del tiempo requerido con un elemento de 0.5 mm. Estas chapas se modelaron aplicando el modelo de material de Barlat de 3 parámetros que se detalló en la sección previa.

En este trabajo se modelaron los herramientas como partes rígidas: la roldana y el soporte de engatillado, ya que se considera

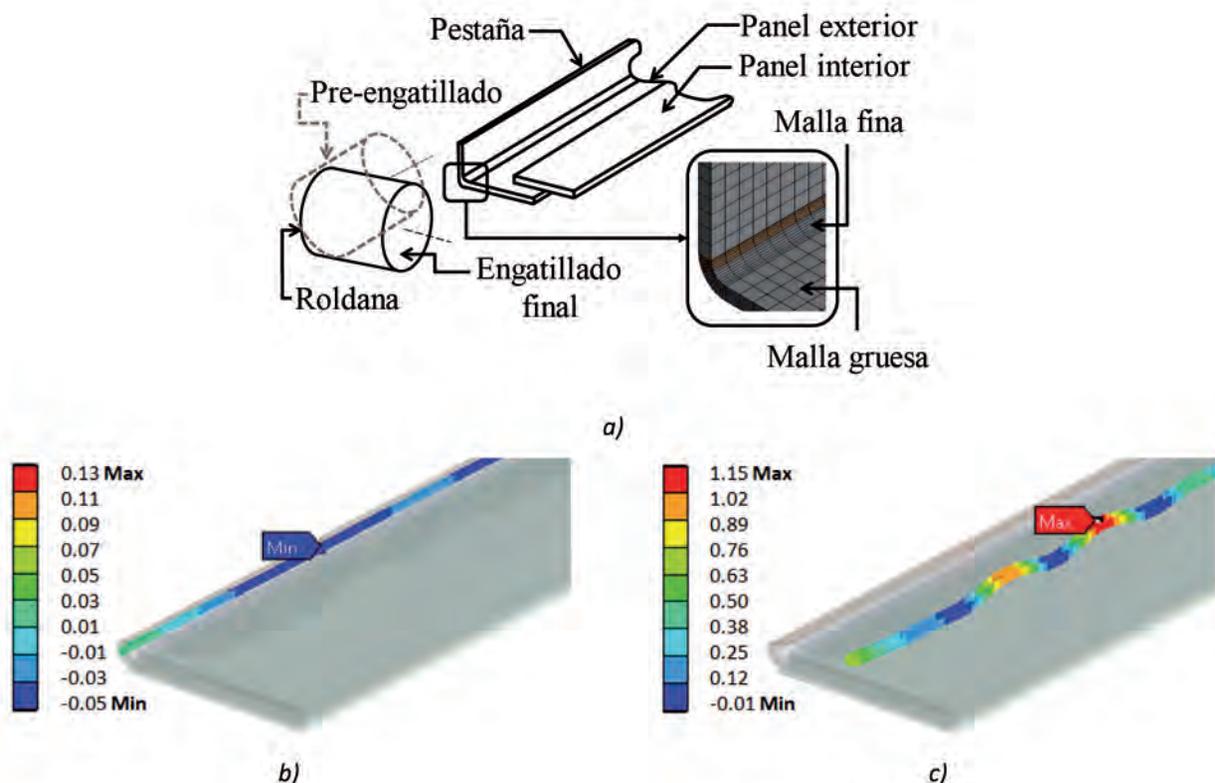


Fig. 2: Modelado inicial: a) elementos del proceso de engatillado por roldana y características de malla; b) resultado de enrollamiento y desenrollamiento en chapa engatillada; y c) resultado de arruga en chapa engatillada

Punto de Diseño	Radio del doblez [mm]	Radio de la roldana [mm]	Ángulo del Pre-Engatillado [°]	Enrollamiento de la pestaña [mm]	Desenrollamiento de la pestaña [mm]	Arruga [mm]
1	2.25	17.5	45.00	0.48	-0.12	0.63
2	1.50	17.5	45.00	0.26	0.00	0.89
3	3.00	17.5	45.00	0.98	-0.09	0.62
4	2.25	10.0	45.00	0.47	-0.18	0.58
5	2.25	25.0	45.00	0.51	-0.04	0.63
6	2.25	17.5	30.00	0.10	-0.48	0.64
7	2.25	17.5	60.00	0.88	0.34	0.84
8	1.64	11.4	32.80	0.08	-0.24	0.58
9	2.85	11.4	32.80	0.11	-0.87	0.68
10	1.64	23.5	32.80	0.15	-0.09	0.93
11	2.85	23.5	32.80	0.35	-0.65	0.61
12	1.64	11.4	57.20	0.45	0.12	1.09
13	2.85	11.4	57.20	1.09	0.40	0.88
14	1.64	23.5	57.20	0.43	0.07	0.84
15	2.85	23.5	57.20	1.11	0.45	0.53

Tabla 2: Puntos y rangos de valores para DOE con punto central

que dichos elementos no se verán afectados por el proceso. Para dichos herramientas se consideró una densidad de 7800 Kg/m³; un módulo de elasticidad de 207 GPa y una razón de Poisson de 0.3.

La trayectoria de la roldana para el engatillado lineal consiste únicamente en 2 puntos a lo largo del mismo eje. En cada uno de los puntos de la trayectoria se especifica tanto la posición como la orientación de la roldana con respecto al plano de engatillado. Como se ilustró en la Figura 2a, se simularon dos roldanas independientes posicionadas y orientadas de manera que uno de ellas realizara el pre-engatillado y la otra el engatillado final.

Para el proceso de optimización se requiere una simulación inicial, con la cual se verifican las trayectorias, la deformación de la ceja y la coherencia en los resultados numéricos. Los parámetros utilizados para la simulación inicial incluyen una altura de ceja de 10.0 mm, un radio de roldana de 25.0 mm, un radio de doblez de 1.5 mm y un ángulo de pre-engatillado de 30.0°.

Los resultados obtenidos en esta primera simulación del proceso se presentan en las Figuras 2b y 2c. Las magnitudes obtenidas para los parámetros de calidad del proceso son arruga máxima de 1.15 mm, enrollamiento máximo de la pestaña de 0.13 y desenrollamiento mínimo de 0.05 mm.

Los parámetros de enrollamiento, desenrollamiento y arruga máxima se obtuvieron directamente de las Figuras 2b y 2c. El enrollamiento, desenrollamiento se mide a partir de la línea de doblado ideal del borde engatillado del panel exterior, mientras que la arruga es el valor máximo medido desde la superficie inferior del panel exterior hasta la superficie superior de la pestaña engatillada menos el espesor ideal de engatillado (2.7 mm). De los resultados presentados en esta sección, es posible determinar que el proceso de simulación propuesto es apropiado para representar el engatillado de chapa por roldana. Sin embargo, las magnitudes de los parámetros de arruga, enrollamiento y desenrollamiento de pestaña con las condiciones iniciales de simulación presentan desviaciones considerables. La magnitud de la arruga para las condiciones iniciales de simulación es de 1.15 mm, tomando en consideración el espesor ideal de engatillado (2.7 mm); mientras que, el enrollamiento y desenrollamiento de pestaña presentan 0.13 y 0.05 mm de desviación, respectivamente, con respecto a la posición ideal del borde de engatillado (ver Figura 1c). Por lo anterior, un proceso de optimización es requerido, en función de mejorar la calidad del engatillado.

2.3. TEORÍA DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

El módulo DesignXplorer®, incluido en la interfaz gráfica de ANSYS Workbench®, utiliza la técnica de DOE. En estas técnicas se localizan puntos de muestreo, de tal manera que los parámetros aleatorios de entrada sean explorados de la manera más eficiente, o en su defecto, se pueda obtener la información requerida con el mínimo de puntos de muestreo. De manera predeterminada, este módulo de optimización utiliza un DOE el cual combina un diseño con punto central (con puntos mínimos, máximos y centrales a lo largo del eje de los parámetros de entrada), y puntos determinados por un diseño factorial fraccionado. Para un número de parámetros de entrada menor a 5, el programa utiliza únicamente un diseño con punto central; a partir de 5 parámetros de entrada o más, se combina el diseño con punto central y el diseño factorial fraccionado. Para el presente análisis, los parámetros de entrada utilizados fueron 3 (radio de la roldana, ángulo de pre-engatillado y radio del doblez), por lo que los puntos de diseño resultantes son 15. A partir de los puntos de diseño determinados, el módulo de optimización de ANSYS® utiliza técnicas estadísticas para la optimización del proceso. La Tabla 2 muestra los 15 puntos de diseño realizados a partir del DOE, así también los parámetros de calidad del proceso de engatillado obtenidos numéricamente.

3. RESULTADOS

La Figura 3a muestra los puntos de diseño correspondientes a la arruga generada, en función del radio de la roldana y el radio del doblez. Diferentes puntos de diseño se obtuvieron para los parámetros de calidad del proceso (arruga, enrollamiento y desenrollamiento de pestaña), en función de las combinaciones de los parámetros de entrada (radio del doblez, radio de la roldana y ángulo de pre-engatillado). A partir de la distribución de los puntos de diseño, se aproxima una superficie de respuesta implementando el método de interpolación Kriging [31].

La superficie de respuesta para el parámetro de calidad de arruga (Figura 3b), se generó a partir de los puntos de diseño de la Figura 3a. Múltiples superficies de respuesta, similares a la Figura 3b, se generaron en función de las combinaciones de los parámetros de entrada.

Los resultados de los 15 puntos de diseño generados en el DOE, se ajustan a ecuaciones que describen los parámetros de calidad del proceso (arruga, enrollamiento y desenrollamiento de pestaña)

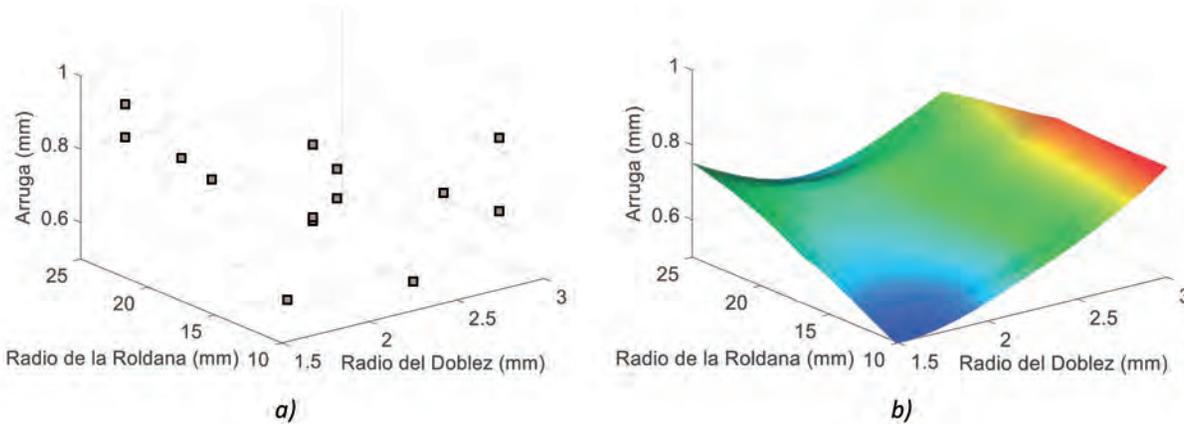


Fig. 3: Resultados del DOE para el parámetro de calidad arruga: a) Puntos de Diseño, b) Superficie de Respuesta

en función de los parámetros de entrada considerados (radio del doblado, ángulo de pre-engatillado y radio de la roldana), ecuaciones (5) a (7). Para ello, se usa el método de mínimos cuadrados para ajustar los puntos de diseño a tres polinomios, que incluyen las interacciones entre los parámetros del proceso. Las ecuaciones obtenidas tienen coeficientes de correlación de 0.97 para la arruga, 0.98 para enrollamiento y 0.99 para desenrollamiento de pestaña.

Las ecuaciones descriptivas de los parámetros de calidad en función de los parámetros de entrada considerados son las siguientes:

$$z_1 = -0.00001 + 0.50986x - 0.05693(90 + y) - 0.00046x^2 - 0.00340x(90 + y) + 0.00050(90 + y)^2 + 1.85633w + 0.21867w^2 - 0.13192wx - 0.02002w(90 + y) + 0.00085wx(90 + y) \quad (5)$$

$$z_2 = -0.00013 - 0.31659x + 0.05910(90 + y) + 0.01112x^2 - 0.00062x(90 + y) - 0.00024(90 + y)^2 - 2.98743w + 0.12281w^2 - 0.18839wx + 0.00031w^2x - 0.00015w^2(90 + y) - 0.00549wx^2 + 0.00007w(90 + y)^2 + 0.00008wx(90 + y) \quad (6)$$

$$z_3 = 0.00001 - 0.00029x + 0.01919y + 0.00190x^2 - 0.00065x(90 + y) - 0.00008(90 + y)^2 - 1.23873w - 0.70480w^2 + 0.06022wx - 0.00353w^2x + 0.00596w^2(90 + y) - 0.00118wx^2 + 0.00001w(90 + y)^2 + 0.00002wx(90 + y) \quad (7)$$

donde z_1 representa el parámetro de arruga; z_2 , el parámetro de enrollamiento de pestaña; z_3 , el desenrollamiento de pestaña; w es el radio del doblado; x es el radio de la roldana; y es el ángulo de pre-engatillado.

Una vez que se obtienen las superficies de respuesta y las ecuaciones descriptivas, es necesario establecer los objetivos y restricciones sobre los cuales se realizará el proceso de optimización. En este trabajo, el objetivo fue minimizar las ecuaciones (5) a (7), implementando las restricciones descritas en (8):

$$\begin{aligned} 1.5 \text{ mm} &\leq w \leq 3.0 \text{ mm} \\ 10.0 \text{ mm} &\leq x \leq 25.0 \text{ mm} \\ 30^\circ &\leq y \leq 60^\circ \end{aligned} \quad (8)$$

Con los objetivos y restricciones descritas en las ecuaciones (5) a (8), el optimizador usa el método de Optimización Dirigida por Objetivos (GDO por sus siglas en inglés) para la solución del problema. En la optimización, se evalúan 1000 puntos sobre las superficies de respuesta generadas. A partir de las evaluaciones se eligen 3 candidatos, los cuales cumplen de mejor manera los

objetivos y restricciones de la optimización multiobjetivos implementada. Los candidatos óptimos para el proceso de engatillado se muestran en la Tabla 3, en conjunto con los parámetros del caso inicial.

Para el proceso de optimización implementado, la altura de la ceja se mantuvo constante en 10 mm, al considerar que dicho parámetro tendrá un efecto menos significativo que el resto. Esto debido a que, en engatillado en un plano, las trayectorias recorridas por la roldana serán lineales, por lo que no existirán variaciones en la trayectoria que puedan afectar al proceso en función de la altura de la ceja. Los resultados del proceso de engatillado,

considerando los candidatos óptimos determinados, se presentan en la Figura 4.

La Figura 4 muestra los resultados obtenidos de la simulación del proceso de engatillado utilizando los valores de radio de la roldana, radio del doblado y ángulo de pre-engatillado, generados por el proceso de optimización. El valor de enrollamiento y desenrollamiento de pestaña, obtenidos usando tanto las condiciones iniciales como los candidatos óptimos se presentan en las Figuras 4a y 4b. Por otro lado, los resultados para la arruga son mostrados en la Figura 4c.

De los resultados de la Figura 4a, se puede apreciar que el candidato 1 genera un enrollamiento negativo, el cual causa una deformación en la lámina interna, misma que experimentalmente rompería la lámina y demandaría un gran esfuerzo de los motores del robot. Por lo anterior, aun cuando los valores de desenrollamiento y arruga son aceptables, el candidato 1 es descartado en función de proteger al manipulador. El candidato 2 genera el menor enrollamiento (positivo) y la menor arruga en la chapa, comparándolo con los candidatos 1 y 3, por lo que a pesar de generar el valor más alto de desenrollamiento, fue seleccionado como el candidato óptimo.

En función del análisis de resultados se puede determinar que, utilizando una roldana de aproximadamente 10.18 mm de radio, con un ángulo de pre-engatillado de 33.90°, un radio de doblado de chapa de 1.78 mm y una altura de ceja de 10 mm, generará un engatillado óptimo, dentro del rango de valores establecidos para los parámetros de entrada. En base a los resultados numéricos ob-

tenidos, se plantea un experimento que considere los parámetros del caso inicial y óptimo, mismo que se describe en la siguiente sección.

Condiciones	Radio del doblez [mm]	Ángulo de Pre-Engatillado [°]	Radio de la Roldana [mm]
Iniciales	1.50	30.00	25.00
Candidato 1	1.50	30.01	10.01
Candidato 2	1.78	33.90	10.18
Candidato 3	1.64	37.91	10.35

Tabla 3: Parámetros óptimos para el proceso de engatillado

Aluminio 6011 con un espesor de 0.9 mm. La Figura 5b muestra los dos herramientas de engatillado utilizados en este trabajo, la roldana inicial montada en el herramental rojo a la izquierda y la roldana óptima acoplada al herramental gris de la derecha.

El sistema experimental tiene una mesa de trabajo de soporte para el engatillado, fabricada en acero estructural, la cual fue rectificadas en la parte superior (Figura 5c). Dicha mesa se utiliza como superficie de engatillado, ya que tiene las mismas dimensiones y forma que el panel exterior. Finalmente, la sujeción de la base del engatillado, así como de los paneles interior y exterior, se lleva a cabo utilizando diferentes tipos de dispositivos mecánicos como prensas, pernos, soleras, etc. Los resultados del proceso de engatillado, implementando los parámetros iniciales y los valores del candidato 2 de la Tabla 3, se presentan en las figuras 5d y 5e.

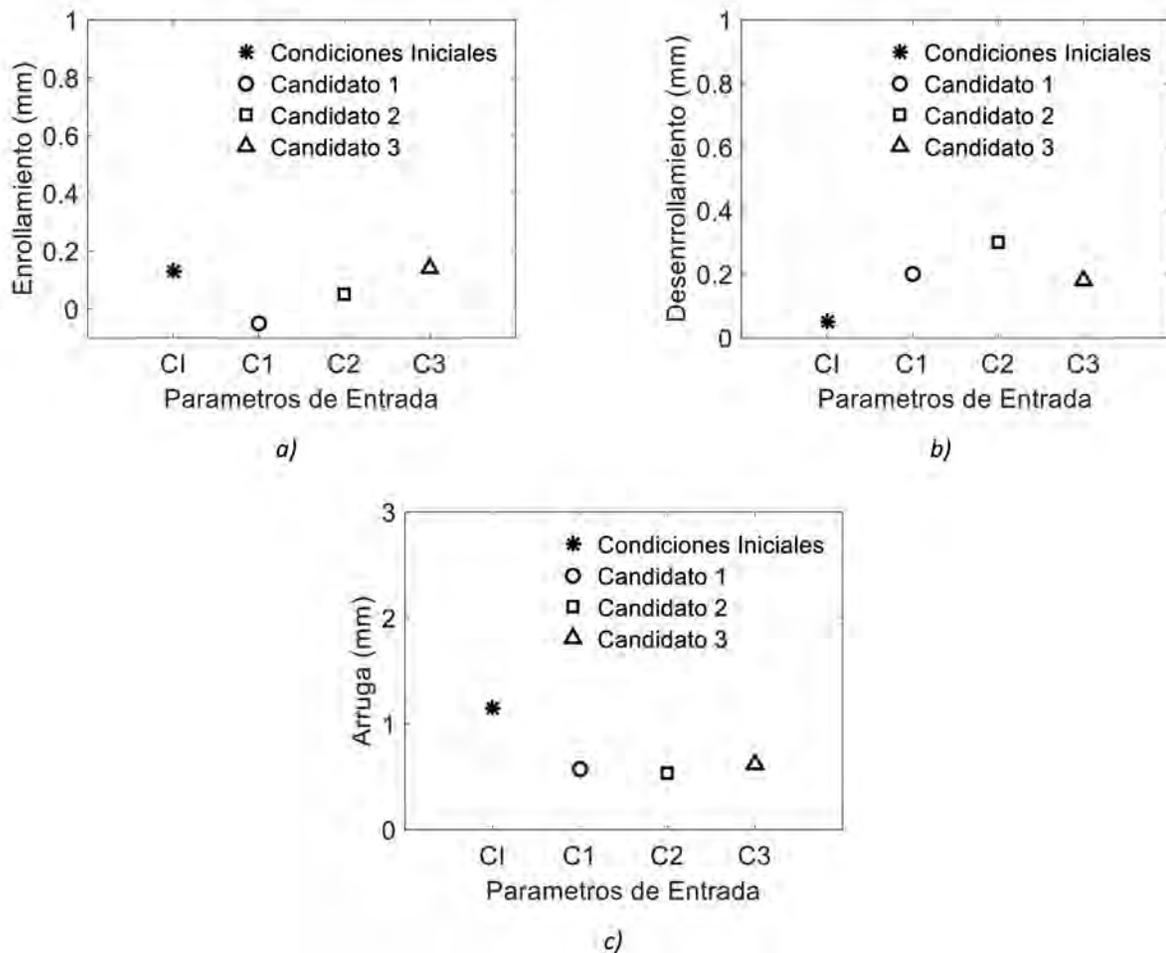


Fig. 4: Resultados de la simulación del proceso de engatillado, a) enrollamiento, b) desenrollamiento y c) arruga, implementando los parámetros de los candidatos óptimos

3.1. VALIDACIÓN CON SISTEMA MECÁNICO

Para la validación de los resultados numéricos, se llevaron a cabo pruebas experimentales de engatillado lineal. Los parámetros de engatillado, se determinaron a partir de los resultados de la simulación, tomando los valores del candidato 2 como óptimos. Posteriormente, se compararon con los resultados del engatillado con las condiciones iniciales, el cual se consideró como un caso no óptimo.

El sistema mecánico utilizado para las pruebas experimentales, consiste en un manipulador Nachi SRA210 de 6 grados de libertad y 210 Kg de capacidad de carga. El manipulador se encarga de posicionar y orientar la roldana a través de múltiples trayectorias (ver Figura 5a) con el fin de deformar plásticamente la ceja para generar el engatillado. Los paneles interior y exterior son de

El engatillado de la Figura 5d se llevó a cabo con los parámetros de entrada iniciales, mientras que para la Figura 5e se utilizaron los parámetros del candidato 2. De los resultados experimentales obtenidos, es evidente la disminución de la arruga al utilizar los parámetros óptimos obtenidos en la simulación. Finalmente, la Figura 5f muestra un comparativo entre los perfiles de engatillado simulados y las mediciones experimentales. Los valores del perfil para el caso óptimo experimental se ajustan adecuadamente al perfil de simulación óptimo, y de manera similar para los perfiles no óptimos. De estos resultados se puede apreciar una buena correspondencia entre los perfiles numéricos y experimentales; sin embargo, los perfiles para los casos no óptimos muestran una desviación considerable con respecto a los perfiles óptimos.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se describe la metodología implementada para la optimización paramétrica del proceso de engatillado por roldana. Los parámetros de evaluación propuestos fueron el diámetro de la roldana, el ángulo de entrada de la roldana para el pre-engatillado y el radio del doblado inicial con el fin de minimizar los parámetros de calidad como son el enrollamiento y desenrollamiento de la pestaña y la formación de arrugas.

El efecto de los parámetros de evaluación propuestos sobre los parámetros de calidad del engatillado fue determinado a partir de un DOE con punto central. Para dicho DOE se tomaron en cuenta 15 puntos de diseño, mismos que se evaluaron numéricamente y se ajustaron a una superficie de respuesta usando el método Kriging. A partir de la superficie de respuesta obtenida se obtuvieron las ecuaciones descriptivas, así como las restricciones consideradas para la optimización del engatillado lineal.

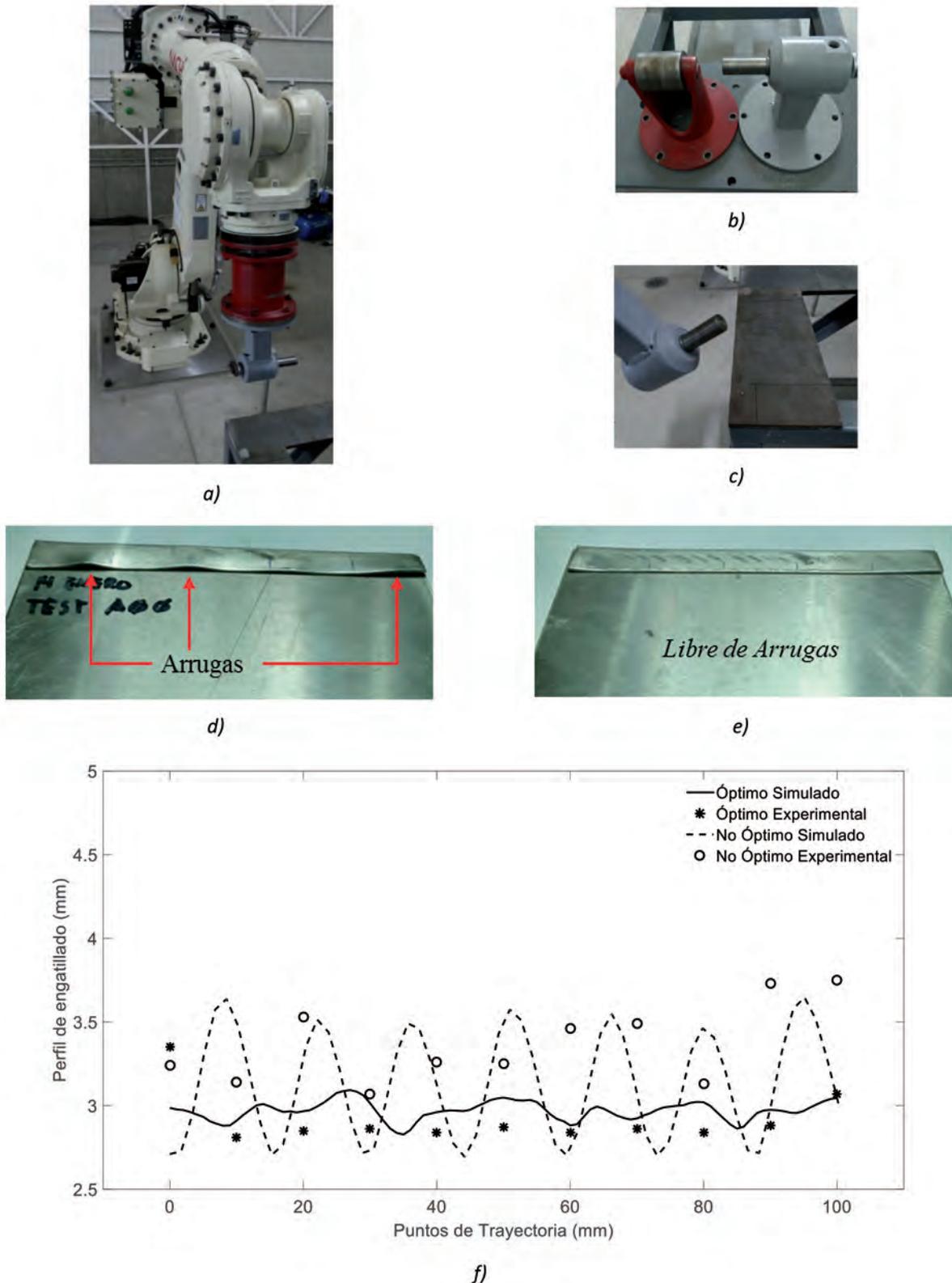


Fig. 5: Sistema y resultados experimentales, a) vista del manipulador; b) herramientas de engatillado (inicial - izquierda / óptimo - derecha); c) superficie de engatillado; engatillado experimental con trayectoria lineal d) roldana de 25.00 mm de radio (no óptimo), e) roldana de 10.18 mm de radio (óptimo); y f) perfiles de engatillado, numéricos y experimentales, obtenidos

Del proceso de optimización usando el método GDO se obtuvieron diversos candidatos óptimos, los mismos que fueron evaluados en función de los parámetros de calidad generados para determinar un caso óptimo para la etapa experimental de engatillado por roldana. En función del análisis de los resultados numéricos se determinó que el proceso de engatillado óptimo, bajo las condiciones analizadas, se puede llevar a cabo utilizando una roldana de aproximadamente 10.18 mm de radio, con un ángulo de pre-engatillado de 33.90°, un radio de doblez de chapa de 1.78 mm y una altura de ceja de 10 mm.

A partir de la optimización numérica y la caracterización del material a utilizar fue posible determinar la factibilidad del proceso de engatillado estudiado. De esta manera, se diseñó y fabricó el banco de pruebas experimental para la implementación práctica del engatillado por roldana. Con el sistema desarrollado, se llevaron a cabo múltiples experimentos para validar los resultados de las simulaciones, usando el caso de referencia (considerado no óptimo), así como los parámetros determinados en el proceso de optimización.

De los resultados experimentales se puede observar una congruencia entre los resultados experimentales del caso óptimo y la predicción de su simulación. Adicionalmente, existe una mejoría considerable, respecto al caso no óptimo, en los parámetros de calidad (enrollamiento y desenrollamiento de la pestaña y arruga) al utilizar los parámetros óptimos determinados en simulación. Finalmente, de los resultados generales obtenidos durante el desarrollo de esta investigación, es posible determinar la factibilidad del análisis numérico implementado para la optimización del proceso de engatillado por roldana, así como de otros procesos de manufactura.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Le Maoût N., Thuillier, S., & Manach, P. Y. (2009). "Aluminum alloy damage evolution for different strain paths—Application to hemming process". *Engineering Fracture Mechanics*, June 2009. Vol. 76-9. p.1202-1214. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2009.01.018>
- [2] Firat M. "Computer aided analysis and design of sheet metal forming processes: Part I—The finite element modeling concepts". *Materials & Design*, March 2006. Vol. 28-4. p.1298-1303. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2006.01.026>
- [3] Kubli W, Reissner J. "Optimization of sheet-metal forming processes using the special-purpose program AUTOFORM". *Journal of Materials Processing Technology*, March 1995. Vol. 50-1. p.292-305. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)01390-M](http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136(94)01390-M)
- [4] Wifi AS, Abdelmaguid TF, El-Ghandour AI. "A review of the optimization techniques applied to the deep drawing process". *Proceedings 37th International Conference on Computers and Industrial Engineering Alexandria, Egypt*. October 2007.
- [5] Bahloul R. "Optimisation of process parameters in flanging operation in order to minimise stresses and Lemaitre's damage". *Materials & Design*, January 2011. Vol. 32-1. p.108-120. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2010.06.028>
- [6] Gantar G, Pepelnjak T, Kuzman K. "Optimization of sheet metal forming processes by the use of numerical simulations". *Journal of Materials Processing Technology*, December 2002. Vol. 130. p.54-59. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00786-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00786-0)
- [7] Zhang G, Hao H, Wu X, et al. "An experimental investigation of curved surface-straight edge hemming". *Journal of Manufacturing Processes*, 2000. Vol. 2-4. p.241-246. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1526-6125\(00\)70025-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1526-6125(00)70025-9)
- [8] Livatyali H, Mūderrisoğlu A, Ahmetoğlu MA, et al. "Improvement of hem quality by optimizing flanging and pre-hemming operations using computer aided die design". *Journal of Materials Processing Technology*, January 2000. Vol. 98-1. p.41-52. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00304-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00304-0)
- [9] Sigvant M, Mattiasson K. "FE-simulation of Hemming in the Automotive Industry". *Doctoral dissertation, Chalmers University of Technology*, 2001.
- [10] Lin G, Iyer K, Hu SJ, et al. "A computational design-of-experiments study of hemming processes for automotive aluminium alloys". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, June 2005. Vol. 219-10. p.711-722. DOI: <http://dx.doi.org/10.1243/095440505X32661>
- [11] Burchitz I, Fritsche D, Grundmann G, et al. "Efficient planning and numerical analysis of industrial hemming processes". *Proceedings 8th International Conference and Workshop on numerical simulation of 3D sheet metal forming processes (NUMISHEET 2011)*, August 2011. p.243-250. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3623617>
- [12] Lin JG, Zhou GR, Wang JQ, et al. "FEA-Simulation of Automobile Sheet Metal Hemming Process". *Applied Mechanics and Materials*, August 2014. Vol. 602-605. p. 86-89. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.602-605.86>
- [13] Hönlle S, Liewald M. "Experimental investigation of energy savings during table-top hemming of aluminum alloys". *Key Engineering Materials*, May 2014. Vol. 611-612. p. 947-954. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.611-612.947>
- [14] Lin JG, Wang EW, Zhou GR. "Hemming Process Simulation of Table-Top Hemming Machine". *Applied Mechanics and Materials*, September 2014. Vol. 644-650. p. 2177-2180. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.644-650.2177>
- [15] Ceretti E, Attanasio A, Fiorentino A, et al. "Sheet Hemming with Rolling Tools: Analysis and Optimization of the Part Quality". *Key Engineering Materials*, July 2007. Vol. 344. p.357-364. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.344.357>
- [16] Thuillier S, Le Maoût N, Manach PY, et al. "Numerical simulation of the roll hemming process". *Journal of Materials Processing Technology*, March 2008. Vol. 198-1. p.226-233. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.07.004>
- [17] Hu X, Zhao Y, Huang S, et al. "Numerical analysis of the roller hemming process". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, September 2012. Vol. 62-5. p.543-550. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-011-3822-4>
- [18] Cacique BS, Capilla G, Aguilera NI, et al. "Metodología para el análisis del proceso de engargolado por rodillos en una probeta especializada". *Memorias del XIX Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, 2013.
- [19] Neugebauer R, Drossel WG, Rössinger M, et al. "Roller Hemming Simulation: State of the Art and Application Limits". *Key Engineering Materials*, May 2014. Vol. 611. p. 1062-1070. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.611-612.1062>
- [20] Limón PA, Pérez R, Aguilera E, et al. "Diseño de experimentos en el engargolado por rodillo de un modelo rectilíneo". *Avances de la Ingeniería Mecánica en Manufactura y Materiales*, 2014. ISBN 978-607-96746-4-9.
- [21] Hu X, Zhao Y, Huang S, et al. "Numerical analysis of the roller hemming process". *The Journal of Advanced Manufacturing Technology*, September 2012. Vol.62-5. p.543-5500 DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-011-3822-4>
- [22] Muderrisoglu A, Murata M, Ahmetoglu MA, et al. "Bending, flanging, and hemming of aluminum sheet—an experimental study". *Journal of Materials Processing Technology*, May 1996. Vol. 59-1. p.10-17. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136\(96\)02281-9](http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136(96)02281-9)
- [23] Jonkers B. *Simulation of the Robot Roller Hemming process*. Master's Thesis, Universiteit Twente. 2006.
- [24] Hallquist JQ. "LS-DYNA Keyword User's Manual. Volume I, Version 971". *Livermore Software Technology Company, Livermore, CA*. 2006.
- [25] Hallquist JQ. "LS-DYNA Keyword User's Manual. Volume II, Material Models, Version 971". *Livermore Software Technology Company, Livermore, CA*. 2006.
- [26] Manual, L.D.K.U.S. Version R7.0. *Livermore Software Technology Corporation*. Livermore, CA. 2013.
- [27] Banabic D. "Sheet metal forming processes: constitutive modelling and numerical simulation". *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2010. DOI: [10.1007/978-3-540-88113-1](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-88113-1)
- [28] Diosdado de la Peña JA, Prieto Juárez MA, Fuentes Castañeda P, et al. "Optimización del modelo de material Barlat de 3 parámetros con curvas experimentales de aleación de aluminio". *Acta Universitaria*, November 2016, Vol. 26-6. p.35-43. DOI: <http://dx.doi.org/10.15174/au.2016.1134>
- [29] Barlat F, Lian J. "Plastic behavior and stretchability of sheet metals. Part I: A yield function for orthotropic sheets under plane stress conditions". *International Journal of Plasticity*, 1989, Vol. 5. p.51-66. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0749-6419\(89\)90019-3](http://dx.doi.org/10.1016/0749-6419(89)90019-3)
- [30] Davis F, Sackey MN, Andrews A, et al. "Realistic friction coefficient model between a rolling cylindrical element and a deformable flat surface". *Tribology International*, May 2011. Vol. 109. p.252-257. DOI: [10.1016/j.triboint.2016.12.047](http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2016.12.047)
- [31] Simpson TW, Mauery TM, Korte JJ, et al. "Kriging models for global approximation in simulation-based multidisciplinary design optimization". *AIAA Journal*, December 2001. Vol. 39-12. p.2233-2241. DOI: <http://dx.doi.org/10.2514/2.1234>

Recomendaciones para el diseño y operación de instalaciones eléctricas en infraestructuras críticas



Recommendations for the design and operation of electrical installations in critical infrastructures



José-Ignacio García-Román, Fermín Barrero-González, Eva González-Romera, María-Isabel Milanés-Montero
 Universidad de Extremadura (España)

DOI: <https://doi.org/10.6036/8208> | Recibido: 11/11/2016 • Evaluado: 11/1/2016 • Aceptado: 20/01/2017

ABSTRACT

- This paper presents a good practices guide of design, execution and operation of electric energy supply installations for critical infrastructure or equipment. The objective is to diminish the risk or duration of supply interruptions, due to both internal and external causes. The paper provides an updated overview based on authors' professional experience. Suggestions are included for internal distribution system and local power supply systems. Their influence in installation reliability is also commented.
- **Key words:** Power supply continuity, reliability, critical infrastructure, local power supply, redundancy in installations.

RESUMEN

El presente artículo presenta una guía de buenas prácticas para el diseño, ejecución y operación de instalaciones que suministran energía eléctrica a infraestructuras críticas o a equipos cuyo funcionamiento sea esencial. El objetivo es disminuir el riesgo de interrupciones de suministro y/o minimizar su duración, considerando tanto el caso de causa interna como el de externa a la propia instalación. Este trabajo aporta una visión global, actualizada y basada en la experiencia práctica profesional de los autores, recogiendo recomendaciones, tanto para la instalación receptora como para los equipos de alimentación propios, y comentando cómo afectan estas medidas a la fiabilidad de la instalación.

Palabras clave: Continuidad del suministro eléctrico, fiabilidad, infraestructuras críticas, suministro complementario, redundancia de instalaciones.

1. INTRODUCCIÓN

Desde el enfoque de la seguridad de suministro se pueden diferenciar tres tipos de instalaciones. Un primer grupo es el formado por aquellas instalaciones en las que una falta de suministro eléctrico supone una pérdida económica, pero las partes afectadas no estiman necesario realizar las inversiones necesarias para paliar ese problema. Un segundo nivel de exigencia lo constituyen las instalaciones en las que sus responsables, siendo conscientes del impacto económico de un fallo eléctrico, asumen criterios de mejora del diseño y mantenimiento, tal y como ocurre entre otras en la industria de fabricación continua. Por último, se tienen las instalaciones en las que resulta imperativo mantener su correcto

funcionamiento, sin interrupciones y con elevada calidad de suministro: es el caso de las llamadas instalaciones de infraestructuras críticas, tales como hospitales, laboratorios, centros de control tráfico o grandes centros deportivos o de espectáculos.

Precisando más, se define infraestructura crítica [1] como toda instalación, sistema, red o equipo físico y de tecnología de la información sobre las que descansa el funcionamiento de servicios esenciales, y cuyo funcionamiento es indispensable y no admite soluciones alternativas. Los servicios esenciales son los considerados como necesarios para el mantenimiento de las funciones sociales básicas, la salud, la seguridad, el bienestar social y económico de los ciudadanos, o el eficaz funcionamiento de las instituciones del Estado y las Administraciones Públicas.

Los efectos devastadores que tienen lugar en el caso de colapso de este tipo de instalaciones impulsaron a gobiernos y asociaciones profesionales a establecer una serie de reglamentos, normas y directrices. En el ámbito nacional están reguladas por la Ley 8/2011 de 28 de abril [1] y por el reglamento que lo desarrolla, el RD 704/2011 de 20 de mayo [2]. En un ámbito supranacional de la UE son documentos de referencia la Directiva 2008/114 del Consejo de la Unión Europea [3] y el libro verde sobre un programa europeo para la protección de infraestructuras críticas [4].

En la legislación se establecen aquellos sectores estratégicos dotados con este tipo de instalaciones; son los indicados a continuación:

- Administración
- Agua
- Alimentación
- Energía
- Espacio
- Industria Química
- Industria Nuclear
- Instalaciones de Investigación
- Salud
- Sistema Financiero y Tributario
- Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC)
- Transporte.

Todos estos sectores presentan en común dos requerimientos fundamentales, por un lado la seguridad e integridad de la información y comunicaciones, y por otro, la continuidad del suministro de energía eléctrica. Ambos requerimientos se encuentran estrechamente relacionados, toda vez que el adecuado suministro

de energía eléctrica resulta casi siempre imprescindible para mantener el funcionamiento de los equipos encargados de la gestión de la información y las comunicaciones; y, recíprocamente, ciertos sistemas de información y comunicaciones son necesarios para el adecuado funcionamiento de los sistemas de suministro de energía eléctrica.

La seguridad de la información y las comunicaciones es un problema cada día más importante debido a su enorme influencia en el correcto funcionamiento de las infraestructuras críticas [5]. Esto ha llevado a numerosos gobiernos a crear agencias nacionales encargadas de lo que se conoce como ciberseguridad, al desarrollo de normativas y procedimientos específicos y a la confección de guías de buenas prácticas [6].

Por otro lado, en lo que concierne a la necesidad de asegurar el suministro de energía, se han desarrollado normas y procedimientos de diseño de las instalaciones, tanto para redes de transporte y distribución como para las instalaciones receptoras. En unos casos estos documentos han sido elaborados por las diversas administraciones, como es el caso de suministro a sistemas sanitarios [7], [8]. En otros casos se trata de normativa propia de empresas o generada por entidades privadas [9], [10].

Tomando como base la extensa y variada normativa existente al respecto, así como la experiencia en la práctica profesional, el presente artículo pretende concretar los requerimientos y las medidas en una serie de recomendaciones generales para el diseño, ejecución y mantenimiento de instalaciones eléctricas que suministren energía a infraestructuras o equipos esenciales, con el objetivo de disminuir el riesgo de interrupciones de suministro y minimizar su duración. Para ello, el documento se estructura abordando en primer lugar las indicaciones para la instalación receptora, formada por la acometida, el centro de transformación, los cuadros de alimentación y las líneas generales de alimentación; después, se trata lo referente a los equipos de alimentación propios.

2. RECOMENDACIONES PARA LA INSTALACIÓN RECEPTORA

En este apartado se tratan las recomendaciones relacionadas con la instalación eléctrica y su relación con la red de suministro exterior. No se abordan los aspectos de seguridad ante catástrofes naturales, que se habrán considerado en el proyecto de construcción del edificio.

2.1. ACOMETIDA

La acometida es el tramo de la red, responsabilidad de la empresa distribuidora, que conecta la red de esta con la instalación receptora. La primera medida considerada en muchas normas y procedimientos para aumentar la disponibilidad de suministro es dotar a la instalación de doble acometida (ITC-BT 28 del RBT [8]) Generalmente no es difícil disponer de esa posibilidad en entornos urbanos con redes en anillo. En cualquier caso, es necesario concretar las características que debe cumplir esa doble acometida para que cumpla su función de manera efectiva. Para ello se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Que la doble acometida no discorra por lugares comunes pues, en ese caso, existe la posibilidad de que la ocurrencia de un incidente en ese tramo, afecte al propio suministro.
- Hay que considerar si el trazado de las acometidas es aéreo o es subterráneo, dado que, según el caso, presentarán distinto índice de averías y distintos tiempos de reparación.
- Estudiar los tipos de protecciones utilizadas en las líneas de

alimentación, así como la posible instalación de sistemas de telecontrol que permitan disminuir los tiempos de reposición del servicio.

- Disponer canalización de reserva para reposiciones del servicio o ampliaciones sin afectar al suministro.
- Conocer y tratar de evitar que las acometidas crucen o discurren paralelas a otros servicios. Esta medida es importante, ya que es sabido que un porcentaje significativo de averías en la red de alimentación tienen su origen en los trabajos realizados en otras redes. Para facilitar esta tarea, existen empresas proveedoras de información que proporcionan los planos de redes de distintas empresas de servicios que operan en determinada zona; la empresa Inkolan [11] es una de ellas. El conocimiento de esta información es obligatorio en la fase de diseño y ejecución de la acometida.
- Recabar información sobre la subestación o subestaciones de procedencia de cada una de las acometidas, en lo referente a la existencia de transformadores de repuesto y al esquema de conexión de la apartada (simple o doble barra, embarrado en anillo, etc.), factores con una gran incidencia en la fiabilidad de la propia subestación y, por tanto, también en la instalación alimentada.
- La doble acometida debe seguir un trazado en el interior de la instalación completamente independiente, de manera que pueda actuarse sobre ella o sus elementos de mando y protección sin afectar a otras partes de la instalación.
- Por supuesto, hay que solicitar a la compañía encargada del suministro eléctrico que informe previamente sobre las actuaciones de mantenimiento o ampliación de su red que pudieran afectar al suministro, con el objeto de evitar la coexistencia temporal de esas actuaciones con operaciones de mantenimiento en la instalación receptora, o que impliquen la necesidad de tomar precauciones adicionales.

2.2. SUBESTACIÓN TRANSFORMADORA O CENTRO DE TRANSFORMACIÓN

La mayoría de las instalaciones receptoras correspondientes a infraestructuras críticas demandan una potencia tal que su suministro ha de ser en alta tensión. Ello obliga a disponer de una o más instalaciones transformadoras, centros de transformación en la mayoría de los casos, con uno o varios niveles de tensión. Para esta parte de la instalación han de tenerse presente las siguientes consideraciones.

- Desde el punto de vista de la ubicación, es necesario que los elementos eléctricos esenciales, y en particular los centros de transformación, se ubiquen fuera de zonas inundables o, en su defecto, dotar a la instalación de medios de drenaje adecuados, tales como bombas de achique y desagüe redundantes, dotados de su correspondiente sistema de transferencia de alarmas.
- En el caso concreto de centros de transformación modulares con celdas prefabricadas, éstas deben estar dispuestas de manera que cualquier actuación sobre el cableado o apartada correspondiente a una acometida no afecte al servicio de la otra acometida.
- La mejor opción desde el punto de vista de continuidad de suministro es la instalación de transformadores independientes con interruptor de transferencia entre barras en el secundario y capacitados cada uno de ellos para alimentar al total de la carga.
- Es preferible la instalación de transformadores en activo-reserva en lugar de transformadores en paralelo. En efecto,

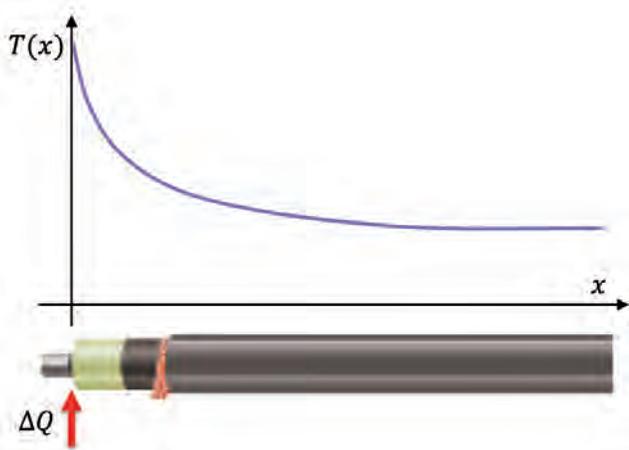


Fig. 1: Perfil de transmisión de temperatura en un conductor

con un solo transformador conectado, la potencia de cortocircuito en barras del secundario es menor que en el caso de dos transformadores en paralelo, lo que se traduce en menor exigencia a la aparamenta y, por tanto, en mayor fiabilidad. En este caso es conveniente que periódicamente se alternen en servicio ambos transformadores a fin de igualar sus horas de funcionamiento.

- El estado de carga de los transformadores deberá evaluarse sin corrección del factor de potencia, desconectadas las baterías de condensadores; para así considerar el caso desfavorable de avería y desconexión de dichas baterías, que podría conllevar sobrecarga del transformador. Además, éstas deberán ir dotadas de sistemas de detección y transmisión de alarmas por mal funcionamiento y desconexión. Esto es particularmente recomendable en aquellas instalaciones que presentan un nivel de carga elevado y sobre todo en el caso de transformadores de potencia con dieléctrico seco.

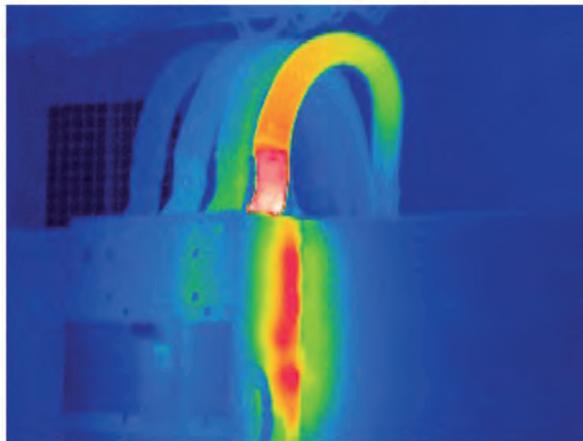
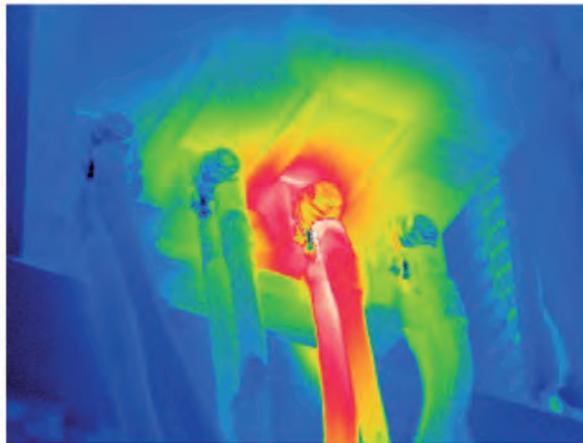
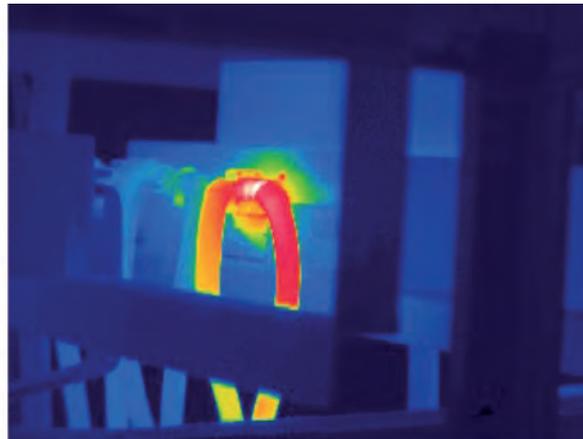


Fig. 2: Detalles de conexión de cables (izquierda) e imágenes termográficas (derecha)

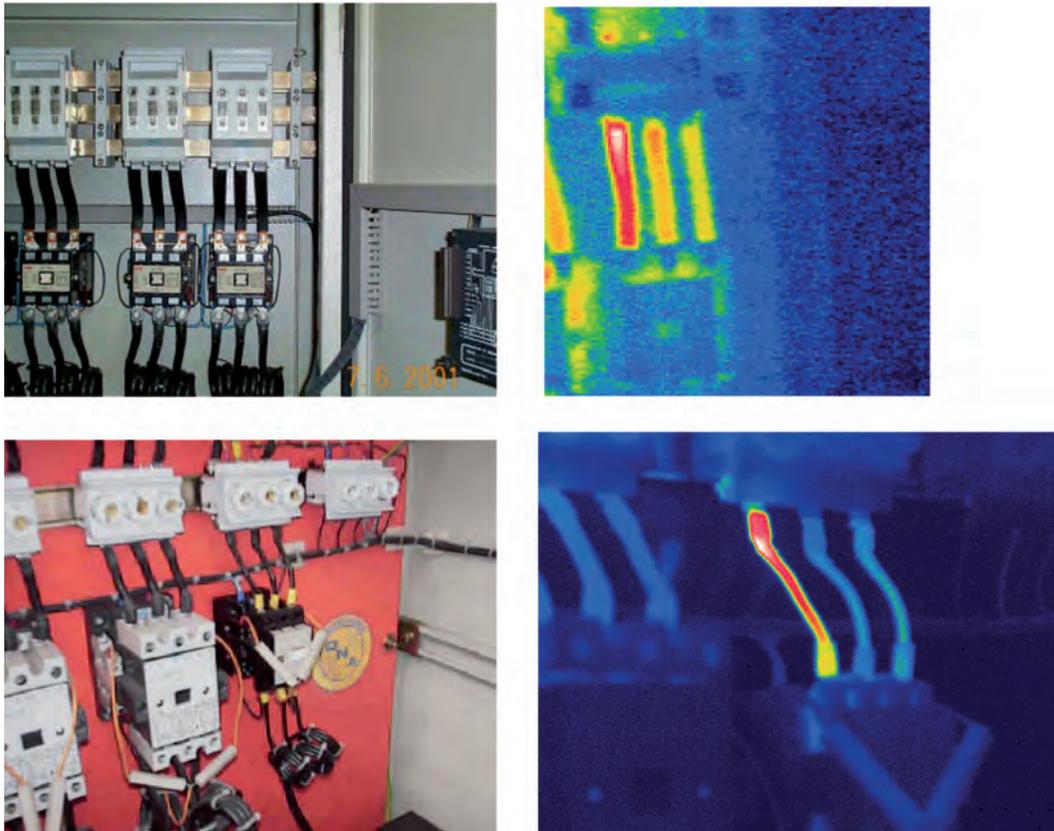


Fig. 3: Detalle de barras de pequeña longitud (izquierda) e imagen termográfica (derecha)

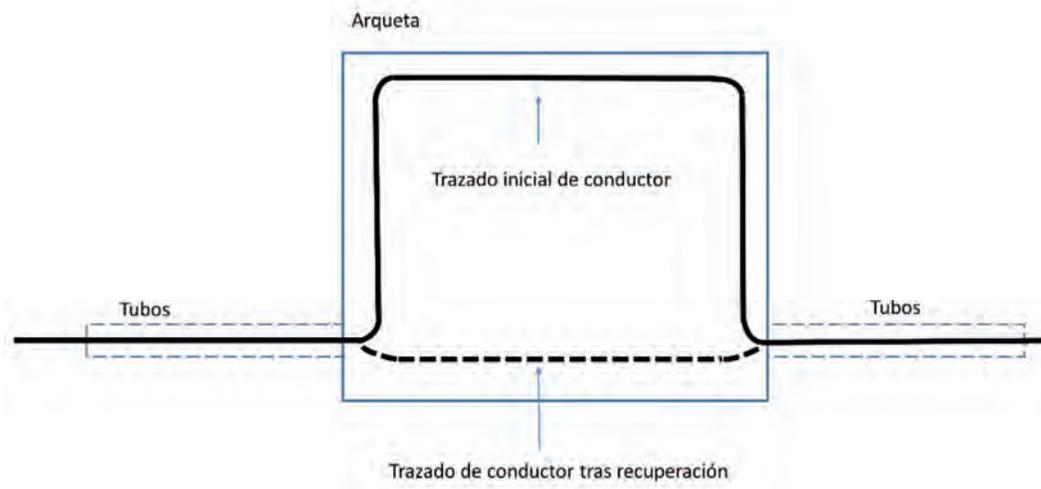


Fig. 4: Trazado del conductor por la arqueta

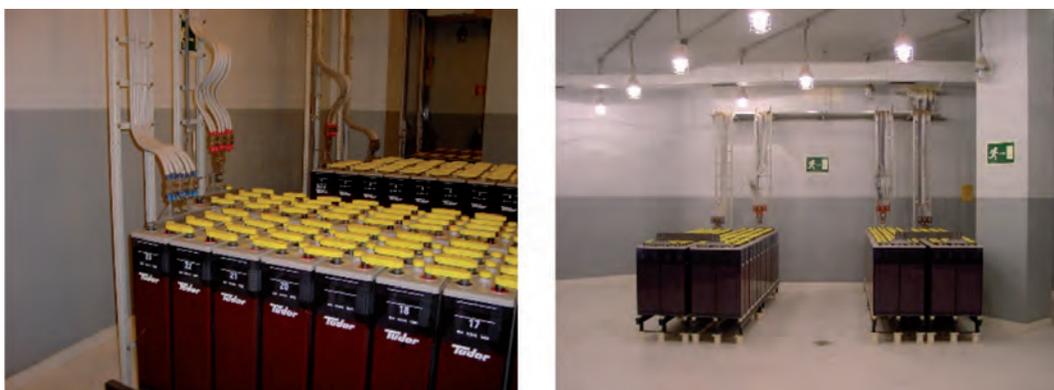


Fig. 5: Forma de S en conductores adosados a paredes

2.3. CUADRO GENERAL DE ALIMENTACIÓN Y SECUNDARIOS PRINCIPALES

La mayor parte de los problemas existentes en los cuadros de mando y protección tienen su origen en problemas de calentamiento. Si el calentamiento es generalizado, la causa más probable es la insuficiente ventilación, por un déficit de la misma o por obstrucción de filtros. Es recomendable realizar un dimensionamiento térmico del cuadro, considerando la ventilación necesaria para ello y una selección adecuada de la aparata. Además, es importante dotar a estos cuadros de sensores con transmisión de alarmas de alta temperatura y de desconexión o avería de los elementos de ventilación. Además, si las salas donde se ubica el cuadro general de alimentación o cuadros secundarios esenciales se encuentren refrigeradas, es conveniente que el control de temperatura en la sala contemple la instalación de un sistema ventilación adicional en caso de fallo del sistema de refrigeración.

Por otro lado, los problemas de calentamientos locales se producen, principalmente, en los puntos de conexión entre cables y aparata. Obviamente, si la fuerza de apriete no es suficiente, la consecuente holgura provocará ese calentamiento local. Ahora bien, también se dan situaciones en las que el calentamiento local es debido a la reducción de la sección conductora del cable en el punto de conexión. La observación y análisis de diversos casos en los que se dio esta situación permiten deducir como causa de la misma una inadecuada ejecución de la instalación. En efecto, cuando el instalador, para realizar una conexión,



Fig. 6: Longitud sobrante de cable en el interior de un cuadro eléctrico

procede a retirar el aislamiento del cable, mediante la herramienta de pelado, puede excederse en el uso de la misma, retirando no solo el aislante sino también parte del material conductor. Como consecuencia, la sección del cable en la conexión queda reducida, lo que dará lugar a un incremento de la resistencia y, por tanto, a un incremento de pérdidas por efecto Joule en esa zona, provocando el calentamiento local.

Incorporando el efecto de calentamiento local, la temperatura $T(x)$ a lo largo de un cable, partiendo del punto de conexión (Figura 1), considerando hipótesis conservadoras, puede expresarse como

$$T(x) = T_a + R_\theta I^2 \frac{\rho}{S} + \frac{(\frac{\Delta Q}{\Delta t})_{x=0}}{KS\sqrt{1/R_\theta KS}} e^{-\sqrt{1/R_\theta KS} x} \quad (1)$$

donde T_a es la temperatura del ambiente que rodea al conductor; R_θ es la resistencia térmica total del conjunto cable más aire; ρ es la resistividad del conductor, Cu o Al; K es la conductividad térmica del conductor; I es el valor eficaz de la intensidad que circula y S es la sección del conductor.

Se puede observar que la expresión de la temperatura a lo largo del conductor está compuesta por tres términos.

1. El primer término expresa la temperatura que alcanza el conductor por estar inmerso en un ambiente con una temperatura T_a .
2. El segundo término expresa la temperatura que alcanzaría el conductor por estar recorrido a su vez por una intensidad I .
3. El tercer término expresa la temperatura que se irá alcanzando a lo largo del mismo por existir una aportación de calor adicional ΔQ en el punto de conexión.

El incremento de temperatura en las inmediaciones de la conexión puede resultar perjudicial debido a que la relación entre el envejecimiento del aislamiento del conductor y la temperatura de operación sigue una ley exponencial, con lo cual hay un tramo de conductor que envejece de forma más acelerada que el resto, pudiendo producirse una degradación del aislamiento que dé lugar finalmente a una derivación o a un cortocircuito. La Figura 2 muestra tres casos de conexionado de cables acompañados de las correspondientes imágenes termográficas, en las que se puede apreciar los puntos de calentamiento local.

Para prevenir los efectos perjudiciales, las partes dañadas de los cables deben ser sustituidas. En el caso de cables de poca longitud se puede reemplazar el cable completo por otro nuevo; sin embargo, para el caso de tramos de cierta longitud, esta solución no es adecuada, por motivos tanto económicos como de parada de la instalación. Esto puede evitarse si se tiene en cuenta la siguiente

recomendación: instalar los tramos de cable dentro del cuadro dejando intencionadamente una longitud superior a la necesaria; de este modo, en caso de que sea necesario, se puede proceder a su saneamiento, eliminando la parte dañada y realizando una nueva conexión.

El fenómeno descrito se hace más acusado en el caso de conductores puentes o barras de corta longitud, ya que el calentamiento local en una de las conexiones afecta a la otra y viceversa; el solape de las dos exponenciales eleva la temperatura de todo el cable. La Figura 3 muestra un caso práctico en el que se da esta situación.

2.4. LÍNEAS GENERALES DE ALIMENTACIÓN

Tal y como se ha indicado para los cuadros es conveniente que las líneas de alimentación a equipos esenciales, así como los cables de entrada a cuadros principales y salida a cuadros secundarios, estén dotadas de 'cierta holgura' o longitud adicional que permita subsanar de forma rápida daños por calentamientos localizados sin necesidad de cambios de conductores ni nuevos empalmes. En el caso de las líneas generales de alimentación se pueden adoptar diversas soluciones, según el tipo de instalación, entre las que se encuentran las siguientes:

- Si el trazado de los cables es canalizado, establecer en todas las arquetas una forma de cable como se indica en la Figura 4 que permita recuperar una cierta longitud para su saneamiento. Esta forma será factible siempre y cuando se cumpla que el radio de curvatura (doblado) sea superior al mínimo exigido en función del tamaño de la arqueta y del tipo de cable.
- En el caso de redes de corriente continua (en régimen permanente el efecto inductivo puede considerarse nulo) se puede permitir el almacenamiento de cables en una vuelta en arquetas pero no en el caso de corriente alterna pues no es conveniente la formación de espiras para evitar problemas de tensiones inducidas.
- En el caso de galerías con cables en suspensión adosados a las paredes, una forma adecuada para tener la longitud sobrante requerida, tal como se observa en la Figura 5, es instalar los cables dándoles una forma curvada en S, tanto en principio como en fin de trazado.
- En la mayoría de los casos, la longitud de cable sobrante puede acumularse en el cuadro general, siempre que su tamaño sea adecuado para ello, tal como se ve en la parte inferior del cuadro de la Figura 6.

Todas las formas y curvaturas del conductor deberán ser tales que respeten los radios de curvatura admisibles para ellos.

3. RECOMENDACIONES PARA LOS EQUIPOS DE ALIMENTACIÓN PROPIOS

En este apartado se tratan algunas recomendaciones relacionadas con la instalación de los equipos de alimentación alternativos, de los que debe disponer la instalación crítica para hacer frente a un fallo de alimentación de la red eléctrica de suministro exterior.

3.1. GRUPOS ELECTRÓGENOS

Es necesario dotar a la instalación de tomas para la conexión de grupos móviles tanto en el cuadro general de alimentación como en cuadros secundarios esenciales, como solución a eventuales averías del grupo general o de la red de alimentación a los cuadros secundarios. Estas tomas deben permitir la conexión y

desconexión de forma segura y simple, debiendo tener identificada la secuencia de fase para facilitar el proceso de conexión.

En el caso de que la instalación tenga como elemento de respaldo un grupo electrógeno fijo con refrigeración por torre, es preciso que la autonomía mínima necesaria del sistema de alimentación ininterrumpida o de los bancos de baterías que se utilicen sea siempre superior al tiempo necesario de parada del grupo por las limpiezas periódicas establecidas para el control y prevención de la legionelosis [12]. Si hubiera espacio es preferible que la refrigeración del grupo en lugar de torre utilice aeroventiladores.

3.2. SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN ININTERRUMPIDA Y BATERÍAS

Los Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (SAI) permiten la alimentación de las cargas críticas cuando falla el suministro exterior, a costa de la energía almacenada en baterías, con tiempos de transferencia muy cortos o nulos en el caso de los SAI denominados de tipo *online*. Se indican a continuación recomendaciones de carácter general.

- Los SAIs deben tener concepción modular en sus etapas inversora y rectificadora y deben estar diseñados para admitir su funcionamiento en caso de fallo de uno de los módulos. Además, en instalaciones críticas tales como las de centrales nucleares se exige el funcionamiento con un margen de seguridad adicional de al menos un 10% para cualquier régimen de funcionamiento [13-14].
- Dado que es muy probable que las cargas alimentadas sean monofásicas, aunque se haya hecho un reparto de las mismas entre las fases para que resulte un total de carga lo más equilibrada posible, es recomendable comprobar el funcionamiento adecuado del SAI para los dos casos siguientes:
 1. Una fase descargada y las otras dos con una corriente igual al 100% de la nominal.
 2. Dos fases descargadas y la restante al 100%.
- En lo que se refiere a las baterías, deben estar constituidas por 2 bancos paralelo para permitir el cambio de elementos sin riesgo de interrupción de servicio, aunque se tendrá una disminución del tiempo de autonomía. Dicha autonomía debe ser siempre superior a la duración de los trabajos de mantenimiento o reparación previstos, considerando la carga mínima necesaria para no afectar la vida media prevista [15].
- La ubicación de las canalizaciones o bandejas de cables en las salas de baterías deben ser tal que no transcurran por la vertical de los bancos y estos deben estar dispuestos de manera que la sustitución de elementos sea factible y simple, sin interrumpir el servicio ni incurrir en riesgo de averías.
- En la sala en la que se ubiquen tanto el SAI como las baterías, no debe discurrir ninguna tubería o conducción de agua cuya fuga pueda ocasionar afectación del servicio; o bien, si no puede evitarse la presencia de la tubería, se dispondrá de una bandeja por debajo de ella que sirva para guiar las posibles fugas, dotada de sensor de humedad.
- En el caso de instalaciones muy críticas será necesario aplicar criterios de redundancias, separación física e independencia entre los SAI y las baterías, tal como se exige para las instalaciones nucleares [16].

4. CONCLUSIONES

En el presente artículo se han reflejado diversas recomendaciones para reducir el riesgo de interrupciones de suministro eléctrico

a infraestructuras críticas y su duración, en caso de producirse, así como para facilitar la reposición del servicio. Estas recomendaciones son independientes del cumplimiento de la normativa aplicable a la instalación, aunque compatibles con ella. A modo de resumen, cabe citar la redundancia de fuentes de alimentación o de partes importantes de la instalación, la dotación de longitud de conductor adicional para reparaciones o la adopción de medidas adicionales para evitar sobrecalentamientos. En todas las decisiones relativas al diseño de una instalación eléctrica de suministro a infraestructuras críticas es crucial la anticipación a los posibles fallos y la fiabilidad de las soluciones posibles. Las recomendaciones aquí recogidas surgen de la experiencia acumulada de los autores en instalaciones diversas y a consecuencia de incidencias tales como inundaciones o incendios.

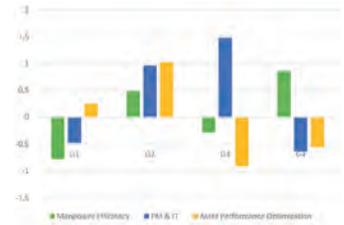
BIBLIOGRAFÍA

- [1] España. Ley 8/2011, de 28 de abril, por la que se establecen medidas para la protección de las infraestructuras críticas. Boletín Oficial del Estado, 29 de abril de 2011, núm. 102, p. 43370.
- [2] España. Real Decreto 704/2011, de 20 de mayo, por el que se aprueba el Reglamento de protección de las infraestructuras críticas. Boletín Oficial del Estado, 21 de mayo de 2011, núm. 121, p. 50808.
- [3] Unión Europea. Directiva 2008/114/CE del Consejo de 8 de diciembre de 2008 sobre la identificación y designación de infraestructuras críticas europeas y la evaluación de la necesidad de mejorar su protección. Diario Oficial de la Unión Europea, 23 de diciembre de 2008, núm. 345, p. 75.
- [4] Comisión Europea. Libro verde sobre un programa europeo para la protección de infraestructuras críticas. Bruselas: COM(2005) 576 final. [consulta Enero 2017]. Disponible en Web: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52005DC0576&from=ES>.
- [5] Abdur Rahman HM. "Modelling and Simulation of Interdependencies between the Communication and Information Technology Infrastructure and other Critical Infrastructures". Tesis Doctoral. University of British Columbia Library, Vancouver, 2009. (DOI: <http://dx.doi.org/10.14288/1.0067769>).
- [6] Comisión Europea. Libro verde sobre un programa europeo para la protección de infraestructuras críticas. Bruselas: COM(2005) 576 final. [consulta Enero 2017]. Disponible en Web: <http://www.osce.org/atu/103500?download=true>.
- [7] Department of Health/Estates and Facilities Division. Health Technical Memorandum 06-01, Part A: 'Electrical services supply and distribution'. TSO United Kingdom. 2007.
- [8] España. Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión. Boletín Oficial del Estado, núm. 224, 18 de septiembre de 2002, p. 33084.
- [9] American Society of Civil Engineers. Guiding principles for the nation's critical infrastructure prepared by the ASCE Critical Infrastructure Guidance Task Committee. Reston, Virginia, USA, 2009. [consulta Enero 2017]. Disponible en Web: http://www.asce.org/uploadedFiles/Issues_and_Advocacy/Our_Initiatives/Infrastructure/Content_Piezas/critical-infrastructure-guiding-principles-report.pdf.
- [10] American National Standards Institute. Telecommunications infrastructure standard for data centers. TIA-942. Revision A. 2014.
- [11] Inkolan. <http://www.inkolan.com>.
- [12] España. Real Decreto 865/2003, de 4 de julio, por el que se establecen los criterios higiénico-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis. Boletín Oficial del Estado, núm. 171, 18 de julio de 2003, p. 28055.
- [13] German Nuclear Safety Standards Commission. Emergency Power Facilities with Static or Rotating AC/DC Converters in Nuclear Power Plants. KTA 3704:2013.
- [14] German Nuclear Safety Standards Commission. Emergency Power Facilities with Batteries and AC/DC Converters in Nuclear Power Plants. KTA 3704:2013.
- [15] Electric Power Research Institute. Stationary Battery Guide: Design, Application, and Maintenance: Revision of TR-100248. EPRI, California., 2002. [consulta Enero 2017]. Disponible en Web: <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=00000000001006757>.
- [16] International Electrotechnical Commission. Nuclear Power Plants – Instrumentation and control systems important to safety- Requirements for electrical supplies. IEC 61225: 2005.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Junta de Extremadura y fondos FEDER mediante la ayuda GR15177.

Análisis de los factores clave para mejorar la gestión del mantenimiento en la industria de oil&gas en América Latina



Analysis of key factors to improve maintenance management in the oil & gas industry in Latin America



Luis Amendola¹, Miguel-Ángel Artacho¹ y Tibaïre Depool²

¹ Universidad Politécnica de València. Camino de Vera, s/n - 46022 Valencia (España)

² PMM Institute for Learning. Calle Hermanos Machado, 13 - 46019 Valencia (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8178> | Recibido: 13/10/2016 • Evaluado: 17/10/2016 • Aceptado: 06/02/2017

ABSTRACT

- This article analyses the application of maintenance management (MM) in the oil and gas industry in Latin America. We conducted a web-based expert panel to develop a set of consensus activities that managers consider when managing maintenance projects. A heterogeneous group of 96 professionals related to maintenance tasks was selected to represent all the relevant perspectives (top management; maintenance; production; quality; logistics; and finance). Some 396 maintenance practitioners took part in a second online survey aimed at establishing the key MM factors that summarised the correlations among the previously defined maintenance activities. Moreover, an equation to discover the influence that these factors have in MM improvement was obtained. Finally, maintenance practitioners were classified into groups with similar MM styles according to previously defined MM factors. Results showed that three latent factors encompassed all MM activities: manpower efficiency; project management and IT; and asset performance optimization. Project management and IT was the most influential factor in MM improvement. Four groups were identified as representing different MM styles. The MM framework outlined in an inductive manner enables maintenance practitioners in the oil and gas industry to find out their strengths and weaknesses and plan their maintenance strategy accordingly. Moreover, the outlined procedure can be generalized for use in any industry.
- Keywords:** maintenance management; manpower; project management & IT; asset performance optimization.

RESUMEN

En este artículo se analiza la gestión de mantenimiento (GM) en la industria del petróleo y gas en América Latina. Se realizó un panel de expertos online para obtener de forma consensuada el conjunto de actividades que se consideran en la gestión de proyectos de mantenimiento. Para ello se seleccionó un grupo heterogéneo de 96 profesionales relacionados con las tareas de mantenimiento para tener representados todos los puntos de vista relevantes (alta dirección, mantenimiento, producción, calidad, logística y finanzas). Después, 396 profesionales involucrados en el mantenimiento participaron en una segunda encuesta online destinada a establecer desde el punto de vista de la industria los factores clave de la GM que resumen las correlaciones entre las actividades de mantenimiento previamente definidas. Por otra parte, se propone una ecuación para descubrir la influencia de

estos factores en la mejora real de la GM. Por último, los profesionales de mantenimiento se clasificaron en grupos con estilos de GM similares según los factores previamente definidos. Los resultados mostraron que existen tres factores latentes que abarcan todas las actividades de la GM: eficiencia de la mano de obra; gestión de proyectos y TI y la optimización del rendimiento de los activos. La gestión de proyectos es el factor que más influye en la mejora real de la GM. Finalmente, se identificaron cuatro grupos como representantes de los diferentes estilos de la GM. El marco esbozado y la ecuación aportada de manera inductiva permiten a los profesionales del mantenimiento en la industria del petróleo y el gas conocer sus fortalezas y debilidades y planificar su estrategia de mantenimiento en consecuencia. Por otra parte, el procedimiento descrito se puede generalizar para su uso en cualquier otra industria.

Palabras Clave: Gestión del Mantenimiento, Mano de Obra, Gestión de Proyectos y TI, Gestión de Activos.

1. INTRODUCCIÓN

El mantenimiento se ve generalmente en las organizaciones como un coste necesario que debe ser minimizado. Los costes de mantenimiento pueden representar hasta un 40% del presupuesto total del departamento de operaciones [1]. Por lo tanto, el mantenimiento ha sido considerado tradicionalmente como un coste más o un mal necesario que normalmente se relega a un nivel secundario y rara vez se considera como una competencia empresarial básica [2, 3]. Sin embargo, a medida que se desarrollaba la actual crisis económica, las empresas se enfocaron más que nunca en mantener la competitividad cuidando sus costes, calidad de servicio y puntualidad en las entregas. Así, en un entorno empresarial cada vez más competitivo, el mantenimiento desempeña un papel importante ya que puede proporcionar ventajas estratégicas en el mercado de múltiples formas, como el aumento de la capacidad productiva, la reducción de costes y la eliminación de desperdicios [4]. Además, la creciente adopción de los procesos JIT, TQM, fabricación flexible, fabricación ágil y flexible junto con el crecimiento de la mecanización y la automatización hacen que la fiabilidad y la disponibilidad sean factores clave a la hora de garantizar una producción ininterrumpida. Este hecho se ha convertido en una cuestión importante cuando la crisis mundial ha obligado a las empresas a reducir al máximo sus costes. En este nuevo escenario, es crucial que el mantenimiento se convierta en una actividad a considerar de cara a controlar la cuenta de resultados,

el coste, la entrega flexible y la satisfacción del cliente, convirtiéndose así en una actividad proactiva centrada en el incremento de beneficios que debe integrarse dentro de la estrategia corporativa. Por lo tanto, la implementación de modelos eficientes de gestión del mantenimiento (GM) es crucial para que las organizaciones aseguren la entrega puntual de bienes y servicios de acuerdo con requisitos relacionados con la seguridad del personal, la sociedad y el medio ambiente.

Sin embargo, es difícil encontrar la manera correcta de concebir y desarrollar modelos de GM. A pesar de la existencia de una considerable cantidad de trabajos teóricos y marcos generales [2] [5-9], el mantenimiento es una disciplina compleja que entraña muchas dificultades. Muchos autores han encontrado una falta de modelos de GM eficaces con una metodología operativa de aplicación generalizada [9, 10]. Como las aplicaciones teóricas con enfoques deductivos son difíciles de implementar, parece necesario abordar la mejora de la GM con un enfoque inductivo. Este artículo aborda la mejora de la GM como parte de un proceso concebido de "abajo hacia arriba", y cuenta con la participación de profesionales del mantenimiento que se enfrentan a las dificultades que la aplicación de la GM impone diariamente en sus puestos de trabajo (yendo desde la falta de apoyo de la alta dirección a la falta de tiempo para registrar, analizar y gestionar toda la información de cara a controlar sus plantas y procesos). En este trabajo se analizan las aplicaciones de la GM en la industria de *oil&gas* en Latinoamérica desde el punto de vista de profesionales relacionados con las tareas de mantenimiento (alta gerencia, mantenimiento, producción, calidad, logística y finanzas).

El objetivo de este estudio es explorar la brecha significativa que todavía existe en la GM entre la teoría y su aplicación práctica [11]. En este sentido, los objetivos principales del estudio son conocer el punto de vista del personal de mantenimiento (planificadores, supervisores y operadores), establecer las actividades subyacentes de la GM consideradas en la práctica, correlacionar estas actividades y reducirlas a un pequeño número de factores que definan la GM. La hipótesis inicial es que los factores clave de la GM resultantes definirán un marco de GM que diferirá de los marcos previos diseñados usando enfoques deductivos. Además, este trabajo intenta estimar la mejora de la GM como un reflejo del nivel de desempeño alcanzado en los factores clave de la GM, así como clasificar a los profesionales de mantenimiento en grupos de acuerdo a su desempeño alcanzado en los mencionados factores. La idea detrás de esto es que el rendimiento alcanzado en los factores clave de la GM entre los profesionales permitirá clasificarlos en diferentes grupos con patrones de gestión comunes y diferentes a los de los otros grupos. Estos patrones de GM podrían describir diferentes estilos de gestión, ofrecer un "panorama general" de la realidad organizacional del mantenimiento en esta industria y permitir a expertos y académicos establecer las principales líneas de mejora que deberían afrontarse en futuros proyectos.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El trabajo se realizó en tres fases:

1. Identificación de los factores clave para evaluar la GM en la práctica.
2. Evaluación de la relevancia de los factores clave identificados en la mejora de la GM.
3. Clasificación de los profesionales de mantenimiento en grupos de acuerdo con su nivel de desempeño actual en los factores clave de la GM.

2.1. IDENTIFICACIÓN DE LOS FACTORES CLAVE PARA EVALUAR LA GM EN LA PRÁCTICA

Se realizó un panel de expertos de ámbito internacional a través de Internet para conocer y consensuar el conjunto de actividades que los profesionales vinculados a la GM consideran normalmente para gestionar sus proyectos de mantenimiento industrial. Se seleccionó un grupo heterogéneo de profesionales que realizaran tareas vinculadas al mantenimiento representando seis áreas funcionales distintas: alta dirección, mantenimiento, producción, calidad, logística y finanzas.

El panel fue seleccionado de manera que se pudiera recoger la opinión de los panelistas asegurando una participación equilibrada entre países. Un total de 96 personas (10 de alta gerencia, 34 de mantenimiento, 17 de producción, 12 de calidad, 11 de logística y 12 de finanzas) acordaron participar provenientes de Venezuela (8%), México (16%), Colombia (19%), Ecuador (15%), Brasil (16%), Perú (17%) y Bolivia (10%).

El panel se desarrolló de forma iterativa administrando dos rondas de opinión realizadas entre noviembre de 2014 y enero de 2015. En la primera ronda, se pidió a los panelistas que proporcionaran el conjunto de actividades que realizan o consideran importantes al gestionar tareas de mantenimiento. Se envió un correo electrónico personalizado a cada miembro del panel con un enlace URL a la encuesta. La segunda ronda se dedicó a la clasificación en grupos de las actividades que surgieron en la primera ronda según las similitudes que compartían. Los participantes debatieron la clasificación y luego seleccionaron por consenso las actividades más adecuadas para medir la GM. Los ítems resultantes fueron las actividades clave resultantes del panel realizado en dos rondas en el que cada una de ellas estuvo abierta durante tres semanas.

Una vez que se identificaron las actividades clave, se diseñó una encuesta *online* para establecer el nivel de desempeño alcanzado en cada una de ellas por los planificadores de mantenimiento, los supervisores y los operadores. Unas 36 plantas industriales pertenecientes a 11 grandes corporaciones aceptaron participar en el estudio. Específicamente, sólo se analizaron las divisiones dedicadas a la producción de petróleo, refinación y gas-GNL. La mayoría de las empresas operan tanto en producción como en refinación y gas, como se muestra en la Fig. 1. Unos 396 profesionales involucrados en tareas de mantenimiento (19% planificadores, 29% supervisores y 52% operadores) de plantas de petróleo y gas ubicadas en Venezuela (17%), México (18%), Colombia (16%), Brasil (15%), Perú (13%) y Bolivia (9%) participaron en el estudio. Todos los participantes tenían un mínimo de cinco años de experiencia y fueron seleccionados al azar a partir de las bases de datos de las empresas que participaron en el estudio entre marzo y septiembre de 2015.

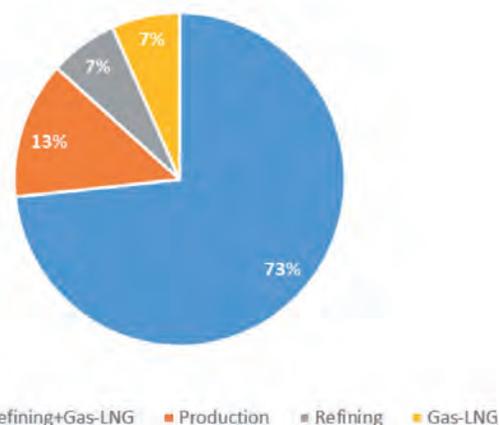


Figura 1: Distribución de las empresas dedicadas a la producción de petróleo, refinación y gas-GNL

Los profesionales completaron un cuestionario en línea indicando su nivel de desempeño en cada una de las actividades de mantenimiento detectadas en el panel previo, como por ejemplo "Determinar el tamaño correcto y la composición del equipo de mantenimiento", usando una escala de Likert de cinco niveles, desde Excepcional hasta inaceptable (5 = excepcional, 4 = supera las expectativas, 3 = competente, 2 = necesita mejorar, 1 = inaceptable). El cuestionario también incluyó una cuestión acerca de las mejoras contrastadas en la GM en los últimos tres años (¿Ha experimentado su planta una mejora demostrada en mantenimiento durante los últimos tres años?) con "Sí" o "No" como posibles respuestas.

El tratamiento de datos consistió en un análisis factorial de componentes principales con rotación Varimax para identificar un conjunto de factores independientes que explicaran la máxima varianza (midiendo el nivel de desempeño en la GM según las actividades resultantes del panel internacional de expertos). Los componentes principales fueron considerados como los factores clave a ser considerados por los profesionales del mantenimiento al evaluar la GM en la práctica.

Las condiciones establecidas para el análisis factorial fueron:

1. (Kaiser-Meyer-Olkin Test) KMO >0.8
2. Autovalores mayores que la unidad después de la rotación, es decir, que cualquier factor explique más varianza que una sola variable.
3. Comunalidad de todas las variables superior a 0,6, lo que significa que la información perdida al trabajar con factores no debe ser mayor al 40% para cualquier variable.

4. Factores resultantes fácilmente interpretables como dimensiones de la GM.

2.2. EVALUACIÓN DE LA RELEVANCIA DE LOS FACTORES CLAVE IDENTIFICADOS EN LA MEJORA DE LA GM

Se analizó la influencia de los factores clave de la GM identificados en la Sección 2.1 en las respuestas de los profesionales de mantenimiento acerca de la mejora contrastada de la GM en sus plantas en los últimos tres años.

Se realizó un análisis de regresión logística binaria con la mejora del mantenimiento como variable dependiente y las puntuaciones de los factores clave de la GM como variables independientes. Este procedimiento estadístico se utiliza ampliamente para desarrollar ecuaciones que modelan la probabilidad de uno de dos posibles resultados utilizando una función de un conjunto de variables predictoras. Se utilizó el procedimiento hacia adelante LR. El test de Hosmer-Lemeshow y el R^2 de Nagelkerke se utilizaron para evaluar la bondad del ajuste y el porcentaje de varianza explicada por la ecuación resultante, respectivamente. Finalmente, se obtuvo la ecuación de probabilidad de no mejora del mantenimiento.

2.3. CLASIFICACIÓN DE LOS PROFESIONALES DE MANTENIMIENTO EN GRUPOS DE ACUERDO CON SU NIVEL DE DESEMPEÑO EN LOS FACTORES CLAVE DE LA GM

El objetivo de este análisis es clasificar a los profesionales de mantenimiento en grupos con patrones diferentes con respecto a los factores de la GM identificados en la Sección 2.1. Para ello,

Código	Actividad de Gestión del Mantenimiento	Nombre en el Estudio
A1	Programación conjunta del mantenimiento y la producción.	<i>Programación conjunta mantenimiento Et producción</i>
A2	Análisis de la inversión y adquisición de activos	<i>Inversión Et adquisición de activos</i>
A3	Lograr una efectiva integración y coordinación entre actores (operadores, ingenieros, gestores, proveedores y responsables de tareas de mantenimiento externalizadas) pertenecientes a áreas relacionadas con el mantenimiento (producción, logística, calidad y LCC, finanzas, RRHH, etc.)	<i>Coordinación personal involucrado en mantenimiento</i>
A4	Gestión de repuestos y materiales	<i>Gestión de inventario Et materiales</i>
A5	Formar y capacitar a los operadores en el mantenimiento diario (inspecciones, ajustes, lubricación, etc.)	<i>Formación del personal</i>
A6	Desarrollar protocolos (por ejemplo, recopilación de datos, mejora continua de la calidad, toma de decisiones) y organizar actividades para que la seguridad y la salud del personal, la propiedad, la infraestructura y el medio ambiente no se vean comprometidas	<i>Protocolos Et organización de actividades</i>
A7	Cálculo de la mano de obra necesaria para las actividades de mantenimiento	<i>Cálculo necesidad de mano de obra</i>
A8	Comunicación efectiva de desviaciones en el tiempo, presupuesto/coste, riesgo, calidad, atrasos y alcance de las actividades de mantenimiento	<i>Seguimiento del proyecto</i>
A9	Definición y uso de los indicadores correctos de rendimiento del mantenimiento (MPI) (basado en EN13306, EN13460 y EN15341)	<i>Definición de indicadores de Mantenimiento</i>
A10	Balancear costes de mantenimiento, reparación o renovación versus los beneficios y rendimientos técnicos	<i>Renovación de Activos</i>
A11	Medición de la capacidad y eficiencia de los activos	<i>Capacidad de Activos Et Eficiencia</i>
A12	Planificación de los recursos de mantenimiento mediante CMMS (Computerized MM System), MRO (Maintenance, Repair, and Overhaul), EAM (Enterprise Asset Management) o similares	<i>Planificación recursos de mantenimiento</i>
A13	Obtener el número y la composición adecuada del personal de mantenimiento	<i>Configuración equipo de mantenimiento</i>
A14	Obtener el número adecuado de planificadores de mantenimiento	<i>Número de planificadores</i>
A15	Lograr que los miembros del equipo de mantenimiento tengan la experiencia técnica necesaria	<i>Experiencia técnica del personal</i>
A16	Incrementar la rentabilidad y traducir el desempeño de mantenimiento en términos de impacto económico	<i>Rentabilidad Et impacto económico del mantenimiento</i>
A17	Uso de estándares de gestión de proyectos para la GM (ICB - International Project Management Association, 2006), APMBok (APM, 2006), Guía del PMBOK (PMI, 2013), estándares GAPPS (GAPPS, 2007), etc.	<i>Uso de estándares de gestión de proyectos</i>

Tabla 1: Actividades de Gestión de Mantenimiento (el nombre de la variable utilizado en el estudio se muestra en cursiva)

se realizó un análisis de conglomerados k-medias para identificar grupos homogéneos. Los criterios empleados para establecer esa solución fueron: el número máximo de iteraciones hasta alcanzar la convergencia se estableció en 10, el número de casos mínimos en cada grupo en la solución final deben ser al menos el 10% del total de casos, y los centros finales deben ser coherentes y fáciles de interpretar.

Cada grupo resultante se consideró como un estilo de GM resultante de los diferentes niveles de desempeño alcanzados en cada factor clave de la GM. El estilo de mantenimiento se describe de acuerdo a los valores medios de las variables en el centro del grupo. Para el análisis estadístico se utilizó el programa SPSS 16.0.

3. RESULTADOS

3.1. FACTORES CLAVE PARA EVALUAR LA GM EN LA PRÁCTICA

La tasa de respuesta del panel online fue superior al 84% en las dos rondas de trabajo. Los panelistas que participaron en dicho panel seleccionaron diecisiete actividades diferentes de la GM desde el punto de vista de la industria, véase la Tabla 1.

Como resultado del análisis factorial se obtuvo tres componentes principales que explican el 77,4% de la varianza total (ver Tabla 2).

Actividades de la GM	Componentes principales de GM		
	1	2	3
Experiencia técnica del personal	0,815		
Número de planificadores	0,778		
Configuración equipo de mantenimiento	0,741		
Cálculo necesidad de mano de obra	0,727		
Formación del personal	0,675		
Coordinación del personal involucrado en mantenimiento	0,597		
Planificación recursos de mantenimiento		0,834	
Programación conjunta mantenimiento & producción		0,813	
Seguimiento del proyecto		0,782	
Protocolos & organización de actividades		0,762	
Definición de indicadores de Mantenimiento		0,711	
Uso de estándares de gestión de proyectos		0,689	
Capacidad de Activos & Eficiencia			0,895
Inversión & adquisición de activos			0,866
Rentabilidad & impacto económico del mantenimiento			0,751
Renovación de Activos			0,687
Gestión de inventario & materiales			0,601
Varianza (%): 77.4	35,604	29,211	12,585

Tabla 2: Matriz de factores rotados (coeficientes inferiores a 0,5 se han eliminado para mayor claridad). La varianza total explicada (%) y la contribución de cada componente se muestra en la última fila

Los factores se describen a continuación analizando las actividades de mantenimiento que más se correlacionan (R^2 entre corchetes) con los componentes como sigue:

Factor 1: Mano de obra (MO). Actividades relacionadas con la experiencia técnica del personal (0,81), el número de planificadores (0,78), la configuración del equipo de mantenimiento (0,74), el cálculo de la necesidad de mano de obra (0,73), la formación del personal (0,67) y la coordinación del personal de mantenimiento (0,60).

Factor 2: Gestión de proyectos y TI (GP & TI). Actividades relacionadas con la planificación de los recursos de mantenimiento (0,83), Programación conjunta del mantenimiento y la producción (0,81), seguimiento del proyecto (0,78), desarrollo de protocolos y organización de actividades (0,76), definición de indicadores de mantenimiento (0,71) y uso de estándares de la gestión de proyectos (0,69).

Factor 3: Optimización del rendimiento de los activos (ORA). Actividades relacionadas con la capacidad y eficiencia de los activos (0,89), la inversión y adquisición de activos (0,87), el impacto económico del mantenimiento y su rentabilidad (0,74), la renovación de activos (0,69) y la gestión de inventario y materiales (0,60).



Figura 2. Efecto de los factores de la GM sobre la probabilidad de no mejora de la GM

3.2. EVALUACIÓN DE LA RELEVANCIA DE LOS FACTORES CLAVE IDENTIFICADOS EN LA MEJORA DE LA GM

El análisis de regresión logística binaria produce un modelo en el cual los tres factores clave son estadísticamente significativos. La Fig. 2 muestra los coeficientes (B) así como los Odds ratio (Exp. B) para las variables significativas, siendo la Odds ratio el efecto constante de una variable independiente sobre la probabilidad de que no se produzca ninguna mejora de mantenimiento manteniendo constantes todas las demás variables independientes. El valor de la R^2 de Nagelkerke es 0,68 y la prueba de Hosmer-Lemeshow no es estadísticamente significativa (mostrando ambas circunstancias un buen ajuste del modelo).

Los resultados se pueden ver en la ecuación (1):

$$\text{Prob. No Mejorar} = 1 / (1 + e^{(0.01 + 0.57 * \text{Mano Obra} + 0.97 * \text{GP \& TI} + 0.68 * \text{Optimización Rendimiento Activos})}) \quad (1)$$

3.3. CLASIFICACIÓN DE LOS PROFESIONALES DE MANTENIMIENTO EN GRUPOS SEGÚN SU ESTILO DE GM

El procedimiento de agrupación de casos K-medias identificó una solución válida para cuatro grupos. La Fig. 3 muestra los centros finales de los grupos. Estos grupos se interpretan como cuatro estilos diferentes de GM definidos de acuerdo a la importancia de cada variable. La Fig. 4 muestra el porcentaje de profesionales pertenecientes a cada grupo.

Los grupos finales representados según estilos de GM se pueden describir como sigue (ver Fig. 3):

Grupo 1: este grupo se refiere a los profesionales con los peores resultados en la eficiencia de la mano de obra y con altas puntuaciones negativas en los estándares de gestión de proyectos & TI. Sin embargo, este grupo realiza una optimización del rendimiento de sus activos aceptable.

- Grupo 2: los profesionales pertenecientes a este grupo son los mejores gerentes de mantenimiento, presentando altos estándares en los tres factores. Tienen el valor más alto para la optimización del rendimiento de activos, presentando también valores positivos para la gestión de proyectos & TI y la eficiencia de la mano de obra.
- Grupo 3: los profesionales de este grupo tienen los valores más altos de desempeño en gestión de proyectos & TI. Sin embargo, tienen valores negativos tanto en la eficiencia de la mano de obra como en la optimización del rendimiento de activos, alcanzando en este último factor el peor valor de todos los grupos.
- Grupo 4: los profesionales pertenecientes a este grupo son los mejores en la eficiencia de la mano de obra, pero el peor para la gestión de proyectos & TI, a la vez que muestran un valor negativo para la optimización del rendimiento de activos.

4. DISCUSIÓN

Este trabajo ha convertido el conocimiento tácito de profesionales relacionados con el mantenimiento en conocimiento explícito. Este hecho es notable, ya que la cantidad de conocimiento tácito de GM en la industria es elevado, lo que lleva a ineficiencias, falta de fiabilidad y pérdidas económicas [12].

El panel web para establecer las prácticas de GM tuvo una tasa de respuesta del 84%, superior al 70% establecido como valor umbral aceptable para mantener el rigor y evitar sesgos y falta de generalización [13]. Con respecto al cuestionario en línea, el número de encuestados alcanzado aumentó ligeramente el error de muestreo inicialmente previsto (5%). Utilizando la fórmula de

Bromaghin para la estimación de intervalos de probabilidades multinomiales [14], con $n = 396$, $k = 5$, $\sigma = 1,96$ y el mismo valor de probabilidad para los distintos niveles de respuesta, el error final de muestreo es de 6,4%. Sin embargo, la muestra final y la distribución de los profesionales de mantenimiento entre países permitieron realizar el tratamiento estadístico de los datos previsto, completando los objetivos de investigación con significación estadística en todos los análisis realizados.

Los principales factores de GM identificados definen un marco nuevo. Como resultado, la hipótesis de partida puede ser validada, porque, hasta donde los autores conocen, los factores de GM derivados de la práctica difieren de los previamente establecidos dentro de otros marcos teóricos. Sólo la eficiencia de la mano de obra se había considerado como un pilar en el marco teórico de Crespo y Gupta [7]. Sin embargo, GP & TI y ORA también emergen en este estudio como factores clave para mejorar la GM en la práctica. GP & TI incluye prácticas estrechamente relacionadas con la GM, ya que la implementación de la GM se realiza a través de la planificación del mantenimiento, control y supervisión y de métodos relacionados con aspectos económicos de la organización [15]. En general, podría decirse que prácticas como la planificación, el control y la supervisión aparecen en la mayoría de los marcos teóricos de mantenimiento existentes en la literatura [5, 6, 16]. Sin embargo, excluyendo los trabajos de Duffuaa et al. [17] y Amendola et al. [18] que subrayan la administración de proyectos como una de las principales actividades para conseguir un mantenimiento funcional y productivo, la GP en sí misma no ha recibido una atención especial. Por último, la ORA puede definirse como la gestión de todos los activos pertenecientes a una empresa para maximizar el retorno de la inversión realizada en los mismos [2]. En los últimos años, muchos autores han intentado evaluar el impacto económico del mantenimiento en la rentabilidad del negocio, demostrando que el mantenimiento se puede considerar como una fuente de beneficios [7,9,19,20]. Además, la familia de estándares europeos ISO 55000 publicada en 2014 ha consolidado la gestión de activos como un campo emergente cuya importancia no deja de crecer. Sin embargo, la gestión de activos no había aparecido como un factor en los marcos teóricos anteriores.

En cualquier caso, los factores resultantes están en línea con algunos estudios previos que subrayan su importancia en la mejora de la GM. Ahmed [14] mostró que el aumento de la eficiencia de mano de obra se tradujo en una mejora de las operaciones y el ahorro de costes en la Organización de Operaciones Petroleras del Área Sur en el período de 1983 a 2004. Papavinasam [15] señaló que la mano de obra tiene todavía mucho margen de mejora en el sector de oil & gas, ya que los operadores cualificados están muy cerca de la jubilación y cada vez entra menos personal. Por otro lado, muchos expertos [21] coinciden en que escenarios exigentes y altamente competitivos favorecen la introducción de la GP como metodología formal que va más allá de una aplicación específica y que, para alcanzar los objetivos estratégicos, se convierte en una capacidad organizativa que involucra a toda la organización. En este sentido, Bardhan et al. [22] afirmaron que las soluciones de TI son cruciales para compartir datos entre los procesos, mitigar el efecto negativo de la dispersión del equipo en el rendimiento del proyecto y contribuir a una mejor interpretación de la parte financiera del mantenimiento. Por último, la realidad muestra que los sistemas de mantenimiento tienen escasos vínculos con la estrategia empresarial y con el negocio, lo que lleva a incongruencias tácticas y operativas que provocan ineficiencias [23]. La solución de estas cuestiones es el objetivo central de la gestión de activos. Por lo tanto, la GM en la práctica podría mejorarse si los esfuerzos

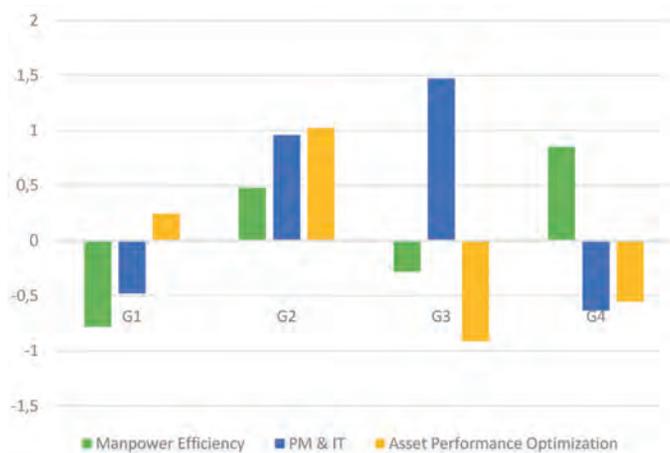


Figura 3: Valores de los centros finales de los factores clave de GM en cada grupo

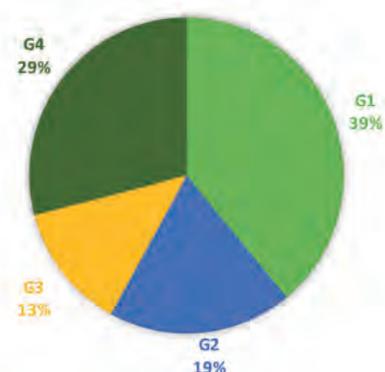


Figura 4. Porcentaje de profesionales pertenecientes a cada grupo

de gestión se dedicaran a la mejora de los principales factores identificados en este estudio.

Por otra parte, los resultados de la regresión logística binaria permiten a los profesionales evaluar la relevancia de los factores identificados en la mejora de su GM. Las empresas podrían utilizar la ecuación 1 para mejorar su GM. Deberán: 1) evaluar su desempeño en GM de acuerdo con los factores clave entre -2 y 2, desde "inaceptable" hasta "excepcional", 2) poner los valores obtenidos en cada factor en la ecuación, y 3) calcular el resultado de probabilidad de no mejora. Esta información podría utilizarse para establecer una línea de base inicial y determinar estratégicamente qué factores deberían cambiarse para mejorar la probabilidad obtenida. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la ecuación 1 se ha obtenido a partir de cuestionarios en un estudio exploratorio. Por lo tanto, el resultado de la ecuación debe ser interpretado con cautela. Los informes de rendimiento del mantenimiento son difíciles de elaborar porque consumen mucho tiempo y dependen de la exactitud de los datos disponibles [24]. Por otra parte, los principales beneficios de las mejoras de mantenimiento se observan generalmente en otras áreas de trabajo, tales como la producción, la calidad, el capital vinculado, la gestión de LCC, etc., pero difícilmente se atribuyen al mantenimiento [19]. Por lo tanto, parece necesario en futuros estudios tener un mayor control sobre los orígenes y las causas de las mejoras de mantenimiento manifestadas por los profesionales en este estudio.

Finalmente, el análisis de conglomerados proporcionó cuatro estilos de GM. Excluyendo el grupo 2 (19% del total de profesionales), que tiene valores positivos altos en todos los factores y sobresale en la optimización del rendimiento de activos, todos los grupos tuvieron valores negativos en dos de los tres factores y alcanzaron el peor desempeño en uno de ellos. Los grupos 3 (13% del total de profesionales) y 4 (29% del total de profesionales) también sobresalen en uno de los tres factores, GP & TI y MO, respectivamente. Así, se cuenta con cuatro estilos de GM diferentes con valores extremos que muestran que ésta podría estar algo descompensada. Cabe destacar que sólo se ha registrado el puesto de trabajo y la experiencia de los profesionales de mantenimiento. Para comprender mejor los estilos de GM resultaría conveniente tener más información acerca de estos profesionales, así como saber más detalles sobre la GM en cada planta industrial. En este sentido, existen múltiples aspectos en el mantenimiento (antigüedad y calidad de los activos, la interpretación y uso de los conceptos de mantenimiento, las condiciones ambientales, la tecnología, etc.) que impiden la generalización de los resultados del estudio a otros sectores. Sin embargo, el procedimiento utilizado se puede generalizar para conocer los factores críticos de la GM de cualquier tipo de industria y sector.

5. CONCLUSIONES

Este estudio ha identificado las principales actividades de GM que los profesionales tienen en cuenta al realizar su trabajo en la industria de *oil&gas* en Latinoamérica. Estas actividades están correlacionadas y pueden resumirse en tres factores principales que difieren de los contenidos en anteriores marcos teóricos: eficiencia de la mano de obra, gestión de proyectos y TI y optimización del rendimiento de activos.

Asimismo, este trabajo ha propuesto una ecuación que predice la mejora del mantenimiento en función de los tres factores identificados. La gestión de proyectos y TI es el factor más influyente para mejorar la GM, seguido por la optimización del rendimiento de activos y la eficiencia de la mano de obra. Esta información po-

dría ayudar a los gerentes a establecer las actividades de mantenimiento que más necesitan mejorar y a planificar una estrategia en consecuencia. Sin embargo, al tratarse de un estudio exploratorio acerca de una disciplina tan compleja se debería ser cauteloso, ya que el modelo de regresión obtenido utiliza un número limitado de variables que podrían simplificar en exceso el problema a resolver.

Finalmente, el trabajo incluye una agrupación de los operadores en función del nivel de desempeño manifestado en los factores clave de la GM, apareciendo cuatro estilos de GM. Este resultado permite conocer las fortalezas y debilidades de cada estilo, ofreciendo una idea general del nivel de desempeño en la GM alcanzado por empresas del sector. Con esa información los investigadores y profesionales podrían planificar mejor en el futuro sus proyectos de mejora del mantenimiento en esta industria.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Eti M, Ogaji S, Probert S. "Reducing the cost of Preventive Maintenance (PM) through adopting a proactive reliability-focused culture". *Applied Energy*. November 2006. Vol.83-11. p.1235-1248. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2006.01.002>)
- [2] Wireman T. *Developing performance indicators for managing maintenance*. 2nd ed. New York: Industrial Press, 2005. 246p. ISBN: 0-8311-3184-5
- [3] Alsyouf I. "Maintenance practices in Swedish industries: survey results". *International Journal of Production Economics*. September 2009. Vol.121-1. p.212-223. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.05.005>)
- [4] Abreu J, Martins PV, Fernandes S, et al. "Business Processes Improvement on Maintenance Management: A Case Study". *Procedia Technology*. 2013. Vol.9. p.320-330. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.036>)
- [5] Muchiri P, Pintelon L, Gelders L, et al. "Development of maintenance function performance measurement framework and indicators". *International Journal of Production Economics*. May 2011. Vol.131-1. p.295-302. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.04.039>)
- [6] Horenbeek AV, Pintelon L. "Development of a maintenance performance measurement framework—using the analytic network process (ANP) for maintenance performance indicator selection". *Omega-International Journal of Management Science*. January 2014. Vol.42. p.33-46. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2013.02.006>)
- [7] Crespo A, Gupta J. "Contemporary maintenance management: process, framework and supporting pillars". *Omega-International Journal of Management Science*. June 2006. Vol.34. p.313-326. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2004.11.003>)
- [8] Waeyenbergh G, Pintelon L. "CIBOCOF: a framework for industrial maintenance concept development". *International Journal of Production Economics*. October 2009. Vol.121-2. p.633-640. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.10.012>)
- [9] Faccio M, Persona A, Sgarbossa F, et al. "Industrial maintenance policy development: A quantitative framework". *International Journal of Production Economics*. January 2014. Vol.147. p.85-93. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.08.018>)
- [10] McKone KE, Schroeder RG, Cua KO. "The impact of total productive maintenance practices on manufacturing performance". *Journal of Operations Management*. January 2001. Vol.19-1. p.39-58. (DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0272-6963\(00\)00030-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0272-6963(00)00030-9))
- [11] Zio E. "Reliability engineering: Old problems and new challenges". *Reliability Engineering and System Safety*. February 2009. Vol.94-2. p.125-141. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2008.06.002>)
- [12] Cárcel-Carrasco FJ, Rodríguez-Méndez M. "Industrial maintenance and tacit knowledge: an introduction about its incidence". *Dyna Management*. January-December 2013. Vol.1.p.(no consta). (DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/MNS5857>)
- [13] Keeney S, McKenna H, Hasson F. *The Delphi Technique in Nursing and Health Research*. Chichester: Wiley, 2010. 208p. ISBN: 978-1-4051-8754-1
- [14] Bromaghin JF. "Sample size determination for interval estimation of multinomial probabilities". *The American Statistician*. August 1993. Vol.43-3. p. 203-206. (DOI: <http://www.jstor.org/stable/2684978>)
- [15] EN 13306, 2010. *Maintenance. Maintenance Terminology*. European Standard. CEN European Committee for Standardization, Brussels.
- [16] Parida A, Chattopadhyay G. "Development of a multi-criteria hierarchical framework for maintenance performance measurement (MPM)". *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2007. Vol.13-3. p.241-258. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/13552510710780276>)
- [17] Duffuaa SÖ, Raouf A, Campbell JD. *Planning and control of maintenance systems*. Indianapolis: Wiley, 2000. 400p. ISBN 978-3-319-19802-6
- [18] Amendola L, Artacho MA, Depool T. "Consider Critical Issues during a Plant Turnaround". *Hydrocarbon Processing*. September 2011. Vol.9. p.113-116. (ISSN: 0018-8190)
- [19] Al-Najjar B. "The lack of maintenance and not maintenance which costs: A model to describe and quantify the impact of vibration-based maintenance on company's business". *International Journal of Production Economics*. May 2007. Vol.107-1. p.260-273. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.09.005>)
- [20] Alsyouf I. "The role of maintenance in improving companies' productivity and profitability". *International Journal of Production Economics*. January 2007. Vol.105-1. p.70-78. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.06.057>)
- [21] Kerzner H. *Project management: a systems approach to planning, scheduling, and controlling*. 11th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2013. 1296p. ISBN: 978-1-118-02227-6
- [22] Bardhan I, Krishnan VV, Lin S. "Team Dispersion, Information Technology, and Project Performance". *Production and Operations Management*. November-December 2013. Vol.22. p.1478-1493. (doi: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1937-5956.2012.01366.x>)
- [23] El-Akruti K, Dwight R, Zhang T. "The strategic role of Engineering Asset Management". *International Journal of Production Economics*. November 2013. Vol.146. p.227-239. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.07.002>)
- [24] Zhou Y, Koub G, Erguc D. "Analysing Operating Data to Measure the Maintenance Performance". *Quality and Reliability Engineering International*. March 2015. Vol.31-2. p.251-263. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/qre.1584>)

Building stock categorization for energy retrofitting of historic districts based on a 3D city model



Categorización de edificios basada en un modelo 3D de la ciudad para abordar la reconversión energética de distritos históricos



Iñaki Prieto, Jose Luis Izkara, Aitziber Egusquiza

TECNALIA. División de Construcción. Parque Científico y Tecnológico de Bizkaia, Geldo Auzoa, 700 Edificio - 48160 Derio (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8147> | Recibido: 08/09/2016 • Evaluado: 12/09/2016 • Aceptado: 23/12/2016

RESUMEN

- La mejora de la eficiencia energética de los edificios es uno de los aspectos clave para la reducción de emisiones de contaminantes y la mejora de la sostenibilidad a escala mundial. La rehabilitación energética de edificios existentes está siendo una de las apuestas clave para la revitalización del sector de la construcción en Europa. Abordar dicha rehabilitación a escala urbana supone importantes beneficios frente a la rehabilitación individual de edificios. Sin embargo también lo convierte en una tarea más compleja, para lo cual se hace necesario el uso de herramientas que faciliten la identificación de las mejores estrategias de rehabilitación sobre datos objetivos. Cuando hablamos de entornos históricos es necesario abordar el problema desde planteamientos específicos que tengan en cuenta las peculiaridades de los edificios contenidos en ellos. En este contexto la solución presentada en este artículo propone la identificación de las principales tipologías de edificios de un entorno urbano y la selección de un edificio representativo de cada tipología para simplificar la recogida de datos y utilizar los datos de los edificios representativos como base para los cálculos totales teniendo en cuenta la representatividad de dicha tipología en el distrito. El proceso de categorización del parque edificado se detalla paso a paso en el artículo, así como su implementación en una herramienta software que automatiza algunas de las actividades de cada paso. La validación se realiza mediante la implementación en el distrito histórico de Santiago de Compostela.
- **Palabras Clave:** Eficiencia energética, distritos históricos, ciudades 3D, tipologías de edificios, software de categorización.

of the main typologies of buildings in the district and the selection of a representative building of each typology to simplify data collection process and use the data from the representative buildings as a basis for total calculations taking into account the representativeness of each typology in the district. The building stock categorization process is detailed step by step, and its implementation in a software tool that automates some of the activities of each step. Validation is carried out through the implementation in the historic district of Santiago de Compostela.

Key Words: energy efficiency, historic districts, 3D cities, building typology, categorization tool.

1. INTRODUCTION

Buildings are responsible for 40% of energy consumption and 36% of CO₂ emissions in the European Union¹. The construction industry is continuously searching for new retrofitting solutions and technologies in order to increase the energy efficiency of buildings. However, the majority of current development regarding energy efficiency focuses on new building work, ignoring the specific issues of existing buildings in general, and historic building in particular. Moreover, addressing the problem at district scale provides significant benefits from the building scale approach (e.g. economy of scale allows reaching cost-effective improvements, overcome barriers and restrictions applied to individual buildings and optimization of energy consumption and CO₂ emissions associated with urban infrastructures). Current approaches for urban retrofitting projects are based on the use of energy simulation software (e.g. Energyplus, TRNSYS, IES VE). These tools require a huge amount of data in order to get precise and accurate results [1]. A good balance between the accuracy of the results and the availability of data needs to be addressed.

The work described in this publication is focused on the identification of building typologies as a previous step to the selection of energy retrofitting strategies. The identification of building typologies allows estimating the energy consumption of a set of buildings from the results of a representative building of this typology. This approach provides a drastically reduction of the need for collecting information. At the same time, it allows identifying the impact of the intervention in a specific typology within the whole district taking into account the representativeness of the typology.

ABSTRACT

Improving energy efficiency of buildings is one of the key areas for reducing emissions of pollutants and improving global sustainability. Energy rehabilitation of existing buildings is currently one of the key challenges for the revitalization of the construction sector in Europe. Addressing such rehabilitation at urban scale versus individual rehabilitation of buildings has important benefits. However it makes the task much more complex, for which the use of tools to facilitate the identification of the best strategies for rehabilitation based on evidences is necessary. When we talk about historic districts it is necessary to address the problem from specific approach taking into account the peculiarities of the buildings contained therein. In this context the solution presented in this paper proposes the identification

¹ <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings>

The article is structured as following: First the building stock categorization process is detailed. In order to assist on the identification of building typologies, a web tool based on an urban 3D model has been developed and described here. Finally, the article presents the results of the application to the case of the historic district of Santiago de Compostela. The work described in this paper has been developed within the European project EFFESUS².

2. MATERIALS AND METHOD

2.1. MODELLING STRATEGIES FOR ENERGY RETROFITTING IN URBAN DISTRICTS

Urban modelling defined by [2] as the representation of functions and processes which generate urban spatial structure embodied in computer programs to enable location theories, is a necessary tool for planning and development of policies [3] as they can support from the design of policies to the implementation of specific strategies. In order to be effective and feasible, the urban modelling has to fall between the search for simplicity in articulating the urban structure and the need to translate their complexity [2]. Different modelling techniques have been considered for energy assessment:

- Large scale energy assessment: Nouvel et al. in [4] describes an automatic large-scale assessment of building energy behaviour based on a 3D city model using data available from public sources. It is based on the hypothesis that strong correlations exist between information about residential buildings (e.g. location, use, age, size) and their energy consumption [5].
- Identification of priority areas: This approach first identifies priority areas for energy efficiency interventions and, then focuses data acquisition on the buildings within this area [6]. Based on a low level of information, blocks or groups of buildings can be prioritized according to their conservation state, a rough estimation of their energy behaviour and the concerns of the citizens.
- Modelling through representative buildings: One procedure used to analyse large building stocks is to examine and categorise the stock according to some parameters (e.g. climatic zone, dimension, age). The representative buildings of each category could be real buildings (sample buildings) or ideal buildings constructed with the statistical characteristics identified as representative (archetype buildings). Parekh et al. in [7] describes the process of developing archetypes for energy simulation and Mata in [8] applies the sample building modelling strategy for energy, carbon, and cost assessments.

Creating models of whole districts based on the identification of sample buildings has been selected as the modelling strategy for energy retrofitting of historic districts in the EFFESUS project. The sample building strategy allows starting with basic information about all the buildings of the district in order to identify homogeneous groups of buildings. But, after performing the clustering process, more detailed semantic information (e.g. heritage significance of building elements or U-value of building envelope) can be acquired just for those representative buildings and extrapolate the results.

In order to cluster the buildings of a historic district for energy

retrofitting, two relevant aspects have to be combined: on the one hand the energy profile of the buildings, and on the other hand, the constraints imposed by the historic value of the building and its elements (e.g. windows, façades, and doors). Previous attempts for clustering of buildings have been focused on the energy side of the buildings (e.g. TABULA project³), but merging both aspects is what allows for the adequate clustering in order to model the historic districts for energy retrofitting purposes.

2.2. 3D CITY MODEL

A 3D city model is a georeferenced digital representation of objects, structures and phenomena that correspond to a real city [9]. CityGML⁴ is an open data model defined by the Open Geospatial Consortium (OGC) for the storage and exchange of a 3D city model. It has been designed to store semantic and 3D multiscale geometric information, considering urban and building scales. Semantic 3D city models have demonstrated being of great value for the prediction of energy demand of buildings, increasing accuracy and easiness compared to the 2D GIS models [10]. The implementation of the modelling strategy through sample buildings defined in this paper is based on a semantic 3D city model.

A 3D city model of the historic district of Santiago de Compostela is used as a material for the implementation of the work described in this paper. The city model includes: (1) a textured digital elevation model of the urban area of Santiago de Compostela and its surroundings; (2) geometry of buildings in the historic district in LoD2 (represented by independent facades and roofs); (3) CityGML data model extended with required parameters for the domain of energy retrofitting of historic buildings. The list of the data sources used for the generation of the 3D city model is:

- Building Footprints from Spanish Cadaster
- Digital Terrain Model (DTM) from Spanish National Geographic Institute (SNGI)
- Orthophotographs from SNGI
- LiDAR from SNGI

Some of the required attributes are already included as part of the CityGML core data (e.g. main use, year of construction, number of floors), while some others need to be added to the data model (e.g. area, level of protection).

3. BUILDING STOCK CATEGORIZATION PROCESS

This section describes the building stock categorization process defined in the EFFESUS project. The final objective of this process is to select a limited number of sample buildings that reflect almost the entire building stock of the historic district within the constraints of the data available. The number of selected typologies must be the minimum, but covering the maximum representativeness of the buildings stock.

For the identification of the sample buildings a set of relevant parameters have to be selected, taking into account the two relevant aspects previously mentioned (i.e. energy and heritage). The selected parameters need to be easy to acquire for all the buildings in the district. For each parameter a group of intervals should be defined in order to identify categories. The combination of different parameters and intervals will generate the typologies. Only those typologies with a significant number of buildings will be selected as the relevant ones. For each of the relevant typologies

³ <http://episcopo.eu/building-typology/>

⁴ CityGML: OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard 12-019 - <http://www.opengeospatial.org/standards/citygml>

² <http://www.fffesus.eu/>

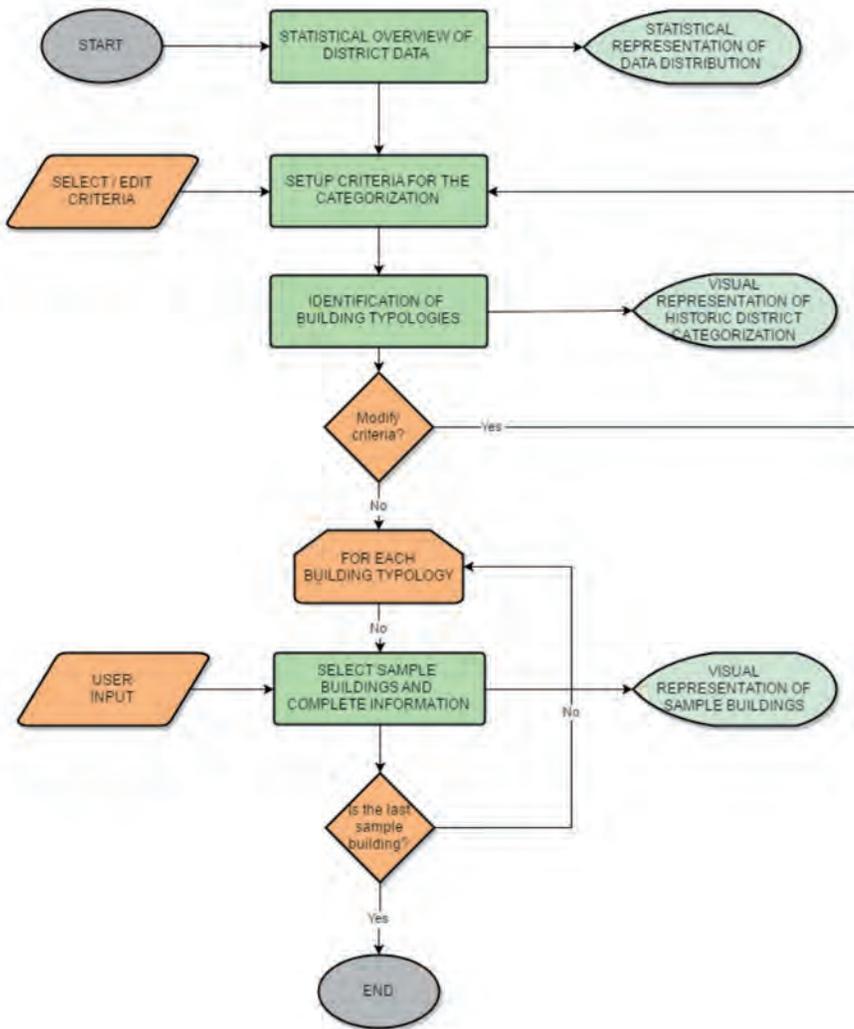


Figure 1: Workflow of the building stock categorization

a building will be identified as the representative of the whole typology.

The process is divided into 4 main steps:

- 1. Statistical Overview of the district data:** Assessment of the data included in the 3D City Model for the identification of those parameters which are relevant for the categorization.
- 2. Set-up Criteria for Categorization:** Selection of the parameters, intervals and threshold that will be used for the generation of typologies.
- 3. Identification of buildings typologies:** Identification of the most representative building typologies according to the selected criteria. If the number of typologies and their representativeness are not the expected ones, it is possible to go back to the previous step and modify the criteria.
- 4. Select Sample Buildings and complete information:** Selection of one building as representative of each typology and introduction of detailed information in the 3D City Model, for each representative typology.

Figure 1 shows the workflow that summarizes the different steps of the building stock categorization process. This workflow has been used for the implementation of the process in a software tool, which is described in Section 4.

3.1. STATISTICAL OVERVIEW OF THE DISTRICT DATA

The set of appropriate parameters and intervals for the identification of the building typologies will depend strongly on the his-

tory and location of the historic district. An expert judgement will be necessary to analyze the key parameters that influence the clustering process. As support for this process, several statistical methods and tools can be used for the representation of the distribution of the different parameters in building stock analysis. Frequency histograms have been previously used in the literature as in [11], in order to identify concentrations of particular values. Box-plot is used to graphically depict groups of numerical data through their quartiles. A histogram combined with a box-plot provides a clear understanding of the normality, tendency and dispersion of the data [12].

3.2. SETUP CRITERIA FOR THE CATEGORIZATION

Once the user has a clear vision of the distribution of each parameter, the criteria for the categorization will be selected. Criteria for categorization are represented by a set of parameters, the intervals for each parameter and the threshold. The threshold is the minimum percentage of buildings that allows a building typology to be considered representative.

For the categorization process it is important to consider that: (1) Typologies have to group the buildings regarding basically their energy characteristics and historic significance. (2) The clustering criteria have to be coherent with the criteria and constraints that later will be used for the identification of retrofitting strategies. (3) The required data have to be easily obtained.

Following these considerations, the proposed list of parameters for the categorization of historic districts regarding their energy performance is:

- **Main use:** mainly if it is residential or not, since their final energy consumption changes significantly (different use patterns and operating systems).
- **Number or facades:** it shows the "exposed area" of the building that is very important for the energy performance.
- **Year of construction:** buildings built in the same period have similar construction techniques. It can be used also, along with the protection degree, to assume homogenous heritage significance of the buildings.
- **Protection degree:** a direct indicator of the heritage significance and of the measures that can be applied.
- **Volume:** it represents the "heated volume" of the building that is also an indicator with a direct link to the energy performance.

The proposed method intends to be flexible regarding the used parameters; so parameters can be added or discarded if considered. Information provided by the volume and the number of facades are very much correlated, and both are direct indicators of the energy performance of the building. In order to reduce the number of typologies one of them could be removed from the final list of parameters.

3.3. IDENTIFICATION OF BUILDING TYPOLOGIES

Generation of the building typologies is the key step of the whole process. The number of parameters selected, the number of

intervals and the defined threshold will determine the success or failure of the categorization process. As an example: Five different parameters with three intervals for each can produce a huge number of different typologies making the analysis unmanageable ($3^5 = 243$ different typologies). Consequently, it is necessary to select the proper parameters, intervals for each parameter and also to discard the less representative groups through an adequate threshold.

The process starts selecting a first parameter and then proceeds to subdivide the typologies with respect to other parameters. By adjusting the number of intervals for each parameter the building typologies will be constructed (See Figure 2).

4 or 5 can be defined as the most suitable number of parameters to obtain a diversity of typologies but keeping them into a manageable number. The definition of the intervals is a bit more complex, due to the diversity of data type of each parameter (e.g. the use of the building will be residential or non-residential, the number of facades will vary from 1 to 4 and the year of construction will be a number between 1298 and 1996). Number of intervals for the categorization will vary from: 1, if only one of the possible values want to be included in the categorization; 2 to 4 if different intervals are defined for the possible values; or discrete if all the possible values will be considered for the categorization. The combination of the selected set of parameters and the corresponding intervals (number and limits) will determine the number of typologies generated.

When all the possible typologies have been identified the most representative ones have to be selected through the establishment of a threshold of minimum representativeness. A good balance between the number of typologies and the representativeness of them depends on the homogeneity of the building stock, the size of the district or the expert judgement of the user. However, a set of no more than 10 different typologies with a representativeness of at least 80% (usually obtained with a minimum threshold between 2% and 5%) could be considered as appropriate balance in most cases.

3.4. SELECT SAMPLE BUILDINGS AND COMPLETE INFORMATION

Once the building typologies have been identified and their statistical representation assessed, the next step involves selecting one representative building for each typology. This is a crucial decision as the results obtained with this building are going to

be extrapolated to the entire typology. The sample buildings can be selected by analyzing the building stock to find out a building showing characteristics similar to the mean value of geometrical or construction features of the statistical sample or by expert judgement. It is also important to consider that detailed information for the selected buildings needs to be available.

Once the sample buildings have been selected, the 3D city model will be completed with detailed information for the selected buildings. The geometric information contained in the model is already sufficient but the semantic information has to be completed regarding the two main topics: heritage significance and energy characteristics.

Regarding heritage significance, the necessary information is the historic value of the building components. This information could be obtained using the public data bases that documents the historic values of the district or by expert judgment if this data bases are not available or not of enough quality.

Regarding the energy characteristics (ratio of openings in the envelope, U values of building elements, glazing characteristics...), different methods are usually used to get this semantic information: public data bases, expert judgment, European databases (e.g. the one created by the TABULA project or others) or even Google street map as in [13].

4. BUILDING STOCK CATEGORIZATION TOOL

The process described above is implemented in a software tool that partially automatizes it and provides the user an easy and intuitive way for the identification of building typologies. The tool is based on data included in the city model described in Section 2.2. User can interact with the tool editing parameters, intervals and thresholds for categorization as well as selecting representative buildings and completing their properties.

4.1. USER INTERFACE

Graphical user interface of the categorization tool is divided into four main areas or panels (see Figure 3). Each panel includes several tabs which are enabled or disabled depending on the phase of the categorization process.

Categorization tool is accessible at the URL:
<http://3dcity.tecnalia.com/DynaCategorization/faces/DynaCategorization.xhtml?city=effesusantiago>

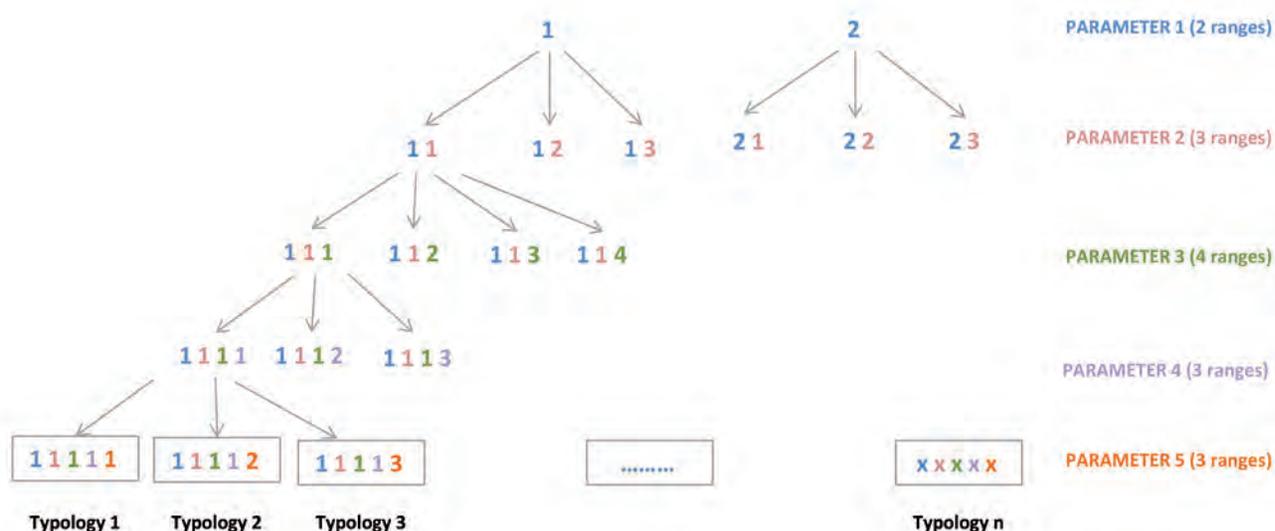


Figure 2: Generation of typologies

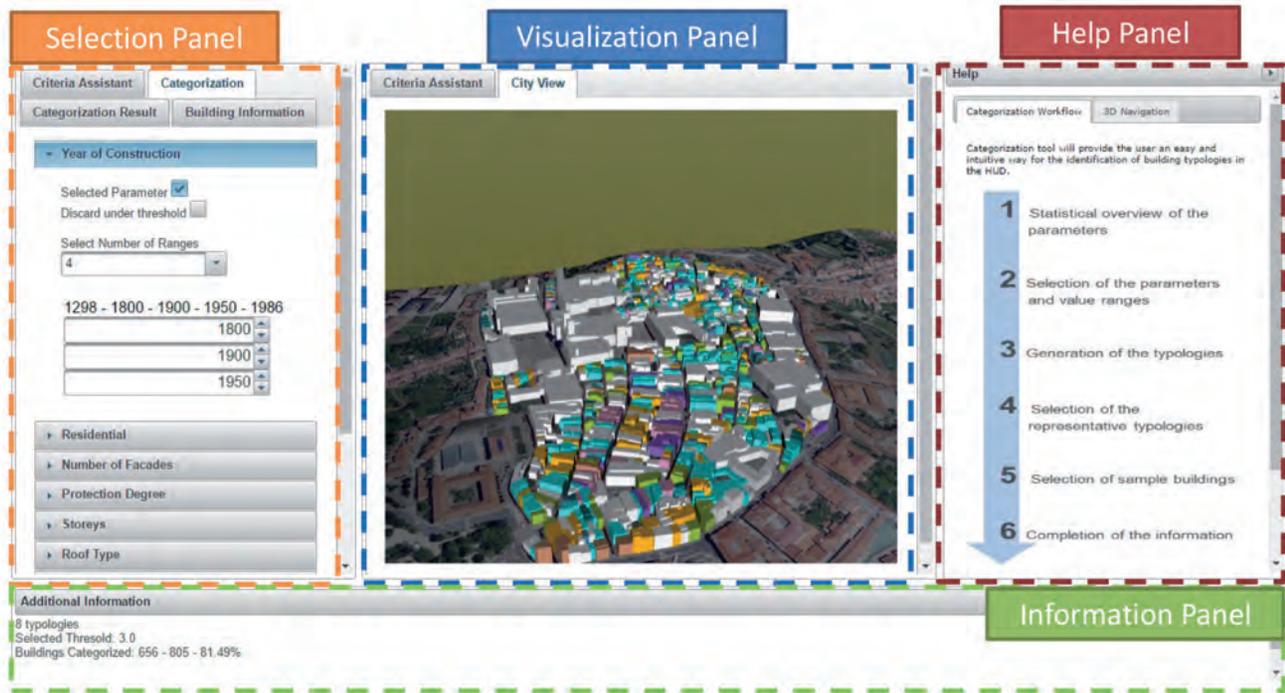


Figure 3: Graphical user interface of the categorization tool

4.2. CRITERIA ASSISTANT

For the statistical overview the categorization tool provides the criteria assistant functionality which aims to easily give an idea of the building data distribution in the whole historic district. Frequency histograms and box-plots for each parameter are automatically generated by the categorization tool (see Figure 4).

4.3. CATEGORIZATION

In order to setup parameters, intervals and threshold for the categorization, the categorization tool provides the user an automatic identification of suitable number of intervals and the upper and lower limits of the intervals for each parameter. The automatic setup of the number of intervals as well as the limits is based on an adaptation of the k-means algorithm widely used for clustering [14]. The complete algorithm is presented in Figure 5. The selection of parameters to be taken into account and the threshold value need to be manually provided by the user. Default intervals

identified by the tool can be manually edited by the user, in order to adapt the results to the user preferences and knowledge.

Intervals can be defined only for parameters with numeric values. In the case of parameters such as building use (e.g. residential, office or commercial) or roof type (e.g. flat, gable or hip) no intervals will be defined and all possible values will be considered in the categorization tool.

After all the possible typologies are generated according to the number of parameters and intervals, the threshold is applied in order to select the most representative typologies.

The automatic setup of the parameters and intervals for the categorization process analyses each parameter and performs the following steps. First, the data distribution of the parameter is analysed (line 8). If the parameter has less than 5 different values, all the values will be used in the categorization (line 10). Otherwise, different intervals are created depending data distribution. If the data distribution is homogeneous (each value has less than

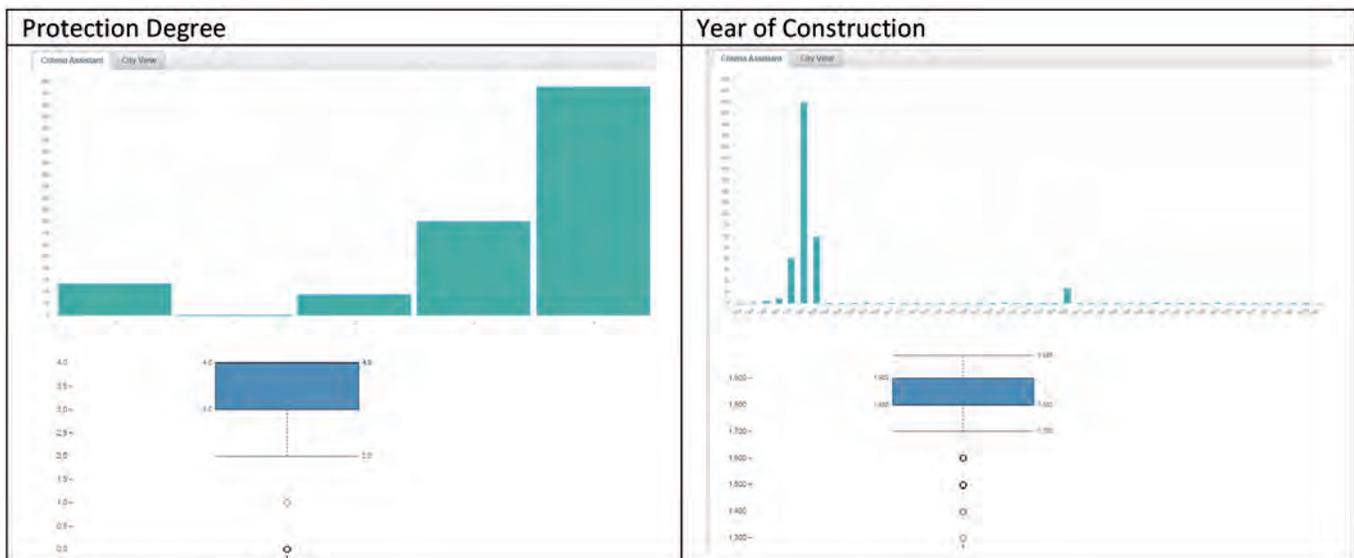


Figure 4: Visualization of parameter distribution in the categorization tool

```

1  Algorithm Automatic Setup of the parameters and intervals for the categorization
2  Input Categorization parameters
3  Output List with intervals setup values for each categorization parameters
4
5  var listOfIntervals
6
7  for each parameter do
8      Analyse data distribution of the parameter
9
10     if (the number of different values of the parameter < 5) then
11         Set interval number = All
12     else
13         Get the value that has more elements
14         var intervalType = (Number of elements of the value that has more elements /Total number
15 of elements in the parameter)* 100
16
17         if (intervalType< 20) then
18             Set interval number = 4
19         else if (intervalType>80) then
20             Set interval number = 1
21         else
22             Apply k-means clustering algorithm with 2 and 3 clusters
23             Set interval number = The k-means result with less total distance between each value and
24 its cluster centroid
25         end if
26     end if
27
28     if (interval number == 1) then
29         Set listOfIntervals[1] = Select maximum value
30     else if (interval number == 2) then
31         Set listOfIntervals[2] = Higher value of the first cluster
32     else if (interval number == 3) then
33         Set listOfIntervals[31] = Set first interval with the higher value of the first cluster
34         Set listOfIntervals[32] = Set second interval with the higher value of the second cluster
35     else if (interval number == 4) then
36         Set listOfIntervals[41] = Set first interval after 25% number of values are reached
37         Set listOfIntervals[42] = Set first interval after 50% number of values are reached
38         Set listOfIntervals[43] = Set first interval after 75% number of values are reached
39     else if (interval number == All) then
40         Set listOfIntervals[5] = All values are used
41     end if
42
43 return listOfIntervals
44
45 end for
    
```

Figure 5: Algorithm Automatic Setup of the parameters and intervals for the categorization

the 20% of elements), 4 intervals are set (line 17), and each interval will contain the 25% of the values (lines 35-38). If there is a value that contains the 80% of the elements, only 1 interval is set (line 19), which will be the value that has more elements (line 29). If 1 or 4 intervals are not set, the k-means algorithm is used to decide whether using 2 or 3 intervals (line 22). The criterion for the decision is the total minimum distance between the elements and their centroid (line 23). If 2 intervals are set, the limit between intervals will be set to the higher value of the first cluster (line 31), and if 3 intervals are set, limits between intervals will be set to the higher values of the first and second clusters (lines 33-34).

4.4. CATEGORIZATION RESULTS

As a result of the previous steps, the different typologies are presented giving statistical information for each of them such as: intervals of each parameter, total number of building, total number of buildings included and representativeness of the category in the whole set of buildings. Different colours are used to visually identify different typologies. Also a 3D visualization of the city

model is used in order to identify which buildings belong to which typology and their geographical distribution.

If the categorization does not provide the user with satisfactory enough results, it is possible for the user to come back to the previous stage and modify the selected criteria.

4.5. BUILDING INFORMATION

This process is manually done in the categorization tool by selecting the sample building in the city viewer of the visualization panel. The software tool provides support in the identification, first providing the information of the selected building (e.g. address); second by the colour of the typology; and third by including the selected building with the statistical information of the typology when the sample building is selected.

5. IMPLEMENTATION: THE CASE STUDY OF SANTIAGO DE COMPOSTELA

The historic district of Santiago de Compostela has been selected as the case study for the implementation of the described building stock categorization process. Santiago de Compostela is located in the north-west of Spain with around 100.000 inhabitants, whose historic centre was declared World Heritage Site by UNESCO. The area selected as case study is the area that was historically inside the walls of the city. 805 buildings have been considered within this area (699 residential and 106 non-residential).

3D city model described in Section 2.2 has been used for the implementation of the described process. The model has been completed with the information of the key parameters for the categorization identified in Section 3.2. For the completion of the information, both the Spanish Cadastre and the Masterplan of the historic city of Santiago have been used. According to the masterplan of the city, 5 different levels of protection are defined for the buildings in the historic city: Monumental buildings of outstanding value (Level 1), buildings of singular features and major value (Level 2), buildings with special features regarding architecture and environment (Level 3), Interesting buildings in the urban context (Level 4) and not listed (Level 0). None of the residential buildings located in the historic district is catalogued as Level 1.

The categorization process has been performed in the categorization tool with the following configuration:

- Year of construction: 2 intervals. 1298 – 1800 and 1800 –1986.

IDENTIFICATION OF BUILDINGS TYPOLOGIES					SELECT REPRESENTATIVE TYPOLOGIES			
Use	Number of Facades	Year of Construction	Level of Protection	Typology Code	Number of Buildings	Total Buildings	Historical and Residential Buildings	Selected Typologies (3% Threshold)
Residential	1	<1800	4	1111	9	1,12%	1,29%	
			3	1112	2	0,25%	0,29%	
			2	1113	0	0,00%	0,00%	
			0	1114	1	0,12%	0,14%	
		4	1121	73	9,07%	12,07%	5	
		3	1122	7	0,87%	1,00%		
		2	1123	1	0,12%	0,14%		
		0	1124	7	0,87%	1,00%		
	2	<1800	4	1211	22	2,73%	3,64%	6
			3	1212	30	3,73%	4,96%	2
			2	1213	1	0,12%	0,14%	
			0	1214	0	0,00%	0,00%	
		4	1221	264	32,80%	43,64%	7	
		3	1222	85	10,56%	14,05%	3	
		2	1223	3	0,37%	0,43%		
		0	1224	38	4,72%	6,28%	1	
	3	<1800	4	1311	8	0,99%	1,14%	
			3	1312	10	1,24%	1,43%	
			2	1313	10	1,24%	1,43%	
			0	1314	1	0,12%	0,14%	
4		1321	60	7,45%	9,92%	8		
3		1322	33	4,10%	5,45%	4		
2		1323	4	0,50%	0,57%			
0		1324	10	1,24%	1,43%			
4	<1800	4	1411	0	0,00%	0,00%		
		3	1412	3	0,37%	0,43%		
		2	1413	5	0,62%	0,72%		
		0	1414	0	0,00%	0,00%		
	4	1421	7	0,87%	1,00%			
	3	1422	3	0,37%	0,43%			
	2	1423	2	0,25%	0,29%			
	0	1424	0	0,00%	0,00%			
Non residential				106	13,17%	15,16%		
							8	
							605	
							86,55%	

Table 1: Generation of typologies

Santiago. Detailed information has been completed for each sample buildings using the web forms provided by the categorization tool. The detailed information about each sample building is shared with other application developed in the EFFESUS project in order to select the best retrofitting strategies for each typology.

6. DISCUSSION

The four modelling strategies identified in section 2.1 can be useful depending on the circumstances, the objectives and the data availability. All of them try to represent a simplified version of a complex reality based on correlations and estimations from a small number of basic building data. The accuracy of the results obtained will be directly proportional to the number and reliability of the data used. In the case of representative buildings, although the method generates uncertainty in the extrapolation to the entire district of the results for the selected buildings, accurate results can be obtained from a very basic dataset. Furthermore, in a decision making process regarding historic districts, the constraints regarding heritage significance are mandatory. The identification of representative buildings allows taking into account the historical value of buildings during the modelling process. The modelling technique based on sample buildings, versus the use of archetypes, offers the advantage of being based on real data of the buildings. In addition, when a virtual city model is used, it can be completed when more information becomes available, thus achieving greater accuracy in the obtained results.

- Main use: 1 interval. Only residential → The automatic categorization set up process has set to All values; however, for the case study purposes only residential buildings are considered.
- Number of facades. All values.
- Protection degree. All values.

The selected configuration for the case study provides the results presented in Table 1. 32 typologies have been generated for residential buildings in the historic district. Only 8 of them are over the selected threshold (3%) of representativeness. Within the selected typologies a total of 605 buildings have been considered, representing the 86,55% of the total number of residential buildings allocated in the historic district of Santiago de Compostela.

Considering only residential buildings, the majority of them have 2 façades, due to the urban configuration of the historic districts. Also it can be noticed that most of the buildings in the historic district has been reconstructed after 1800. The level of protection of the residential buildings is low (3 or 4). The most common typology is represented by residential buildings of 2 façades, reconstructed after 1800 and with a protection level of 4.

Figure 6 shows the geographical distribution of the typologies within a 3D visualization in the categorization tool. Note that only residential buildings were of interest for the categorization and the 3D city model includes also the non-residential ones. The whole set of resulting typologies, including their representative parameters and statistical information, as they are shown in the categorization tool, are also presented.

The selection of sample buildings is based on the availability of detailed data of buildings in the masterplan of the city of

Santiago. Detailed information has been completed for each sample buildings using the web forms provided by the categorization tool. The detailed information about each sample building is shared with other application developed in the EFFESUS project in order to select the best retrofitting strategies for each typology.

7. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

The main objective of the work presented in this article is the development of a software tool for building stock categorization of historic districts for energy retrofitting, based on data available or requiring little field work and that provides high representativeness results with a reduced number of typologies

The buildings stock categorization is based on a modelling strategy based on sample buildings. The described method for building stock categorization proposes a reduced an easily acquired set of parameters (use, number of facades, year of construction and level of protection) that gives optimal balance between the number of typologies and the represented percentage



Figure 6: Geographical distribution of typologies and categorization results

of the building stock (in the case of Santiago de Compostela 8 typologies represent the 86,55% of the residential buildings).

The method described is feasible and affordable for the implementation in a web-based tool, which partially automatizes the process and provides the user an easy and intuitive way for the identification of building typologies. The categorization tool is based on a 3D city model which provides some of the required geometric data (i.e. volume, number of façades) while other required data can be obtained from public sources and can be added to the model almost automatically. The k-means clustering algorithm has been adapted in order to optimize the identification of categorization criteria (intervals and limits) which provides good results in the implemented scenario.

The result of modelling based on sample buildings facilitates the estimation of the energy performance of a district with a good balance between the amount of information needed and the accuracy of the results obtained. The modelling process based on sample buildings and an urban 3D model is a good starting point for initial references and estimates that can be incrementally completed for more accurate results in the future.

The described categorization method is applicable to other application domains (e.g. vulnerability to climate change) requiring minor adaptations, especially with regard to criteria for the selection of categorization parameters. A potential future work area is also the improvement of the method and automation of sample buildings selection.

BIBLIOGRAPHY

- [1] A. R. Amorrortu, E. B. Sánchez, and V. S. Zabala, "Edificios de balance energético positivo," *Dyna*, vol. 85, no. 9, pp. 746–759, 2010.
- [2] M. Batty, "Urban modeling," in *International Encyclopedia of Human Geography*, R. Kitchin/Nigel, Ed. Oxford: Elsevier, 2009, pp. 51–58.
- [3] M. Kavgic, A. Mavrogiani, D. Mumovic, A. Summerfield, Z. Stevanovic, and M. Djurovic-Petrovic, "A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector," *Build. Environ.*, vol. 45, no. 7, pp. 1683–1697, 2010.
- [4] R. Nouvel, M. Zirak, H. Dastageeri, V. Coors, and U. Eicker, "Urban Energy Analysis Based on 3D City Model for National Scale Applications," in Presented at the IBPSA Germany Conference, 2014, vol. 8.

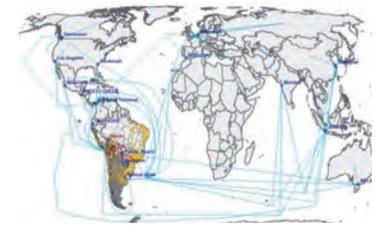
- [5] T. Krüger and T. Kolbe, "Building analysis for urban energy planning using key indicators on virtual 3D city models—the energy atlas of Berlin," *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. Vol. XXXIX-B2*, 2012. XXII ISPRS Congr. 25 August – 01 Sept. 2012, Melbourne, Aust., vol. XXXIX, pp. 145–150, 2012.
- [6] A. Egusquiza, A. Gandini, J. L. Izkara, and I. Prieto, "Management and decision-making tools for the sustainable refurbishment of historic cities," *V Congr. Latinoam. REHABEND 2014 sobre Patol. la Construcción, Tecnol. la Rehabil. y Gestión del Patrim.*, 2014.
- [7] A. Parekh and P. Eng, "Development of archetypes of building characteristics libraries for simplified energy use evaluation of houses," in *In Proceedings of the Ninth International Building Performance Simulation Association Conference (IBPSA)*, 2005.
- [8] Mata, É. ; Sasic Kalagasidis, A. ; Johnsson, F. "A modelling strategy for energy, carbon, and cost assessments of building stocks.". *Energy and Buildings*, vol. 56 pp. 100- 108, 2013
- [9] L. Ross, J. Bolling, J. Döllner, and B. Kleinschmit, "Enhancing 3d city models with heterogeneous spatial information: Towards 3d land information systems," *Adv. GIScience*, pp. 113–133, 2009.
- [10] F. Biljecki, J. Stoter, H. Ledoux, S. Zlatanova, and A. Çöltekin, "Applications of 3D City Models: State of the Art Review," *ISPRS Int. J. Geo-Information*, vol. 4, no. 4, pp. 2842–2889, 2015.
- [11] A. A. Famuyibo, A. Duffy, and P. Strachan, "Developing archetypes for domestic dwellings - An Irish case study," *Energy Build.*, vol. 50, pp. 150–157, 2012.
- [12] O. Barnett and A. Cohen, "The Histogram and Boxplot for the Display of Lifetime Data," *J. Comput. Graph. Stat.*, vol. 9, no. 4, pp. 759–778, 2000.
- [13] M. Carpenter, T. Crosbie, M. Crilly, N. Dawood, and Mhalas Amit, "Implications of open access data for low cost KPIs measuring energy efficiency," *ICT Sustain. places Int. Conf.*, 2014.
- [14] J. A. Hartigan and M. A. Wong, "Algorithm AS 136: A k-means clustering algorithm," *J. R. Stat. Soc. Ser. C (Applied Stat.)*, vol. 28, no. 1, pp. 100–108, 1979.

ACKNOWLEDGMENT

The work described in this article is partially funded by the "Energy Efficiency for EU Historic Districts' Sustainability" (EFFESUS) project, Grant Agreement Number 314678, 2012–2016, as part of the EU's FP7.

Aproximación bayesiana aplicada al reparto modal en modelos de transporte de mercancías

Caso práctico: Corredor Ferroviario Bioceánico Central



Bayesian approach to model choice analysis in freight transport models (Case study: Central Bioceanic Railway Corridor)



Óscar DeGregorio-Vicente, Beatriz González-Pérez y Miguel-Ángel Gómez-Villegas

Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Matemáticas. Dpto Estadística e Investigación Operativa Et Instituto de Matemática Interdisciplinar (IMI). Plaza de Ciencias, 3 - Ciudad Universitaria - 28040 Madrid. Tfno: +34 91 3944531

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8126> | Recibido: 22/08/2016 • Evaluado: 24/08/2016 • Aceptado: 24/05/2017

ABSTRACT

- Transport planning requires tool to model the current and future situation of an infrastructures network. In this way, different scenarios of passenger flows, vehicles or freight can be predicted and serve as information for decision making. One of these tools are the so called "Demand models", among which the four steps models (Generation/attraction, Distribution, Modal choice, Network assignment) is a remarkable example for its widespread use. This paper presents a novel Bayesian approach to the third step of a demand transport model. Traditional discrete choice models are the ones most commonly used at this purpose, although other methods such as neural networks have been used by some authors. A Bayesian network is proposed as tool for estimating the decisions made by users when they face the need to choose which transport alternatives to use for sending cargo in a case study corresponding to the Central Bioceanic Corridor in South America. The results from fitting a logit model and a Bayesian network are compared and show the Bayesian network to be a promising tool to be applied in this kind of applications.
- **Key Words:** Transport Model, Discrete choice model, Logit, Bayesian Network.

RESUMEN

La Planificación de los Transportes de una determinada zona necesita herramientas que permitan representar o modelizar, de forma analítica, la situación actual y futura de su red de infraestructuras. De esta manera, se pueden estimar, para diferentes escenarios, los flujos de pasajeros, vehículos o mercancías que habrá en dicha red.

Una de estas herramientas son los denominados Modelos de Demanda, de entre los que destaca el modelo clásico de 4 etapas (Generación-Atracción, Distribución, Reparto o elección modal y Asignación).

El presente artículo muestra una novedosa aproximación a la tercera etapa, que es la correspondiente a la decisión del modo de transporte a la que se enfrenta la unidad de decisión dentro de un conjunto discreto de alternativas. Tradicionalmente, los modelos de elección discreta han sido los más utilizados para esto, aunque existen otros métodos, como las redes neuronales, que también han sido utilizadas por otros autores. Las redes bayesianas se proponen como herramienta alternativa para la elección modal, tanto para pasajeros como para mercancías, y para este último caso,

se presenta un caso de estudio basado en el Corredor Ferroviario Bioceánico Central en Sudamérica.

Los resultados obtenidos permiten comparar un modelo logit y una red bayesiana, y muestran cómo la aproximación bayesiana surge como una herramienta prometedora en este tipo de aplicaciones.

Palabras Clave: Modelos de Transporte, Modelo de Elección Discreta, Logit, Red Bayesiana.

1. INTRODUCCIÓN

El análisis de inversiones en grandes infraestructuras de transporte requiere la estimación, con largos horizontes de análisis, de cómo los usuarios de dichas redes (sean pasajeros o mercancías) harán uso de las mismas, si escogen unas alternativas frente a otras y, en definitiva, de si un nuevo proyecto supone una mejora real para el conjunto, de tal manera que compense los altos costes de inversión a los que se ha de hacer frente. Para lograrlo pueden someterse a diversas fuentes de incertidumbre.

Al respecto, un aspecto clave en el desarrollo de dichos modelos es la estimación del reparto modal entre una serie de alternativas. Los modelos de elección discreta estiman cómo distintos decisores escogen entre una serie de opciones que pueden corresponder a distintos modos de transporte, combinaciones de modos o configuraciones de un modo de transporte en función de un conjunto de factores que determinan la elección [1].

En el transporte de mercancías, los dos factores más determinantes en la elección modal son tiempo y coste de viaje por cada opción, aunque debido a la disparidad entre los criterios seguidos por usuarios distintos, se considera adecuado el uso de modelos probabilísticos frente a modelos determinísticos, de forma que se contemple la variabilidad en las decisiones de los usuarios del medio de transporte. Por tanto, el modelo de elección proporciona la probabilidad de uso de una alternativa, y esa probabilidad es usada en un modelo de transporte (agregado usualmente), como la proporción de usuarios que toman dicha alternativa.

Los modelos más habitualmente empleados en la práctica son modelos de tipo *Multinomial Logit (MNL)*, pueden verse en [1], aunque hay variaciones que parten de hipótesis más complejas, como los modelos Logit Anidados (*Nested Logit Models*) pueden consultarse en [4].

Según la principal referencia bibliográfica sobre modelización de transporte [1], por un lado tenemos que:

- La elección del modo de transporte dentro de la red cons-

truida, representa el elemento más importante en la planificación de los transportes y en la toma de decisiones;

- Tanto para modelos de pasajeros como de mercancías, es la etapa crucial de cara a las proyecciones a futuro;
- Influye en la eficiencia general del sistema de transportes, en la cantidad de espacio urbano dedicado a las funciones del transporte, así como en el conjunto de alternativas disponibles;

Y por otro lado, tenemos que:

- La probabilidad de que los individuos elijan una determinada alternativa es función de sus características socioeconómicas y de la relativa atractividad de la alternativa;
- Para representar la atractividad de la alternativa se utiliza el concepto de utilidad (artificio teórico, lo que el individuo intenta maximizar). Las alternativas *per se* no producen utilidad, sino que la utilidad se deriva de las características de las alternativas y de las características de los individuos [2]. La utilidad medible u observable se define generalmente como una combinación lineal de variables;
- Hay que comparar el valor de las utilidades de cada alternativa y transformarlos en un valor de probabilidad entre 0 y 1, utilizando habitualmente transformaciones matemáticas entre las que destacan los modelos Logit (Ec. (1)) y Probit (Ec. (2)):

$$\text{Logit: } P_1 = \frac{\exp(V_1)}{\exp(V_1) + \exp(V_2)} \quad (1)$$

$$\text{Probit: } \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} V_1 - V_2 + x_1 \frac{\exp\left\{-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left[\left(\frac{x_1}{\sigma_1}\right)^2 - \frac{2\rho x_1 x_2}{\sigma_1 \sigma_2} + \left(\frac{x_2}{\sigma_2}\right)^2\right]\right\}}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}} dx_2 dx_1 \quad (2)$$

Siendo los más utilizados de estos los siguientes:

- Multinomial Logit (MNL) pueden verse en [1], Ec. (3):

$$P_{iq} = \frac{\exp(\beta V_{iq})}{\sum_{A_j \in A(q)} \exp(\beta V_{jq})} \quad (3)$$

- Hierarchical Logit (HL), o Modelo Logit Anidados, que pueden verse en [3] y [4], Ec. 4:

$$\text{con } P(d, m) = \frac{\exp(\beta(V_d + V_d^*)) \exp(\lambda V_{dm})}{\sum_d \exp(\beta(V_d + V_d^*)) \sum_m \exp(\lambda V_{dm})} \text{ con } V_d^* = \left(\frac{1}{\lambda}\right) \log \sum_m \exp(\lambda V_{dm}) \quad (4)$$

Pero, según [1]:

- "Toda esta teoría se basa en la hipótesis de que la unidad de decisión, el usuario *ideal* es racional, egoísta, y sus gustos *nunca* cambian, maximizando su utilidad mediante análisis cuidadosos y reflexivos."
- "Sin embargo, el usuario *real* es parcialmente racional, pero también es emocional y colaborador. No puede usar *todas* las alternativas, por lo que usa reglas heurísticas para decidir:
 - Le importan más los cambios que los valores absolutos.
 - Tiene una sensibilidad decreciente a los cambios de utilidad.
 - Es enemigo de las pérdidas.
 - No reacciona inmediatamente."

Dicho esto, dada la incertidumbre y la información a priori en la toma de decisiones por el decisor, ¿por qué no plantear otro tipo de modelos para analizar la elección de alternativas?, más allá de modelos MNL o HL, optimizando la etapa de reparto modal utilizando redes Bayesianas (RB), dados los buenos resultados de las mismas en los últimos años en diferentes trabajos de investigación, y dada la relevancia de esta etapa en los modelos de transporte.

Este artículo presenta una aproximación novedosa al problema de la modelización del reparto modal mediante la aplicación de RB aunque recoger todas las citas es prácticamente imposible, debemos citar a [20], donde están contenidas las RB asociadas a la distribución multinomial y [21] donde pueden verse distribuciones más generales aplicadas a este tipo de redes.

2. METODOLOGÍA Y CASO DE ESTUDIO

2.1. METODOLOGÍA

Si bien los usuales modelos matemáticos tienen una larga trayectoria y una base sólida, a la hora de encontrar soluciones al problema de la elección discreta, existen otro tipo de aproximaciones diferentes a las frecuentistas que pueden dar lugar a mejores resultados, y este es el caso de las aproximaciones bayesianas.

Las RB surgen en la década de los 80, derivadas de las investigaciones que desde los 70 se venían haciendo en inteligencia artificial (IA) con los sistemas expertos, programas capaces de simular e incluso sustituir en algunas ocasiones a los razonamientos humanos.

El propio término de "Redes Bayesianas" se le atribuye en estos años, en concreto, en el año 1985 a Judea Pearl véase [5], para hacer hincapié en tres aspectos fundamentales:

- El carácter a menudo subjetivo de la información de entrada;
- La dependencia del condicionamiento mediante el *teorema de Bayes* como base para la actualización de la información;
- La distinción entre los modos causales y probatorios de razonamiento, lo que subraya Thomas Bayes en un documento publicado póstumamente en 1763 [6].

A finales de 1980 los textos seminales *Razonamiento Probabilístico en Sistemas Inteligentes* [7] y *Razonamiento Probabilístico en Sistemas Expertos* [8] resumen las propiedades de las RB y ayudan a considerar a las mismas como un campo de estudio.

Siguiendo esta línea de investigación, durante las décadas de los 80 y 90, se puso de manifiesto que la IA no debía únicamente imitar el comportamiento racional humano, sino colaborar con éstos en las tomas de decisiones a través de sinergias. Es decir, transmitir conocimiento del proceso lógico seguido para resolver un problema y obtener una solución.

Al respecto, en el año 1993, [9] dirige una cita a los editores de la revista *Knowledge Acquisition*, quienes deciden publicarla, en la que indica: "La cuestión clave no es la IA, sino cómo mejorar la inteligencia natural con la ayuda de los sistemas basados en conocimiento."

Dicho esto como precedente contextual, para explicar la importancia que en las últimas décadas están teniendo las RB, éstas se definen como un modelo gráfico probabilístico, un grafo acíclico dirigido (GAD) que representa: (1) cualitativamente, un conjunto de variables, llamadas nodos, y sus dependencias condicionales probabilísticas, codificadas en sus arcos, (2) cuantitativamente, que recogen las distribuciones de probabilidad condicionadas de cada nodo dado sus padres. Cada nodo puede ser un parámetro, una variable aleatoria o una hipótesis.

- Para la especificación de la información cualitativa de la RB se utiliza un DAG, que se denota $D = (V,E)$, donde cada uno de los nodos de D representa los elementos del problema $X = \{X_1, \dots, X_n\}$, siendo por tanto $V = \{X_1, \dots, X_n\}$; y las aristas dirigidas que están en E muestran las relaciones de tipo causal, siendo él o los nodos padre, la causa, y él o los nodos hijos, el efecto.
- Para la especificación de la información cuantitativa se tiene un conjunto de distribuciones de probabilidad condicionada $P = \{p(x_1|pa(x_1)), \dots, p(x_n|pa(x_n))\}$, de forma que para cada variable $X_i \in X$ se tendrá la distribución de probabilidad condicionada de X_i dada la ocurrencia de sus padres $pa(X_i)$ en el grafo D , denotada por $p(x_i|pa(X_i))$.

En resumen, formalmente, uniendo los dos conceptos, una RB está formada por el par (G,P) , donde G es un DAG formado por un nodo para cada variable aleatoria de $X = \{X_1, \dots, X_n\}$, y arcos que representan la estructura de dependencia probabilística entre ellas, $P = \{p(x_1|pa(x_1)), \dots, p(x_n|pa(x_n))\}$ es un conjunto de n distribuciones de probabilidad condicionadas, y $pa(x_i)$ es el conjunto de padres del nodo X_i en G .

Es decir, un DAG es una RB respecto a un conjunto de variables, si el conjunto de la distribución de probabilidad de las variables nodo puede ser escrito como el producto de la distribución local de cada nodo y sus padres como la siguiente factorización [10], Ec. (5):

$$P(x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n P(x_i | \text{padres}(x_i)) \quad (5)$$

Si hay un arco desde el nodo A hacia el nodo B, A es llamado padre de B y B es un hijo de A. El conjunto de nodos padre de un nodo x_i se denota como "padres (x_i)".

Esta última ecuación (5) es una distribución de probabilidad condicionada por cada variable aleatoria. O lo que es lo mismo, cada nodo X_i es una variable condicionada por sus padres, lo que establece una relación directa entre la parte cualitativa y la parte cuantitativa de la red, ya que es el GAD el que permite determinar las distribuciones de probabilidades condicionadas que se consideren en la factorización de la distribución de probabilidad conjunta. Es decir, a un GAD le corresponde una factorización de la distribución de probabilidad conjunta de una RB.

A partir de esta propiedad, existen algoritmos eficientes que realizan inferencia y aprendizaje en RBs pueden verse en [11] y [12]. Entre las principales características de las RB se deben destacar:

- 1) Cumplen las propiedades de *separación*, que determinan estructuras de independencia (y dependencia) condicionada. Esto es, a partir del concepto de *evidencia* o valor exacto conocido que toma una de las variables (nodos), tal que al introducir esta información en la red, afecta a la incertidumbre del resto de las variables, se estudia cómo se traslada la información de dicha evidencia a lo largo de una red, es decir, los criterios de separación que se cumplen en el grafo; las relaciones de independencia o dependencia condicionada entre las variables, que dependerán del tipo de conexión que se considere:
 - a) conexión **serial**, se transmite información de la evidencia, excepto que dicha información esté contenida en el nodo intermedio, (A y C *separados* dado B);
 - b) conexión **divergente**, la información fluye a través de la red, excepto si la evidencia se encuentra en el nodo padre, ya que queda bloqueada la comunicación entre los nodos hijos, (B y C *separados* dado A);

- c) conexión **convergente**, la información puede ser transmitida a través de la red sólo si se tiene la evidencia sobre el nodo hijo, o un descendiente de éste, (A y B *conectados* dado C);
- 2) Cumplen la propiedad de Markov si y sólo si, cada nodo X_i es condicionalmente independiente de sus no descendientes, $nd(x_i)$, dado sus padres, $pa(x_i)$ [13]. Es decir,

$$P(x_i | pa(x_i), nd(x_i)) = P(x_i | pa(x_i)) \quad (6)$$

En la siguiente figura (1) se representan gráficamente estas propiedades.

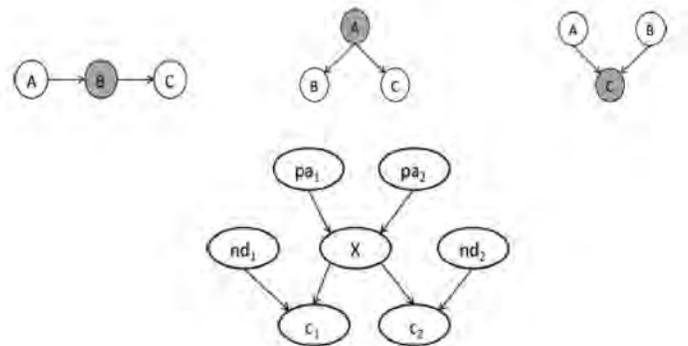


Fig. 1: a) conexión serial, b) conexión divergente, c) conexión convergente y d) Propiedad de Markov

Esta propiedad, permite definir una RB de forma similar a la Ec. (5), a través de los siguientes teoremas:

- teorema 1: todo par (G,P) que cumple la propiedad de Markov, constituye una red Bayesiana.
- teorema 2: toda red Bayesiana formada por el par (G,P) , cumple la propiedad de Markov.

Conclusión, considerando recíprocos estos dos teoremas, se puede concluir que toda RB definida por el par (G,P) , cumple dos propiedades equivalentes: la factorización presentada en Ec. (5) y la de Markov presentada en Ec. (6).

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones de las RB, en relación a la modelización de transporte, cabe destacar en los últimos años, por citar algunos, los trabajos realizados:

- para la estimación de matrices de origen-destino de viajes (matrices OD), a partir de la información de placas de matrículas en flujos vehiculares, o a partir de flujos parciales de tráfico dada una ed urbana. La tesis doctoral [14] contiene ejemplos aplicados a la red viaria de Nguyen-Dupuis, a la red viaria de Ciudad Real y a la del Estado de Vermont. Consiguiendo dicho trabajo
- para la estimación de matrices origen-destino de viajes (matrices OD), a partir de la información de placas de matrículas en flujos vehiculares, o a partir de flujos parciales de tráfico dada una red urbana la tesis doctoral de Maria Nogal Macho [14] considerando ejemplos aplicados la red viaria de Nguyen-Dupuis, a la de Ciudad Real y a la del Estado de Vermont. Consiguiendo dicho trabajo de Tesis Doctoral el 1er Premio Internacional Abertis en el año 2012.
- para el análisis de decisión en diferentes escenarios de transporte, el trabajo [15], explica en su capítulo 3, un problema de reparto postal considerando una serie de variables de partida que son incluidas en una red bayesiana obteniendo unos resultados esclarecedores;

- el trabajo [16] contiene la construcción de modelos de predicción de flujos de tráfico en los arcos de una red dada, para estimar matrices OD, así como para encontrar la mejor ubicación para los puntos de conteo de tráfico con el objetivo de que las Administraciones (locales, regionales y nacionales) consigan una mejor gestión de la movilidad en términos globales.

Por tanto, si bien históricamente se ha buscado la estimación de flujos como una dirección clara de investigación, el presente artículo se dirige más hacia la utilización de las RB para mejorar la bondad de los resultados obtenidos en la etapa del reparto modal, de los modelos clásicos de transporte de cuatro etapas: 1) Generación/Consumo de carga, 2) Distribución de carga, 3) Reparto modal y 4) Asignación a red.

2.2. CASO DE ESTUDIO

Con el fin de poner de manifiesto la aplicación de nuestro método se ha utilizado el Corredor Ferroviario Bioceánico Central (CFBC) (Fuente: Modelo de Transportes del estudio "Análisis de prospectiva comercial, mercado y alternativas logísticas" con número de préstamo BO-L1056-1), Figuras 2 y 3, pretende conectar las redes ferroviarias oriental y occidental de Bolivia, lo cual permitiría un continuo en dicha red uniendo océano Atlántico y Pacífico. Ambas redes bolivianas están separadas por la cordillera de los Andes y esta infraestructura busca conectar el altiplano andino occidental, a 4.000m de altura, y la zona oriental de Bolivia a unos 600m de altura, conectada a su vez a Brasil y Argentina. De esta forma se podrá configurar un corredor ferroviario de costa a costa de gran interés económico.

Especialmente, es de suma importancia para las regiones más interiores de Sudamérica, ya que sus comunicaciones con los puertos más cercanos son lentas y costosas, y por ello constituyen un impedimento para el desarrollo económico de la región.

El trabajo descrito en este artículo parte del modelo de transporte de 4 etapas desarrollado en dicho proyecto para proporcionar estimaciones de los flujos de mercancía y pasajeros que harán uso de dicho corredor frente a las alternativas existentes. Para mercancía, los principales modos en competencia con el ferroviario, por agregación en la cadena de transporte, son la carretera y la hidrovía Paraguay-Paraná. Una descripción completa puede leerse en [17] si bien este artículo se centra en la problemática del transporte de mercancías ya que es el de mayor interés para el CFBC.

2.2.1. Alternativas de elección

El problema de elección modal en este proyecto considera como alternativas de transporte las combinaciones de puertos de

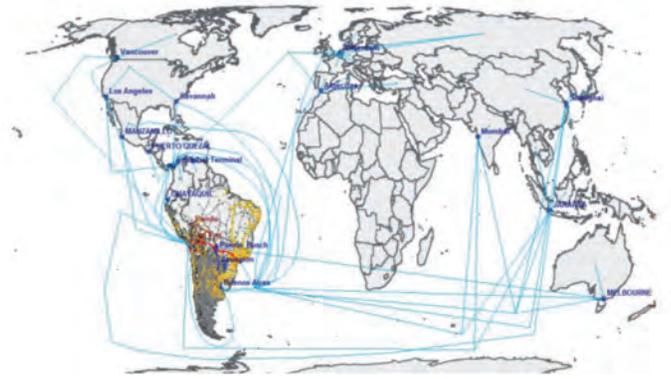


Fig. 3: Captura de pantalla del modelo de transportes (mundial)

importación/exportación, junto con los modos de transporte hasta el puerto. No todas las combinaciones entre opciones son viables en la práctica, por lo que un primer paso consistió en identificar las combinaciones de alternativas factibles.

La siguiente tabla (I) muestra las alternativas disponibles, combinación de puerto y modo, para las mercancías de tipo graneles y para la mercancía contenerizada.

Alternativas			
Puerto	Modo	Graneles	Contenedores
Arica	C	Sí	Sí
Arica	MM	No	No
Ilo	C	Sí	Sí
Ilo	MM*	Sí	Sí
Iquique	C	Sí	Sí
Antofagasta	C	Sí	No
Antofagasta	MM	Sí	No
Pto. Busch	C	Sí	Sí
Pto. Busch	MM	Sí	Sí
Pto. Suarez	C	Sí	Sí
Pto. Suarez	MM	Sí	Sí
Buenos Aires	C	Sí	Sí
Santos	C	Sí	Sí
Santos	MM	Sí	Sí

*Esta alternativa no está disponible en la actualidad sino que será fruto de la construcción del CFBC.

Tabla I: Alternativas disponibles en el modelo (C=carretera, MM=multimodal carretera/tren)

2.2.2. Muestra de datos

Para realizar el ajuste de los modelos de elección, se partió de la mayor muestra disponible que permite estimar la distribución



Fig. 2: Mapa propuesto para el CFBC

geográfica de los movimientos de carga en Bolivia, que es la base de datos del Instituto Nacional de Estadística (INE) boliviano para comercio exterior. Dicha base de datos contiene registros de exportaciones e importaciones identificando las siguientes variables:

- Productos agrupados por diversas categorías (se han empleado las categorías de sección NANDICA de cuatro dígitos y la clasificación de principales productos).
- Departamento de origen o destino.
- País de origen o destino de importación o exportación.
- Vía de salida, que permite identificar a través de qué puerto se envía la carga en aquellos envíos a destinos internacionales de larga distancia.
- Modo de salida, que permite identificar si se está empleando carretera, ferrocarril o hidrovía.

Esta información en conjunto con el modelo de costes y tiempos implementado con el software de modelización macroscópica TransCad (Caliper Corp. – www.caliper.com), permite analizar los modos de salida adoptados en relación con los costes y tiempos que implica cada opción. Para ello se combinaron tablas de importaciones y exportaciones descargadas del INE boliviano con las matrices OD de costes y tiempos obtenidas con el modelo de transporte. La tabla de datos de exportaciones empleada para el ajuste de los modelos de elección contiene un total de 466 registros y la de importaciones 4.333.

2.2.3. Calibración del MNL

Realizada con el software estadístico R por ser la herramienta estadística con mayor variedad de librerías de programación y técnicas de este tipo desarrolladas por investigadores. Los valores de los parámetros ajustados se omiten en este artículo por estar sujetos a cláusulas de confidencialidad del proyecto, pero en la tabla siguiente puede comprobarse la significación de los parámetros de los modelos. Se consideraron tres tipos de parámetros en el modelo:

- Un parámetro de efectos fijos asociado al puerto.
- Un parámetro de efecto del coste por cada tipo de mercancía.
- Un parámetro de efecto del tiempo por cada tipo de mercancía.

Tipo de Carga	Parametro	p-valor
Contenedores	Puerto Arica	0.0000
Contenedores	Coste	0.0000
Contenedores	Tiempo	0.0000
Graneles Sólidos Sucios	Coste	0.0000
Graneles Sólidos Sucios	Tiempo	0.0000
Graneles Sólidos Limpios	Tiempo	0.0001
Graneles Líquidos	Coste	0.0000

Tabla II: Parámetros de la función de utilidad con el p-valor del test de significación

Entrada	Variable	Descripción
Tiempo	$T_k = t_k - \min_k t_k$	Diferencia de tiempo con respecto al tiempo de la mejor alternativa k .
Coste	$C_k = c_k - \min_k c_k$	Diferencia de coste con respecto al coste de la mejor alternativa k .
Flujo de mercancía por año	$F_{i,j,m}$	Flujo de mercancía del origen i al destino j para la mercancía m .
Precio FOB	$FOB_{i,m}$	Precio FOB del producto en el punto de origen
Proporción de uso de la alternativa	$p_{m,i,j,k}$	Proporción de mercancía del tipo considerado entre el origen i y el destino j que hacen uso de la alternativa considerada k .

Tabla III: Variables para la red Bayesiana

Los parámetros de la función de utilidad que no mostraron ser estadísticamente significativos en el test de significación fueron eliminados del modelo hasta seleccionar los modelos indicados, Tabla II.

Resumiendo la tabla anterior, en el ajuste se observó, con la información utilizada, que el parámetro relativo al puerto de Arica resultó ser estadísticamente significativo ya que este puerto ofrece instalaciones especialmente aptas para el tráfico de contenedores que no se explican sólo en término de tiempos y costes de acarreo. Para los graneles sólidos limpios, sólo el tiempo se encontró como factor significativo, ya que se trata principalmente de productos agrícolas para los cuales los tiempos de viaje son muy importantes. Para los graneles líquidos (principalmente combustible) el principal factor de decisión se observó que era el coste.

A partir de este análisis, los modelos de elección MNL fueron implementados en el modelo de transporte y con ello se obtuvieron las estimaciones de asignación a red relativas al reparto modal estimado. Ver Figura 4 siguiente:

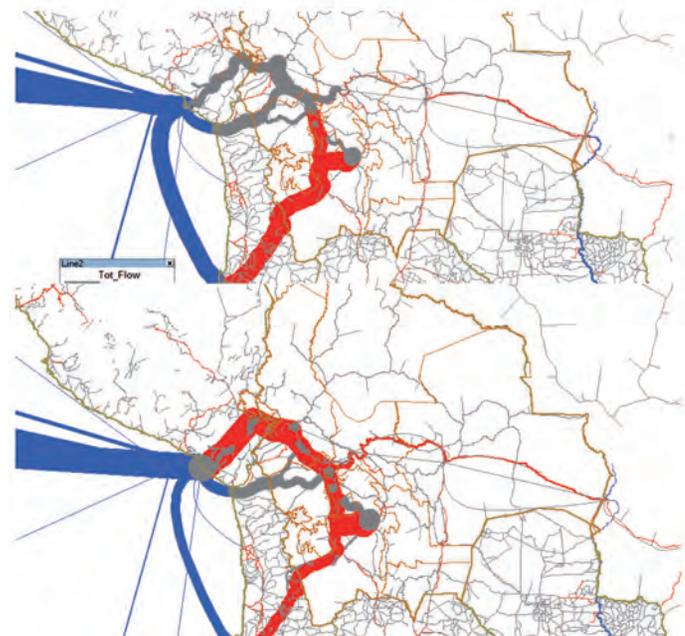


Fig. 4: Ejemplo de dos capturas de pantalla del modelo de transporte que muestra asignaciones para un producto, comparativa de 2 escenarios-hipótesis considerados por modos (rojo: tramos ferroviarios; azul: mar; gris: carretera)

2.2.4. Calibración de la RB

A partir del mismo conjunto de datos usado para los modelos MNL en R, empleando las siguientes variables de red:

- Tiempo
- Coste
- Flujo de mercancía por año
- Precio FOB (Free On Board) del producto
- % de reparto por alternativa.

Una diferencia con respecto a la codificación empleada para el ajuste de los modelos MNL es que en ellos se desarrolló un modelo independiente para cada tipo de mercancía mientras que para la red bayesiana se empleó una sola red para todas, aunque se incluyó el factor precio FOB como indicador del tipo de mercancía (los graneles tienen bajos precios FOB y los contenedores valores altos).

La codificación de las variables se explica en la Tabla (3):

El proceso de calibración siguió los siguientes pasos:

1. Aplicación del test de Doornick-Hansen de normalidad que mostró que las variables no se ajustaban adecuadamente a una distribución Normal.
2. Transformación de los datos mediante la transformación "Nonparanormal" propuesta por Liu [18].
3. Aplicación de nuevo del test de Doornick-Hansen a la muestra transformada para verificar que efectivamente la transformación había proporcionado una muestra con distribución Normal.
4. Como restricción para la calibración de la red bayesiana se incluyó que los nodos correspondientes a las proporciones no pudieran ser orígenes de los links del grafo. Esto se debe a que estas variables han de ser explicadas en todos los casos a partir del resto de variables de la red.
5. Aplicación del algoritmo max-min hill-climbing (mmhc) de Tsamardinos [19], para la calibración de la red bayesiana.

El resultado de la calibración de la RB proporcionó los resultados de la Tabla IV (ponerlo en castellano).

• Nodes:	42
• Arcs:	61
• Undirected arcs:	0
• Directed arcs:	61
• Average Markov blanket size:	4.86
• Average neighbourhood size:	2.90
• Average branching factor:	1.45
• Learning algorithm:	Max-Min Hill-Climbing
• Constraint-based method:	Max-Min Parent Children
• Conditional indep. test:	Pearson's Correlation
• Score-based method:	Hill-Climbing
• Score:	BIC (Gauss.)
• Alpha threshold:	0.05
• Penalization coefficient:	3.061246
• Tests used in the learning procedure:	4504
• Optimized:	TRUE

Tabla IV: Resultados de la calibración de la RB

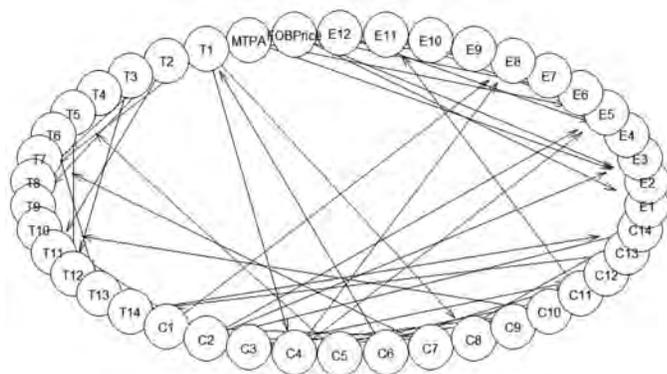


Fig. 5: Grafo de la Red Bayesiana

ALTERNATIVA	ECM		Error Máximo	
	MNLogit	RB	MNLogit	RB
ANTOFAGASTA_Carretera	15.08%	8.50%	99.48%	37.04%
ANTOFAGASTA_MM	16.26%	7.40%	93.73%	39.53%
ARICA_Carretera	73.71%	29.48%	100.00%	57.00%
ARICA_MM	19.67%	4.05%	41.66%	48.81%
ILO_Carretera	14.05%	12.26%	100.00%	46.24%
IQUIQUE_Carretera	27.10%	13.27%	100.00%	39.66%
IQUIQUE_MM	5.64%	2.20%	10.24%	46.96%
BUENOS AIRES_Carretera	19.56%	15.83%	100.00%	47.30%
PTO.SUAREZ_Carretera	6.84%	3.55%	95.49%	46.86%
PTO.SUAREZ_MM	5.03%	2.20%	90.26%	46.96%
SANTOS_Carretera	8.28%	10.27%	100.00%	48.10%
SANTOS_MM	3.78%	6.30%	10.24%	50.15%

Tabla V: Comparación entre los errores cuadrático medio y máximo cometidos en la estimación de las proporciones de cada modo de transporte para cada puerto considerado

Por otro lado la siguiente Figura 5 muestra el grafo de la RB generada, donde se observan las relaciones entre los nodos de costes ($C_1...C_{14}$) y tiempos ($T_1...T_{14}$) para las distintas alternativas ($E_1...E_{14}$), y cómo unos pocos de ellos en conjunto con los precios FOB y el flujo de mercancía por año (MTPA), explican la mayor parte de porcentajes de elección observados.

3. RESULTADOS

Los resultados de la Tabla (V) siguiente muestran el error cuadrático medio (ECM) y el error máximo cometidos en la estimación de la muestra mediante el modelo MNL y la Red Bayesiana.

Se puede apreciar que en la mayoría de alternativas de transporte, excepto en las marcadas en negrita, la red bayesiana incurre en un error cuadrático medio menor y que, además, los errores máximos son en general también inferiores. Esto es especialmente relevante en el caso de la opción de Arica por carretera y Puerto Suárez que en la actualidad son los dos puntos con mayor volumen de importación y exportación del país.

5. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos se pueden obtener las siguientes conclusiones.

- Los modelos de transporte son una poderosa herramienta para ayudar en la toma de decisiones relacionadas con las infraestructuras y las inversiones que un país ha de llevar a cabo a futuro.
- Los avances algorítmicos y de procesamiento de grandes cantidades de información están permitiendo que nuevas técnicas, como las RB, se postulen como alternativas reconocidas, obteniéndose resultados prometedores.
- Este artículo demuestra que los resultados y ajustes obtenidos mediante la aplicación de RB, en comparación con los modelos logit multinomiales, permite minimizar los errores y encontrar alternativas.

Este artículo describe los modelos de elección modal empleados en el estudio de mercado de un posible nuevo corredor ferroviario entre Brasil y Perú (CFBC).

Inicialmente, en el proyecto, se optó por el empleo de un modelo de elección modal (MEM), que estima las proporciones de uso de las alternativas correspondientes a combinaciones de modo de transporte y puerto, empleando como factores los tiempos y costes de cada alternativa, el puerto en cuestión, y ajustando un modelo por cada tipo de mercancía.

Como alternativa añadida se presenta una aproximación bayesiana al problema de la elección modal, que no ha sido considerada por autores previos en este tipo de problemas de modelización de transporte. La red bayesiana permite estimar las proporciones de uso de las alternativas por sus tiempos y costes y añadiendo también la variable precio FOB del producto. En el modelo MEM no se usa el precio FOB del producto sino que se ajusta un modelo independiente para cada producto.

Los resultados del ajuste muestran que la red bayesiana proporciona una estimación más precisa tanto en base al error cuadrático medio como a los errores máximos de ajuste. Estos resultados abren una nueva línea de aplicación para las RB en los problemas de elección modal en transporte. Por un lado, ofrecen posibilidades interesantes en cuanto al establecimiento de relaciones de causalidad entre las variables del problema y por otro lado, los resultados en este caso en particular, muestran que las RB ofrecen un gran potencial para ser más precisas que los modelos clásicos MEM que se han venido utilizando hasta la fecha.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Ortúzar and L. G. Willumsen, *Modelling Transport*, 4th ed. Chichester, West Sussex, 2011.
- [2] K. J. Lancaster, "A New Approach to Consumer Theory," *J. Polit. Econ.*, vol. 74, no. 2, pp. 132–157, Apr. 1966.
- [3] H. C. W. L. Williams, "On the formation of travel demand models and economic evaluation measures of user benefit," *Environ. Plan. A*, vol. 9, no. 3, pp. 285–344, 1977.
- [4] A. Daly, S. Zachary, D. Hensher, and Q. Dalvi, "Improved multiple choice models," 1978.
- [5] J. Pearl, "Bayesian Networks A Model of Self-Activated Memory for Evidential Reasoning," *Proceedings of the 7th Conference of the Cognitive Science Society*. Irvine, California, pp. 329–334, 1985.
- [6] M. Bayes and M. Price, "An Essay towards Solving a Problem in the Doctrine of Chances. By the Late Rev. Mr. Bayes, F. R. S. Communicated by Mr. Price, in a Letter to John Canton, A. M. F. R. S.," *Philos. Trans. R. Soc. London*, vol. 53, pp. 370–418, Jan. 1763.
- [7] J. Pearl and Judea, *Probabilistic reasoning in intelligent systems : networks of plausible inference*. Morgan Kaufmann Publishers, 1988.
- [8] R. E. Neapolitan and R. E., *Probabilistic reasoning in expert systems : theory and algorithms*. Wiley, 1990.
- [9] W. J. Clancey, "Notes on 'Heuristic classification,'" *Artif. Intell.*, vol. 59, no. 1, pp. 191–196, 1993.
- [10] F. V. Jensen and F. V., *Bayesian networks and decision graphs*. Springer, 2001.
- [11] R. E. Neapolitan and R. E., *Learning Bayesian networks*. Pearson Prentice Hall, 2004.
- [12] E. Castillo, J. M. Gutiérrez, and A. S. Hadi, *Expert Systems and Probabilistic Network Models*. New York, NY: Springer New York, 1997.
- [13] K. B. Korb and A. E. Nicholson, *Bayesian artificial intelligence*. Chapman & Hall/CRC, 2004.
- [14] M. Nogal Macho and María, *Métodos matemáticos para la predicción de tráfico*. Universidad de Cantabria, 2012.
- [15] A. Holland, "Bayesian networks for transport decision scenarios," pp. 325–328, 2003.
- [16] E. Sánchez-Cambronero, S., Castillo and J. M. Menéndez., *Traffic Prediction*

Models: Using Bayesian Networks and Other Tools. LAP Lambert Academic Publishing, 2011.

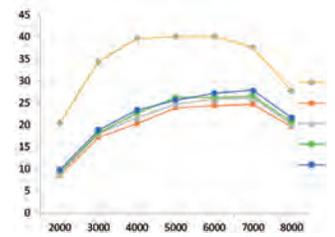
- [17] R. Rios-Prado, D. Crespo-Pereira, D. Del Rio-Vilas, N. Rego-Monteil, and Ó. De Gregorio-Vicente, "MODEL DEVELOPMENT FOR THE ASSESSMENT OF AN INTERNATIONAL RAILWAY CORRIDOR – METHODOLOGICAL OVERVIEW," in *The 15th International Conference on Harbor, Maritime and Multimodal Logistics Modelling and Simulation*, *Proceedings*, pp. 133–139. 2013.
- [18] H. Liu, J. Lafferty & L. Wasserman, "The Nonparanormal: Semiparametric Estimation of High Dimensional Undirected Graphs," *J. Mach. Learn. Res.*, vol. 10, pp. 2295–2328, 2009.
- [19] Tsamardinos, I., Brown, L.E., Aliferis, C.F. (2006). The max-min hill-climbing Bayesian network structure learning algorithm. *Machine Learning*, 65:31–78.
- [20] Ricardo A. Daziano, Luis Miranda-Moreno & Shahram Heydari, *Computational Bayesian Statistics in Transportation Modelling: From road Safety Analysis to Discrete Choice*, *Transport Reviews*, Vol. 33, 2013.
- [21] Tai-Yu Ma, *Bayesian Networks for Multimodal Mode Choice Behavior Modelling: A Case Study for the Cross Border Workers of Luxembourg*, *Transportation Research Procedia*, vol. 10, pp. 870–880, 2015.

AGRADECIMIENTOS

Al Grupo de Investigación en Métodos Bayesianos del Departamento de Estadística e Investigación Operativa de la Universidad Complutense de Madrid, por sus aportaciones en cuanto a las diferentes aplicaciones y líneas de investigación con RB. Al Grupo Integrado de Ingeniería -GII- de la Universidad da Coruña, por sus aportaciones en materia de modelización y simulación de eventos discretos. Así mismo agradecemos al editor y a cuatro referees anónimos por la cuidadosa lectura del manuscrito y por sus sugerencias que han llevado a la mejora del mismo.

Esta investigación ha sido parcialmente subvencionada por el Ministerio de Economía y Competitividad, España, grant TRA2015-65283-R y la Universidad Complutense de Madrid-Banco Santander, España, grant PR26/16-20261.

Suitable injection duration of pure ethanol fuel for motorcycle at a high compression ratio



Duración apropiada de la inyección de etanol puro para una motocicleta con una relación de compresión alta



Marthen Paloboran¹, I Nyoman Sutantra², Bambang Sudarmanta³, Renno FD Dharmawan⁴

¹Automotive Engineering Department. Universitas Negeri Makassar, Makassar 90242, South Sulawesi (Indonesia).

²Head of Automotive Laboratory. Sepuluh Nopember Institute of Technology, Surabaya 60111, East Java (Indonesia).

³Head of Fuel and Combustion Engineering Laboratory. Mechanical Engineering Department. Sepuluh Nopember Institute of Technology - Surabaya 60111, East Java (Indonesia).

⁴Undergraduate in Mechanical Engineering of Sepuluh Nopember Institute of Technology, Surabaya - 60111, East Java (Indonesia).

DOI: <https://doi.org/10.6036/8272> | Recibido: 04/01/2017 • Evaluado: 09/01/2017 • Aceptado: 04/04/2017

RESUMEN

- El consumo de gasolina en el sector del transporte continúa aumentando junto con el aumento de población y civilización. Por otro lado, las reservas de combustibles fósiles continuaron disminuyendo en las últimas décadas. Por lo tanto, se necesita un nuevo tipo de combustible derivado de fuentes de energía renovables. Además los productos de combustión de los combustibles fósiles contribuyen a la contaminación del aire y al calentamiento global, por lo que el uso de los biocombustibles es una de las soluciones para superarla. El etanol tiene un impacto positivo en la reducción de las emisiones de gases de escape y el aumento del par y la potencia. Por esa razón, el etanol será un denominador común para reemplazar la gasolina en el futuro. Este estudio investigó el efecto del E100 sobre los resultados y las emisiones de la motocicleta indonesia. La investigación realizada mediante el mapeo de la duración de la inyección a una alta relación de compresión. Los resultados muestran un aumento del par, potencia y BMEP cuando aumenta la relación de compresión. Al mapear la duración de la inyección, todos los parámetros de rendimiento aumentaron gradualmente hasta la velocidad máxima. Además, la emisión de CO y HC disminuye significativamente por este método. Sin embargo, el SFC y la eficiencia térmica del etanol son inferiores a la gasolina, como consecuencia de que el valor de calentamiento del etanol es menor que el de la gasolina.
- Palabras clave:** Biocombustible, mezclas gasolina-etanol, alta concentración, duración de la inyección, mapeo.

ABSTRACT

The gasoline consumption in the transportation sector continues to increase along with the increase of population and civilization. On the other side, the fossil fuel reserves continue to decline in recent decades. Therefore, a new type of fuel derived from renewable energy sources is needed. Moreover, the combustion products of the fossil fuels contribute to air pollution and global warming, so the use of the bio fuels becomes one of the solutions to overcome it. Ethanol has a positive impact in reducing the exhaust carbon emissions and increasing the torque and power. By that reason, ethanol will be a nominator to replace the gasoline fuels in the future. This study investigated the effect of E100 on performances and emissions of Indonesian motorcycle.

The research was conducted by mapping the injection duration at a high compression ratio. The results showed increased torque, power and BMEP when compression ratio increased. By mapping the injection duration, all the performances parameters increased gradually up to the maximum speed. Moreover, the CO and HC emission decreased significantly by this method. However, the SFC and thermal efficiency of ethanol were inferior to gasoline. It was because ethanol had lower heating value than that of gasoline.

Keywords: Biofuel, gasoline-ethanol blends, high concentration, injection duration, mapping.

1. INTRODUCTION

The combustion product of fossil fuels has caused the global warming that impacts on increased sea surface temperature. By about 73% of greenhouse gas (GHG) over the world is derived from the automotive activities. According to the data, the CO₂ emission is produced by more than 600 million vehicles of its daily operation. The gas emissions predicted will increase when the vehicles grow up to 2.5 billion in 2050 (Sergio and Otto Anderson, 2014; Mustafa Balat et al., 2008; S. Lopez et al., 2013).

Fossil fuel existence both as potential and proven reserves has decreased every year in all of regions. In March 2016, DEN has reported that 1.7 billion barrel of fossil fuels will be ready to serve the world energy consumption for 50-55 years. While the Indonesian fossil fuel by about 7.5 million barrel is estimated to be run out within 12-15 years. These are the estimates based on the assumption that there is no new discovery of oil wells anymore. The high production of CO₂ emissions in the transport sector caused by more than a half of the energy consumption is spent on this sector. As an illustration, the total use of fossil energy in Indonesia along 2014 amounted to 70.9 kiloliters, while 45.9 kiloliters used by car, truck and other automotive products (DEN, 2016).

Popularization of ethanol as a green fuel has been proven by many researchers, so the research in the bioethanol field continues to grow up until now. As an alternative energy, ethanol has been used by Nicholas Otto in 1897, previously Henry Ford has also used the fuels on the design T of Ford car since 1880 (Mustafa Balat et al., 2008; S. Lopez-Aparicio and C. Hak, 2013; Charles Wyman et al., 2004). As blend fuels with gasoline, however, the fuel has been used extensively since 1980s in Brazil. Even, the Brazil government has made a regulation that requires all gasoline

be blended with at least 20 – 25% ethanol (Milnes R et al, 2010; Rubio E. Nicolas, 2006; Larry G. Anderson, 2015).

In Indonesia, the use of ethanol as an alternative energy is being re-echoed recently, due to the use of the fuel is only about 3% until now. Indonesian government has decided the necessity of use of bioethanol by 20% in all energy consumptions in 2025. Several infrastructures are being prepared to support the government's policies including the development of research on the use of bioethanol. Unfortunately, research on the use of bioethanol in Indonesia has never been conducted as advanced as the overseas. Whereas, Indonesia already has a bioethanol plant with a big scale production, even their products have been exported to neighboring countries i.e. Thailand, Philippines, and Vietnam etc.

This paper reports the effects of E100 fuel to the engine performance and emissions at a high compression ratio. As known, the calorific value of ethanol is lower than gasoline, so enlarging the hole of injector or increasing the injection duration of ethanol is a method to achieve an equal power to gasoline. Injection duration variation method is applied in this study to determine its effect on engine performance and emissions. The variations in injection duration start from 100% to 200% with an increment of 25% at all compression ratios and engine speeds. The specific of this study is the high compression ratio of 12–13 which has never been applied to a small capacity engine of 150cc. All the data is produced in this test will be compared with the engine performance when the engine runs with gasoline fuels.

2. LITERATURE REVIEW

Research about the fuel blend of gasoline-ethanol up to 20% has been studied by many researchers successfully, where the engine does not need any adjustments at these kinds of composition (Marthen Paloboran, 2016). It is due to the fuel blend will act as an octane booster so that detonation problems can be reduced (Algariksa A. Fintas et al., 2013; Najafi G et al., 2015; B.M. Masum et al., 2015; Yang Hsi-Hsien et al., 2012; Murat Kapusuz et al., 2015; Yung-Chen Yao et al., 2013; Chan-Wei Wu et al., 2004).

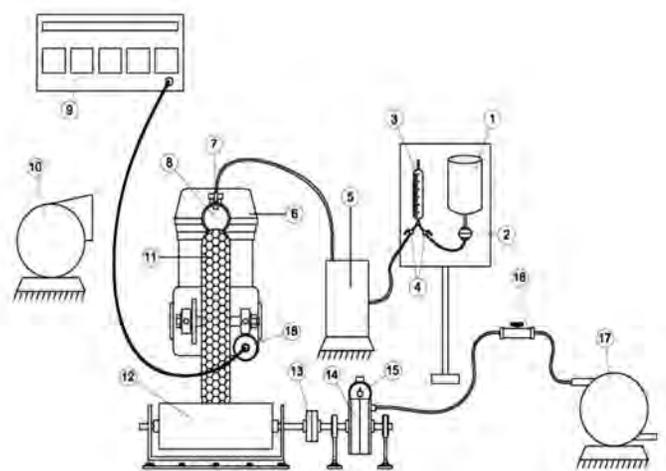
The high oxygen content of ethanol is very useful to complete combustion process in decreasing hydrocarbon emissions (C. Ananda Srinivasan and C.G. Saravanan, 2010; Costa C. Rodrigo et al., 2010; Turkoz N. et al., 2014; Turner D. et al., 2011; Sudarmanta B. et al., 2016). The oxygen in ethanol is more effective to make the combustion process in a stoichiometric (Alan C. Hansen et al., 2005). The high of the latent heat of vaporization is another property of ethanol that confers a benefit when applied in spark engine. This property will give an impact in decrease of peak of cylinder temperature and give a cool effect on the combustion chamber. Then, the NO_x emissions will decrease and air flow rate into the combustion chamber increases. When the air flow rate increases, the density of mixture will be more solid, in turn, the volumetric efficiency will increase. The most popular of ethanol advantages is the high octane number when compared to gasoline. With a high octane number, ethanol can be run in the gasoline engine by improving the compression ratio in highest. The results, the power, torque, effective pressure and thermal efficiency can be increased. Furthermore, specific fuel consumption can be reduced by increasing the compression ratio (Costa C. Rodrigo et al., 2010; Balki MK and Sayin C, 2014; Farha Tabassum Anshari et al., 2013; Chan-Wei Wu et al., 2004).

Nowadays, many researchers study the effect of combustion gasoline-ethanol blend on the performance and emissions of engine at variations in the compression ratio, such as Rodrigo and

Sudarmanta. Their studies found that the torque, power and BMEP increase if the compression ratio increases when the E22, E50 and E100 fuels are applied. However, the SFC of E22 is higher than E0 by about 0.09kg/HP-h, and the SFC will increase if the concentration of ethanol increases. It is caused by the calorific value of ethanol is lower than gasoline, so that the ethanol fuel consumption is wasteful by about 60–65% compared with gasoline (Chelik M. Bahattin, 2007; Jeuland N. et al., 2004; Dharmawan RFD, 2016).

The effect of M100, E100 and E0 fuels on the CO and HC emissions at variations in the compression ratio has been studied by Balki et al. The results show that the CO and HC emissions decrease if the compression ratio increases up to 9: 1 when M100 and E100 are burnt. However, the CO and HC emissions increase if the compression ratio is mounted on the 9.5: 1 for all of alcohol fuels. Different with Farha's study, the CO and HC emissions of E100 consistently decrease, even though the engine runs on the compression ratio of 10: 1. It is influenced by the spark timing, since the ignition timing will be advanced if the compression ratio increases. In the same thing, the ignition timing will advance if the concentration of ethanol increases. It is affected by the laminar flame speed and latent heat of vaporization of ethanol. With a high of laminar flame speed of ethanol, the combustion process of ethanol is being faster than that gasoline, so the ignition timing has to advance. Meanwhile, a high of latent heat of vaporization of ethanol will affect on a long time in ignition delay when the ignition timing is advanced. By a long time in ignition delay, the cylinder temperature decreases and volumetric efficiency increases (B. M. Masum et al., 2013; Marthen Paloboran et al., 2016).

The influence of the gasoline-ethanol blend fuels on the CO and HC emission at variations in engine load has also been investigated by Anshari et al. The results reveal that the CO and HC emissions will increase if the engine load increases. When the engine load increases, the flow rate of fuel also increases. At the same time, the mass flow rate of air is comparable with fuel in making a stoichiometric condition. Actually, the air flow rate come into the cylinder is insufficient restricted by the valve mechanism. Eventually, a part of hydrocarbons fuel is unburned and produces CO and HC emissions. Insufficient air in the combustion chamber can be overcome by installing a turbocharger on engine (Marthen Paloboran et al., 2016; Elfasakhany Ashraf, 2015).



- | | | |
|----------------|------------------|----------------------|
| 1. Fuel Tank | 7. Injector | 13. Clutch |
| 2. Filter fuel | 8. Throttle body | 14. Dynamometer |
| 3. Glass gauge | 9. Gas analyzer | 15. Torque gauge |
| 4. Valve | 10. Blower | 16. Valve |
| 5. Fuel pump | 11. Back train | 17. Water pump |
| 6. Engine test | 12. Roller | 18. Exhaust manifold |

Figure 1. Schematic diagram of experimental set-up

The low vapor pressure of ethanol is one of ethanol drawbacks in spark engine. A negative impact of these properties causing the engine is difficult to be turned on in cold conditions. Therefore, an effort is required to make the fuel to be more volatile. Installing a heater on the injector nozzle is one of methods in increasing the fuel temperature. Raising the air temperature is another method by installing a heater on along a channel crossed by the air. However, using two fuel tanks is more common to handle the problem, which the gasoline tank is used when cold starts and ethanol tank is used if engine temperature is hot (Chen RH et al., 2011; M. Clairotte et al., 2013; Mustafa Balat et al., 2008). The ethanol shortage that has not been seriously considered is the high solubility of ethanol in the water. Consequently, the engine material that made from metal is susceptible to corrosion (Jeuland N et al., 2004; Mustafa Balat et al., 2008).

3. EXPERIMENTAL TOOLS, MATERIAL AND METHODS

The engine test used in this experiment was 4 stroke engine, 1 cylinder and types of CB150R by Honda manufacturers. The compression ratio standard of engine was 11: 1, but it had been developed to 13: 1 to accommodate the use of ethanol.

Parameters	Standard
Engine type	4 Stroke, 4 Valve, 1 cylinder
Bore	63.5 mm
Stroke	47.2 mm
Displacement volume	149.48 cm ³
Compression ratio	11.0 : 1
Ignition system	Full transistorized
Maximum power	12.5kW(17 PS)/10000RPM
Maximum torque	13.1Nm(1,34kgf.m)/8000RPM
Intake valve opening	5° BTDC, lifting 1 mm
Intake valve closure	35° ABDC, lifting 1 mm
Exhaust valve opening	35° BBDC, lifting 1 mm
Exhaust valve closure	5° ATDC, lifting 1 mm
Valve Train	Chain, DOHC

Table 1: Engine specification

Compression ratio standard of engine was 11:1 which was developed up to 13:1 with applying a dome on cylinder head. While at the compression ratio of 12:1 and 12.5:1, a suitable gasket was applied on the engine. The detailed engine specifications are shown in Table 1.

The main condition in this test was a fully open throttle and speed engine varied from 2000 to 8000 rpm. Whereas the lambda value was noted according to natural conditions. The engine speed was controlled by a water brake dynamometer of DYNomite type. In this experiment, the torque was measured directly by the torque gauge on the dynamometer. Thus, the power to be calculated indicated a brake horsepower (BHP) as an actual power delivered by engine. As known, the brake horsepower is usually measured by various devices, one of them is by water brake such as in this test (Paul W. Gill, 1959).

Some thermocouples were mounted to record the coolant oil temperature, cylinder block and cylinder head of engine. A STAR-GAS 898IND was placed on exhaust manifold to detect the CO and HC emissions. As additional information that CO₂ and NOx

emissions sensor may not work properly, these emissions cannot be displayed in the discussion session. As known, however, the CO₂ and NOx emissions of pure ethanol fuels have no or less negative impact on the environment and ecosystem.

Type of gasoline used in this test has RON 92, in Indonesia it is called PERTAMAX. Whereas the ethanol has RON 110. The ethanol is produced by Energy Agro Nusantara (ENERO) Co. Ltd. Fuel consumption was noted when the engine had spent of fuel in every 25 mL. Whereas the mapping injection duration was performed to find the maximum torque at all of the compression ratios and engine speeds. Analysis of the performance and emission of engine was based on the best torque. The entire testing stages were controlled by an electronic control management by ECU SUM-IT.

4. RESULT AND DISCUSSION

Investigating the effect of injection duration on the performance and engine emissions at variations in engine speed and compression ratio is another objective of this study. Furthermore, some important results in this test are reported as below.

4.1. EFFECT OF THE E100 AND E0 ON THE PERFORMANCE OF ENGINE

Figure 2 shows the effect of E100 and E0 fuels on the BMEP at variations in the compression ratio and engine speed. The BMEP slightly increases when the engine speed increases. The maximum value is obtained by the BMEP when the engine runs with 7000 rpm at all compression ratios. If compared with gasoline, BMEP of ethanol increases by about 5, 8 and 9% at the compression ratio of 12, 12.5 and 13 respectively. In general, the BMEP is stated in the equation as follow (Heywood JB, 1988):

$$BMEP = \frac{2\pi zT}{A \times L \times i}$$

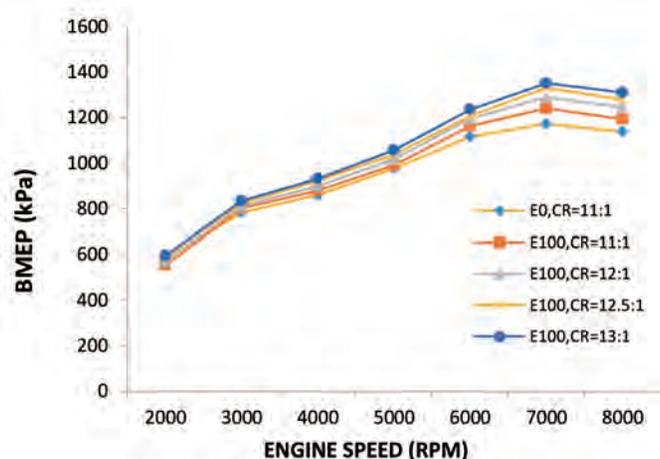


Figure 2: BMEP vs engine speed at variations in the compression ratio

Where T is torque, AxL is displacement volume (m³), is a number of crank revolutions per power stroke (for a 4-stroke engine z=2) and i is number of cylinder. The BMEP decreased in average by about 3.4% from the maximum values at all fuel and compression ratio. The decline is caused by many things, one of which is a cylinder pressure decrease when the expansion stroke is at a high speed.

Figure 3 shows the effect of E100 and E0 fuels on the power at the variation in the compression ratio and engine speed. The

power of E100 is higher than E0 by about 2.1% in the same compression ratio. The power increases steadily by about 4.9%, 7.1% and 8.4% when the compression ratio increases of 12:1, 12.5:1 and 13:1 respectively. By the mapping injection duration strategy, the power increases continuously up to the maximum speed.

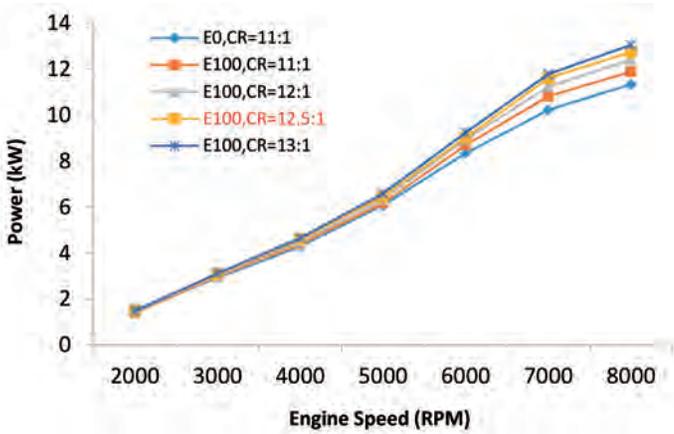


Figure 3: Power vs engine speed at variations in compression ratio

Overall, BMEP and power increase with increasing the compression ratio. The increase is contributed by the latent heat of vaporization and octane number of ethanol which is higher than gasoline. The latent HoV will be impact on increase of the density of charge. While, the octane number will be impact on the increase of cylinder pressure due to the combustion chamber has been narrowed. Mapping the injection volume is very helpful in increasing the pressure and power of engine. Since the mapping is conducted based on the maximum brake torque, thus, the injection of ethanol at each of engine speed and compression ratio will obtain the power maximum.

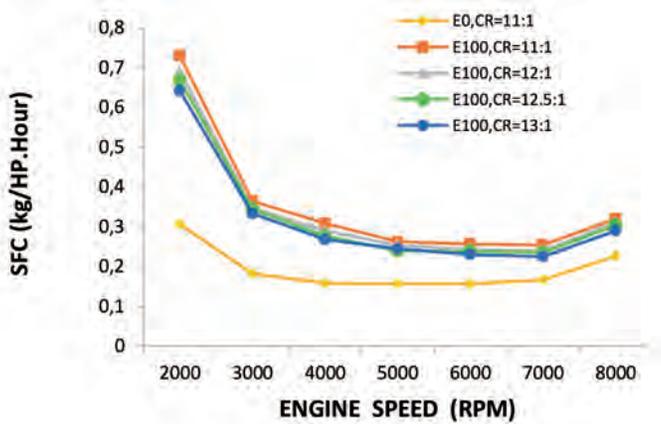


Figure 4: SFC vs engine speed at variable compression ratio

The effect of E100 and E0 fuels on the specific fuel consumption is given in Figure 4. The minimum SFC is obtained by the E0 at an engine speed of 6000 rpm, while the E100 at 7000 rpm at all of the compression ratios. The SFC of E100 is higher than E0 by 42.9% at the same compression ratio. However, the SFC can be lowered by a high compression ratio. The SFC of ethanol decreases gradually by about 2.9%, 4.6% and 6.5% at the compression ratio of 12:1, 12.5:1 and 13:1 respectively. In many studies, the SFC of E100 is higher about 60% than E0, because the heating value of ethanol is only 60% of the heating value of gasoline. In this

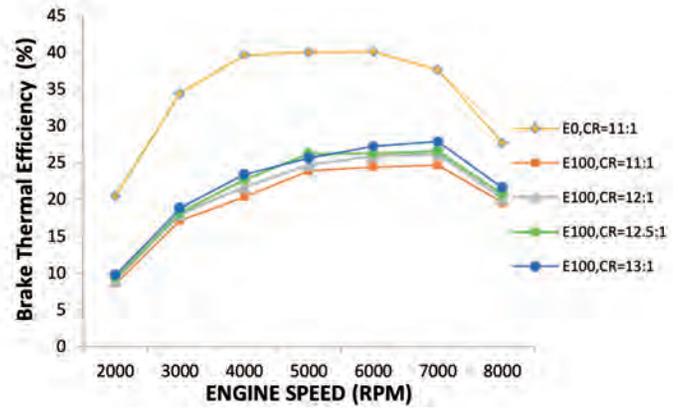


Figure 5: BTE vs engine speed at variable compression ratio

test, however, the fuel consumption decreases by 17.1% with the method of mapping the injection duration.

Figure 5 shows the influence of E100 and E0 on the brake thermal efficiency at variations in the compression ratio and engine speed. The BTE of gasoline reaches a peak value shortly at an engine speed of 4000 rpm. The BTE tends to be stable up to 7000 rpm, and eventually, the BTE decreases dramatically at a maximum engine speed. In contrast to gasoline, the BTE of ethanol rises gradually up to the engine speed of 7000 rpm. Furthermore, the BTU of ethanol decreases similarly with gasoline. The average of thermal efficiency of gasoline is about 34.3%, while the BTE of ethanol is around 19.8%, 20.8%, 21.4% and 22.0% at the compression ratio of 11, 12, 12.5 and 13 respectively. The BTE of ethanol is lower than that gasoline, because the calorific value of ethanol is lower than that gasoline. However, the BTE of ethanol can be increased by increasing the compression ratio and engine speed. In addition, a lot of frictional losses and heat loss during the engine work at 8000 rpm. By mapping the injection duration strategy, however, the increase of BTE of ethanol successfully is maintained at a high speed.

4.2. EFFECT OF THE E100 AND E0 ON EXHAUST EMISSION

Figure 6 illustrates the effect of E100 and E0 on carbon monoxide emission. The CO emission is obtained by ethanol fuels by about 26.7% lower than gasoline at the same compression ratio. These emissions decline in higher compression ratio. By increasing the compression ratio to 12, 12.5 and 13, the CO emissions decrease by around 38.8%, 50.3% and 63.7% respectively if compared with gasoline. Mapping the injection duration method has

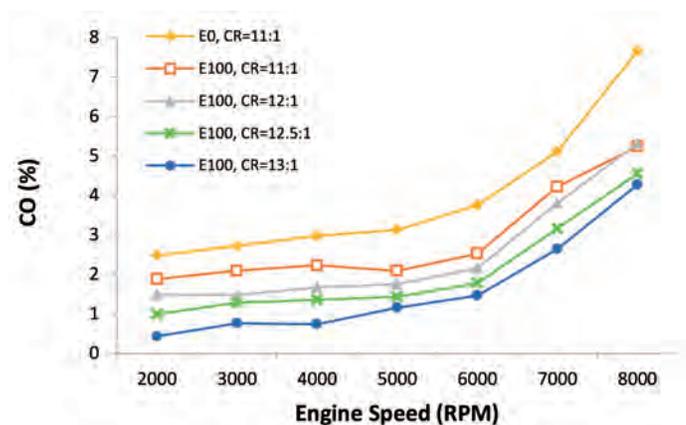


Figure 6: The CO emissions vs engine speed at variable compression ratio

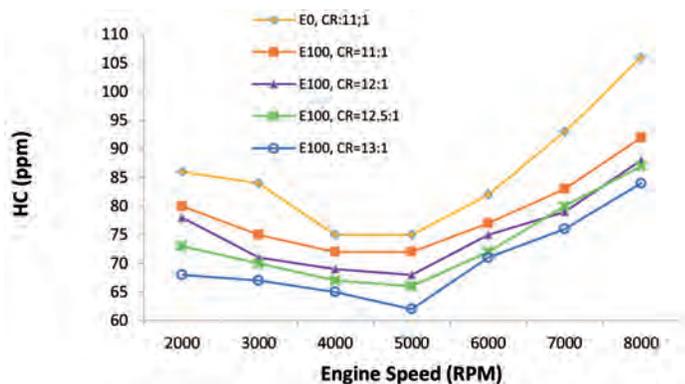


Figure 7: The HC emission vs engine speed at variable compression ratio

a significant impact on the CO emission which remains stable at 3000–6000 rpm. The high oxygen content of ethanol is a major contributor to the CO emissions of drops significantly. In addition, the high of octane number and laminar flame speed of ethanol causes the E100 burn completely than those E0.

Figure 7 shows the influence of E100 and E0 on the HC emissions at the variation of compression ratio and engine speed. The engine produces the HC emissions by about 86ppm with the gasoline fuel, but these emissions slightly decrease by 8.3% when E0 is replaced with the E100 at the same compression ratio. By increasing the compression ratio, the HC emissions gradually decrease when the engine runs with E100. In this test, the HC emissions of E100 decrease by about 12.1%, 14.3% and 18.0% at the compression ratio of 12, 12.5 and 13 respectively. The HC emission has been produced by the incomplete combustion in chamber. It is affected by a lot of things including the homogeneity of the charge, temperature of cylinder, the availability of air and the ignition timing.

CONCLUSION

The effect of E100 fuels on performances and emissions at high compression ratio with mapping the injection duration strategy has been investigated. All the results of E100 experiments will be compared with E0 fuels. These results have been summarized as follow:

- The temperature of fuel is not heated when engine runs with E100, but requires a great effort to start the engine. The air temperature on the summer in Indonesia, namely 31–33°C, has influenced the ethanol, so the fuel does not need to be heated.
- Mapping the injection duration has been identified a maximum torque at any engine speed i.e. 200% on 2000–4000 rpm, 175% on 5000–6000 rpm and 150% on 7000–8000 rpm, respectively at the compression ratio of 12. The injection volume of ethanol becomes 200% on 2000–3000 rpm, 175% on 4000–6000 rpm and 150% on 7000–8000 rpm respectively at compression ratio of 12.5. Finally, 200% on 2000–3000 rpm, 175% on 4000–5000 rpm and 150% on 6000–8000 rpm when the engine runs with compression ratio of 13. Thus, the best performance of the engine is obtained when the injection duration is applied by 150–200%. In the engine speed of 2000–4000 requires maximum injection volume, because the caloric value of ethanol is lower. On the other hand, the low of engine temperature has caused the injection of ethanol increased to overcome the initial of engine load. By increasing the engine speed and

compression ratio, the cylinder temperature will increase to resolve the low of vapor pressure of ethanol, in turn, the ethanol can be evaporated easily. According to the Celik's study, it necessitates 1.5–1.8 times more ethanol to obtain the equal energy output of gasoline.

- Thermal efficiency is given by the ratio between the output power and product of the fuel mass flow rate and the calorific value of fuel. An increase in compression ratio will affect on the increase in power, torque and thermal efficiency directly. According to this experiment, reductions in the fuel consumption are contributed by a high compression ratio. In the fact, reduction in fuel consumption will increase the thermal efficiency. At this point, the compression ratio becomes a key to improve the performances of the engine.
- As a mentioned above that an increase in compression ratio produced high pressure. But, if the pressure is too high will make the connecting rod of engine crooked. Thereby, increasing the compression ratio should consider the material strength of the engine
- Increasing the compression ratio has a risk to increases in HC and CO emissions. The ratio between combustion chamber's surface area and volume increased when the compression ratio is being improved. Increasing the compression ratio will lead to misfiring in the combustion chamber, in turn, the CO and HC emission was formed (M.B. Celik, 2007). Adjustment on ignition timing is a solutions to reduce CO and HC emissions when the compression ratio increased. The ignition timing should be advanced when engine runs with ethanol fuel. It caused by a low of vapour pressure and a high of latent heat of ethanol. The vapour pressure and latent heat of ethanol will have an optimum impact on combustion process if the ignition timing is advanced.
- Overall, mapping the injection duration strategy has been improved the performance and decreased the engine emissions significantly. An advance research of this work has been prepared to investigate the effect of E100 on performance and emission by varying the ignition timing. Theoretically, the results of this experiment can be optimized with applying the ignition timing strategy.

BIBLIOGRAPHY

- [1] Alan C. Hansen, Qin Zhang, Peter W.L. Lyne. "Ethanol–diesel fuel blends – a review". Elsevier. Bio Resource Technology. June 2004. Vol. 96. P. 277–285. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2004.04.007>
- [2] Alariksa A. Fintas, Susilo B, Nugroho A. Wahyunanto. "Uji Motor Bakar Bensin (On Chasis) Menggunakan Campuran Premium Ethanol". Jurnal Keteknik Pertanian Tropis dan Biosistem, Universitas Brawijaya–Malang, Indonesia. October 2013. Vol. 1–3. P.194–203
- [3] Farha Tabassuma Anshari, Verma Abhishek Prakash, Chaube Alok. "Effect on performance and emissions of SI engine using ethanol as blend fuel under varying compression ratio". International Journal of Engineering Research and Technology. December 2013. Vol. 2. P. 848–864
- [4] Balki MK and Sayin C. "The effect of compression ratio on the performance, emissions and combustion of an SI (spark ignition) engine fuelled with pure ethanol, methanol and unleaded gasoline". Elsevier. Energy. May 2014. Vol. 71. P. 194–201. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.074>
- [5] B.M. Masum, H.H. Masjuki, M.A. Kalam, S.M. Palash, M. Habibullah. "Effect of alcohol–gasoline blends optimization on fuel properties, performance and emissions of a SI engine". Elsevier. Journal of Cleaner Production. August 2014. Vol. 86. P. 230–237. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.032>
- [6] C. Ananda Srinivasan and C.G. Saravanan. "Study of combustion characteristics of an SI engine fuelled with ethanol and oxygenated fuel additives. Journal of

- Sustainable Energy & Environment. 2010. Vol. 1. P. 85-91
- [7] Chan-Wei Wu, Rong-Horng Chen, Jen-Yung Pu, Ta-Hui Lin. "The influence of air-fuel ratio on engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol-gasoline-blended fuels". Elsevier. Atmospheric Environment. January 2004. Vol. 38. P. 7093-7100. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.01.058>
- [8] Charles Wyman, Erick D., Adam Han, Brian H. "Ethanol as fuel for recreational boats". The Thayer School of Engineering at Dartmouth College. March 2004. www.dartmouth.edu/~ethanolboat
- [9] Chelik M. Bahattin. "Experimental determination of suitable ethanol-gasoline blend rate at high compression ratio for gasoline engine". Elsevier. Applied Thermal Engineering. November 2007. Vol. 28. P. 396-404. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.10.028>
- [10] Chen RH, Chiang LB, Chen CN, Lin TH. "Cold-start emissions of an SI engine using ethanol-gasoline blended fuel". Elsevier, Applied Thermal Engineering. January 2011. Vol. 31. P. 1463-1467. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.01.021>
- [11] Costa C. Rodrigo, Sodre R. Jose. "Compression ratio effects on an ethanol/gasoline fuelled engine performance". Elsevier. Applied Thermal Engineering. September 2010. Vol. 31. P. 278-283. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.09.007>
- [12] Dewan Energi Nasional. Outlook Energi Indonesia 2015. Jakarta-Indonesia. March 2016. 145p. ISSN: 2503-1597
- [13] Elfasakhany Ashraf. "Investigations on the effects of ethanol-methanol-gasoline blends in a spark-ignition engine: Performance and emissions analysis". Elsevier. Engineering Science and Technology, an International Journal. June 2015. Vol. 18. P. 713-719. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jestch.2015.05.003>
- [14] Jeuland N, Montagne X, Gautrat X. "Potentiality of ethanol as a fuel for dedicated engine". Oil & Gas Science and Technology-Rev IFV. Institut Français du Pétrole, Francis. 2004. Vol. 59. P. 559-570
- [15] M. Clairotte et al. "Effects of low temperature on the cold start gaseous emissions from light duty vehicles fuelled by ethanol-blended gasoline". Elsevier. Applied Energy. October 2012. Vol. 102. P. 44-54. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.08.010>
- [16] Milnes R, Deller Laura, Hill N. "Ethanol internal combustion engines. Etsap, Energy Technology System Analysis Programme, United Kingdom, England. June 2010 - www.etsap.org
- [17] Murat Kapsuz, Hakan Ozcan, Jehad Ahmad Yamin. "Research of performance on a spark ignition engine fuelled by alcohol-gasoline blends using artificial neural networks". Elsevier. Applied Thermal Engineering. August 2015. Vol. 91. P. 525-534. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.08.058>
- [18] Mustafa Balat, Havva Balat, Cahide Oz. "Progress in bioethanol processing". Elsevier. Progress in Energy and Combustion Science. January 2008. Vol. 34. P. 551-573. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.peccs.2007.11.001>
- [19] Najafi G, Ghobadian B, Yusaf T, Ardebili S.M.S, Mamat R. "Optimization of performance and exhaust emission parameter of a SI engine with gasoline-ethanol blended fuels using response surface methodology". Elsevier. Energy. July 2015. Vol. XXX. P. 1-15. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.004>
- [20] Rubio E. Nicolas, "Brazilian government policies in the ethanol program". A Model for the Rest of the World, Thesis Master of Art, University of Florida, USA. 2006
- [21] Sergio M, Otto Andersen. "A review of emission products from bioethanol and its blends with gasoline. Background for new guidelines for emission control". Elsevier. Fuel. October 2014. Vol. 140. P. 293-301. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.101>
- [22] S. Lopez-Aparicio, C. Hak. "Evaluation of the use of bioethanol fuelled buses based screening and on the road measurements". Elsevier. Science of the Total Environment. March 2013. Vol. 452-453. P. 40-49. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.046>
- [23] Sudarmanta B., Junipitoyo B., Putra Krisna A. B., Sutantra I. N. "Influence of the compression ratio and injection timing on sinjai engine performance with 50% bioethanol-gasoline blended fuel". ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. February 2016. Vol. 11. P. 2768-2774.
- [24] Turkoz N, Erkus B, Karamangil MI, Surmen A, Arslanoglu N. "Experimental investigation of the effect of E85 on engine performance and emissions under variation ignition timings". Elsevier. Fuel. March 2013. Vol. 115. P. 826-832. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.009>
- [25] Turner D., Xu H., Cracknell FR., Natarajan V., Chen X. "Combustion performance of bio-ethanol at variation blend ratios in a gasoline direct injection engine". Elsevier. Fuel. January 2011. Vol. 90. P. 1999-2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2010.12.025>
- [26] Yang Hsi-Hsien, Liu TC, Chang CF, Lee Eva. "Effects of ethanol-blended gasoline on emissions of regulated air pollutants and carbonyls from motorcycle". Elsevier. Applied Energy. August 2011. Vol. 89. P. 281-286. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.07.035>
- [27] Yoon SH, Lee CS. "Effect of undiluted bioethanol on combustion and emissions reduction in a SI engine at various charge air condition". Elsevier. Fuel. February 2012. Vol. 97. P. 887-890. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.02.001>
- [28] Yung-Chen Yao, Jiun-Horng Tsai, I-Ting Wang. "Emissions of gaseous pollutant from motorcycle powered by ethanol-gasoline blend". Elsevier. Applied Energy. August 2012. Vol. 102. P. 93-100. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.07.041>
- [29] Marthen Paloboran, I.N. Sutantra, Bambang Sudarmanta, "Performances and emissions characteristics of three main types composition of gasoline-ethanol blended in spark ignition engine", Praise Worthy Prize, International Review of Mechanical Engineering, November 2016, Vol. 10-7, p. 552-559, DOI: <http://dx.doi.org/10.15866/ireme.v10i7.9968>
- [30] Larry G. Anderson, "Effects of using renewable fuels on vehicle emissions", Elsevier, Renewable and Sustainable Energy Reviews, March 2015, Vol. 47, p.162-172, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.011>
- [31] Heywood John B. Internal Combustion Engine Fundamentals. USA: McGraw Hill Series, New York, 1988. 930p. ISBN: 0-07-028637-X
- [32] B.M. Masum, H.H.Masjuki, M.A.Kalam, I.M.Rizwanul Fattah, S.M. Palash, M.J.Abedin. "Effect of ethanol-gasoline blend on Nox emission in SI engine". Elsevier. Renewable and Sustainable Energy Reviews. April 2013. Vol. 24. Pp. 209-222. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.046>
- [33] Paul W. Gill, James H. Smith, JR, Eugene J. Ziurys, "Fundamentals of internal combustion engines", OXFORD & IBH PUBLISHING CO. Calcutta, Bombay New Delhi, 557p.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work is one of the main requirements for program of doctoral students in completing their studies. The experiment was conducted in the Fuel and Combustion Engineering Laboratory, Sepuluh Nopember Institute of Technology, Surabaya - East Java, Indonesia.

- Los artículos deberán ser originales e inéditos y no deben de haber sido enviados simultáneamente a otros medios de comunicación.
- Tendrán siempre preferencia los que versen sobre temas relacionados con el objetivo, cobertura temática y/o lectores a los que se dirige la revista.
- Todos los trabajos serán redactados en castellano o inglés y deberán cumplir los siguientes requisitos:
 - Título en castellano e inglés de 150 caracteres máximo
 - Un breve resumen (Abstract), de unas 300 palabras, en castellano e inglés.
 - Entre tres y cinco palabras clave (Key words) en castellano e inglés, que permitan identificar la temática del artículo
 - No deberían de tener más de aproximadamente 5.500 palabras, o 17 páginas formato A4 en fuente Arial 10 con interlineado simple (Consultar con DYNA extensiones superiores).
 - Bibliografía relacionada o referencias según normas DYNA en www.revistadyna.com
- Con el objeto de facilitar la "revisión entre pares", el autor deberá asignar el código DYNA de 6 dígitos correspondiente a la temática del artículo, seleccionándolo de entre los códigos disponibles en la dirección de Internet: www.revistadyna.com
- Los originales se remitirán mediante nuestra página web (envío artículos), en formatos .DOC (mword), .RTF, o .TXT. Se recomienda una calidad mínima de 300ppp para las fotografías que se adjunten con el artículo. Se harán constar: título del artículo, nombre del autor, título académico, empresa o institución a la que pertenece, dirección electrónica, dirección postal y teléfono.
- Se someterán al Consejo de Redacción cuantos artículos se reciban, realizándose la "revisión entre pares" por los expertos del Consejo o los que éste decida. El resultado de la evaluación será comunicado directamente a los autores. En caso de discrepancia, el editor someterá el trabajo a un revisor externo a la revista cuya decisión será trasladada nuevamente al autor.
- Los autores aceptan la corrección de textos y la revisión de estilo para mantener criterios de uniformidad de la revista.
- La revista se reserva el derecho de no acusar recibo de los trabajos que no se ajusten a estas normas.
- Para mayor detalle sobre estas normas, por favor visite nuestra web <http://www.revistadyna.com> (en el apartado de "autores y evaluadores").

- Paper will be original and unpublished and it must not be concurrently submitted for publication elsewhere.
- Preference will be given to articles on the main subject areas of the Journal.
- Papers should be written in Spanish or English and should fulfil the following requirements:
 - Title in both English and Spanish with a maximum length of 150 characters.
 - Brief Summary or Abstract, about 300 words, in Spanish and English.
 - Between three and five keywords in English and Spanish, that identify the paper theme.
 - Written text should not exceed 5.500 words, or 17 A4 format pages in 10 size arial font single-spaced (For longer lengths consult with DYNA)
 - Bibliographical references according to DYNA norms at www.revistadyna.com
- To facilitate the "peer review" process, the author will assign the six digits DYNA code corresponding to the paper thematic, selecting it between the codes available at the Internet address: www.revistadyna.com
- Papers should be sent by our web page (envío artículos), in .DOC (MSWord), .RTF, or .TXT format. It is recommended a minimum quality of 3000 ppp for the pictures enclosed in the article. These papers will include: Article title, author name, academic title, company or institution, email, correspondence address and telephone.
- All papers must pass the Editorial Board (EB) evaluation process. The "peer review" will be made by the Editorial experts or those that the EB decides. The evaluation result will be directly communicated to the author. In case of discrepancy, the publisher will refer the work to an external reviewer whose decision will again be transferred to the author.
- The authors accept the text correction and the style revision to maintain uniformity criteria for the magazine.
- The journal reserves the right not to accept articles which do not comply with said instructions.
- To find more details about these instructions, please visit our web page <http://www.revistadyna.com> (authors and referees section).

DYNA

Ingeniería e Industria

PROMOCIÓN: Suscripción a DYNA por 29,85 €/año

Reciba la revista dyna impresa en su domicilio por solo 29,85 €/año

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

Promoción válida para los Ingenieros Industriales colegiados en: Araba, Bizkaia y Galicia.

Si está interesado, envíe un email a dyna@revistadyna.com mencionando que se acoge a la promoción e indicando su nº de colegiado y el nombre de su Colegio de Ingenieros Industriales.



¡Sorprende a todos!
Haz que tu empresa vuele alto en
MadridFly



Terrazas chill-out
Parking privado
Salas de reuniones
Sala de proyecciones
Restaurante Flying Grill

SERVICIOS PARA
EMPRESAS:
Programas formativos
Incentivos y Team Building
Producciones audiovisuales
Fiestas privadas

EVENTOS DE EMPRESA

Más de 1.700 m de
instalaciones para un
evento perfecto



Reservas:
www.madridfly.com
34 912 648 657
sales@madridfly.com
¡Te esperamos!




MadridFly