

DYNA

ingeniería e industria #5 | www.revistadyna.com | Año 93 | N°5 | Septiembre - Octubre 2018

Análisis comparativo entre aerogeneradores

Reconstrucción de estructuras por fotogrametría

Optimización de la resistencia en el moldeo por inyección de plásticos

Estudio de la estabilidad en taludes

Dimensionamiento y armado de secciones de hormigón



Revista de Ingeniería Multidisciplinar con factor de impacto en JCR
ISSN 0012-7361 | DOI: 10.6036/DYNAII | SIC: 0012-7361(20181901)93:5<>1.0.TX:2-Q | CODEN: DYNAAU





DYNA Management

DOI: 10.6036/DYNAMN

ISSN: 2340-6585

<https://www.dyna-management.com>

CONSIDERE ENVIAR SU PRÓXIMO ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN A ESTA REVISTA

DYNA Management es una revista digital científica perteneciente a la editorial
Publicaciones DYNA SL – <https://www.dynapubli.com>

Desde 2013, DYNA Management publica trabajos de investigación originales en los campos de la gestión de organizaciones: Liderazgo, Dirección de Operaciones, Estratégica, RR.HH., Marketing, etc.

BENEFICIOS PARA EL AUTOR:

- Reducidos plazos de publicación:
2 meses de media desde el inicio del proceso de evaluación
- Riguroso proceso de revisión entre pares, con propuestas de mejoras realizadas por expertos
- Audiencia objetivo especializada
- Alta visibilidad internacional

BUSCAMOS ARTÍCULOS EN LAS ÁREAS DE:

- Dirección de Operaciones
- Gestión Financiera
- Recursos Humanos
- Marketing y Ventas
- Liderazgo
- Motivación

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 (Sin consejeros)

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 Izque 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 Fundición 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 Giroit (Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers - París, 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), Luis María Abadie (Basque Center for Climate Change - Bilbao), Pere Alavedra Ribot (Universitat Politècnica de Catalunya - Barcelona).

CONSEJO ASESOR

Alberto Del Rosso (Universidad Tecnológica Nacional - Buenos Aires, Argentina), Andrés Ortuño Carbonell (Asociación de Murcia - Murcia), Antonio Adsuar Benavides (Conselleria 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 Sebastián), 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), Francisco Cavas Martínez (Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena), Nadia Rego Monteil (Queen's University - Ottawa, Canada), Raimundo Martínez Giménez (Euroconseil - Sevilla), Victor Petuya Arcocha (Asociación Española de Ingeniería Mecánica - Madrid), Antonio Sánchez Egea (Centro de Fabricación Avanzada Aeronáutica - Zamudio, España), Jaime R. Santos Reyes (IPN - Zacatenco, México).

© 2018. 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:

Miguel Ibars (Pixabay.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(20181901)93:5<>1.0.TX;2-Q
 CODEN: DYNAUJ
 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

DIRECCIÓN

José María Hernández Álava

Miembro de:

- Council of Science Editors
- Asociación Española de Comunicación Científica

contenido

Septiembre - Octubre 2018

■■■ artículos de investigación

497

NOVEL METHOD OF 3D SLOPE STABILITY ANALYSIS AND ITS ENGINEERING APPLICATION

NUEVO MÉTODO DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN 3D Y SU APLICACIÓN EN INGENIERÍA

512

DIMENSIONAMIENTO Y ARMADO ÓPTIMO DE SECCIONES DE HORMIGÓN SOLICITADAS A FLEXOCOMPRESIÓN

OPTIMUM REINFORCEMENT AND SIZING OF CONCRETE CROSS SECTIONS SUBJECTED TO FLEXURAL AND AXIL LOADING

529

METODOLOGÍA DE PREPARACIÓN SUPERFICIAL PARA LA NANOINDENTACIÓN DE RECUBRIMIENTOS DE ALTA RUGOSIDAD

SURFACE PREPARATION METHODOLOGY FOR NANOINDENTATION OF HIGH ROUGHNESS COATINGS

541

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE AEROGENERADORES CON GENERADOR DE INDUCCIÓN ASÍNCRONO Y CONTROL DE POTENCIA DE PASO FIJO Y AEROGENERADORES CON GENERADOR SINCRÓNICO Y CONTROL DE POTENCIA DE PASO VARIABLE

COMPARATIVE ANALYSIS OF FAULTS FROM STALL CONTROLLED WIND TURBINES WITH ASYNCHRONOUS GENERATORS AND PITCH CONTROLLED WIND TURBINES WITH SYNCHRONOUS GENERATORS

556

DETECCIÓN DE FALLOS MULTICRITERIO DE UN MOTOR BLDC (BRUSHLESS DIRECT CURRENT)

MULTIPLE CRITERIA FAULT DETECTION OF A BLDC (BRUSHLESS DIRECT CURRENT) MOTOR

504

IDENTIFICACIÓN DE FACTORES QUE INFLUYEN EN EL COMPROMISO DE LOS EMPLEADOS UTILIZANDO PENSAMIENTO SISTÉMICO

IDENTIFICATION OF THE FACTORS WHICH INFLUENCE EMPLOYEE COMMITMENT USING SYSTEMS THINKING

521

ANÁLISIS DE UN COLECTOR SOLAR UTILIZANDO POLICARBONATO ALVEOLAR PARA SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DE AGUA DE BAJA TEMPERATURA

ANALYSIS OF A SOLAR COLLECTOR USING CELLULAR ALVEOLAR POLYCARBONATE FOR ECOLOGICAL AND LOW TEMPERATURE WATER HEATING SYSTEMS

534

OPTIMIZACIÓN DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN EN PIEZAS DE POLIAMIDA-6 MOLDEADAS POR INYECCIÓN USANDO TÉCNICAS DE REDES NEURONALES Y PROGRAMACIÓN NO LINEAL

OPTIMIZATION OF TENSILE STRAIN ON INJECTION MOLDED POLYAMID-6 PARTS BY NEURAL NETWORKS AND NONLINEAR PROGRAMMING TECHNIQUES

549

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE MEZCLAS CONVENCIONALES DE CAUCHO NATURAL CON RESIDUOS DE CUERO

RHEOLOGICAL BEHAVIOUR ASSESSMENT OF CONVENTIONAL MIXTURES BETWEEN NATURAL RUBBER AND LEATHER WASTES

563

MODIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES EN LOS TEJIDOS DE ALGODÓN TRATADOS CON MICROCÁPSULAS DE ESENCIA MARINA

VARIATION OF COTTON PROPERTIES DUE TO THE APPLICATION OF SEA FRAGRANCE MICROCAPSULES

■■■ nuestras cosas

460

Dyna hace 80 años

461

Editorial

■■■ perspectivas

462

Fusión nuclear: del proyecto iter hacia el futuro

465

¿Son compatibles la eficiencia económica y el bien común?

■■■ notas técnicas

467

La seguridad de la vida en el planeta, deducida mediante análisis de los acuerdos de las cumbres mundiales del clima y de los informes del IPCC

468

Evaluación del diseño de una interfaz cerebro-computadora para detección de emociones

469

Calidad de la gasolina: clave en el control de emisiones

470

Proyecto de industria turística conectada 4.0. a velocidad de crucero

471

Ingeniería multidisciplinar para resolver el problema del congestionamiento en sistemas vehiculares

■■■ colaboraciones

472

La importancia del título, del resumen y de las palabras clave en un artículo técnico o científico

474

Efectos ambientales y económicos de la utilización de energías renovables en instalaciones térmicas residenciales según objetivos 2030: estudio de caso en la provincia de Granada (España)

479

Reconstrucción dimensional de estructuras industriales mediante fotogrametría y técnicas de segmentación

483

Impacto del mentoring inter-organizacional en la calidad y resultados de las organizaciones

488

Propuesta de marco de trabajo para la evaluación de la sostenibilidad de productos desde el paradigma de la economía circular basada en industria 4.0 (parte 2)

493

Función y desarrollo de los gráficos de control multivariantes

LA MARCHA DE LA GUERRA

Mientras la Batalla del Ebro por el control de la zona baja de ese río proseguía con toda su crudeza, a finales de septiembre se firmaba entre Alemania, Francia y Gran Bretaña, con la presencia de Italia, el llamado Acuerdo de Munich para zanjar el conflicto provocado por la ocupación alemana de los Sudetes checoslovacos, aceptando los hechos consumados. Esto afectó a la guerra civil española en el sentido de que las potencias europeas vieron con mayor tolerancia la ayuda de Alemania e Italia en la lucha contra la República. Además, tampoco se llegó a un acuerdo en unas conversaciones de paz que tuvieron lugar en Ginebra e incluso alguna propuesta de paz negociada con participación internacional fue rechazada.

LO QUE PUEDE HACERSE EN AVIACIÓN

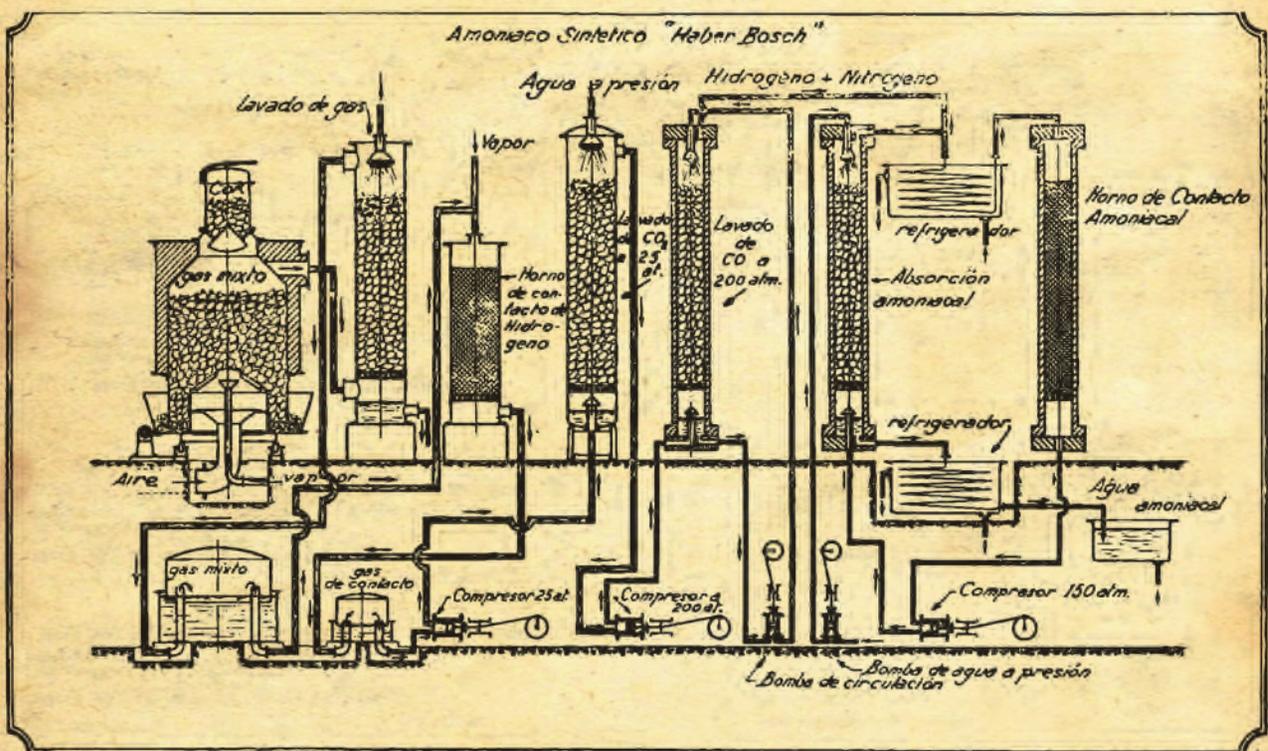
Tras una serie de consideraciones del autor sobre los cálculos de sustentación necesarios para soportar todos los pesos muertos de un aparato (estructura, motor y contenidos), así como de las fuerzas necesarias para la marcha en horizontal, asegura que "la posibilidad de aumentar la velocidad de traslación a las alturas normales... es la turbina de aire combinada con el motor". "interponiendo entre el grupo propulsor motor y seguidamente después del motor, una turbina de aire que absorba el aire en la porción central después del propulsor, lo canalice y guíe después de pasar por una turbina de aire frío y caliente que aproveche las calorías desprendidas por el motor".

¿Estaba intentando describir un sistema jet en esa época temprana?

NITRÓGENO

J. Santandreu Averly, Ingeniero Industrial

"Entre las industrias químicas que reclaman más urgente atención se cuentan las de carburantes, celulosa y nitrógeno; las tres son perfectamente viables en España y las tres son de importancia extraordinaria... La industria del nitrógeno abarca la obtención del amoníaco, ácido nítrico, cianamida y cianuros... Me limitaré en estas líneas a los dos primeros productos por ser, con gran diferencia, los de mayor consumo".



Tras exponer con detalle la necesidad de los compuestos amoniacales y nitratos para la agricultura, que hasta principios del siglo XX eran exclusivamente naturales, aborda las técnicas desarrolladas poco antes del inicio de la guerra europea para la síntesis del amoníaco y su oxidación a ácido nítrico. Dice que "en la actualidad son varios los sistemas establecidos: Haber-Bosch. Claude, Mont-Cenis. Casale-Fauser y el de la Nitrogen Eng. Co. de América", describiendo el primero, en sus líneas generales, así como la obtención de la urea y el ácido nítrico a partir del amoníaco sintético.

Concluye afirmando que "el amoníaco sintético y su oxidación son industrias establecidas en todos los pueblos industriales y no hay ningún motivo para que España sea una excepción; muy al contrario, como complemento del tratamiento de los lignitos, por ejemplo, podrían aprovechar el semi-cok para gas y fuerza y así, la unidad de nitrógeno combinado resultaría a un costo tal que las haría rentables... España precisa habilitar los medios de producir al año, cien mil toneladas de nitrógeno combinado por síntesis, cantidad que sumada a la producción en fábricas de gas y cok metalúrgico cubriría, de momento las necesidades del mercado español en fertilizantes nitrogenados y ácido nítrico".

Carlos García de los Ríos, Diplomado del Colegio Tecnológico de Manchester

LA ASOCIACIÓN DE INGENIEROS INDUSTRIALES DE ANDALUCÍA CUMPLE 100 AÑOS

La Asociación de Ingenieros Industriales de Andalucía Occidental cumple su Centenario en 2018 y, como siempre que se cierra un ejercicio, aunque éste sea de cien años, cabe hacer balance de la gestión y propuesta de futuro.

El balance de gestión hay que considerarlo, con toda modestia, como ampliamente positivo. Ha habido momentos y circunstancias muy difíciles, en un entorno socioeconómico extremadamente duro marcado por las repercusiones en España de la Primera y Segunda Guerras Mundiales, las crisis de los años treinta, la guerra civil española y, últimamente, por las sucesivas crisis económico-financieras sufridas a partir de 2008.

También, en el ámbito de la Ingeniería Industrial, fue muy penosa la supresión en 1866 de la primera Escuela de Ingenieros Industriales de Andalucía, la Escuela Industrial Superior de Sevilla, en la que se impartieron estudios de la carrera de Ingeniero Industrial desde 1859, y en la que sólo consiguieron titularse 34 compañeros.

Sin embargo, hay que reconocer que han sido más las luces que las sombras. La Asociación de Ingenieros Industriales de Andalucía Occidental ha sorteado todas las dificultades de estos años y ha mantenido firme sus objetivos estatutarios, entre otros los de desarrollo humano, cultural y profesional de sus asociados, de fomento de la imagen de la Ingeniería Industrial ante la sociedad, de orientación de su actividad a la mejora de la industrialización y economía de Andalucía, y de colaboración con las Administraciones Públicas.

Durante toda su historia ha seguido haciendo bandera del ejercicio de la profesión, del servicio a la sociedad de los Ingenieros Industriales, de la formación y unión de los profesionales, todo ello orientado al desarrollo industrial y económico de nuestro entorno.

Y hoy, nuestra Asociación es una institución consolidada e independiente, que simultanea su condición de ser la organización profesional más antigua de Andalucía en todas las ramas de la Ingeniería, con su plena adaptación a la realidad actual, cambiante y consecuente con las medidas de liberación de la economía que impone la Unión Europea, y preparada para asumir en un futuro próximo nuevos roles de mucha más responsabilidad, a semejanza de lo que impera en el resto de países europeos.

La extraordinaria transformación experimentada por la sociedad andaluza en estos últimos cien años no ofrece dudas. Y en ella hay que reconocer la eficaz y abnegada labor realizada durante tantos años por los profesionales de la Ingeniería que, con sus conocimientos, dedicación y esfuerzo, han contribuido de forma importantísima al desarrollo socioeconómico de Andalucía.

Hoy, hay Escuelas de Ingenieros Industriales en siete de las ocho provincias andaluzas. Disponemos en Andalucía de polos de desarrollo industrial en Sevilla, Cádiz y Huelva, de una buena red de comunicaciones por carretera y aeroportuarias, apreciadas infraestructuras portuarias distribuidas a lo largo de toda la Comunidad Autónoma, una buena red de Parques y Centros Tecnológicos, y una excelente ubicación geoestratégica como puerta de entrada a Europa. Son fortalezas que no podemos olvidar y hay que poner en valor.

El balance global, pues, es positivo. Pero, una vez puesto en valor lo hasta ahora realizado, en modo alguno debemos dejarnos llevar por la autocomplacencia porque hay aún mucho que hacer. El progreso conseguido con el esfuerzo de todos debe servirnos como estímulo para redoblar energías y continuar impulsando el desarrollo y progreso.

Para contribuir a alcanzar este objetivo es fundamental poner en valor a la Ingeniería, poner de manifiesto sus valores de excelencia y liderazgo que la conforman como instrumento transformador de la sociedad, impulsor del cambio y generador de progreso, empleo y riqueza.

En esta línea, las Asociaciones de Ingenieros deben perseverar, a semejanza de las europeas, no sólo en la reivindicación de las condiciones necesarias para impulsar el desarrollo y progreso, sino en establecer mecanismos que avalen las aptitudes, conocimientos y experiencia de sus asociados, que sean reconocidos por las empresas, compañías de seguros y Administraciones Públicas.

Tenemos que promover e impulsar el liderazgo de la Ingeniería a través de la creatividad, el posicionamiento en la vanguardia tecnológica ante un mundo globalizado y cambiante, el intercambio de conocimientos, y el diálogo permanente con los estamentos que toman las decisiones.

Hay una gran tarea por delante, pero también implicación y ganas de los Ingenieros Industriales para abordarla y seguir contribuyendo al progreso de Andalucía y de toda España. Ese es nuestro compromiso.

Fusión nuclear: del proyecto ITER hacia el futuro

Nuclear fusion: from the ITER project into the future

Joaquín-Pedro Sánchez-Sanz
CIEMAT (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8783>

La fusión nuclear tiene todos los ingredientes que necesitaría una solución definitiva al problema de la energía: es segura, respetuosa con el medio ambiente, utiliza un combustible abundante y distribuido por todo el planeta y puede desarrollarse a gran escala, siendo capaz de satisfacer las necesidades presentes y futuras de la humanidad, incluyendo algunas que hoy día quedan en segundo plano, como la producción masiva de agua potable y alimentos o el reciclado a gran escala de materias primas. Sin embargo, estas ventajas se han visto ensombrecidas por la dificultad intrínseca del proceso: una reacción de fusión energéticamente rentable requiere mantener el combustible a temperaturas de cientos de millones de grados, problema en el que la comunidad científica lleva trabajando desde hace décadas.

Desde esta publicación se ha revisado en varias ocasiones el progreso de la fusión, que a día de hoy tiene como buque insignia el proyecto ITER, en construcción en el sur de Francia. ITER es el proyecto de referencia en la "fusión por confinamiento magnético", la vía de desarrollo que ha adoptado la Unión Europea en su "hoja de ruta" hacia la energía de fusión y que comprende dos grandes líneas de investigación: la línea *tokamak* a la que se adscribe ITER y la línea *stellarator*, orientada a más largo plazo. La otra gran rama de investigación, la fusión por láser o "confinamiento inercial" tiene sus principales desarrollos en Estados Unidos (proyecto NIF) y Francia (Laser Megajoule). En este artículo nos centraremos en el confinamiento magnético.

Tras una época de avances rápidos durante los años 1970-90, el progreso hacia una reacción de fusión con ganancia energética se ralentizó, esencialmente porque el siguiente paso implicaba la construcción de un dispositivo, ITER, con tecnología de imanes superconductores y de grandes dimensiones: diez veces mayor en volumen que JET, el mayor "tokamak"

existente hasta ahora. Un proyecto de este tipo requería una inversión sin precedentes, involucrando a muchos países (la UE al completo más EEUU, Japón, Rusia, India, China y Corea del Sur) y se necesitaron veintiún años para avanzar desde el acuerdo político inicial de Reagan y Gorbachov en 1985 hasta el acuerdo final de construcción a finales de 2006.

Parte de estos años se dedicaron a trabajos preparatorios. Se continuó el avance de la física del plasma (el fluido a esas altas temperaturas está en estado de "plasma") y se desarrollaron prototipos de los elementos que suponían un mayor desafío tecnológico: imanes superconductores, segmentos de la cámara de vacío, etc. También se llevó a cabo el diseño conceptual de muchos subsistemas, llegándose a tener un diseño casi completo de todos los componentes del proyecto.

Sin embargo, tras la firma del acuerdo en 2006, se vio que había que transformar un proyecto científico-tecnológico, que había abordado cada sistema por separado, en un proyecto global de ingeniería, integrado en unos edificios que tenían que seguir un estricto protocolo de seguridad nuclear. La radiotoxicidad de ITER, derivada de la existencia de tritio, es muchos órdenes de magnitud menor que la de una central

nuclear tradicional, pero la autoexigencia del proyecto de evitar, en el peor caso de accidente, una evacuación más allá del perímetro de la instalación, llevó a aplicar los más estrictos criterios de seguridad nuclear, incrementados tras el accidente de Fukushima en 2011. Todo ello produjo una fuerte revisión al alza de plazos y costes. Habría que añadir también los problemas derivados de trabajar con aportaciones en especie como principal vía de participación de los socios y los derivados de trabajar con culturas muy diferentes bajo un difuso marco colaborativo. El resultado fue un pobre avance del proyecto durante casi diez años, durante los cuales parte del esfuerzo se evaporó en planes irrealistas para intentar cumplir un calendario irrealizable.

En 2016, con la toma de posesión de B. Bigot, como nuevo Director General, se relanzó el proyecto con una aproximación más dinámica y realista. El progreso se ha hecho visible y la credibilidad del proyecto ha aumentado sensiblemente. De todas maneras los plazos son dilatados dada la envergadura y complejidad de ITER: aún faltan siete años para alcanzar al "primer plasma", hito que marcará la puesta en marcha del experimento, y la fase de producción de hasta 500 MW de potencia mediante la fusión de deuterio-

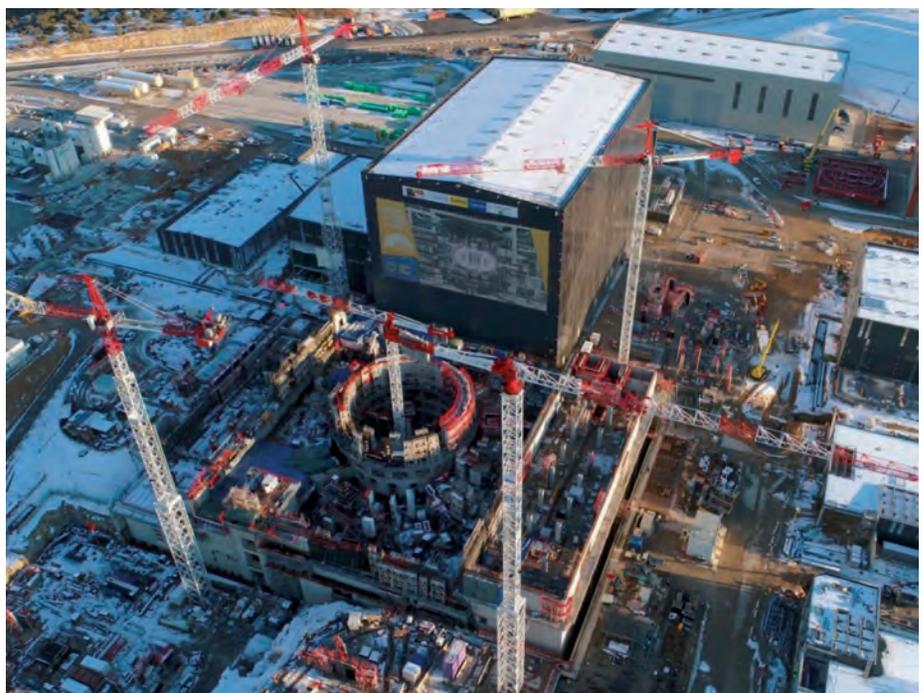


Fig. 1: Vista general de la sede del proyecto ITER a diciembre de 2017 (cortesía de ITER Organization)

tritio deberá esperar hasta 2035 tras una serie de experimentos preparatorios y un parada para instalar elementos adicionales necesarios para el trabajo a alta potencia.

ITER es un proyecto para resolver una necesidad fundamental de la humanidad a largo plazo, pero a corto plazo supone también un gran desarrollo tecnológico, con importantes oportunidades industriales. En este sentido podemos estar orgullosos del papel que está teniendo la industria española, que se sitúa en el tercer puesto a nivel europeo, tras la francesa y la italiana, por presupuesto adjudicado en los contratos para la construcción de ITER. Los contratos ganados, en un sistema de competencia abierta, abarcan desde la ingeniería civil y la participación en la construcción de los edificios a la construcción de los grandes imanes superconductores o el desarrollo de prototipos para la pared interna del reactor.

Cuando ITER funcione a pleno rendimiento tendrá una ganancia energética de $Q=10$, siendo Q el cociente entre la energía generada por la fusión y la energía que inyectamos al combustible para mantenerlo caliente. No hay que confundir este valor de Q con el rendimiento energético de una central eléctrica, en la que habría que contar con la energía necesaria para mantener activos

los imanes y todos los demás sistemas de planta así como la eficiencia de conversión de la energía térmica en eléctrica. Una futura central de fusión energéticamente rentable necesitaría una amplificación Q del orden de 50. Sin embargo el citado valor de $Q=10$ de ITER es fundamental porque es suficiente para comprobar si la energía generada por la fusión sirve para calentar el fluido y compensar las pérdidas que lo enfrían. En ITER esperamos que esto se confirme y podamos observar claramente que los núcleos de He generados en la reacción, que llevan el 20% de la energía, quedan confinados en el plasma y le transmiten la energía.

A lo largo de estos años ha habido incertidumbre sobre el calendario y el coste del proyecto, pero hay bastante confianza en que una vez que ITER se complete los objetivos científicos se alcanzarán. La mayor incertidumbre en este aspecto está asociada a las cargas térmicas en el llamado *divertor*, el componente situado en la parte inferior de ITER donde son conducidas las partículas que por difusión se van escapando de la zona confinada y que en estado estacionario suponen el 20% de la potencia generada en el reactor. Las placas del *divertor*, de wolframio en su parte externa, sufren cargas térmicas

de más de 10 MW/m² y existen dudas sobre su durabilidad. El riesgo para ITER no estaría en alcanzar el objetivo de los 500 MW de fusión sino en mantenerlos durante periodos de 500 segundos repetidamente a lo largo de toda una campaña de experimentos sin tener que parar para reparar el *divertor*.

Para mitigar este riesgo se trabaja en varios frentes. Por un lado el uso del wolframio como material de la pared del reactor se está experimentando en el Tokamak JET, se trata de algo relativamente novedoso ya que en los experimentos de menor tamaño, con menores cargas térmicas y durante

tiempos más cortos, no era necesario recurrir a este material. Los resultados muestran dificultades en la operación pero se llegan a alcanzar los valores necesarios de los diferentes parámetros y se espera que en ITER, con mayor tamaño y más energía en el plasma, las dificultades serán menores. Por otro lado, se juega con la geometría del componente para que las placas reciban la carga térmica oblicuamente y así extender la superficie sobre la que ésta se reparte, finalmente se han realizado pruebas exitosas en JET con inyección de neón y kriptón en el borde del plasma para que las partículas que escapan pierdan parte de su energía en forma de emisión de luz, que no causa problemas porque se difunde sobre una gran superficie, y lleguen más frías a la pared.

ITER consolidará lo que denominamos "*viabilidad científica*" de la fusión como fuente de energía pero aún habrá un camino que recorrer hasta que energía de fusión sea una alternativa real. El siguiente paso, que en la hoja de ruta europea denominamos "DEMO", deberá ser el prototipo de una central completa de producción de electricidad por fusión.

En primer lugar, DEMO ira equipado con un "*manto fértil*" (*breeding blanket*), que es el componente que cumple el triple papel de regenerar el tritio a partir de aleaciones o sales de litio, extraer la energía de los neutrones mediante el circuito primario de refrigeración para llevarla a las turbinas y apantallar los imanes superconductores y otros elementos sensibles del flujo de neutrones. Esta triple misión hace del manto fértil un componente de enorme complejidad y la I+D necesaria para su construcción lleva en marcha varias décadas. De hecho está previsto insertar en ITER una serie de módulos de prueba, denominados "*Test Blanket Modules*" (TBM) que servirían para probar diferentes tecnologías de material fértil, aleación eutéctica litio plomo o "pellets" de sales de litio, y de refrigerante, esencialmente agua o helio. Existen otras tecnologías, que no están maduras para su prueba en ITER pero podrían usarse en DEMO complementando los resultados obtenidos en el programa TBM con un programa de I+D específico, como la de refrigeración dual mediante el uso combinado de helio y litio-plomo circulante, que permitiría la operación del reactor a alta temperatura y mejoraría la eficiencia de los sistemas de conversión de potencia entre otras ventajas.

Mientras que en ITER nos concentraremos en obtener ganancia energética en el "sistema físico" del



Fig. 2: Prueba de resistencia de los anillos de precompresión que sujetarán radialmente los imanes superconductores en ITER. Los anillos, de fibra de vidrio, están siendo fabricados por Airbus-España, en Torrejón de Ardoz (Madrid). (Cortesía de ITER Organization)

plasma, en DEMO el objetivo será tener ganancia energética en la planta completa, incluyendo un ciclo térmico para generar electricidad y volcarla a la red. Las plantas comerciales de fusión tendrán una potencia eléctrica del orden de 1 GW, en el caso de DEMO el objetivo es más modesto: se plantea producir del orden de centenares de MW. Esta producción deberá mantenerse de manera continuada 24 horas al día siete días a la semana durante meses.

Otro rasgo que definirá a DEMO frente a ITER será el uso de materiales resistentes a los neutrones de 14 MeV generados en la reacción de fusión. Cuando un neutrón colisiona con el material genera una cascada de desplazamientos de átomos desde sus posiciones originales, en general éstos se vuelven a recolocar reconstruyendo la estructura pero pueden quedar pequeños defectos, que se acumulan con el tiempo de irradiación dando lugar a dislocaciones y debilitan el material. La medida de este daño es el "dpa" o desplazamiento por átomo. Un material sometido a 1 dpa es un material en el que en promedio todos sus átomos se han desplazado una vez de su posición original. En DEMO se espera llegar a dosis de 20 dpa en una primera fase y a más de 40 dpa en una segunda. El segundo efecto que se produce es que los neutrones de 14 MeV producen transmutaciones en el material, generando helio e hidrógeno que se acumula, produciendo hinchazón y pequeñas ampollas que afloran a la superficie; además se generan núcleos inestables, que hacen que el material estable se convierta en radiactivo. Esta activación da lugar a un residuo radiactivo al final de la vida del reactor que, sin ser comparable

a los de una central de fisión, es algo que hay que gestionar adecuadamente. Por otro lado, la activación es en sí misma un problema durante la operación de la planta, ya que impide el acceso de operarios al interior del reactor para reparaciones o mantenimiento. Esto lleva a la necesidad de diseñar y construir todo un conjunto de sistemas de mantenimiento remoto, capaz de realizar todas las operaciones en el interior del reactor sin intervención humana.

ITER, dados su potencia y ciclo de operación, no generará mucho daño o activación en el material y por esto se ha elegido para su construcción un acero relativamente convencional, bajo en cobalto y de baja permeabilidad magnética, sin embargo para DEMO y las posteriores plantas de fusión se plantea el uso de nuevos materiales, denominados de "baja activación", que reducirían significativamente el problema. La comunidad científica lleva también décadas trabajando en este campo y ya hay claros candidatos para su uso como materiales de los futuros reactores de fusión. A corto plazo contamos con aceros ferrítico-martensíticos (Eurofer en Europa, F82H en Japón) en los que se ha realizado una eliminación profunda de impurezas activables y una sustitución de los elementos aleantes tradicionales por otros químicamente equivalentes pero más estables frente a neutrones. A más largo plazo se cuenta con el vanadio o el carburo de silicio. Una de las ventajas del vanadio es su muy baja activación, que permitiría reciclar los residuos, para su uso restringido en un nuevo reactor, al cabo de menos de

50 años, mientras que el Eurofer requeriría al menos cien años de mantenimiento en un almacén antes de poder ser reutilizado.

El Eurofer se ha sometido a pruebas en reactores de fisión con resultados prometedores, pero, para simular completamente los efectos en un reactor de fusión, necesitamos irradiar con neutrones de mucha más energía, próxima a los 14MeV. No existen fuentes intensas de este tipo de neutrones y por ello se han desarrollado los proyectos IFMIF (*International Fusion Materials Irradiation Facility*) y su versión reducida IFMIF-DONES, (DONES: *DEMO Oriented Neutron Source*) que son fuentes de neutrones de 14 MeV con alta intensidad, basadas en aceleradores de deuterio que irradian un blanco de litio líquido circulante. IFMIF DONES está completamente diseñado y su construcción, para la que se ha propuesto un emplazamiento en Granada, podría comenzar en 2020, extendiéndose unos siete años.

Los resultados de ITER, junto con los de IFMIF-DONES y del programa de "Breeding Blankets" permitirían abordar la construcción de DEMO en la década de 2040, con el objetivo de generar electricidad por fusión en la red en la segunda parte de este siglo. Son periodos largos y proyectos muy costosos, pero el tamaño del problema que se pretende resolver es también enorme: el coste del gran proyecto ITER (aprox. 20.000 millones de euros), en el que participan países que albergan a más de la mitad de la población mundial, es equivalente al coste de tan solo un par de días de consumo de energía de la humanidad.



Fig. 3: El proyecto IFMIF DONES. Implantación artística en el entorno del parque de Escúzar, Granada. (Cortesía de CIEMAT)

PARA SABER MÁS

- G. McCracken, P.E. Stott, *Fusion, the Energy of the Universe*, Academic Press, Oxford 2005, 2ª ed. 2013
- T.J. Dolan, *Magnetic Fusion Technology*, Springer Verlag, London 2013
- J. Wesson, *Tokamaks*, 3ª ed. Clarendon Press, Oxford 2004
- J. Wesson, *The Science of JET*, disponible en <http://www.euro-fusionscipub.org/wp-content/uploads/2014/11/JETR99013.pdf>
- M. Wakatani, *Stellarator and Heliotron Devices*, Oxford University Press, Oxford 1998
- Yuhong Xu, *A general comparison between tokamak and stellarator plasmas*, *Matter and Radiation at Extremes Vol1*, Elsevier, 2016.
- Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468080X16300322>
- Eurofusion: www.euro-fusion.org
- ITER: www.iter.org
- Fusion for Energy: <http://www.fusionforenergy.europa.eu>

¿Son compatibles la eficiencia económica y el bien común?

Is economic efficiency compatible with the common good?

Antonio Argandoña-Rámiz
IESE Business School (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8703>

La empresa es una institución económica, y esto reclama el uso eficiente de los recursos escasos. **Giovanni Agnelli**, el que fue presidente de *Fiat*, definía a la empresa como una comunidad de personas con diferentes culturas, inclinaciones, aspiraciones, preferencias... que *"tienen que llevar a cabo el milagro de trabajar juntos, de modo que los resultados de la empresa sean los adecuados. Hoy y mañana"*.

Me parece una magnífica definición. No menciona el capital o las instalaciones, sino las personas, que son las que aportan esos recursos materiales y, sobre todo, su trabajo, su inventiva, sus conocimientos y capacidades, para llevar a cabo el milagro de conseguir que salga de ahí algo útil para los consumidores y para la sociedad. Y añade: hoy y mañana, porque la empresa tiene vocación de continuidad, lo que significa compromiso duradero con la tarea común, para que la empresa sea útil, eficiente y próspera.

Y esto nos lleva inmediatamente a la pregunta clave: ¿cómo se consigue que un grupo de personas con intereses y motivaciones distintos estén dispuestos a colaborar en un proyecto común, con continuidad y, si es posible, con ilusión? ¿Qué

reciben esas personas? Resultados económicos, desde luego: salarios y beneficios, por ejemplo. Pero también otras cosas: satisfacción por lo que hacen y por cómo se les trata, conocimientos y capacidades, relaciones de compañerismo, porque trabajan en algo compartido... y valores y virtudes, porque aprenden a colaborar con otros, a poner los intereses de los clientes por delante de los suyos propios, a echar una mano al colega que lo necesita... Cuando actuamos, aprendemos de nuestras propias acciones y de las de los demás: mejoramos o empeoramos como profesionales y como personas.

Hasta aquí nos ha llevado la definición de Agnelli. La empresa tiene un propósito en el que todos colaboramos, porque todos queremos que salga adelante. ¿Es el beneficio? No: este puede ser lo que mueve a los propietarios, aunque es probable que ellos también busquen otras cosas, como la satisfacción de tener un negocio prestigioso o la reputación de ser una empresa socialmente responsable. A pesar de lo que digan los economistas, todos los que entramos a trabajar cada día en la empresa lo hacemos porque queremos que eso que hacemos salga adelante, como tarea colectiva en la que todos participamos y nos comprometemos... ¿Lo hacemos porque lo exige el contrato de trabajo? Sí, pero, sobre todo, por otras razones. Lo que damos en la empresa no son solo las horas de convenio, sino muchas más cosas. Y lo

que recibimos no es solo un salario, sino, ya lo hemos dicho, satisfacciones, conocimientos, capacidades, relaciones, amistades, valores...

La eficiencia es necesaria porque, en todo caso, necesitamos que la empresa nos pague nuestro salario o, en el caso de los propietarios, el dividendo. Y esto se consigue cuando los clientes están dispuestos a pagar el precio adecuado: si esto no es así, la supervivencia de la empresa está en riesgo. Pero, ya lo hemos dicho, hace falta algo más. La empresa es una comunidad humana que se plantea, primero, cómo satisfacer las necesidades de sus clientes. Esta es la misión externa de la empresa: qué necesidades de qué personas vamos a satisfacer.

Y, como comunidad humana, tiene que motivar a sus propietarios para que sigan aportando el capital; y a los directivos y empleados, para que aporten horas, conocimientos e ilusión; y a los proveedores y distribuidores, y a la sociedad toda, en la que actúa la empresa. Esa es la misión interna: la satisfacción de las necesidades de los que participan en ella, para que ellos se vuelquen en la satisfacción de las necesidades de los clientes, que es la misión externa.

Y, como ya dijimos, esto es cuestión de recursos materiales, pero no solo de ellos. La empresa es una comunidad humana para satisfacer necesidades humanas: esto no es lo que suelen decir los libros





de texto, pero, si lo pensamos bien, ¿no es esta una magnífica manera de presentar la función social de la empresa? Por supuesto, añadiendo la condición de que esto se lleve a cabo con eficiencia, y con continuidad. Pero poniendo énfasis en las personas, porque son ellas las que, con su implicación, desarrollarán las capacidades específicas que harán de cada empresa una organización única, aunque parezca que hace lo mismo que las demás de su sector.

Al final, hemos tenido que ir a la sociedad a preguntar cuál es la función social de la empresa. Lo decía hace años **Peter Drucker**: *"si queremos saber qué es una empresa, debemos empezar por el propósito. Y su propósito debe estar fuera de la empresa misma. De hecho, debe estar en la sociedad, porque la empresa es un órgano de la sociedad"*.

En la definición de Agnelli con la que empezábamos estas reflexiones no aparecía explícitamente la figura del directivo, aunque estaba claro que el milagro de trabajar juntos para obtener unos resultados adecuados, económicos, psicológicos, sociales y morales, con continuidad,

de modo que, al final del día, todos los que participamos en la empresa podamos decir que hacemos algo que vale la pena, todo eso es la tarea de las personas que dirigen la organización.

"La dirección de empresas, decía en 2012 **Clay Christensen**, profesor de la *Harvard Business School*, está entre las más nobles profesiones, si se practica bien. No hay otra ocupación que ofrezca más vías para ayudar a otros a emprender y a crecer, a asumir responsabilidades, a ser reconocido por sus logros y a contribuir al éxito de un equipo".

Nótese que no habla de maximizar el beneficio o el valor de la acción, pero está definiendo lo que es un buen directivo, un directivo excelente, capaz de "ver" otras realidades, de valorarlas de "otra" manera y de presentar "otras" alternativas, de tener en cuenta todas las consecuencias de sus acciones para él mismo y para los demás... que sabe ponerse en la piel del otro, que desarrolla una cultura de diálogo, que huye de la tiranía del corto plazo, que crea confianza, que escribe "otra" historia... Pero esto solo lo ve el que se atreve a ponerlo en práctica: el directivo

excelente aprende no de los libros, sino de su propia experiencia y de la de los demás. Con dificultades y con errores, pero con la humildad de volver a intentarlo cada día.

Bien, pero me preguntará el lector: ¿y el bien común del título de esta conferencia? Estamos hablando de él casi desde la primera línea. En la empresa todos aportamos y recibimos muchos bienes tangibles e intangibles, y entre estos últimos hay bienes comunes que definen lo que es una empresa ética, socialmente responsable, amiga de las personas, creativa y humanista. ¿Eficiencia? Sí: es condición necesaria en una empresa que sale cada día al mercado para ganarse la confianza de sus clientes, expresada en ventas. Pero hace falta también el bien común. Como explicaba el fundador de *Whole Foods*, **John Mackey**, *"la empresa es muy fácil; el trabajo de los directivos es cuidar a los empleados; el trabajo de los empleados es cuidar a los clientes; clientes satisfechos cuidan a los accionistas... Es un círculo virtuoso"*.

La seguridad de la vida en el planeta, deducida mediante análisis de los acuerdos de las cumbres mundiales del clima y de los informes del IPCC

Security of life on the planet, derived from an analysis of the agreements of the world climate summits and the IPCC reports

Juan-Ignacio Canelo-Perez, Susana Laguela-Lopez, Pedro Mas-Alique y Arturo Farfan-Martin

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8854>

El trabajo constituye una aportación novedosa de la ingeniería y la universidad, realizada mediante análisis de contenido del texto procedente de las principales fuentes de información sobre el cambio climático y sus efectos, constituido por las declaraciones de las grandes Cumbres del Clima (COP.1 a COP.22) y por los informes del IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1990, 1995, 2001, 2007 y 2014), con el objetivo de determinar los aspectos relacionados con la defensa de la población mundial, advertir desde una perspectiva más sobre la gravedad del cambio climático antropogénico y los riesgos ambientales que supone, tratando de facilitar la comprensión del problema, acelerar la creciente sensibilidad de la población, generar conciencia pública de riesgo frente a las grandes amenazas y estimular a la actuación operativa, concertada e inmediata de los países.

Como indican algunos autores, para lograr la protección eficaz de la humanidad es necesario orquestar la gestión de planes preventivos en materia de riesgos con una comprensión cabal del problema (Amorin, Gandara Tarlow y Korstanje, [1]). En esa línea, el trabajo ha tratado de determinar los aspectos relacionados con la seguridad y la protección de la población mundial a partir de los documentos referidos, por tratarse de un tema sobre el que existe un riesgo real y una creciente sensibilidad promovida por los medios de comunicación entre científicos, actores políticos y el público (BoykoV y BoykoV, [2]), habiéndose pronunciado sobre el tema reiteradamente los científicos "Advertencia de World Scientists a la humanidad: un segundo aviso" Ripple et al [3].

Los resultados del análisis se

organizan en nueve factores: Factor 1, Determinante, responde a la pregunta ¿Qué está ocurriendo? Resultando con un peso del 23,13 %; Factor 2, Causal: ¿Por qué? ¿Cuáles son las causas? con una presencia en los textos analizados del 17,76 %; Factor 3, Previsión ¿Qué se sabe?, ¿Qué se necesita saber? que aparece un 12,92 %; Factor 4, Prevención ¿Qué se está haciendo? con un 13,28 %; Factor 5, Espacial ¿Dónde está ocurriendo? con un 11,91 %; Factor 6, Financiación ¿Cuáles son los costes del cambio climático? con el 6,90 %; Factor 7, Protección ¿Qué se espera? ¿Qué se desea? con un 5,82 %; Factor 8, Temporal ¿Cuándo ocurrirá? con el 5,33 % y Factor 9, Personal ¿Quién o quiénes son responsables? con un peso cuantitativo del 2,95 %, con alto consenso en señalar la causa antropogénica.

Desde el enfoque cualitativo los resultados marcan un potente factor Determinante que advierte de los riesgos, de la probabilidad de que se produzcan, de su magnitud y de la vulnerabilidad de la población, mostrando evidencias y lógicamente desencadena la preocupación por la seguridad.

Con relación a la seguridad que es el objeto de este artículo se organiza el factor Protección constituido por la conjunción de elementos que caracterizan las acciones frente al cambio climático conducentes a lograr la protección, con un reducido peso de la varianza total explicada por el conjunto; es decir, los documentos analizados solamente contemplan de manera directa la seguridad de la población en bajo porcentaje, que sin embargo se acompaña de los factores de anticipación constituidos por un moderado ámbito de previsión y de otro tanto para la prevención, ocupando entre ambos el 26,20 % del análisis global.

Las conclusiones permiten precisar sobre la profundidad de la previsión advertida por los organismos científicos ¿qué se sabe sobre el problema? y ¿qué se necesita saber para lograr el desarrollo

sostenible? frente a la debilidad de la prevención y la protección que requieren el soporte de la acción de la ingeniería de la seguridad, sobre la retórica de los discursos; ¿qué se está haciendo desde el punto de vista operativo? y ¿qué se necesitaría hacer? para alcanzar el grado óptimo de protección eficaz, esperado y deseado para garantizar la seguridad, la salud y la supervivencia de los seres vivos sobre la tierra.

REFERENCIAS

- [1] AMORIN, E., GANDARA, J. M., TARLOW, P., & KORSTANJE, M. (2012). "Seguridad percibida en la ciudad de Curitiba. Un sondeo exploratorio en residentes locales y turistas". *Revista de análisis turístico*, (14): 1-9.
- [2] TARLOW, P. (2011b). *Tourism Disaster Management in a age of Terrorism*. *Int. Journal of Tourism Anthropology. Special issue on Narrives of Risk, security & Disasters issues in Tourism and Hosp.* Korstanje, M. (editor). Vol. 1 (3-4): 254-272.
- [3] RIPPLE WILLIAM J, CHRISTOPHER WOLF, THOMAS M. NEWSOME, MAURO GALETTI, MOHAMMED ALAMGIR, EILEEN CRIST, MAHMOUD I. MAHMOUD, WILLIAM F. LAURANCE (2017). *World Scientists' Warning to Humanity: A Second Notice*. and 15,364 scientist signatories from 184 countries.

Evaluación del diseño de una interfaz cerebro-computadora para detección de emociones

Evaluation of the design of a brain-computer interface for emotion detection

Ramón-Sidonio Aparicio-García, Gustavo Juárez-Gracia, Jesús Álvarez-Cedillo, Jacobo Sandoval-Gutiérrez y Blanca Tovar-Corona
Instituto Politécnico Nacional (Méjico)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8862>

Con una interfaz Cerebro-Computadora (BCI) se puede lograr la detección de emociones a partir de la señal electroencefalográfica (EEG), tal como se ha reportado por Murugappan, et. al [1] y por otros trabajos similares. Sin embargo, una de las oportunidades detectadas para mejorar estos métodos fue desarrollada por Aparicio-García, et. al [2] mediante la descomposición wavelet discreta, ejecutada como proceso de extracción de características, seguida de la selección de características de mayor separabilidad, y la clasificación, buscando que el clasificador sea capaz de entrenarse de manera no intensiva, e igualando condiciones como las características, el número de canales, y las emociones asociadas.

De las dos clases de tecnología, las no invasivas miden la actividad cortical con sensores superficiales ofreciendo ventajas de bajo costo, fácil instalación y portabilidad, que contrastan con la dificultad de generar un método adecuado para el reconocimiento afectivo en cualquier dispositivo. En este sentido, el diseño de una evaluación para cualquier BCI en la detección de emociones definimos cuatro etapas que deberán ser analizadas y comparadas de forma independiente:

- a) Adquisición de las señales
- b) Extracción de características
- c) Selección de características
- d) Clasificación

En la adquisición de las señales la forma de evaluar la capacidad del método se mide con la reducción de canales, es decir, incorporar una mayor cantidad de información descriptiva, en el caso de [2] hubo una comparación que pudo reducir esto. En la extracción de características, la expresión matemática debe ser reducida para minimizar el costo del cálculo numérico. Para la selección de características dos métodos se consideraron prin-

cipalmente: ranking y selección de subconjuntos; por último en la clasificación se reportaron algunos como *Naive Bayes*, *Perceptron Multicapa*, K vecinos más cercanos, K-Star y Árbol de decisiones, los cuales son parámetros de referencia comparables y probadas.

La aportación presentada en la extracción de características por la descomposición wavelet es la propiedad de multi-resolución, útil al análisis del comportamiento frecuencial y los cambios temporales de la señal. Haciendo un comparativo para los métodos de búsqueda-selección, con la selección individual de características se obtuvieron los mejores desempeños para el caso de las clases de *arousal*, siendo un clasificador *Naive-Bayes* el de mayor porcentaje de asertividad. Para el caso de valencia, se tienen diferencias mínimas entre el resultado del método de selección de subconjuntos e individual, en donde no hubo mayor ventaja para cualquiera de los clasificadores. De los resultados revisados en [2] se puede observar, para la clasificación de acuerdo al eje de arousal, que en la mayoría de casos los valores de la *Entropía Relativa de Wavelet* (RWE o coeficientes ρ) de las ondas beta, resultaron ser las variables más descriptivas; mientras que la información relacionada con las ondas alfa y teta, así como del cuantificador de la Entropía de Wavelet Total Normalizada (NTWS), tuvieron un menor impacto. La mayor contribución de información útil durante la clasificación de señales respecto al eje de valencia, la proporcionaron las variables atributo relacionadas con el comportamiento de las ondas beta y alfa, siendo sólo reducidos casos en los que las ondas teta y el descriptor NTWS tuvieron relevancia. El cuantificador RWS no proporcionó información útil durante la clasificación para ninguno de los dos casos. Después de haber aplicado el método de reducción de características, se cumplió con verificar que para reducir el número de variables, se descartaron algunas poco descriptivas como las concernientes al cuantificador SWR y las relacionadas al cálculo de la entropía de Shannon de la señal para los tres tipos de onda. Un análisis realizado sobre las señales provenientes del sensor Fp1 demostró que puede ser

aplicable para la detección siempre que se realice un entrenamiento previo de la interfaz conectada al usuario final.

En conclusión, debido a la dificultad que representa la estimulación afectiva al tomar en cuenta el proceso de recabar información para la construcción de un conjunto de entrenamiento en el usuario final, mismo que no puede ser exhaustivo, es conveniente optar por algoritmos de clasificación cuyo entrenamiento no requiera de grandes cantidades de muestras, validando entonces, que los diversos métodos de ingeniería de características para la BCI son tema de investigación enfocada a optimizar las condiciones de aplicación en conjunto con las bases de la detección de las emociones.

REFERENCIAS

- [1] MURUGAPPAN Murugappan, RAMACHANDRAN Nagarajan, and SAZALI Yaacob, COMBINING SPATIAL FILTERING AND WAVELET TRANSFORM FOR CLASSIFYING HUMAN EMOTIONS USING EEG SIGNALS, *Journal of Medical and Biological Engineering*, vol. 31, no. 1, pp. 45-5. DOI: <http://dx.doi.org/10.5405/jmbe.710>
- [2] APARICIO-GARCIA, Ramon Sidonio, JUAREZ-GRACIA, Gustavo, ALVAREZ-CEDILLO, Jesus Antonio et al. FEATURE EXTRACTION AND SELECTION APPROACH FOR A BRAIN-COMPUTER INTERFACE IMPLEMENTATION IN EMOTION DETECTION. *DYNA New Technologies*, Enero-Diciembre 2017, vol. 4, no. 1, [13 p.]. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT7829>
- [3] KLAUS R Scherer, WHAT ARE EMOTIONS? AND HOW CAN THEY BE MEASURED?, *Social science information*, vol. 44, no. 4, pp. 695-729, DOI: <https://doi.org/10.1177/0539018405058216>

Calidad de la gasolina: clave en el control de emisiones

Gasoline quality: key to emission control

Blanca Sánchez-Fernández, Luis R. Sánchez-Fernández y M^a Mercedes del Coro Fernández-Feal
Universidad de La Coruña (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8879>

Los problemas debidos a la contaminación atmosférica [1], no se limitan al territorio de un país, sino que afectan o pueden afectar a otros colindantes. En España, la preocupación por la contaminación medioambiental como consecuencia de las emisiones de los automóviles y las industrias comienza oficialmente en 1972 con la Ley 38/1972 de protección del ambiente atmosférico; como resultado de esta Ley se definen y limitan oficialmente, por primera vez, las "características, calidades y condiciones de empleo de los combustibles y carburantes": Decreto 2204/1975.

La entrada de España, en 1985, en la CEE conllevó la obligatoriedad de la aceptación de los tratados internacionales que sobre contaminación ambiental suscribe la UE, lo que ha obligado a adoptar oficialmente medidas progresivas para garantizar la calidad de los combustibles de automoción, potenciar el uso de biocombustibles y establecer controles y plazos para su cumplimiento.

La legislación y normativa española ha tenido que adaptarse, en lo referente a la calidad de los combustibles, a lo establecido por Directivas Europeas: la Directiva Europea 2003/17/CE se traspuso en el Real Decreto 1700/2003, modificado con posterioridad por el Real Decreto 61/2006. La Directiva Europea 2009/30/CE se traspuso en el Real Decreto 1088/2010 que modifica pero no anula el Real Decreto 61/2006 y es el actualmente en vigor para especificar la calidad de la gasolina.

Como consecuencia de la adaptación a las exigencias medioambientales y técnicas, las especificaciones de calidad de las gasolinas han sufrido una gran evolución. La aparición del convertidor catalítico en los vehículos que utilizan gasolina como combustible supuso la paulatina aparición en el mercado de gasolina cada vez más baja en plomo y con menor contenido en azufre con las correspondientes modificaciones legislativas. Esta evolución también está determinada por la normativa sobre

emisiones contaminantes a la atmósfera. El control de emisiones ha suscitado y suscita un notable y generalizado interés, lo que se observa en el paralelismo existente en la evolución legislativa sobre emisiones en Europa y América[2].

En los últimos tiempos, para cumplir las cada vez más restrictivas leyes medioambientales también se ha actuado mediante nuevos y continuos desarrollos tecnológicos de los motores y equipos en los que se quema el combustible (nuevos sistemas de inyección, control electrónico del tiempo de inyección, catalizadores, filtros de partículas, etc.). Esto ha obligado a modificar ciertas características de calidad, para su adaptación a dichos cambios y al control del tipo y cantidad de gases de combustión emitidos a la atmósfera por los vehículos en marcha, incidiendo sobre todo en el control de material particulado y NOx.

Los parámetros conducentes a especificar la calidad de las gasolinas sobre los que más se ha legislado con el objetivo de controlar las emisiones y la calidad del aire atmosférico son el contenido en azufre, plomo, compuestos oxigenados e hidrocarburos (aromáticos, olefinas y benceno). Simultáneamente se han tomado acciones sobre las emisiones, entre las que destacan las emisiones de NOx; familia que comprende hasta cinco compuestos de nitrógeno y oxígeno, algunos con una vida media en la atmósfera de más de 100 años.

El control de emisiones se evidencia como clave para luchar contra la contaminación atmosférica. Para ello se debe considerar conjuntamente: actuar sobre la calidad del combustible y realizar las correctas modificaciones técnicas en el motor. Es por tanto, necesario establecer



protocolos de medida de contaminantes, fiables y universalmente aceptados, para avanzar en la lucha contra la contaminación atmosférica y asegurar la salida al mercado de gasolina y vehículos que cumplan las reglamentaciones establecidas con este propósito.

REFERENCIAS

- [1] Sullivan TJ, Driscoll CT, Beier CM et al. Air pollution success stories in the United States: The value of long-term observations. *Environmental Science and Policy*, June 2018, vol.84, p.69-73. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.02.016>
- [2] Comparative study on the differences between the EU and US legislation on emissions in the automotive sector. Directorate General for Internal Policies. Policy Department a: Economic and Scientific Policy. IP/A/EMIS/2016-02. PE 587.331. December 2016. [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/587331/IPOL_STU\(2016\)587331_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/587331/IPOL_STU(2016)587331_EN.pdf)

Proyecto de industria turística conectada 4.0. a velocidad de crucero

Tourism industry project connected 4.0. at cruising speed

Teodoro Vázquez-Vázquez¹, Amalia Luque-Sendra² y Luis Gonzalez-Abril²

¹ SAGEP Puerto de Sevilla (España)

² Universidad de Sevilla (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8884>

Los nuevos desarrollos tecnológicos, la hiperconectividad y la globalización de la economía están planteando importantes oportunidades y retos a la economía actual. Por ello, la industria también debe abordar estas oportunidades y retos, para evolucionar y posicionarse como un sector fuerte, competitivo y de referencia internacional.

El concepto de Industria 4.0 [1] es relativamente reciente y se refiere a la cuarta revolución industrial que consiste en la introducción de las tecnologías digitales en la industria. Con el objetivo de acercar la industria turística de cruceros al paradigma de Industria 4.0., se comenzará por detectar la dirección de mayor gradiente de innovación.

Los datos del problema abordado se basan en los juicios de los clientes y están directamente recogidos de ellos, a través de encuestas personalizadas y de sondeos en webs públicas. Se trata de un problema de evaluación multivariable, dado que la satisfacción general del cliente depende de un conjunto de variables que representan las características del producto o servicio. Por lo general, se utiliza una fórmula aditiva para agregar evaluaciones parciales en una medida de satisfacción global [2].

Se busca contrastar a partir de un cuestionario/encuesta cuál es la valoración de los pasajeros a la atención recibida a bordo cuando embarcan en un buque de pasaje, así como identificar los aspectos más significativos que ayuden a mejorar u optimizar los servicios a bordo. Para ello se lleva a cabo un cuestionario de elección forzada que analiza campos referentes a la atención al pasajero a bordo y, sobre todo, se consulta el grado de interés que supondría para el mismo, el complementar la misma por medio de aplicaciones basadas en nuevas tecnologías [3].

Los resultados aportados enfocan

propuestas de mejora en los servicios a bordo para el pasaje a través de nuevas tecnologías, cumpliéndose los objetivos trazados en aras de cuantificar cuáles son los factores más valorados y los de menos puntuación desde la opinión subjetiva del pasajero.

Se infiere la necesidad de desarrollar un aplicativo, que podría adquirir especial importancia por su concepto innovador, aportando como novedad a los ya implementados la posibilidad de elección flexible por parte del pasajero de la excursión y visita en el puerto de recalada del buque. Este desarrollo estará dotado de información institucional y de la hostelería, ocio, actividades culturales y guía interactiva del puerto de recalada, con opciones de ofertas y descuentos que potencien la elección libre del pasajero, en el ámbito de una elección idiomática previa, autónoma de cada terminal del cada pasajero.

Se propone el desarrollo de una solución tecnológica para la industria turística, específicamente a los barcos de pasajeros, bajo el paradigma de industria 4.0. El objetivo fundamental es, una vez detectadas las carencias o necesidades de los pasajeros, proponer una solución que, mediante la implantación de facilitadores tecnológicos, permita que la inversión en mejora tecnológica se haga en la dirección de máximo gradiente.

Se ha realizado una aproximación, por medio de sondeo de opiniones aportadas en webs públicas por pasajeros en diferentes rutas y en diferentes buques de crucero. Se han obtenido cuales son los factores más valorados y los de menos valoración, por parte del pasajero, considerándose estos últimos, los más idóneos a la hora de proponer fórmulas y medidas de mejora.

Esta propuesta abre las puertas a futuras líneas científicas y de investigaciones que podrían enfocarse tanto al sector náutico marítimo como al turístico. Así se potenciaría la interconectividad entre buque y puerto de recalada y los estudios sobre control de masas, flujos turísticos en ciudades con amplio patrimonio artístico-cultural y sectorización del consumo, proponiéndose una opción flexible de



elección para el pasajero en excursiones y visitas en puertos de destino del crucero. Esta aplicación debería estar dotada de información institucional y de la hostelería, ocio, actividades culturales y guía interactiva del puerto de recalada, con opción de ofertas y descuentos que potencien la elección libre del pasajero, junto al consumo responsable. El mismo supondría una mejora en el servicio planteado por la naviera de cruceros que posibilita garantías de fidelización del usuario y para el puerto *Smart City* supone una gestión fiable del flujo del pasaje.

REFERENCIAS

- [1] Crivat, B.: SQL (2006) Server Data Mining Programmability. Fecha de Acceso: 12 de diciembre de 2016.
- [2] Grigoroudis, E., & Siskos, Y. (2009). Customer satisfaction evaluation: methods for measuring and implementing service quality (Vol. 139). Springer Science & Business Media.
- [3] Luque Gil, A. M., Zayas Fernández, B., Herrero, C., & Luis, J. (2015). Los Destinos Turísticos Inteligentes en el marco de la Inteligencia Territorial: conflictos y oportunidades. *Investigaciones Turísticas* nº10 2015.
- [4] VAZQUEZ-VAZQUEZ, Teodoro, LUQUE-SENDRA, Amalia, GONZALEZ-ABRIL, Luis et al. INTEGRATION OF THE TOURISM INDUSTRY TO SMART CITIES THROUGH AN APPROACH OF INDUSTRY 4.0. AND ITS APPLICATION TO CRUISE BOATS. *DYNA Management*, January-December 2018, vol. 6, no. 1, [14 p.]. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/MN8759>.

Ingeniería multidisciplinaria para resolver el problema del congestionamiento en sistemas vehiculares

Multidisciplinary engineering to solve the congestion problem in vehicle systems

■■■■
Jorge Rojas-Ramírez¹ y Damien Trentesaux²

¹ Instituto Politécnico Nacional (México)

² Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis (Francia)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8915>

El congestionamiento de vehículos en las calles es en la actualidad un problema común a las grandes ciudades en el mundo. El índice de TomTom para medir la congestión [1], que expresa en porcentaje el tiempo que a un vehículo toma cumplir un recorrido típico respecto del tiempo en hacerlo en el caso de un flujo libre, es significativo de que las ciudades presentan diferentes condiciones. En el caso de la Ciudad de México, la primera en la lista, el índice resulta de 66%.

Puesto que los vehículos en circulación son de las mismas características en todas las ciudades, se infiere que éstos no son el único factor de influencia en el rendimiento. Entonces, las investigaciones en ingeniería destinadas a mejorar los diseños de los automóviles no son las únicas opciones que deben alentarse para resolver el problema.

La medida de la falta de fluidez con este índice es consistente con otros indicadores usuales de un sistema de circulación, como las horas laborales perdidas, las emisiones contaminantes y los problemas causados al bienestar de los humanos participantes, tanto en lo físico como en lo emocional. Por consiguiente, una mayor fluidez repercute favorablemente en los rendimientos económico, ecológico y de bienestar.

Para investigar soluciones deben tomarse en cuenta, como variables de entrada al sistema, el vehículo, la infraestructura viaria y el conductor, principalmente.

Como guía de operación del sistema se requiere de normatividad, dada por reglamentos y gestión. Se ubica en un lazo cibernético la corrección de las desviaciones entre lo logrado por el sistema y lo diseñado idealmente, en gran medida debidas a las interpretaciones y comportamientos humanos presentes [2].

En esencia, se espera que la infraestructura viaria ofrezca la resolución de conflictos anticipada. Por conflicto se entiende la solicitud simultánea de dos o más vehículos por ocupar el mismo espacio urbano dentro de sus recorridos. Las reglas de prioridad para dirimir el derecho de paso, entre las principales, se establecen con semáforos, señales verticales y al piso de *alto*, de *ceda el paso*, de *prioridad a la derecha* en cruceos, de *prioridad a la izquierda* en rotondas. La elección de alguno de estos instrumentos debe observar las condicionantes específicas de cada intersección, con bases formales.

De esta manera, los tiempos de recorrido individuales de los vehículos se componen de tres elementos: el *tiempo de flujo libre*, en ausencia de otros usuarios; el *tiempo de espera*, por la cesión del paso según las prioridades en puntos de conflicto, y; el *tiempo muerto*, en el que no hay avance, sin que exista justificación. En éste se incluyen los obstáculos como hundimientos, topes o resaltos en el piso, letreros confusos, indefinidos o ambiguos, que obligan a destinar un lapso adicional para acordar o disputar el derecho de paso.

Como comprobación experimental de lo anterior se realizaron trayectos conduciendo vehículos en ciudades diversas, atendiendo a la señalización establecida en la infraestructura viaria. La observación confirmó el resultado de que en los casos de circulación fluida la información vial es

de ayuda y reduce los tiempos muertos, mientras que en los restantes ocurre lo contrario, con un deterioro de los tiempos de trayecto.

Algunos ejemplos del segundo escenario son las señales simultáneas de semáforo en verde y letrero de *pare*, o bien, los de *ceda el paso* puestos a ambas arterias en conflicto, por citar algunos, así como la proliferación de topes que obligan a hacer alto en vías primarias, con las consecuentes pérdidas de tiempo. Su colocación supone que reducir los flujos lleva a un sistema más estable, pero esta visión es parcial, con las consecuencias descritas.

Se destaca entonces la oportunidad para la acción sinérgica de las disciplinas de la ingeniería en la conformación de proyectos académicos de aplicación. El rediseño de la infraestructura viaria [3] en las ciudades de rendimiento deficiente debe promoverse con la participación de expertos de las ingenierías automotriz, del transporte, ambiental, informática, así como de la aportación de representantes de los sectores de gobierno, de educación y de la sociedad [4]. Las aportaciones, coordinadas sistémicamente, podrán generar soluciones factibles, probadas y efectivas en la corrección y la prevención de los congestionamientos viales.

REFERENCIAS

- [1] TomTom. "Measuring Congestion Worldwide", TomTom Traffic Index, 2017. [ref. abril 2018]. Disponible en Internet: <http://www.tomtom.com/en_gb/trafficindex>
- [2] Kolski C, Garbay C, Lebrun Y, et al. "Interactive Surfaces, Tangible Interaction: Perspectives for Risk Management", en Millot P (ed.), Risk Management in Life Critical Systems, Londres: Wiley, p.351-373, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118639351.ch17>
- [3] Thornton SM, Pan S, Erlen SM, et al. "Incorporating Ethical Considerations into Automated Vehicle Control", IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems, Vol. 18, N°6, p.1429-1439, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2609339>
- [4] Rojas Ramírez J y Trentesaux D. "Resolución de Conflictos en la Circulación Urbana con Ingeniería Transdisciplinaria", DYNA New Technologies, p.x, 2018. DOI: <https://doi.org/>



La importancia del título, del resumen y de las palabras clave en un artículo técnico o científico

The importance of title, abstract and keywords in a technical or scientific article

Revista DYNA

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8573>

La decisión de preparar y enviar un artículo a una publicación científica o tecnológica supone un considerable esfuerzo, cuyas características no deben dejarse al buen hacer y/o a la improvisación.

Pero si es importante el contenido por su originalidad, desarrollo y conclusiones, no lo es menos el tener en cuenta los componentes del mismo citados arriba, que pueden ayudar al éxito o fracaso de una difusión y, por lo tanto, reconocimiento del trabajo realizado.

Es evidente que la revista, papel o digital, que tras una ardua evaluación admite la publicación del artículo, es el medio primario al que acceden los lectores suscritos, compradores o gratuitamente, si está en el grupo de *open journals*. Pero siempre se tratará de una opción muy limitada: el público científico global dispone para la localización de informaciones de su interés los medios de búsqueda, las bases de datos o los sitios web especializados, en el

medio digital. Y para ello el título, el resumen y las palabras clave son la base más importante que los autores deben utilizar si desean darlo a conocer de la forma más extensa posible y, sobre todo, si pretenden ser citados por quienes a su vez publiquen sobre el mismo tema.

Los editores de publicaciones técnicas y científicas también pueden tener una primera impresión del texto recibido con esos tres elementos y decidir si lo pasan a evaluar. No es grato encomendar una misión a los evaluadores sobre algo que, desde un primer momento se aprecia confuso, conocido, de escasa originalidad o ya muy presente en la web, cosa fácil de encontrar con rapidez. Además, tras la aprobación y publicación, son esos mismos elementos los que se ofrecen gratuitamente al eventual lector en los mecanismos de búsqueda y con los que tiene que decidir el que accede a ellos si lo descarga, para lo que no es infrecuente el abono de una cantidad dineraria: la fuerte decepción si falla la concordancia con el contenido causa graves perjuicios a la publicación que los contiene.

Damos desde DYNA algunas orientaciones con el objetivo de ayudar a nues-

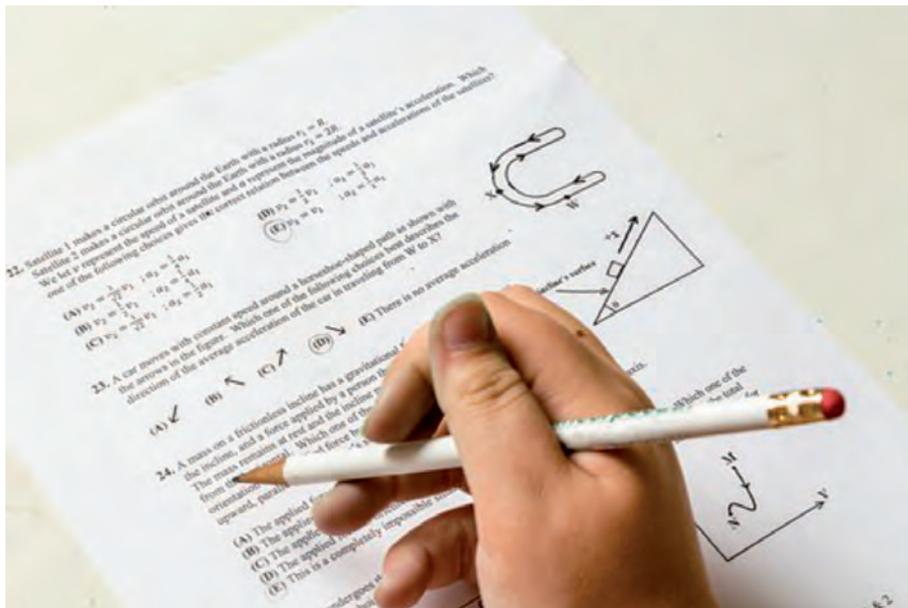
tros autores y evaluadores a que su trabajo tenga la mayor repercusión posible y a que otros técnicos y científicos los conozcan y utilicen o citen su contenido, lo que también incidirá en un mejor índice de cualificación.

Las palabras clave como punto de partida

Cuando se aborda la redacción de un artículo, explícita o implícitamente nos estamos preguntando *cuál es el problema que hemos deseado resolver o qué nos ha motivado la ejecución del trabajo*, siempre enmarcado en una especialidad determinada. Eso será el arranque de la INTRODUCCIÓN, que continuará con una muy breve justificación apoyada por el *estado del arte de la tecnología*. No se trata de hacer un alarde bibliográfico repitiendo en el texto nombres, fechas, publicaciones, artículos consultados, etc.: un artículo no es una tesis y con dar el número asignado en la lista de referencias, no solo basta, sino que hace la lectura resulte más amena y dispondremos de mayor espacio para el texto.

El siguiente paso será exponer el *cómo hemos actuado* para conseguir el objetivo marcado: constituye el capítulo de MATERIALES Y MÉTODOS utilizados. A continuación, RESULTADOS marcarán la información sobre lo encontrado en los *ensayos o pruebas* realizadas y CONCLUSIONES la relación entre los objetivos indicados al comienzo del texto y lo visto en los resultados, sin olvidar nunca las *repercusiones prácticas* que pueden tener para la tecnología de productos o procesos involucrados: un trabajo que se queda en mera especulación de posibilidades pierde una parte notable de su valor.

El aspecto más difícil ahora es el escoger de cada una de las partes citadas la o las *palabras* que mejor representen el trabajo y la tecnología que lo soporta. Bien entendido que tendrán preferencia las que presenten mayor nivel científico o mejor comprensión por parte de los colectivos técnicos. Esa lista, por ejemplo, entre cinco a siete palabras, es lo que llamamos las *palabras clave* que nos serán de mucha utilidad para la preparación del título y del resumen.



El título y el resumen

¿Sería posible escribir una frase coherente con las palabras clave en el orden expuesto? Quizá eso nos empiece a orientar sobre cuál podría ser el título del trabajo, evidentemente eliminando los conceptos repetidos y la información que no sea destacable o necesaria, llegando a un máximo de 10 a 12 palabras con el mayor atractivo posible para incitar a la lectura: no se trata de exhibir conocimientos complejos sobre métodos o herramientas, sino de mostrar con preferencia que se van a proponer conclusiones útiles para otros investigadores. Estos son los que van a citar el trabajo ofrecido.

Como ejemplo ficticio, pero con una estructura no tan rara entre algunos de las propuestas que se reciben, damos el título ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN MEDIANTE LA APLICACIÓN DE SIMULACIONES CON EL PROGRAMA PLAXTIX® DE LA MEJORA POR ADICIÓN DE FENOLES DEL POLÍMERO XXXX EN LA CARACTERÍSTICA DE RESISTENCIA A LA TEMPERATURA. Es evidente que afirmar que tratamos de hacer un *análisis*, lo mismo que un *estudio* o una *implementación*, es obvio e innecesario

rio citar, y lo mismo que se hace *mediante la aplicación* de alguna herramienta; también que lo esencial, la *mejora de la resistencia a la temperatura*, debería situarse en lugar preferente. La excesiva longitud del título es posible reducirla simplemente como MEJORA DE LA RESISTENCIA A LA TEMPERATURA DEL POLIVINILO XXX POR ADICIÓN DE FENOLES SIMULADA CON PLAXTIX®, incluye todo lo deseado para los interesados en las propiedades del polivinilo XXX, que, si no conocen aun lo que es el programa de simulación PLAXTIX®, lo verán en el apartado de Materiales y Métodos. Además, manifestaremos en el momento oportuno que se trata solamente de una simulación y que posteriormente podría seguir un trabajo complementario de evaluación en laboratorio.

Las palabras clave y el título elegido serán ahora la base para redactar un resumen que, con 100 a 200 palabras, llame aún más la atención de los potenciales lectores. Prácticamente en el mismo orden que el título, bastaría con desarrollar las frases necesarias que comprendan cada uno de los apartados referenciados, pero además con un breve complemento de lo

obtenido como resumen y conclusiones. Lógicamente, si el trabajo ha sido exitoso debe reflejar hasta qué punto se ha conseguido en las conclusiones *resolver el problema planteado como objetivo*. En las publicaciones técnicas se aplica mejor el resumen "informativo" que el "descriptivo" muy detallado y menos aún el "estructurado" con separación de apartados.

Comprobación

Antes de dar por buenos estos tres importantes componentes de un artículo, es prudente introducirlos en un buscador y estudiar los resultados de la búsqueda: habitualmente es lo que realizan editores o evaluadores. La originalidad, tanto en los objetivos como en las conclusiones, pueden marcar el atractivo de lectura. E incluso hacer una nueva búsqueda con los nombres de los autores, también recurso frecuente, ya que muestra si los trabajos recibidos son nuevos o simple reescritura de otros anteriores. Es importante, ante cualquier similitud, hacer resaltar las diferencias existentes.

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 49 €/año

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



Efectos ambientales y económicos de la utilización de energías renovables en instalaciones térmicas residenciales según objetivos 2030: estudio de caso en la provincia de Granada (España)

Environmental and economic effects of using renewable energy in residential thermal installations according to 2030 targets: case study in the province of Granada (Spain)

Manuel Carpio¹, María Martín-Morales² y
Montserrat Zamorano²

¹ Pontificia Universidad Católica de Chile (Chile)

² Universidad de Granada (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8556>

1. INTRODUCCIÓN

El modelo energético actual basa el 84% del consumo en el uso de combustibles fósiles tradicionales, como el carbón, el gasoil y el gas natural [1], a pesar del marco legal desarrollado en todo el mundo para responder a la necesidad de suministrar energía en el contexto del desarrollo sostenible [2-4]. Como resultado de esta situación, el bienestar social y el crecimiento económico se ven amenazados por la vulnerabilidad de nuestro modelo energético actual a los futuros problemas de suministro de energía. Por otro lado, en los últimos años, otro factor indudablemente ha contribuido a un cambio en la percepción mundial de los problemas energéticos: el cambio climático provocado por las emisiones de gases de efecto invernadero [5].

Debido a la gravedad de estos problemas a escala mundial, se ha hecho necesario que todos los países desarrollen medidas medioambientales y energéticas para reducir los efectos negativos en el planeta del uso de combustibles fósiles. En Europa, la política sobre energía y protección climática se ha expresado en tres objetivos estratégicos que conforman los "objetivos 2030" [6] diseñados para reducir el consumo de energía primaria y las emisiones de gases de efecto invernadero

en la Unión Europea, ayudado, entre otras medidas, por una mayor contribución de las energías renovables [3]. Estos objetivos están contruidos sobre los inicialmente propuestos en el PECC 2020 [3] para combatir el cambio climático. Para alcanzar estos objetivos debemos actuar en las áreas prioritarias de generación y consumo de energía, y emisiones, asumiendo los compromisos especificados en la Directiva 2009/28/CE [7].

Una de estas áreas prioritarias es el sector de la construcción, ya que es responsable del 40% del consumo mundial de energía y del 36% de las emisiones de CO₂ a la atmósfera [8,9]. Hasta ahora, la mayoría de los sistemas de calefacción en edificios han utilizado fuentes de energía convencionales, lo que genera altos niveles de emisiones de CO₂: alrededor de 44 kgCO₂/m² por año para el gas natural y 58 kgCO₂/m² por año para el gasoil [10].

La elección del combustible es, por lo tanto, un factor clave al evaluar el impacto ambiental del consumo de combustible en el sector de la construcción, por lo que se debe tomar medidas para reducirlo. El uso de combustible a partir de fuentes renovables sería una contribución valiosa para resolver el problema de las emisiones de CO₂ en los edificios, ya que pueden reducirse hasta en un 95% mediante el uso de energías renovables [10]. La biomasa es claramente una buena alternativa de combustible para sistemas de calefacción, aire acondicionado y ACS, ya que es una fuente de energía económica y accesible que prácticamente no tiene impacto ambiental [11]. Sin embargo, a pesar de sus ventajas, la biomasa no se usa de forma muy exten-

sa como combustible en edificios en países como España [10].

Otras investigaciones llevan a cabo estudios similares, como Pardo, que realiza una evaluación de varias medidas para mejorar la eficiencia energética y la emisión de CO₂ en las casas unifamiliares europeas [12], incluso por países específicos como Joelsson en Suecia [13] o Devlin en Irlanda [14].

Este estudio analiza la capacidad de potencia instalada en edificios de la provincia de Granada con una muestra de 6.234 calderas, considerando los diferentes sistemas de calefacción, refrigeración y ACS. Se realiza una evaluación de los combustibles utilizados en la actualidad y su reemplazo por biomasa, mostrando los beneficios ambientales y financieros que se obtendrían del uso de biomasa como combustible para los propósitos anteriores en el sector de la construcción.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. ÁMBITO GEOGRÁFICO

Como se puede ver en la Fig. 1, la provincia de Granada, España, fue elegida para este estudio, con 169 municipios. La provincia de Granada es la que tiene el mayor rango de altitud en la península ibérica, desde el nivel del mar en la costa en el sur hasta la cima más alta de la península ibérica, Mulhacén (3.479 m), en Sierra Nevada [15].

Las zonas climáticas se pueden clasificar según la severidad del clima en invierno y en verano, y la influencia combinada de la temperatura exterior y la radiación solar. La escala utilizada depende del país de la Unión Europea considerado [16]. En España se encuentran 12 de las 20 posibles zonas climáticas mundiales [17], y la provincia de Granada, debido a las diferencias de altitud y la morfología distintiva del terreno, contiene 11 de las 12 zonas posibles en España [18]. Por lo tanto, puede considerarse un área representativa desde el punto de vista climático [18].

2.2. RECOPIACIÓN DE DATOS

Los datos necesarios para el estudio, descritos a continuación, provienen de los censos proporcionados por instaladores de equipos de calefacción, aire acondicionado y ACS con la autorización de la Dirección General de Industria, Energía y Minas, dependiente de la Consejería de Empleo, Empresa y Comercio de la Junta de Andalucía [19].

Para obtener una muestra representativa se estudiaron diferentes tipos de calderas instaladas en diferentes municipios de la provincia de Granada, obteniéndose una muestra válida de 2.213 registros con 6.234 calderas. Cada uno de los registros cubre un edificio, que puede ser una casa unifamiliar o un edificio plurifamiliar. Por lo tanto, puede existir más de una caldera por registro. Los datos de las calderas proporcionan información sobre los diferentes combustibles utilizados, ya sea de un solo tipo (electricidad, gasoil, gas natural, propano o biomasa) o una combinación (gas-electricidad, electricidad-biomasa, electricidad-gasoil), la capacidad instalada del sistema y la cantidad de unidades por sistema. Cada combustible tiene diferentes necesidades de almacenamiento, espacio y suministro. Por ejemplo, la red de gas natural no llega a todas las áreas; el gasoil y la biomasa necesitan grandes espacios de almacenamiento; el propano se suministra en cilindros; etc.

2.3. MEDICIÓN DE EMISIONES, COSTO Y TIEMPO DE USO

Las emisiones teóricas de CO₂, para los diferentes tipos de combustible, se calcularon de acuerdo con los coeficientes de equivalencia especificados en *Factores de emisión de CO₂ y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector de edificios en España* [20], actualizados en 2016, como se muestra en la Tabla 1. Por otro lado, la energía primaria utilizada se calcula a partir de los datos de prueba oficiales [20]. El costo de usar los diferentes tipos de combustible, en €/kWh, como se observa en la Tabla 1, es el costo oficial registrado en los informes periódicos publicados por el gobierno español y las compañías energéticas [21–25].

Combustible	Emisiones CO ₂ (kg CO ₂ /kWh)	Costo (€/kWh)
Gasoil	0,311 [20]	0,105 [21]
Gas natural	0,252 [20]	0,050 [22]
Gas propano	0,254 [20]	0,080 [23]
Electricidad (península ibérica)	0,357 [20]	0,122 [24]
Biomasa	0,018 [20]	0,049 [25]
Solar	0 [26]	0 [26]
Mixto (Gasoil-electricidad)	0,334 [20]	0,114 [21,24]

Tabla 1: Factores de equivalencia de emisiones de CO₂ y costos económicos

Finalmente, las cifras promedio de uso anual, de acuerdo con las condiciones medias para la zona climática [10], son las calculadas por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) [27] utilizando datos estadísticos de los últimos años. Se usaron los siguientes datos: refrigeración 360 horas/año; calefacción 1.500 horas/año; ACS 365 horas/año y C+ACS 1.850 horas/año [28].

2.4. PROGRAMA EUROPEO SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO

En este estudio se analizan los efectos de la aplicación de medidas diseñadas para lograr los objetivos especificados en el programa 2030 [6]. Este programa establece tres objetivos mínimos clave para el año 2030:

- (i) Al menos, un 40% menos de emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con 1990.
- (ii) Al menos, un 27% de energías renovables en el consumo de energía.
- (iii) Al menos, un 27% de mejora de la eficiencia energética.

También está en línea con la perspectiva a más largo plazo establecida en la *Hoja de ruta para avanzar hacia una economía competitiva baja en carbono en 2050* [29], *Ruta energética 2050* [30] y el *Libro Blanco del Transporte* [31]. Debe

recordarse que los objetivos PECC 2020 fueron 20% -20% -20% respectivamente en las mismas claves [3].

3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos de los registros se muestran en las Tablas 2 a 4 y en las Fig. 2 y 3. Estos resultados se analizaron en términos de: (i) desglose del consumo de combustible; (ii) beneficios ambientales; y (iii) beneficios económicos del uso de biomasa.

Estos resultados se resumen y analizan en las siguientes secciones.

3.1. DISTRIBUCIÓN DE USO DE COMBUSTIBLE

En la Tabla 2 y la Fig. 2 se muestran la capacidad instalada y el porcentaje de uso para diferentes tipos de combustible, de acuerdo con el sistema utilizado (refrigeración, calefacción, ACS y C+ACS) y el total general. Se puede observar que, en términos de capacidad instalada total, el gas natural, con ≈49% y 92.424 kW, es el más utilizado, seguido de cifras sustancialmente menores para electricidad y gasoil. Los resultados también muestran que el uso de energías renovables en el área es limitado, siguiendo las tendencias observadas en otros estudios [32]; la biomasa, con el 4,31% (8.161 kW), es la energía renovable más utilizada, mientras que la energía solar solo representa el 0,19% (364 kW) de uso.

El análisis de los resultados por uso (Fig. 2) muestra que para refrigeración la fuente de energía más utilizada es la electricidad (≈62%, 23.508 kW), mientras que el gasoil (≈39%, 13.829 kW) y el gas natural (≈34%, 11.893 kW) se usan más para calefacción. Finalmente, en el caso de ACS y C+ACS, el gas natural representa la mayor parte del uso, con ≈52% y ≈67% respectivamente. Las energías renovables representan ≈5% del total general de 85.245 kW, la cifra más alta para el uso de la biomasa en el calentamiento aproximadamente el 12% (4.092 kW), mientras que su uso para el ACS es insignificante (≈1%, 99 kW). Estos porcentajes, observados dentro del área estudiada, siguen las tendencias mundiales generales para las energías renovables, que registran 4,50% para el uso de biomasa en calderas y 0,4% para energía solar [33].

En la distribución geográfica de las calderas, se ha observado que las calderas colectivas se encuentran principalmente en edificios de grandes ciudades, como Granada, Baza y Guadix. Por otro lado, en los municipios más pequeños la mayoría de las calderas instaladas son individuales.



Fig. 1: Ubicación de la provincia de Granada. El punto es la capital

Combustible	Refrigeración	Calefacción	ACS	C+ACS	Total
Gasoil	176,00	13.828,80	1.920,70	3.271,75	19.197,25
Gas natural	3.881,30	11.893,06	4.859,35	71.789,90	92.423,61
Gas propano	824,10	496,90	1.333,80	12.501,75	15.156,55
Electricidad	23.508,05	1.075,54	12,80	3.343,60	27.939,99
Biomasa	694,0	4.092,16	99,00	3.275,52	8.160,68
Solar	0,00	0,00	256,30	107,73	364,03
Mixto	8.543,36	3.630,61	834,10	12.504,39	25.512,46
Otros	0,00	35,00	0,00	497,90	532,90
Total	37.626,81	35.052,07	9.316,05	107.292,54	189.287,47

Medidas en kW

Table 2: Desglose de la capacidad instalada por tipo de combustible en la provincia de Granada

3.2. FACTORES AMBIENTALES

Las cifras obtenidas para el uso de diferentes fuentes de energía y los criterios descritos anteriormente para el cálculo de las emisiones de CO₂ se utilizaron para establecer las emisiones generadas por el uso de energía incluido en el estudio (Tabla 3). Se observa que el combustible que genera la mayoría de las emisiones de CO₂ es el gas natural, debido a la gran cantidad de equipos que utilizan este combustible, que representa el 43,53%, seguido de la electricidad, el sistema mixto gasoil-electricidad, el gas propano, el gasoil y la biomasa con 17,81%, 15,92%, 11,31%, 11,15% y 0,27% respectivamente.

La Fig. 3 muestra los cambios necesarios desde el 2016 hasta el 2030 para que las emisiones de CO₂ en la provincia de Granada se reduzcan en línea con los objetivos 2030. Estos cambios se han realizado en una hipótesis de sustituciones proporcionales de los combustibles fósiles hacia las energías renovables. Se puede observar que la capacidad instalada para energías renovables debe aumentar desde la cifra actual del 4,50% (4,31% de biomasa y 0,19% solar) hasta el 27% especificado en los objetivos (25,86% de biomasa y 1,14% solar). Como hipótesis, para lograrlo se requiere una tasa de reemplazo anual de los sistemas actuales por energías renovables del 1,61% (Fig. 3). Para lograr este aumento en la energía renovable, se debe reducir el uso de otros combustibles no renovables. Actualmente el gasoil representa el 10,14%, el gas natural el 48,83%, el gas propano el 8,01%, la electricidad el 14,76% y los mixtos el 13,48%. Además, debería alcanzar 7,75%, 37,32%, 6,12%, 11,28% y 10,30% respectivamente para cumplir los objetivos 2030.

3.3. FACTORES ECONÓMICOS

Finalmente, con los costos mostrados en la Tabla 1, y la información de las instalaciones de la Tabla 2 y la Fig. 3, se calcu-

laron los ahorros económicos resultantes del cumplimiento de los objetivos 2030 [3], con el 27% de los requerimientos de energía provenientes de fuentes renovables. Debido a que el precio de las instalaciones depende de varios factores, solo se ha considerado el costo de los combustibles. Se puede observar un ahorro total del 6,24%. Por un lado, se han producido ahorros económicos en refrigeración y C+ACS (19,28% y 11,43% respectivamente). Por otro lado, se han producido aumentos en el calefacción y ACS (13,50% y 5,48% respectivamente).

4. DISCUSIÓN

Para alcanzar el objetivo especificado en el programa 2030, en el área estudiada, se requiere una reducción general de las emisiones de CO₂ del 23,01% en comparación con los niveles actuales. El caso de España se puede comparar con el de Suecia, donde se requirió una reducción del 25% respecto a los niveles de emisiones de CO₂

de 1990. Como se ha logrado una reducción de alrededor del 8%, es necesaria una reducción adicional de aproximadamente del 17% [13], muy similar a la cifra de España en este estudio.

Los resultados obtenidos en factores ambientales son similares a los de otros estudios europeos, en relación con los combustibles no renovables, que muestran el mayor nivel de emisiones de CO₂ con el gasoil con el 37,40% del total, seguido por el gas natural con el 23,50%, porcentajes que dependen de variables como las reservas de cada país [3].

Teniendo en cuenta que las emisiones netas de CO₂ son muy bajas para la biomasa [20], y que son cero para la energía solar [26], estas fuentes de energía siempre serán una buena opción. Si fuera factible cambiar el 100% de los equipos a energías renovables, las emisiones de CO₂ serían mínimas. Por otro lado, si las emisiones de biomasa se consideran neutrales, debido al ciclo de vida [34], la reducción de emisiones sería del 100%. Aunque la biomasa se considera CO₂ neutra [34], su uso como fuente de energía estándar podría tener otro tipo de consecuencias como el impacto en el uso de la tierra, el desplazamiento de cultivos alimenticios (humanos y/o animales), la erosión del suelo y la eutrofización de residuos agrícolas. Por esta razón, es necesario utilizar biomasa de recursos forestales sostenibles o basados en residuos urbanos.

Para garantizar reducciones en las emisiones de CO₂, muchos países europeos favorecen la biomasa como alternativa a otros combustibles. Alemania, Francia, Suecia y Finlandia están a la vanguardia con un consumo anual de 10.000 kt, 9.000 kt, 7.000 kt y 6.000 kt, respectivamente, mientras que España ocupa el séptimo lugar con un consumo anual de 4.000 kt [35]. La provincia de Granada se caracteriza por un alto potencial de biomasa, principalmente residuos de cultivos, cáscaras

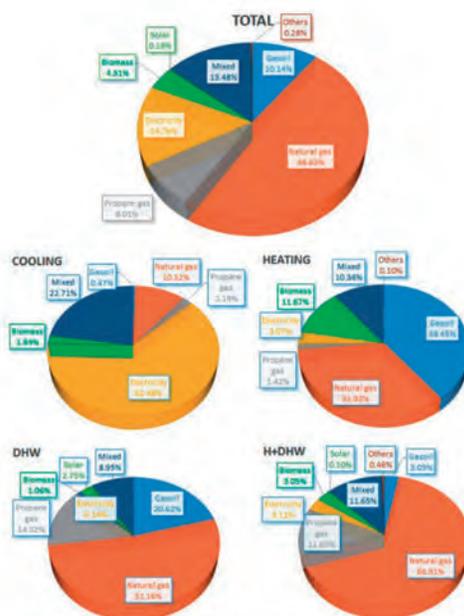


Fig. 2: Desglose del uso de combustible en la provincia de Granada

Situación actual								
Combustible	Gasoil	Gas natural	Gas propano	Electricidad	Biomasa	Solar	Mixto	Total
Refrigeración	20	352	26	3.021	4	0	1.027	4.451
Calefacción	6.451	4.496	258	29	110	0	1.819	13.163
ACS	218	447	43	0	1	0	102	811
C+ACS	1.439	25.583	8.045	1.579	654	0	5.906	43.207
Total	8.128	30.878	8.372	4.630	770	0	8.854	61.631
Programa 2030								
Combustible	Gasoil	Gas natural	Gas propano	Electricidad	Biomasa	Solar	Mixto	Total
Refrigeración	15	269	20	2.309	27	0	785	3.426
Calefacción	4.931	3.436	197	22	663	0	1.390	10.640
ACS	167	342	33	0	4	0	78	623
C+ACS	1.100	19.556	6.150	1.207	3.924	0	4.515	36.451
Total	6.213	23.603	6.400	3.539	4.618	0	6.768	51.140

Medidas en t CO₂/año

Tabla 3: Emisiones de CO₂ por tipo de combustible

de almendras y huesos de aceituna [27]. Además, cada tipo de biomasa tiene diferentes características como PCI, costos económicos, etc. [10].

En general, se ha observado un aumento considerable en el uso de energías renovables en la producción de electricidad. En 2011 se estimaron emisiones de 0,649 kg CO₂/kWh [4], en 2017 se ha reducido a 0,357 kg CO₂/kWh [20]. Como resultado, en el uso de la electricidad se ha logrado una reducción de las emisiones de CO₂ del 45%.

En el caso hipotético de reemplazar todos los sistemas por biomasa, calculamos que el ahorro económico aumentaría al 30,83%. En España, en comparación con el gasoil, el uso de pellets de madera puede llevar a ahorros económicos de hasta el 70%, y aproximadamente el 88% cuando se usan astillas de madera o huesos de aceitunas [10]. De manera similar, en Chile, en comparación con el gas natural, el uso de astillas de pino, huesos de aceituna y pellets de madera

puede generar ahorros económicos de hasta el 80%, el 83% y el 84% respectivamente [36]. Estos resultados dependen de la diferencia entre el precio de los combustibles en cada país. Los resultados presentados son teóricos, con la hipótesis de que el reemplazo de calderas es factible en todos los casos. Debe tener en cuenta condiciones tales como el espacio disponible para la instalación de la caldera; espacio para la el almacenamiento de combustible; suministro de combustible; etc.

5. CONCLUSIONES

En este estudio se ha analizado el uso de diferentes tipos de combustibles utilizados en los hogares de Granada para refrigeración, calefacción y ACS. Teniendo en cuenta el número de registros considerados y la diversidad climática del área, podemos considerarla representativa de la situación en la que se encuentra en el resto de España.

Hemos visto que la fuente de energía más utilizada depende del tipo de sistema, aunque hay un claro predominio de los combustibles fósiles sobre las energías renovables, especialmente el gas natural, que representa aproximadamente la mitad de la capacidad total en uso. En el caso de calefacción, la fuente de energía predominante es el gasoil, que se utiliza aproximadamente en un 40%, mientras que el gas natural representa 1/3 del total. En refrigeración, la electricidad se usa de manera más extensa (2/3 del total). En todos los casos, el uso de energías renovables representa pequeños porcentajes, independientemente del sistema analizado.

Estos resultados muestran que estamos muy lejos de alcanzar los primeros objetivos establecidos en el programa 2030 para la implementación de sistemas mejorados, a pesar de que su uso implicaría beneficios ambientales y económicos sustanciales.

Para cumplir los objetivos especificados en el programa 2030, el uso de energías renovables para calefacción, refrigeración y ACS implicaría el reemplazo del 23% de las calderas actualmente instaladas en el área estudiada, lo que permite un ahorro de aproximadamente un 17% en las emisiones de CO₂. Estas cifras podrían aumentarse a 87,84% si se cambiaran todos los sistemas actuales a un sistema basado en biomasa.

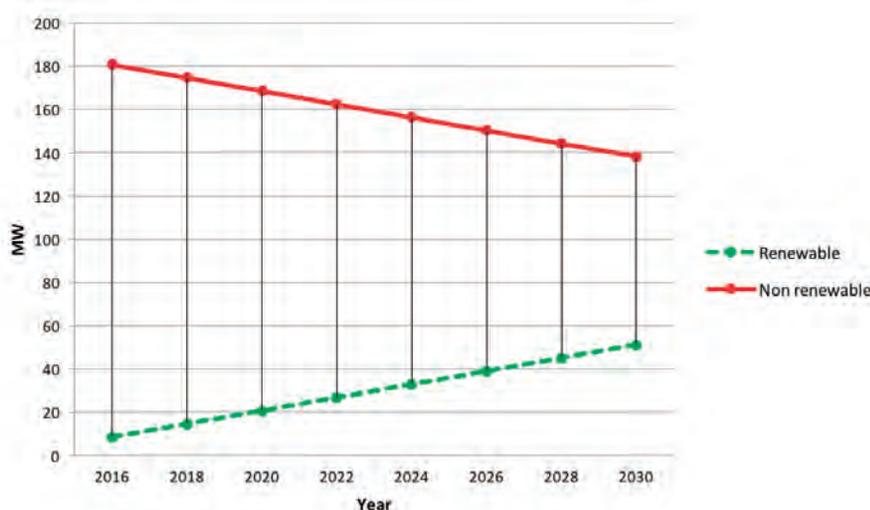


Fig. 3: Incrementos en el uso de energía renovable necesarios para cumplir con los objetivos 2030 en la provincia de Granada

PARA SABER MÁS

- [1] F. Marcos Martín, Biocombustibles sólidos de origen forestal, AENOR, Madrid, 2001.
- [2] United Nations, Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change, 1998.
- [3] Europe, European Union climate and energy package 2008-2020, (2007).
- [4] Spain, Plan de Energías Renovables 2011-2020, Minist. Ind. Tur. Y Comer. Gov. España, IDAE. (2011) 1-824.

Situación actual							
Combustible	Gasoil	Combustible	Gasoil	Combustible	Gasoil	Combustible	Gasoil
Refrigeración	6.653	69.863	23.734	1.032.474	12.242	350.619	1.495.585
Calefacción	2.178.036	891.980	59.628	196.824	300.774	620.834	4.248.075
ACS	56.268	67.789	29.771	436	10.621	26.530	191.414
C+ACS	635.537	6.640.566	1.850.259	754.651	296.926	2.637.176	12.815.114
Total	2.876.494	7.670.198	1.963.392	1.984.384	620.562	3.635.160	18.750.190
Programa 2030							
Combustible	Gasoil	Combustible	Gasoil	Combustible	Gasoil	Combustible	Gasoil
Refrigeración	5.085	53.403	18.142	789.221	73.431	268.013	1.207.296
Calefacción	1.664.886	681.827	45.580	150.452	1.804.114	474.564	4.821.423
ACS	43.011	51.818	22.757	333	63.705	20.279	201.903
C+ACS	485.803	5.076.035	1.414.334	576.853	1.781.034	2.015.852	11.349.911
Total	2.198.786	5.863.083	1.500.813	1.516.859	3.722.284	2.778.708	17.580.533

Cifras en euros (€)

Tabla 4: Cifras comparativas del combustible de la caldera (€/año)

[5] A.M. Omer, Energy, environment and sustainable development, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 12 (2008) 2265–2300. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2007.05.001>.

[6] Europe, Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2012/27/EU on energy efficiency, (2016).

[7] Europe, Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC (Text with EEA relevance), (2009).

[8] Europe, Directive 2002/91/EC, European Parliament and of the Council of 16 December on the energy performance of buildings, *DOUE* 1 (2002) 65–71.

[9] Europe, Directive 2010/31/EU, European Parliament and of the Council of 19 May on the energy performance of buildings, *DOUE* 153 (2010) 13–35.

[10] M. Carpio, M. Zamorano, M. Costa, Impact of using biomass boilers on the energy rating and CO2 emissions of Iberian Peninsula residential buildings, *Energy Build.* 66 (2013) 732–744. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.079>.

[11] J.F. González, C.M. González-García, A. Ramiro, J. González, E. Sabio, J. Gañán, M.A. Rodríguez, Combustion optimisation of biomass residue pellets for domestic heating with a mural boiler, *Biomass and Bioenergy.* 27 (2004) 145–154. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.01.004>.

[12] N. Pardo, C. Thiel, Evaluation of several measures to improve the energy efficiency and CO2 emission in the European single-family houses, *Energy Build.* 49 (2012) 619–630. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.006>.

[13] J. Joelsson, L. Gustavsson, Swedish biomass strategies to reduce CO2 emission and oil use in an EU context, *Energy.* 43 (2012) 448–468. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.03.050>.

[14] G. Devlin, R. Klvac, K. McDonnell, Fuel efficiency and CO2 emissions of biomass based haulage in Ireland – A case study, *Energy.* 54 (2013) 55–62. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.007>.

[15] IGN, Base Cartográfica Nacional 500. BCN500. Instituto Geográfico Nacional-Centro Nacional de Información Geográfica, España, (2012).

[16] M. Carpio, A. García-Maraver, D.P. Ruiz, A. Martínez, M. Zamorano, Energy rating for green buildings in Europe, *WIT Trans. Ecol. Environ.* 190 VOLUME (2014) 381–394. doi: <http://dx.doi.org/10.2495/EQ140371>.

[17] Spain, Código Técnico de la Edificación (CTE), Real Decreto 314/2006 17 Marzo. BOE 74 (2006) 11816–11831. www.boe.es/boe/dias/2006/03/28/pdfs/A11816-11831.pdf.

[18] M. Carpio, J. Jódar, M.L. Rodríguez, M. Zamorano, A proposed method based on approximation and interpolation for determining climatic zones and its effect on energy demand and CO2 emissions from buildings, *Energy Build.* 87 (2015) 253–264. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.041>.

[19] Junta de Andalucía, Dirección General de Industria, Energía y Minas. Consejería de Empleo, Empresa y Comercio, (2017). <http://www.juntadeandalucia.es>.

[20] Spain, Factores de emisión de CO2 y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector de edificios en España, Doc. Reconocido Del Reglam. Instal. Térmicas En Los Edif. (RITE), Minist. Ind. Energía Y Tur. (2016) 31. doi: <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.

[21] Spain, Geoportal precios carburantes, Secretaría de Estado de Energía, Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, (2017). <http://www.minetad.gob.es/energia/es-ES/Servicios/Paginas/consultasdecarburantes.aspx>.

[22] Spain, BOE, Resolución de 25 de septiembre de 2017, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se publica la tarifa de último recurso de gas natural., (2017) 95011–95013.

[23] Repsol, Listado precios butano propano, (2017). <https://www.repsol.com/SA/Herramientas/ListadoPreciosButanoPropanoEnvasado/precios.aspx>.

[24] Red Eléctrica de España, Término de facturación de energía activa, (2017). <https://www.esios.ree.es/es/pvpc>.

[25] AVEBIOM, Índice de precios del pellet doméstico en España 1T 2012–3T 2017, Valladolid, 2017. <http://www.avebiom.org/es/ind-precios-biomasa>.

[26] G.A. Florides, P. Christodoulides, V. Messaritis, Reviewing the effect of CO2 and the sun on global climate, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 26 (2013) 639–651. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.062>.

[27] IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, (2017). <http://www.idae.es/>.

[28] IDAE, Biomasa: Edificios, Madrid, 2007.

[29] Europe, COM/2011/0112 A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050, (2011).

[30] Europe, Energy roadmap 2050, Luxembourg, 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.2833/10759>.

[31] Europe, COM/2011/0144 - White Paper - Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system, (2011).

[32] IEA, Key World Energy Statistics, 2016.

[33] REN21, Renewables Global Status Report, 2016.

[34] R. Saidur, E.A. Abdelaziz, A. Demirbas, M.S. Hossain, S. Mekhilef, A review on biomass as a fuel for boilers, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 (2011) 2262–2289. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.015>.

[35] AEBIOM, European Bioenergy Outlook, 2016.

[36] M. Carpio, Comparativa de uso de diferentes tipos de biomasa para calefacción de viviendas en distintas zonas climáticas de Chile, in: 2o Congr. Energías Sustentables En Bahía Blanca, Bahía Blanca, 2016: p. 484.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por el proyecto CONICYT FONDECYT 11.160.524. Los autores desean agradecer a la Junta de Andalucía (España) su autorización para acceder a los datos del estudio.

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

Términos	Acronimos
Dióxido de Carbono	CO ₂
Agua Caliente Sanitaria	ACS
Agua Caliente Sanitaria y Calefacción	C+ACS
Programa Europeo sobre el Cambio Climático	PECC
Euro	€
Calefacción	C
Hora	h
Kilogramo	kg
Kiloton	kt
Kilowatt	kW
Poder Calorífico Inferior	PCI

Reconstrucción dimensional de estructuras industriales mediante fotogrametría y técnicas de segmentación

Reverse engineering using photogrammetry and segmentation for industrial structures



Oscar J. Cosido-Cobos^{1,2}, Alberto Salcines-Menezo², Carlos Loucera-Muñecas³ y Antolín Lorenzana-Ibán⁴

¹ Universidad de Cantabria (España)

² UPINTELLIGENCE (España)

³ Universidad de Cantabria-DICOM (España)

⁴ Universidad de Valladolid (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8549>

1. INTRODUCCIÓN

La forma tradicional de trabajar en el cálculo inverso de estructuras implicaba la necesidad de medir sobre la propia estructura, mediante contacto directo, para poder generar un modelo que permita conocer la geometría y calcular, por ejemplo, cómo se comporta ante determinadas cargas y poder tomar decisiones sobre su aptitud ante posibles modificaciones o sobre la necesidad de mantenimiento o refuerzos para alargar su vida útil. Si esta estructura tenía partes elevadas o inaccesibles, se necesitaba una plataforma elevadora u otros medios que permitieran el acceso de un operario para medir. Algunos de estos inconvenientes se superan mediante tecnologías modernas basadas en el uso del escáner - láser [1], si bien se propone un procedimiento basado en la toma de simples fotografías y su posterior procesado con el que, para precisiones similares, se abaratan costes y se reduce el riesgo en los trabajos asociados a la adquisición de datos.

La metodología permite el modelado 3D (y la obtención de los tradicionales planos) de estructuras antiguas o de aquellas en las que por distintas razones no se disponga del correspondiente proyecto. Lo anterior, junto con la continua necesidad de cálculo e inspección sobre estructuras industriales, lleva a procedimientos que abaratan costes sin menoscabar la precisión. El cálculo de estructuras a partir de ingeniería inversa es una herramienta muy apropiada en el ámbito industrial [2], siendo además estas técnicas aplicadas

en muchos otros campos, sobre todo en aplicaciones geomáticas o patrimonio [3], donde el grupo de trabajo tiene una mayor experiencia.

La metrología industrial de componentes mecánicos se ha enfrentado a una revolución gradual [4][5] a través de la aplicación de escáneres 3D fijos y más recientemente embarcados en vehículos e incluso en drones. El sistema más utilizado en entornos industriales suele ser el uso de plataformas de escáner-láser de altas prestaciones y usualmente también de elevado coste. En este trabajo, sin embargo, se demuestra la posibilidad de trabajar enteramente con fotografías y conseguir similares niveles de precisión gracias a re-escalados, cuando éstos sean posibles. Para ello se tendrá en cuenta la disponibilidad comercial discreta de muchos de los componentes industriales cuya geometría y dimensiones se trata de determinar.

Se puede definir la fotogrametría como la tecnología consistente en la extracción de información (coordenadas, textura y color) mediante algoritmos informatizados de correlación dimensional. Cuando se aplican a dos o más fotografías del mismo objeto tomadas desde distintos puntos de vista se pueden inferir (por estéreo-correlación) coordenadas en 3D de los distintos puntos identificables y, con todos, obtener una nube de puntos. Con esa información geométrica y algoritmos de mallado se identifican superficies. Inicialmente esas superficies son simples triángulos definidos entre 3 puntos cercanos de la nube. Posteriormente algoritmos matemáticos de interpolación y suavizado [6] permiten agrupar triángulos en superficies geométricas parametrizadas. Finalmente sobre esas superficies se añade el correspondiente color y texturizado a partir de las fotografías originales.

Por su parte, mediante el escaneado láser se determina directamente la posición en el espacio de cada punto sobre el que incide la luz láser y, en algunos casos, también el color. Del mismo modo que en

fotogrametría, el modelo debe ser completado con la identificación de superficies y la incorporación del texturizado.

El límite de precisión de un escáner láser depende de sus prestaciones y en principio es fijo. En fotogrametría se puede aumentar la precisión [6] sin más que aumentar el número de fotografías pudiendo llegar a obtener detalles con precisiones superiores a las dadas por el escáner, en función de óptica de la cámara y la toma de puntos de anclaje del modelo. Se entiende por punto de anclaje aquellos puntos de referencia con coordenadas tridimensionales conocidas. En publicaciones como [7], se recopilan varios trabajos basados en fotogrametría aplicados a distintos fines.

2. SEGMENTACIÓN DE OBJETOS

Se entiende por segmentación al proceso por el que se identifican los distintos objetos representados en un conjunto. Este proceso puede ser aplicado directamente a imágenes pero también a las nubes de puntos obtenidas tras el tratamiento de las imágenes. La técnica de segmentación, basada en algoritmos de visión artificial [7][8], consigue dividir la imagen en las distintas partes identificables que la componen. La homogeneidad cromática y los brillos de los elementos estructurales en entornos industriales hace recomendable combinar diversos algoritmos para una exitosa identificación. Los resultados son ajustados a entidades geométricas simples y, en principio, no escaladas. El siguiente paso es referenciar dimensionalmente alguna de esas entidades a, al menos, una medida de referencia.

3. EJEMPLO DE VERIFICACIÓN

Como caso de estudio, se reconstruyó el perfil tipo IPE de una de las ménsulas que soportan la viga carril del puente grúa de la Figura 1. Las ménsulas se encuentran a cierta altura y se puede suponer que en un caso real sería costoso o inseguro elevar a un trabajador para tomar físicamente las medidas. Dado que con este trabajo se pretende demostrar la viabilidad del método, las medidas reales de la ménsula son conocidas y servirán para validar la eficacia de la metodología.

3.1. TOMA DE FOTOS

Se comienza con una serie de fotografías del objeto desde ángulos diferentes y convergentes al mismo (Figura 1). Conviene también hacerlas con distintos niveles de zoom lo cual ayuda a referenciar la escala del modelo a objetos accesibles de su entorno, además de alimentar con más información a los algoritmos de reconstrucción.



Fig. 1: Imágenes convergentes a la ménsula

3.2. GENERACIÓN DE LA NUBE DE PUNTOS

Existen varias aplicaciones de postprocesado de imágenes que a partir de las fotografías y la medición de un objeto accesible en la escena generan la correspondiente nube de puntos escalada. En este trabajo se ha usado el software comercial *Agisoft Photoscan* (www.agisoft.com). Este programa detecta puntos en las fotos de origen que son estables (insensibles a las variaciones de punto de vista e iluminación) y

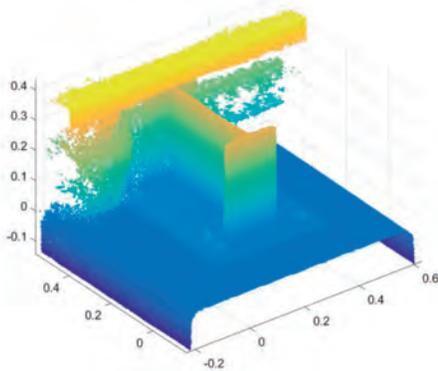


Fig. 2: Nube de puntos

genera un descriptor para cada punto en función de su vecindario local. La generación de correspondencias se hace mediante diversos algoritmos geométricos que consiguen definir las coordenadas de cada uno de los puntos identificados. En total tras las dos imágenes de la Figura 1 se pueden identificar 888677 puntos (Figura 2).

Todos estos puntos se pre-procesan con un doble objetivo: por una parte se

eliminan puntos "atípicos" (*outliers*) de forma que se minimice el efecto de las diversas formas de ruido; por otra permitirá agilizar los cálculos posteriores debido a la reducción del tamaño de la nube. Para ello se ha utilizado un *filtro mediante entornos próximos* [7]. En esencia la técnica consiste en marcar como atípico un punto dado Q si la distancia de sus k vecinos más cercanos es superior a le , donde e es la mediana de las distancias medias de todos los vecinos. Los parámetros que mejor resultado han dado han sido $l=4.0$ y $k=4$.

3.3. SEGMENTACIÓN DE LAS NUBES DE PUNTOS

Una vez definidos los puntos de interés, se procede (mediante triangulación de *Delaunay*) a obtener las superficies facetadas para su posterior tratamiento mediante algoritmos RANSAC (*Random Sample Consensus*, [9]) implementados para este proyecto, bien de forma automática o asistidos por el usuario (opcional). RANSAC es un método estocástico iterativo que estima los parámetros de una enti-

dad geométrica "base" establecida a priori (un plano, por ejemplo) que ajuste con suficiente precisión a un subconjunto de la nube de puntos dada. Partiendo de un subconjunto aleatorio, en cada iteración se van refinando los parámetros del modelo que mejor ajusta. Por tanto, se trata de un proceso estocástico "tolerante al ruido" que genera "mejores" soluciones a medida que se añaden iteraciones.

Tras este proceso se obtienen subconjuntos de la nube de puntos que son ajustables a entidades geométricas (planos, cilindros, ..., NURBS en general) con suficiente sencillez y precisión. Tras ello se agrupan dichas superficies básicas en base a cercanías y texturas (proceso de mapeado) y se identifican objetos por agrupación de superficies conexas. En el caso bajo estudio se consiguen identificar diversas partes como la placa de testa (Figura 3.a), la superficie inferior del ala inferior (Figura 3.b) o las superficies laterales del alma (Figura 3.c), entre otras.

La identificación en este caso se basa en el conocimiento previo de que el elemento estructural está formado por placas metálicas y perfiles laminados en los que se pueden identificar superficies planas. De esta forma, se indica al algoritmo RANSAC que ajuste subconjuntos de la nube de puntos a "planos". En cada iteración se selecciona un subconjunto aleatorio de la nube original y se trata de ajustar a planos. En cada iteración se realiza un test de cómo ajusta el subconjunto de puntos seleccionado al plano identificado. Como función de coste se suele utilizar el error cuadrático medio entre los puntos seleccionados y el plano identificado. Para las tolerancias definidas, se seleccionan los puntos que mejor ajustan (puntos de consenso) y se sustraen de la nube original. Con los puntos restantes se procede de forma análoga. Del mismo modo se puede proceder para buscar otras entidades geométricas (rectas, arcos, cilindros, etc.).

3.4. GENERACIÓN DE SUPERFICIES

Para cada uno de los planos identificados anteriormente, se seleccionan de forma manual aquellos que en realidad corresponden a la misma superficie física y se determina el plano único que mejor aproxima (por mínimos cuadrados) a cada entidad física. En la Figura 4 se pueden ver

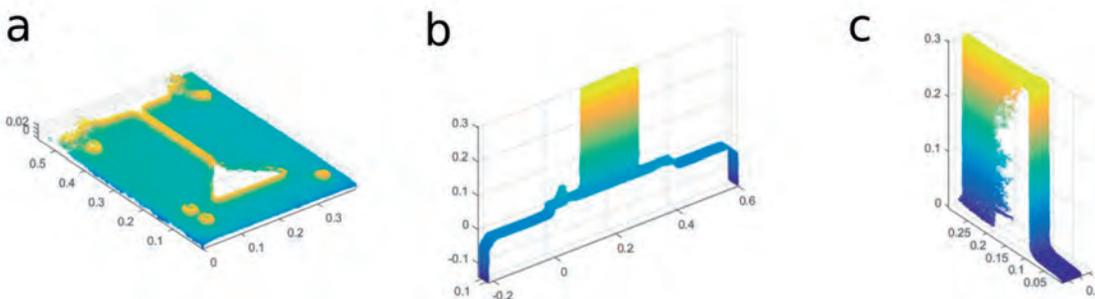


Fig. 3: Partes de la segmentación automática

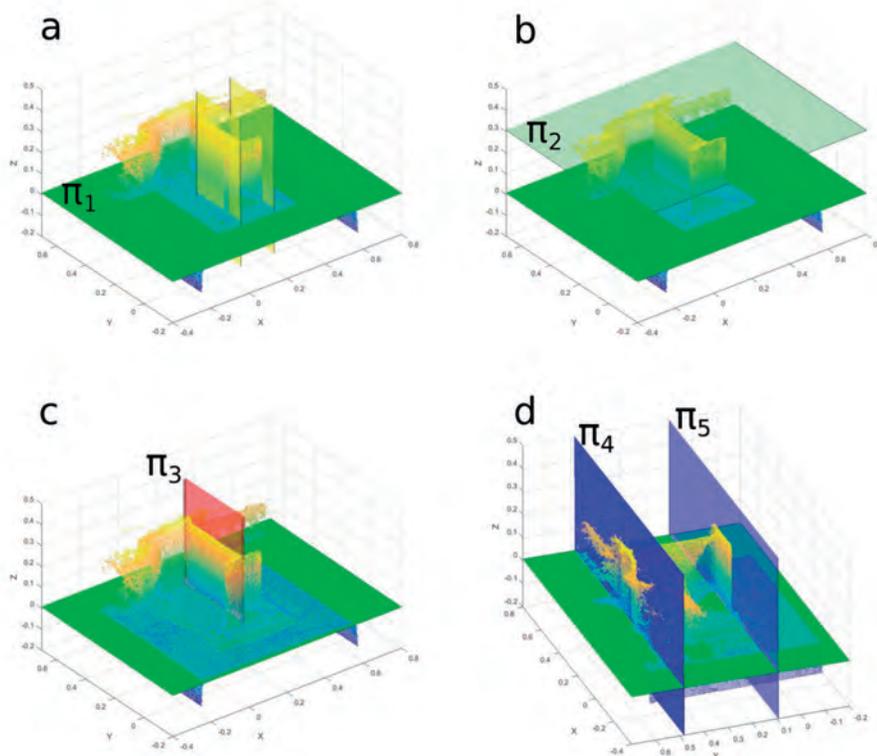


Fig. 4: Representación gráfica de los planos obtenidos superpuestos a la nube de puntos

los planos resultantes correspondientes a la cara vista de la placa de testa (π_1), la sección extrema del perfil doble T (π_2), la cara derecha del alma (π_3) y las dos caras inferiores de las alas (π_4 y π_5).

De esta forma se pueden obtener la ecuación de los distintos planos y sus coeficientes de ajuste a la nube de puntos. También se pueden hacer comprobaciones de paralelismo o de perpendicularidad. Para los planos identificados en la Figura 4 el coeficiente R^2 es 0.966, 0.876, 0.970, 0.837 y 0.978 respectivamente. Respecto a errores de paralelismo, como referencia se tienen 0.48° entre π_4 y π_5 y 1.80° entre π_1 y π_2 . Análogamente la falta perpendicularidad entre π_1 y π_3 es de 1.28° y entre π_3 y π_4 es de 0.34° . Algunos valores, como el paralelismo entre π_4 y π_5 o la perpendicularidad entre π_4 y π_5 , dados por la precisión del proceso de fabricación por laminación del propio perfil, son indicativos de la resolución del método que se propone. Otros, como el paralelismo entre π_1 y π_2 o la perpendicularidad entre π_1 y π_3 , además están influidos por la precisión durante el proceso de corte y soldadura en taller.

Con los planos más significativos bien identificados se pueden calcular líneas y puntos de corte entre los subgrupos de 2 o de 3 para identificar aristas y vértices y de este modo ir completando el modelo. También se podían haber buscado aristas directamente como se muestra en la Figura 4a.

3.5. ESCALADO

Como medida de referencia para el escalado se ha tomado el ancho b del pilar sobre el que está espitada la ménsula (ver Figura 1) cuyo valor es de 767 mm. Este elemento del entorno de la ménsula aparece en las imágenes convergentes y es cómodamente accesible para su medición desde el suelo. Ahora ya se pueden calcular distancias y determinar parámetros físicos del perfil como el canto (h), el ancho (b) y sus espesores de ala t_f y de alma t_w e incluso el radio de acuerdo (r). En la segunda columna de la Tabla 1 se muestran dichos valores. En este tipo de aplicaciones industriales es muy importante sacar partido de que muchos parámetros suelen tener unos valores discretos debidos a la estandarización comercial.

A la vista de esas dimensiones se deduce que se ha de tratar de un perfil tipo IPE400, cuyos valores nominales (<http://sections.arcelormittal.com>) son los indicados en la tercera columna de la misma tabla. En este punto, parecería lógico pensar que ha habido algún error en la escala

y de forma tentativa se podría calcular su valor promedio (0.94%) y "corregir" la escala, tras lo cual se obtendrían los valores indicados en la cuarta columna, resultando que algunos de los parámetros son significativamente menores que los nominales. Nótese que las diferencias no pueden ser imputadas al recubrimiento de pintura de los perfiles, que suele estar en torno a las 120 micras para este tipo de estructura metálica. Ante la discrepancia entre los valores escalados y los nominales del IPE400 se decidió acceder a la ménsula mediante una escalera y medir esos parámetros con ayuda de una cinta métrica y un calibre. Los resultados (promediados tras varias mediciones) se muestran en la quinta columna. El máximo error entre estos valores medidos y los inferidos por fotogrametría es inferior al 0.6%. Esto hace sospechar que el perfil no es el IPE400 estándar sino alguna variación del mismo. Concretamente el denominado IPE 0 400+ (perfiles norma EU19-57) cuyas medidas nominales son las de la última columna de la tabla 2 (según la misma referencia <http://sections.arcelormittal.com>) y discrepan de los medidos en menos del 1.2% y de los inferidos en menos del 1%.

Es destacable que los espesores medidos (incluyendo la pintura) son algo inferiores a los nominales, estando estos rozando la tolerancia inferior según la norma EN10034:1993.

Tras el proceso seguido en este caso sencillo de verificación se ha concluido que no ha sido necesaria una corrección del escalado inicial. No obstante, la metodología permite escalados sucesivos en base a las comprobaciones dimensionales que vayan resultando en cada paso.

3.6. RECONSTRUCCIÓN DEL MODELO

En este instante se tendría toda la documentación gráfica escalada de tal manera que es posible conocer no solo los valores de los parámetros usados para el ajuste de escala (dimensiones del perfil) sino también otros como las dimensiones y espesor de la placa de testa (resultando en 650 mm de alto y 401 mm de ancho y 20 mm de espesor), las posiciones de los tornillos y métrica de los mismos (M16) y

	inferidos	IPE400	Escalado	Medidos	IPE0400+
h (mm)	404.6	400	382.0	404.75	404
b (mm)	182.4	180	172.2	182.5	182
t_w (mm)	9.5	8.6	9.0	9.55	9.7
t_f (mm)	15.4	13.5	14.5	15.32	15.5
r (mm)	21.8	21	20.6	...	21

Tabla 1: Parámetros del perfil

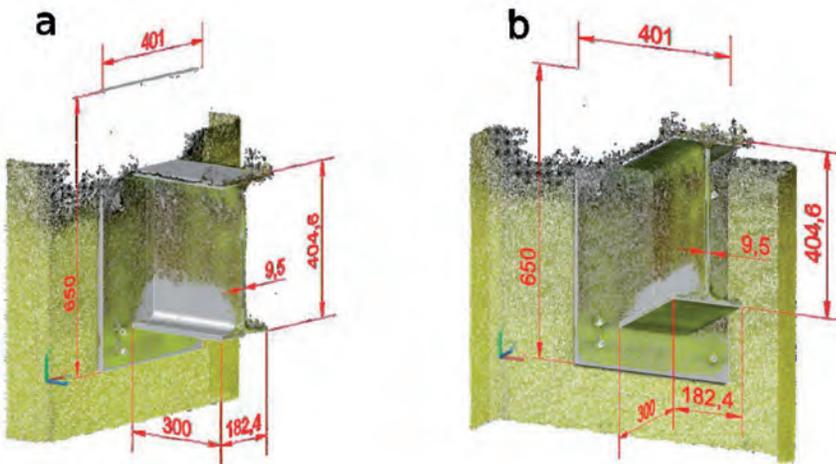


Fig. 5: Modelo CAD con medidas inferidas sobre nube de puntos



Fig. 6a: Fotografía de la estructura del panel solar. Fig. 6b: Modelado 3D a partir de la nube de puntos

una estimación de la garganta del cordón de soldadura entre el perfil y la placa de testa (11 mm en la zona de las alas). La ménsula resultante es la mostrada en la Figura 5. Todo el proceso seguido, realizado por un usuario experto con medios informáticos habituales en cualquier oficina técnica puede suponer unos 10 minutos para la toma de fotografías (sin incluir desplazamientos), 40 minutos para el procesado y 20 minutos para la reconstrucción CAD.

Con toda la información recopilada en los pasos previos, se está en condiciones de abordar una última fase que incluya la elaboración de planos o la realización de cálculos sobre la resistencia de dicho elemento estructural. Para esto, además de las dimensiones geométricas, sería necesario conocer las propiedades de los materiales (acero y hormigón en este caso), las cuales deberán ser inferidas mediante otras técnicas (ultrasonidos u otros ensayos sobre probetas).

Estos requerimientos de cálculo podrían ser necesarios ante casos de estructuras envejecidas o dañadas o ante situaciones de cambio de uso de la estructura original (por ejemplo, ante el caso de cambiar el puente grúa por otro de mayor tonelaje).

4. EJEMPLO DE APLICACIÓN

La metodología ilustrada con el ejemplo de la ménsula visto en el apartado anterior se puede aplicar a estructuras más complejas. En la Figura 6 se muestra el esqueleto de un seguidor solar. Tras procesar múltiples fotografías y con la única referencia dimensional de la longitud del lado de la zapata (L) se pudieron identificar las dimensiones de los distintos perfiles y levantar el correspondiente modelo sólido sobre el cual poder hacer simulaciones del movimiento siguiendo al sol así como cálculos sobre, por ejemplo, la vulnerabilidad de este seguidor ante vientos de una determinada intensidad o los modos propios de vibración una vez se instalen los correspondientes paneles.

5. CONCLUSIONES

Se ha visto cómo mediante una cámara digital convencional y múltiples fotografías procesadas mediante ciertos algoritmos se puede conseguir el modelo geométrico de determinadas estructuras industriales con un aceptable nivel de precisión. Dicha precisión además puede ser mejorada una vez se han identificado determinados componentes estructurales estandarizados. Esta metodología posibilita, a bajo coste, labo-

res de ingeniería inversa como la generación de planos o comprobación resistente ante determinadas cargas o bajo situaciones de cambio de uso.

Por todo ello, el procedimiento presenta un valor añadido al grupo de trabajo de los autores, quienes están reconstruyendo virtualmente estructuras de patrimonio industrial así como ciertas infraestructuras, valiéndose de los sucesivos re-escalados para conseguir la precisión suficiente para fines ingenieriles.

Con la proliferación de nuevas tecnologías, como cámaras cada vez de mayor calidad y embarcadas en drones geoposicionados, las posibilidades de esta metodología son muy prometedoras.

PARA SABER MÁS

- [1] Beraldin J-A. "Integration of laser scanning and close-range photogrammetry – The last decade and beyond". International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 35, No B7, p.972-983. (2004).
- [2] Koelman HJ, "Application of a photogrammetry-based system to measure and re-engineer ship hulls and ship parts: An industrial practices-based report". Computer-Aided Design, Vol.42 p731-743. (2010).
- [3] Martínez, S, Ortiz, J, Gil ML. "Recording complex structures using close range photogrammetry: the cathedral of Santiago de Compostela". The Photogrammetric Record. Vol.28 p.375-395 (2013).
- [4] Rodríguez P, Rodríguez M, Ramos L et al. "3D reconstruction methods and quality assessment for visual inspection of welds". Automation in Construction. Vol. 79 p.49-58. (2015).
- [5] Ciocca L, Scotti R. "CAD-CAM generated ear cast by means of a laser scanner and rapid prototyping machine". Journal of Prosthetic Dentistry, Vol.92 p.591-595. (2014).
- [6] Kortaberria G, Olarra A, Tellaecha A, et al. "Close Range Photogrammetry for Direct Multiple Feature Positioning Measurement without Targets". Journal of Sensors. Vol.16, p.930-943, (2017).
- [7] Richard H, Andrew Z. View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, Cambridge, UK. ISBN: 978-0-521-54051-3. (2007).
- [8] Demirhan A, Guler I, "Combining stationary wavelet transform and self-organizing maps for brain MR image segmentation", Engineering Applications of Artificial Intelligence Vol.24, p.358-367, (2011).
- [9] Fishler M, Bolles R. "Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography". Graphics and Image Processing. Vol.78, 138-156 (1981).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las empresas 3DINTELLIGENCE y UPINTELLIGENCE por financiar parcialmente este proyecto y por la ayuda recibida en la parte de visión artificial. Asimismo se agradece la colaboración y disponibilidad del Centro Tecnológico CARTIF y de la Escuela de Ingenieros Industriales de la Universidad de Valladolid.

Impacto del mentoring inter-organizacional en la calidad y resultados de las organizaciones

Impact of inter-organizational mentoring on the quality of the process and performance of organizations



Nuria Gisbert-Trejo^{1,3}, Luciano Azpiazu²,
Jon Landeta³, Eneka Albizu³ y
Pilar Fernández-Ferrín³

¹ CIC EnergiGUNE (España)

² AHALBIDETU (España)

³ Universidad del País Vasco (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8646>

1. INTRODUCCIÓN

El *mentoring* es una práctica de desarrollo directivo que, en el campo de la ingeniería, puede ayudar a los ingenieros a adquirir un mayor conocimiento técnico y organizativo, especialmente, en el comienzo de su carrera profesional, gracias a la guía de otros ingenieros con mayor conocimiento y experiencia, que actúan como sus mentores. Así mismo, posibilita que estos ingenieros que inician su carrera profesional desarrollen de manera guiada habilidades y competencias valiosas para su futuro profesional. En este sentido, diferentes autores coinciden en señalar que el desempeño laboral de aquellos ingenieros que están involucrados en programas de *mentoring* mejora de forma notable [1 y 2].

La razón de esta mejora descansa, por una parte, en que los jóvenes ingenieros mentados están deseosos de aprender sobre la profesión y sobre sus organizaciones y, además, pueden aportar una gran cantidad de ideas valiosas para sus mentores y para sus empresas. Por otro lado, los mentores experimentados se sienten satisfechos de traspasar un legado de conocimiento y experiencia a los mentados y a las organizaciones para las que trabajan, en la confianza de que esa aportación impactará en la vida profesional de sus mentados y dejará un poso en sus empresas [3 y 4].

El *mentoring* es, por lo tanto, una herramienta que posibilita la gestión efectiva del conocimiento técnico, organizativo y cultural de las organizaciones. El

entorno competitivo y globalizado en el que nos encontramos requiere una constante gestión del cambio que demanda un aprendizaje continuo, la generación de conocimiento y su puesta a disposición de la organización, a fin de que ésta sea cada vez más competitiva. Lógicamente, este tipo de procesos de gestión activa de conocimiento requiere imprescindiblemente el apoyo de la Alta Dirección de la empresa [5 y 6].

Desde otra perspectiva, otro de los retos que enfrenta la profesión de ingeniería es el de impulsar el acceso de las mujeres a esta carrera profesional, notablemente masculinizada. A través del *mentoring* se puede facilitar el acceso de las mujeres a la profesión de ingeniería, haciéndola más atractiva. Así mismo, el *mentoring* es una herramienta que posibilita a las mujeres ingenieras una progresión más rápida en sus carreras profesionales, aumentando además la satisfacción laboral [7].

Por consiguiente, el *mentoring* parece ofrecer ventajas importantes para los profesionales de la ingeniería.

Hasta la fecha, los escasos estudios llevados a cabo dentro del ámbito de la ingeniería se han focalizado en dinámicas de *mentoring* individual e intra-organizacional, donde existe una relación diádica mentor-mentado, siendo ambos de la misma organización [8]. Sin embargo, hoy en día están surgiendo con fuerza otras dinámicas de *mentoring* diferentes, entre las que cabe destacar el *mentoring* inter-organizacional, donde mentor y mentado pertenecen a organizaciones distintas. Esta práctica es ya una realidad para los profesionales y directivos de las distintas ramas del conocimiento [9 y 10], y comienza a extenderse entre los ingenieros e ingenieras que quieren desarrollarse de una forma transversal, tanto en competencias como en habilidades técnicas.

En este sentido, los colegios profesionales y de ingeniería, aprovechando su

capacidad para coordinar mentores, mentados y empresas, tienen la oportunidad de ofrecer a sus colegiados programas de *mentoring* inter-organizacional que satisfagan sus necesidades de desarrollo [11]. No obstante, ante la posibilidad de asumir el liderazgo de programas de este tipo, se les plantean varias preguntas previas, que no han sido todavía suficientemente respondidas por la investigación académica, entre las que caben señalar: ¿qué ventajas reales tiene el relativamente más desconocido *mentoring* inter-organizacional frente al tradicional *mentoring* intra-empresarial?, ¿qué elementos son clave para que el proceso de *mentoring* tenga éxito y, por consiguiente, deben ser sujeto de atención especial?, o ¿qué motivación pueden tener las organizaciones para facilitar la participación de sus profesionales como mentores o mentados en un programa de *mentoring* inter-organizacional?

Este trabajo busca dar respuesta a esas preguntas. Para ello, lleva a cabo un estudio de campo con recogida y análisis de las opiniones y valoraciones de ingenieros e ingenieras con experiencia en procesos de *mentoring*, mediante una encuesta que se ha complementado con un Focus Group con ingenieros expertos en *mentoring*.

El artículo se estructura de la siguiente manera: después del capítulo de introducción presente se detalla la metodología empleada en el estudio empírico y, a continuación, se exponen los resultados en términos de ventajas del *mentoring* inter-organizacional, los elementos que determinan la calidad de un proceso de *mentoring* inter-organizacional y los resultados para las organizaciones de un proceso de *mentoring* de este tipo. Se finaliza con las conclusiones que para las organizaciones y colegios profesionales de ingeniería pueden extraerse de este trabajo, así como sus limitaciones, líneas de investigación futura y agradecimientos.

2. METODOLOGÍA

Con la finalidad de obtener la información necesaria para dar respuesta a las preguntas del presente estudio, se ha utilizado una combinación de técnicas cuantitativas y cualitativas. La técnica

cuantitativa (encuesta) se ha enfocado a: la jerarquización de las ventajas del *mentoring* inter-organizacional frente al *mentoring* intra-organizacional; la valoración de los parámetros que definen la calidad del proceso de *mentoring* inter-organizacional; así como a la medición del impacto para las organizaciones de los mentados. La técnica cualitativa (Focus Group) se ha orientado a contrastar con un colectivo de ingenieros expertos en *mentoring* los resultados obtenidos en la encuesta, así como, a proporcionar explicaciones a los mismos desde la perspectiva de los actores implicados. El presente trabajo muestra un enfoque exploratorio para un fenómeno (*mentoring* inter-organizacional) poco conocido. Esta es la razón de que la parte cuantitativa o encuesta se haya utilizado para poder describir el fenómeno y la parte cualitativa (Focus Group) para contrastar con ingenieros expertos en *mentoring* los resultados obtenidos en la encuesta.

2.1. ENCUESTA

Durante el mes de mayo de 2017 se envió un cuestionario electrónico a una selección de 95 ingenieros. Esta muestra estaba compuesta por profesionales, en su mayoría españoles, que habían participado previamente en procesos de *mentoring*. Los profesionales fueron identificados a través de diferentes coordinadores de programas de *mentoring* colaboradores con este estudio. En el cuestionario debían valorar las ventajas del *mentoring* inter-organizacional con respecto al tradicional (7 ítems), los aspectos relevantes de la calidad de un proceso de *mentoring* inter-organizacional (11 ítems) y los elementos más importantes relativos al impacto sobre la organización del mentado en el *mentoring* inter-organizacional (18

ítems). La escala de valoración era de 11 puntos, siendo sus extremos: 0 "nada relevante" y 10 "muy relevante". En este sentido, interesaba una escala amplia con una mayor variación que una escala (1-7) o (1-3) puesto que de los contrastes previos con expertos se esperaba que las valoraciones de los factores se agruparan en los valores superiores. El cuestionario se diseñó a partir de estudios previos de Eby & Lockwood, (2005) [1], Allen (2004) [3] y Gisbert-Trejo et al (2018a y b) [9 y 11] entre otros y, así mismo, fue sometido a la validación de un grupo de nueve expertos (mentores, mentados y coordinadores de programas). Se recibieron 38 respuestas completas, lo que supone un grado de respuesta del 40% sobre el total de los ingenieros identificados.

Sobre la composición de la muestra de ingenieros informantes cabe señalar que un 13% son mujeres y el resto, hombres. El 50% de las personas integrantes en la muestra han sido mentores en el último proceso de *mentoring* en el que han participado, un 47% mentados y un 3% coordinadores de programa. La edad media de la muestra es de 47,37 años, con 23,03 años de media en experiencia laboral. El 66% ha participado en procesos de *mentoring* individual, 26% en grupal y 8% en *mentoring* mixto. El 39% de los encuestados tiene experiencia en *mentoring* intra-organizacional y el 61% en *mentoring* inter-organizacional. Con respecto al perfil demográfico, el 94% de la muestra procede de España, el 3% del Reino Unido y el 3% restante de Francia. Poniendo el foco en los sectores empresariales de la muestra, la composición es la siguiente: 39.5% energía, 26.3% industria, 13.2% telecomunicaciones y software, 10.5% I+D, y 10.5% otros sectores.

2.2 FOCUS GROUP

Con objeto de completar el análisis anterior, el 26 de octubre de 2017 se llevó a cabo en el Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Bilbao una dinámica de Focus Group [12] con un grupo de ocho mentores ingenieros experimentados pertenecientes a seis organizaciones distintas, cuatro de ellos con elevada experiencia en *mentoring* intra-organizacional y cuatro con experiencia en *mentoring* inter-organizacional. Estos mentores expertos, debido a su experiencia poseen una visión global y completa del proceso de *mentoring*, y por lo tanto, son capaces de valorar tanto desde la perspectiva del mentor, como de la del mentado las cuestiones clave presentadas en este trabajo.

A los expertos se les explicó el objetivo de la investigación, las diferentes tipologías de *mentoring* alternativo y se les expusieron los resultados obtenidos a través de la encuesta realizada en mayo de 2017 sobre las ventajas del *mentoring* inter-organizacional, la calidad del proceso de *mentoring* y el impacto sobre la organización. Los ítems de cada uno de los tres elementos de análisis se presentaron jerarquizados en función de la media de las 38 respuestas recibidas. Finalmente, se les pidió que justificasen razonadamente, uno a uno y por turnos, cada ítem en cuya priorización tenían alguna diferencia de opinión. Así mismo, por turnos, cada uno de ellos pudo hacer comentarios sobre su interpretación de los resultados obtenidos.

Sus intervenciones se grabaron, y posteriormente se transcribieron, sintetizaron y ordenaron por parte del equipo investigador. Finalmente, se les remitieron por correo electrónico y los expertos las validaron.



Fig. 1: Ventajas del *mentoring* inter-organizacional con respecto al *mentoring* tradicional para el colectivo de ingeniería

CALIDAD DEL PROCESO DE MENTORING INTER-ORGANIZACIONAL

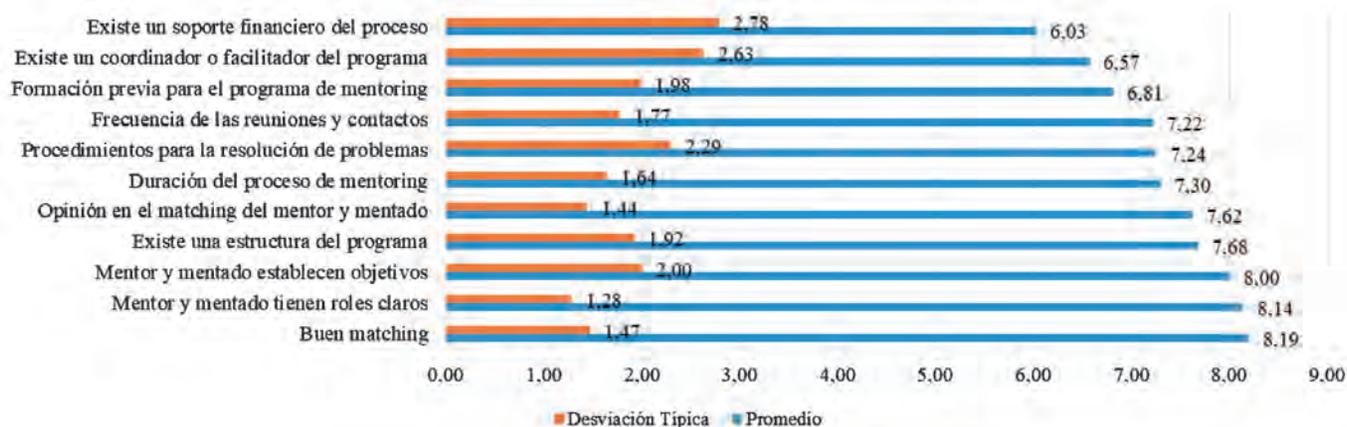


Fig. 2: Aspectos que determinan la calidad del proceso de mentoring inter-organizacional para el colectivo de ingeniería

3. RESULTADOS

Los siguientes resultados muestran, en primer lugar, las ventajas que el *mentoring* inter-organizacional puede aportar al colectivo de ingeniería. En segundo lugar, revelan los aspectos fundamentales que intervienen en la calidad del proceso de *mentoring* inter-organizacional, así como el impacto que este tipo de *mentoring* reporta a las organizaciones de los mentados.

3.1. VENTAJAS DEL MENTORING INTER-ORGANIZACIONAL

La muestra del colectivo de 38 ingenieros valoró las ventajas del *mentoring* inter-organizacional con respecto al tradicional (7 ítems). La Figura 1, muestra dicha lista de ventajas, presentando el promedio y la desviación típica de los resultados obtenidos a partir de la muestra.

Las opiniones del grupo de expertos a través de la dinámica de Focus Group corroboran los resultados obtenidos. Los expertos confirman que la mayor ventaja del *mentoring* inter-organizacional frente al intra-organizacional o tradicional es que "Aporta perspectivas de análisis y resolución de problemas diferentes" (M=8,27). Por otra parte, señalan que la orientación individual de las respuestas de los encuestados puede explicar la valoración relativamente baja otorgada al ítem "Posibilita la aparición de sinergias entre organizaciones que deriven en un menor coste de gestión para la organización derivado de la aparición de sinergias entre organizaciones" (M=7,11), en el sentido de que es la consecuencia menos observable directamente por ellos.

A modo de aclaración comentar que todos los datos numéricos sobre valores medios, incluidos entre paréntesis, se re-

fieren a las puntuaciones indicadas por el colectivo de ingenieros. El grupo experto ha valorado estas puntuaciones, pero sin indicar una nueva puntuación numérica.

3.2. CALIDAD DEL PROCESO

La **calidad del proceso** de *mentoring* inter-organizacional viene determinada especialmente por aspectos como: "Un buen *matching*", esto es, emparejamiento mentor-mentado acertado (M=8,19), "Mentor y mentado tienen roles claros" (M= 8,14), y "Mentor y mentado establecen objetivos claros al principio de la relación" (M=8,00). La Figura 2 recoge el promedio y la desviación típica de los resultados.

El grupo de expertos, a través de la dinámica de Focus Group, coincide en destacar la importancia de acertar en el emparejamiento mentor-mentado, y ratifica que "Mentor y mentado tienen los objetivos claros" (M=8,00), y que "Mentor y mentado tienen los roles claros" (M=8,14) son factores de gran relevancia de cara al éxito de un proceso de *mentoring*. Se apunta que la importancia asignada a estos dos últimos aspectos, junto con "Existe una estructura del programa" (M=7,68), podría ser explicada en parte también por aspectos culturales, especialmente en las dimensiones señaladas por Hofstede [13] de "distancia al poder" y "aversión a la incertidumbre", relativamente presentes en los profesionales españoles. No obstante, los expertos resaltan que el programa debe tener un hilo conductor, pero a la vez reconocen que se debe dejar bastante flexibilidad para que en el momento que aparezcan cuestiones puntuales, éstas puedan ser abordadas entre mentor y mentado. También destacan que el programa debe tener una

duración en el tiempo adecuada para que los objetivos mentor-mentado se puedan alcanzar. Con respecto al *matching* el grupo participante en la dinámica destaca, además, que el reto como mentor es adaptarse a aquellos perfiles con los que no se tiene tanto encaje, lo que aporta un mayor grado de aprendizaje para el mentor en la gestión, comprensión y motivación de las personas.

Así mismo, en el Focus Group se insiste en la importancia que tiene firmar un contrato o documento de compromiso mentor-mentado antes de que comience la relación de *mentoring*. En dicho documento se establecen, entre otros, los objetivos y el calendario de reuniones. En este sentido, el grupo remarca que la existencia de un "coordinador de programa" (M=6,57) es un factor relevante de cara a garantizar la calidad de un proceso de *mentoring*, porque dicho coordinador, entre otras responsabilidades, debiera monitorizar la relación entre mentor y mentado, y, por lo tanto, ser la tercera parte a la que se le rinde cuentas desde la firma del contrato. Su relativamente baja valoración, junto con la del "Soporte financiero del proceso" (M=6,03), puede venir derivada de que son elementos menos observables por los encuestados, pero que cobran gran importancia cuando son deficientes.

Por último, el grupo de expertos considera que para que el proceso tenga éxito la "Formación previa para el programa de mentoring" (M=6,81) debería extenderse tanto para mentores como para mentados. El grupo resalta que el mentor debe tener ganas de aplicar lo que se aprenda en la formación o no ejercerá correctamente su función como mentor; este es el primer paso sobre el que se fundamenta todo el proceso.



Fig. 3: Impacto para la organización del mentado ingeniero que acude a un proceso de mentoring inter-organizacional

3.3. IMPACTO DEL MENTORING EN LA ORGANIZACIÓN

El impacto para la organización como consecuencia de la participación de uno de sus integrantes en un programa de *mentoring* inter-organizacional se refleja en mayor medida en los factores: "Satisfacción en el trabajo" (M=8,42), "La organización mejora en el desarrollo del talento directivo" (M=8,15), "Existe mayor involucración en el trabajo" (M=7,88); "Mejora de la cualificación de los trabajadores" (M=7,88) y "Mejora del conocimiento de los empleados así como de la transferencia de conocimiento" (M=7,82). La Figura 3 representa el promedio y la desviación típica de los resultados para la organización.

En comparación con estudios anteriores [14 y 15], el colectivo de ingenieros encuestados ha otorgado menor importancia a los factores "Se fomenta la creación de empleo" (M=5,38) y "Mayor retención de talento y menor rotación" (M=6,77).

Esta aparente incoherencia (bajo valor a "retención del talento", alto valor a "satisfacción en el trabajo") se puede explicar desde varias perspectivas. Por un lado, la satisfacción en el trabajo es la consecuencia del desarrollo de los otros factores: desarrollo directivo, involucración, cualificación, socialización, mejora del conocimiento, etc. Por otro lado, los aspectos mejor valorados corresponden, sobre todo, a mejoras que afectan directamente a los profesionales, mientras que los menos valorados son de carácter más organizativo. Finalmente, los expertos apuntan que cuando las mejoras de carácter individual (cualificación, conocimiento, etc.) no son correspondidas por la organización se puede activar el deseo de abandono de la organización, por lo que el *mentoring* no siempre es un instrumento adecuado para la retención del talento. En este sentido, el grupo de

expertos consultado sugiere que el mentoring tradicional aporta un sentimiento de pertenencia a la organización que no está garantizado en el mentoring inter-organizacional.

En cualquier caso, el grupo coincide en que "Satisfacción en el trabajo" (M=8,42), primer factor del ranking, es una consecuencia importante de la satisfacción interna de la persona, en el sentido de que si ésta se produce, la persona tenderá a permanecer en la organización. El grupo identifica que lo anterior tiene impacto claro sobre la "Retención del talento" (M=6,77) y la "Estabilidad laboral" (M=7,03), dado que la empresa que alienta a la asistencia a este tipo de programas de mentoring inter-organizacional envía un mensaje de que se preocupa por el desarrollo profesional y personal del ingeniero.

En la misma línea, el grupo experto considera de gran relevancia el impacto del *mentoring* sobre el "Cambio estratégico de la organización" (M=7,18) dado que, gracias al *mentoring*, se consigue que los mentados tengan una mayor visión estratégica y, por tanto, pueden aportar nuevas ideas a la estrategia de la organización, especialmente, cuando los procesos de reflexión estratégica se desarrollan en paralelo a los procesos de mentoring.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo pone de manifiesto las contribuciones que el *mentoring* inter-organizacional puede efectuar al colectivo de ingenieros y a sus organizaciones, así como los elementos clave que garantizan la calidad de su desarrollo.

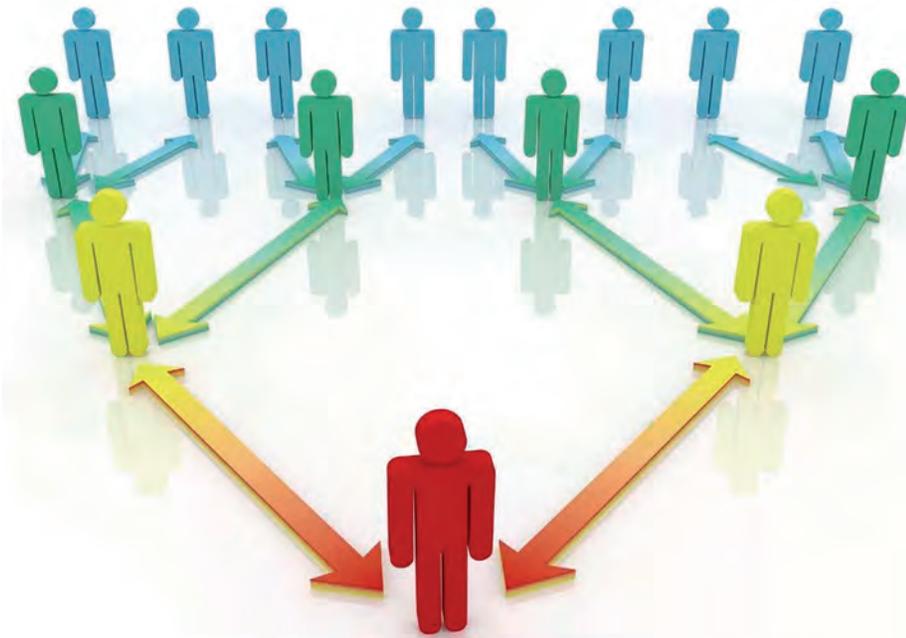
Los resultados obtenidos en este estudio facilitan el liderazgo en el diseño e implantación de programas de *mentoring* inter-organizacional por parte de las entidades que puedan actuar de nexo entre

mentores, mentados y empresas, como es el caso de los colegios profesionales de ingeniería.

En este sentido, el *mentoring* inter-organizacional puede contribuir a que las empresas puedan disponer de empleados más satisfechos, cualificados, productivos, socializados, comprometidos y con mayor apertura y visión estratégica, lo que debe redundar en una mejor gestión del talento y conocimiento de la organización y, en suma, en una mayor competitividad de la empresa.

Los principales retos de los colegios profesionales son, por un lado, diseñar procesos para alcanzar el emparejamiento adecuado mentor-mentado (*matching*); por otro lado, estructurar programas en los que ambos puedan desarrollar con eficacia su actividad: definición de roles, sistemática de definición de objetivos, protocolos de reuniones y de resolución de problemas, formación de los implicados, monitorización de los procesos, etc. y, por último, ser conscientes de las ventajas que este tipo de *mentoring* tiene también para las organizaciones, para poder transmitírselas con acierto y conseguir su necesaria colaboración. En cualquier caso, este trabajo no pretende profundizar en los elementos de necesarios para el diseño y la implementación del *mentoring* inter-organizacional, que deberán ser estudiados en próximas contribuciones, partiendo de trabajos de otros autores que identifican las mejores prácticas para otros colectivos [16].

Así mismo, otra de las limitaciones de este trabajo es no identificar los posibles riesgos que para la organización del mentado entrañan los programas de *mentoring* inter-organizacional. Es cierto que el mentado que acude al *mentoring* inter-organizacional puede aspirar a una carrera cuyas fronteras se extiendan más allá de su propia organización [17] y por



tanto, pueden existir riesgos como la desmotivación y eventualmente la salida de la organización. La valoración de los riesgos que estos programas pueden suponer para la organización del mentado debe ser objeto de trabajos posteriores.

PARA SABER MÁS

- [1] EBY, Lillian T.; LOCKWOOD, Angie. "Protégés' and mentors' reactions to participating in formal mentoring programs: A qualitative investigation". *Journal of vocational behavior*, 2005, vol. 67, no 3, p. 441-458. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvb.2004.08.002>
- [2] WANBERG, Connie R.; KAMMEYER-MUELLER, John; MARCHESE, Marc. "Mentor and protégé predictors and outcomes of mentoring in a formal mentoring program". *Journal of Vocational Behavior*, 2006, vol. 69, no 3, p. 410-423. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0742-7301\(03\)22002-8](https://doi.org/10.1016/S0742-7301(03)22002-8)
- [3] ALLEN, Tammy D. "Protégé selection by mentors: Contributing individual and organizational factors". *Journal of Vocational Behavior*, 2004, vol. 65, no 3, p. 469-483. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvb.2003.07.003>
- [4] PARISE, Marc R.; FORRET, Monica L. "Formal mentoring programs: The relationship of program design and support to mentors' perceptions of benefits and costs". *Journal of Vocational Behavior*, 2008, vol. 72, no 2, p. 225-240. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvb.2007.10.011>
- [5] GARCIA-SANCHEZ, Encarnación, MARTIN-ROJAS, Rodrigo, FERNANDEZ-PEREZ, Virginia et al. "INFLUENCE OF TOP MANAGEMENT SUPPORT AND TECHNOLOGICAL ASSETS IN KNOWLEDGE MANAGEMENT". *DYNA Management*, Enero-Diciembre 2016, vol. 4, no. 1, [10 p]. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/MN7783>
- [6] EBY, Lillian T.; LOCKWOOD, Angie L.; BUTTS, Marcus. "Perceived support for mentoring: A multiple perspectives approach". *Journal of Vocational Behavior*, 2006, vol. 68, no 2, p. 267-291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvb.2005.07.003>
- [7] BARGER, Theresa Sullivan. "For women engineers, mentoring helps". *IEEE Spectrum*, 2015, vol. 52, no 9, p. 27-27 DOI: <https://doi.org/10.1109/MSPEC.2015.7226604>
- [8] DAVIS, Pryce; VINSON, Alexandra; STEVENS, Reed. "Informal mentorship of new engineers in the workplace". *ASCE 124th Annual Conference & Exposition Proceedings*. American Society for Engineering Education, 2017. ISSN: 21535965
- [9] GISBERT-TREJO, Nuria; LANDETA, Jon; ALBIZU, Eneka; FERNÁNDEZ-FERRÍN, Pilar. "Alternative mentoring: an HDR key for a rapid changing work environment". *Human Resource Management International Digest*, 2018 a, vol. 26, no. 1 DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/HRMID-05-2017-0096>
- [10] MURRELL, Audrey J., et al. « Interorganizational formal mentoring: Breaking the concrete ceiling sometimes requires support from the outside". *Human Resource Management*, 2008, vol. 47, no 2, p. 275-294. DOI: <https://doi.org/10.1002/hrm.20212>
- [11] GISBERT-TREJO, Nuria, AZPIAZU-CANIVELL, Luciano Maria, LANDETA-RODRIGUEZ, Jon et al. MENTORING IN PROFESSIONAL ASSOCIATIONS: A TOOL FOR CAREER DEVELOPMENT. *DYNA*, Mayo 2018, vol. 94, no. 3, p.257-261. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8478>
- [12] KRUEGER, R. A; CASEY, M.A, "Focus Group: A Practical Guide for Applied Research". 5ª edición. USA, Sage Publications, 2014, 280p. ISBN: 978-1-4833-6524-4
- [13] HOFSTEDE, G, "Culture's Consequences. International Differences in Work-Related Values", 1ª edición, USA, Sage Publications, 1984, 328p ISBN: 978-0803913066
- [14] PAYNE, Stephanie C.; HUFFMAN, Ann H. "A longitudinal examination of the influence of mentoring on organizational commitment and turnover". *Academy of Management Journal*, 2005, vol. 48, no 1, p. 158-168 DOI: <https://doi.org/10.5465/AMJ.2005.15993166>
- [15] CRAIG, Christopher A., et al. « The impact of career mentoring and psychosocial

mentoring on affective organizational commitment, job involvement, and turnover intention". *Administration & Society*, 2013, vol. 45, no 8, p. 949-973. DOI: <https://doi.org/10.3102/0034654311403323>

[16] GIANCOLA, Jennifer K., et al. An organizational-development approach to implementing mentoring partnerships: Best practices from physician programs. *Consulting Psychology Journal: Practice and Research*, 2016, vol. 68, no 3, p. 208. DOI: <http://dx.doi.org/10.1037/cpb0000067>

[17] BAUGH, S. Gayle; FAGENSON-ELAND, Ellen A. Boundaryless mentoring: An exploratory study of the functions provided by internal versus external organizational mentors. *Journal of Applied Social Psychology*, 2005, vol. 35, no 5, p. 939-955. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1559-1816.2005.tb02154.x>

AGRADECIMIENTOS

Al equipo de investigación le gustaría agradecer a los miembros del grupo de expertos ingenieros que han colaborado en la dinámica *focus group* realizada en esta investigación: José María Menéndez (Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Bizkaia), Luciano Azpiazu, José Miguel Martínez y Ramón Valdés (Ahalbidetu), Juan Ignacio Burgaleta (Sener), Javier Marqués (EVE), Marcos Suarez (Clúster de la Energía) y Javier San Martín (Hofstede Insights). Asimismo, deseamos expresar el agradecimiento a los ingenieros e ingenieras que, habiendo participado en un proceso de mentoring, dieron respuesta al cuestionario, y al grupo de mentores, mentados y coordinadores de programas que nos ayudaron a validarlo.

Este artículo es parte del proyecto de investigación: US17/14 "Análisis de la validez del mentoring inter-organizacional como instrumento de desarrollo directivo" correspondiente a la convocatoria general para la concesión de ayudas a la investigación de la Universidad del País Vasco-UPV/EHU (2017).

Propuesta de marco de trabajo para la evaluación de la sostenibilidad de productos desde el paradigma de la economía circular basada en industria 4.0 (parte 2)

Proposal of a framework for the evaluation of the sustainability of products from the paradigm of the circular economy based on industry 4.0 (2nd part)

Ana De-Las-Heras-García-de-Vinuesa, Francisco Aguayo-González y Antonio Córdoba-Roldán
ETSII. Universidad de Sevilla (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8718>

1. INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de mitigar la fractura metabólica [1] y basados en el paradigma de la economía circular donde se aúnan los aspectos ambientales y económicos con un nuevo modelo de sociedad que utiliza y optimiza stocks y flujos de materiales, energía y residuos creando ciclos cerrados, se ha desarrollado un nuevo marco de trabajo para la evaluación integrada de la sostenibilidad en los productos inteligentes conectados.

Este nuevo marco de trabajo queda compuesto por tres pilares: los marcos de trabajo ACV [2] y C2C [3], evolucionados

hacia una nueva versión conectada donde los facilitadores digitales aporten datos e información en tiempo real, junto con la conectividad como eje estructural para el desarrollo de un modelo metodológico orientado a las mejoras estratégicas aportadas por la Cuarta Revolución Industrial o Industria 4.0.

La siguiente figura muestra el esquema conceptual de la articulación del marco de trabajo donde se aborda una evaluación de los impactos provocados por el diseño y fabricación de productos orientado a los efectos (AVC, eco-eficiencia) y las causas (C2C, eco-efectividad) integrada en las tres dimensiones de la sostenibilidad: impactos ambientales, impactos económicos e impactos sociales.

El objetivo de este trabajo se centra en el desarrollo metodológico del modelo, de forma que, en la sección 2 se presenta la estructura del mismo con las fases y las

etapas que lo componen. En cada una de las fases, adenómica y doméstica, se hace una definición del objetivo y contenido de sus etapas así como los niveles de análisis y evaluación de las mismas.

La sección 3 se centra en una parte del modelo, la Cloud Desing Manufacturing Platform (CDMngP) [4], plataforma IoT para la recogida, procesamiento, análisis y almacenaje de los datos recogidos por los sensores ubicados en el producto inteligente conectado así como de aquella información procedente de otras fuentes de datos (histórico de datos de la empresa, datos de los distribuidores, información de productos del mercado y bases de datos estandarizadas para el ACV de cada dimensión) necesarias para la evaluación de la sostenibilidad del mismo, con técnicas de Big Data e inteligencia artificial en la nube para la monitorización y control en tiempo real.

2. FORMULACIÓN DEL MODELO DE DISEÑO Y EVALUACIÓN INTEGRADA DE LA SOSTENIBILIDAD DESDE LAS CAUSAS (C2C) Y EFECTOS (ACV) PARA PRODUCTO INTELIGENTE CONECTADO

Siguiendo el principio de conectividad de industria 4.0, se propone modelo dentro del marco de trabajo desarrollado bajo el paradigma de la economía circular para

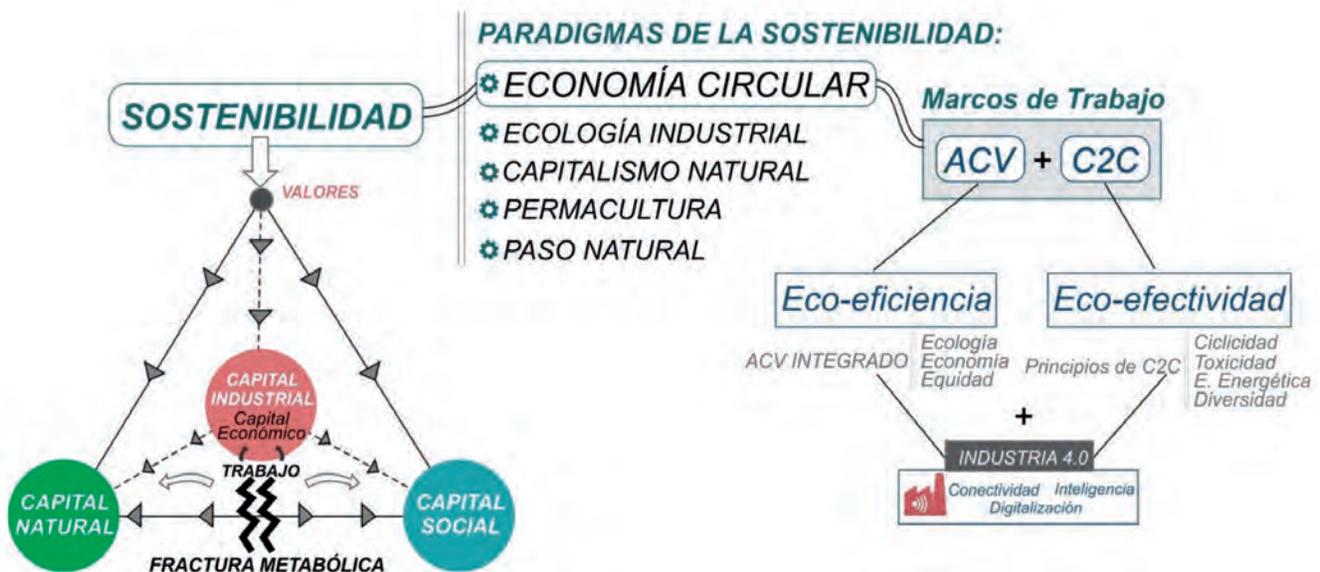


Figura 1: Estructura marco de trabajo para la sostenibilidad conectada. Fuente: Elaboración propia

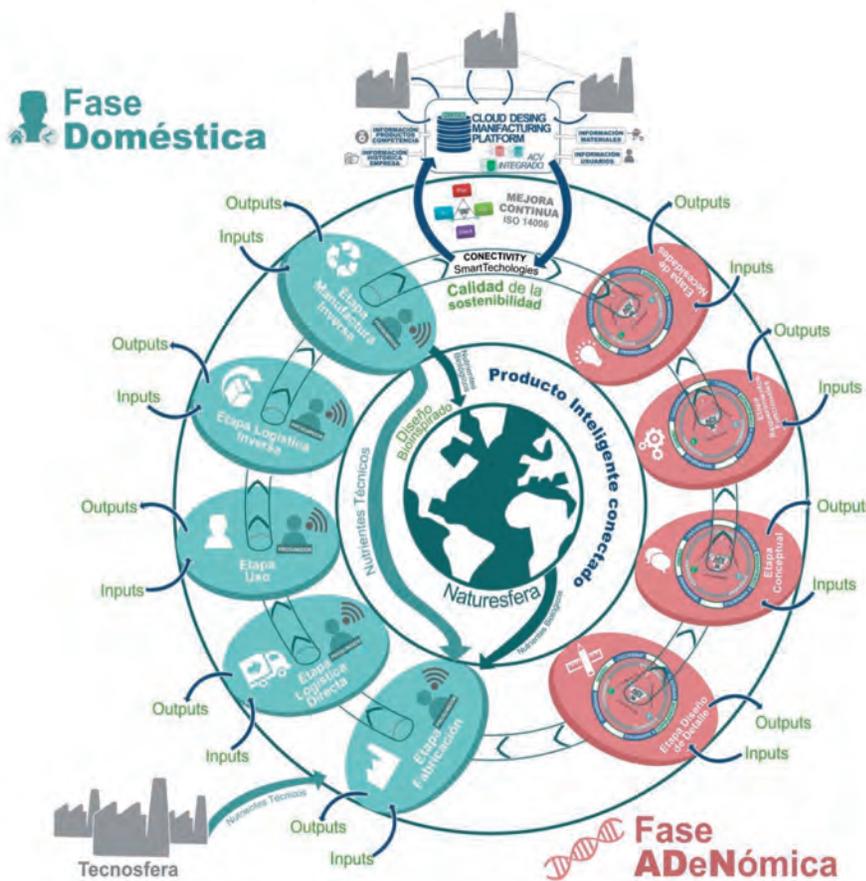


Figura 2: Estructura MDESA. Fuente: Elaboración propia

la evaluación de la sostenibilidad bajo la perspectiva de análisis de los efectos y las causas de los impactos (ACV y C2C conectado), la 3E y los facilitadores digitales.

ACV conectado presenta una visión de todo el ciclo de vida, permite obtener el efecto del impacto de forma cuantitativa, elegir el método de eliminación más adecuado (a través del ecodiseño y la eco-innovación) dependiendo de aquel que suponga menor impacto negativo, analizar el tipo de nutrientes que se eliminan y, por tanto, aquellos que puede ser mejor metabolizados por la biosfera (para superar la limitación que posee la metodología C2C en la clasificación de los nutrientes como biológicos o técnicos).

Complementarias a las potencialidades que aporta el ACV conectado, aparecen aquellas con las que contribuye el C2C conectado. Ésta metodología permite obtener la información de las causas de los impactos definiéndose como una herramienta útil y necesaria en la toma de decisiones posteriores a la evaluación ocupando dentro del modelo, una posición transversal con el cálculo de indicadores referidos a los 4 criterios (ciclicidad, toxicidad, eficiencia energética y diversidad) que contribuyen a la toma de decisiones y

desarrollo de líneas guías para el desarrollo sostenible del producto.

El **Modelo de Diseño y Evaluación Sostenible Adenómico (MDESA)** está compuesto por dos fases: fase adenómica y fase doméstica.

La fase adenómica la componen las etapas donde se fija el ADN del producto y

el carácter autopoyético de la sostenibilidad a través de su adenificación organizado en genes en base a los requerimientos funcionales, mediante el proceso de evaluación diseño y desarrollo del producto inteligente conectado.

Por otro lado, la fase doméstica es la que dota al producto de las características ligadas al usuario, es decir, los genes, introduciendo un nuevo concepto, la *domesticación* [5] del producto, que añade las modificaciones de los consumidores y prosumidores en cada una de las cinco etapas que componen la fase determinando las distintas modificaciones del ADN en el contexto del ciclo de vida del producto.

Como puede observarse en la figura 2, ambas fases se encuentran unidas por un canal de comunicación, donde poder aportar y absorber datos en tiempo real. Este canal de conectividad hace que los datos del producto sean recogidos, analizados y procesados en la CDMngP, que recoge tanto los datos creados en tiempo real en las distintas etapas como el histórico de datos que genera el P&PLM del producto. Así mismo, este modelo está conectado con las bases de datos estandarizadas para el ACV en cada una de las dimensiones (ambiental, económica y social) de forma que exista una capa de almacenamiento con diversos tipos de bases de datos (no-estructuradas, semi-estructuradas y estructuradas).

La CDMngP del MDESA soporta la conexión con otras *industrias inteligentes* de forma que, no solo se trabajen con datos creados en tiempo real, sino que sea posible el acceso a bancos de subproductos

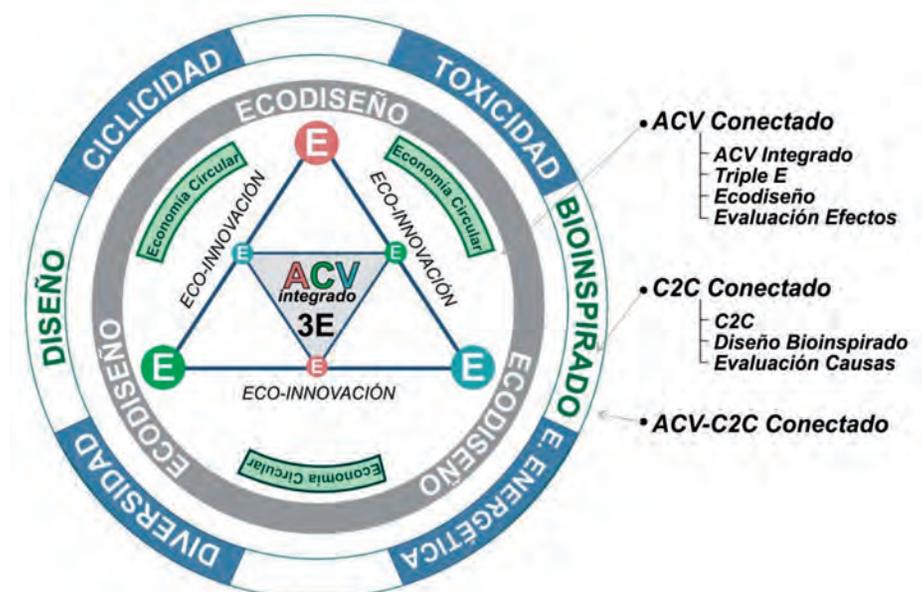


Figura 3: Estructura etapas fase ADeNómica. Fuente: Elaboración propia

y materiales preprocesados de forma que se promueve la creación de ciclos cerrados gracias a los metabolismos industriales y sociales conectados, desde el paradigma de la economía circular.

2.1. FASE ADENÓMICA

En esta fase se fija el ADN del producto y comprende: Etapa de necesidades, Etapa de requerimientos funcionales, Etapa conceptual y Etapa de diseño de detalle. En cada una de ellas, se ponen a disposición de los stakeholders que intervienen en el ciclo de vida del producto un conjunto de posibilidades de evaluación de los impactos a través del uso de técnicas y herramientas orientadas al efecto, las causas o la combinación de ambos. La figura 3 recoge la estructura de análisis que se lleva a cabo en cada etapa, donde la parte interior se refiere al ACV conectado y la parte externa al C2C conectado.

Los stakeholders que forman el equipo de diseño dentro del P&PLM tienen a disposición, en cada uno de estos dos niveles presentes en todas las etapas de la fase adenómica, una serie de recursos en forma de herramientas y técnicas donde realizar el análisis y evaluación de los impactos que mejora de forma continua el proceso de diseño del producto.

- **ACV integrado:** En este nivel del ACV conectado se plantea la aplicación de una evaluación integrada bajo las tres dimensiones de los impactos negativos de un producto a través de la aplicación de la metodología del Análisis del Ciclo de Vida Sostenible (LCSA).
- **Triple E:** La triple cuenta de resultados (3E) supone la integración de las tres dimensiones de la sostenibilidad como yacimiento de valor.
- **Ecodiseño:** Aplicación de técnicas y herramientas para el ecodiseño ecoinnovador de productos.
- **Evaluación de Efectos:** Combinación de aplicación de los tres niveles anteriores con el fin de realizar una evaluación integrada conectada de los efectos de los impactos en un smart connected product.
- **C2C:** Desarrollo de una evaluación basada en los 4 principios que plantea el C2C con el objetivo de desarrollar productos que sigan la línea de aportar eco-innovaciones y crear valor en los recursos fabricados en sucesivos ciclos
- **Diseño Bioinspirado:** Aplicación de técnicas y herramientas para el diseño innovador inspirado en la naturaleza

TOXICIDAD	CICLICIDAD	E. ENERGÉTICA	DIVERSIDAD
Peso total de la toxicidad (TTM). Toxicidad relativa de los materiales del producto (RTP).	Materiales del producto procedentes de fuentes recicladas (MFRS). Materiales que serán reciclados o compostados (MTBR)	Demanda Acumulada de Energía (CED). Contribución de energía de cada coproducto (CEC)	Clasificación de imitación a la naturaleza por la morfología (MFO). Clasificación de imitación a la naturaleza por función (MFU). Clasificación de imitación a la naturaleza en ecosistema (MECO)

Tabla 1: Criterios evaluación C2C transversal

turalidad y todo el potencial de los sistemas naturales.

- **Evaluación de Causas:** Combinación de aplicación de los dos niveles anteriores con el fin de realizar una evaluación integrada conectada de las causas de los impactos en un smart connected product.
- **ACV y C2C conectado:** Combinación completa de la evaluación de efectos y causas de los impactos en un smart connected product.
- **Economía Circular:** Principios e indicadores de economía circular.

2.2. FASE DOMÉSTICA

Una vez fijado el ADN, se procede a la industrialización y lanzamiento y la consiguiente evolución del producto en el mercado y su fin de vida útil. En estas etapas el producto sufre modificaciones por posibles mejoras, adaptación a modos de uso o preferencias de los consumidores, que recibe el nombre de domesticación del producto. Esta nueva perspectiva de incluir en el proceso de manufactura al consumidor se denomina *social manufacturing* [6, 7] donde se rediseña la cadena de suministros desde una perspectiva de desarrollo social sostenible, incluyendo la innovación social debido a que los productos se encuentran conectados a las personas y éstas son parte de la toma de decisiones desde el concepto de distribución abierta colaborativa donde la experiencia del consumidor supone una nueva estrategia para transformar a éste en prosumidor [8].

A lo largo de todas las etapas de la domesticación se mantiene el canal de comunicación de datos en tiempo real que puede influir en la toma de decisiones residuales (elementos que no se han contemplado en la fase adenómica pero que suponen mejoras en el producto). Así mismo, se genera información del producto que pasará a la CDMngP para integrarla en la domesticación de las sucesivas ge-

neraciones del producto (P&PLM sostenible en ciclo cerrado).

2.3. EVALUACIÓN CRITERIOS C2C: INDICADORES

De manera transversal, se lleva a cabo una evaluación referida a los 4 criterios de C2C. Dicho cálculo se lleva a cabo conforme a la Tabla 1.

3. ESTRUCTURA DE LA CDMNGP. MODELO DE PROCESAMIENTO DE DATOS

Como se ha señalado, la conectividad que aporta la Industria 4.0 permite la comunicación de todas etapas del modelo. La información generada por los procesos de cada etapa está soportada por la ISO 10303 (Standard for the Exchange of Product model data, STEP) como modelo de datos del producto.

Tras el análisis de la norma ISO 10303 y sus protocolos, y dado que existe un protocolo de aplicación, el AP239 que aporta una visión global del ciclo de vida, se propone que dentro de la categoría "entorno" se ubicará la información resultante de la evaluación de la sostenibilidad a través del ACV-C2C integrado conectado. En esta propuesta se incorporaran mediante etiquetas de contenido los tres impactos de cada dimensión dando como resultado el perfil sostenible global y el resultado del cálculo de los indicadores de cada criterio de C2C.

Junto con una base de datos de referencia de las fuentes externas a la CDMngP que proporciona información concreta del producto, se propone incorporar los contenidos de sostenibilidad a través de la AP239, constituyendo así una base sólida sobre la cual se puede construir la gestión de datos del ciclo de vida del producto, basada en la representación estandarizada de la información [9].

La Figura 4 muestra las diferentes capas de las que se compone la plataforma.

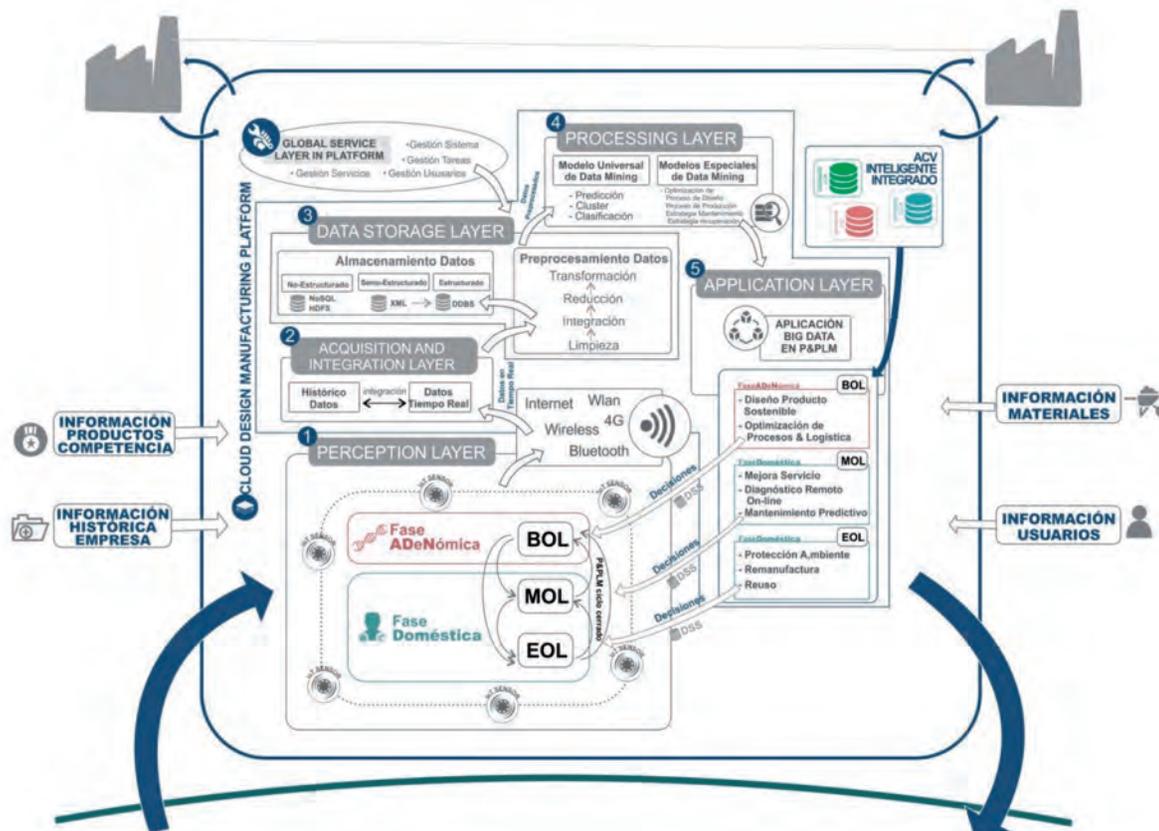


Figura 4: Estructura procesamiento de datos CDMngP para MDESA. Fuente: Elaboración propia

La plataforma se compone de 5 capas:

1. Perception Layer (Capa perceptiva):

Las etapas que forman parte de las dos fases del marco de trabajo (fase adenómica y fase doméstica) se encuentran sensorizadas, de forma que exista una transmisión constante de datos en tiempo real a través de diferentes tecnologías (Internet, WLAN, Wireless, 4G, Bluetooth,...) hacia la plataforma. Esto viene derivado por la diversidad de contextos en los que se sitúan las etapas (y por tanto, los sensores tienen asociada una tecnología adecuada al entorno y su transferencia de datos) así como en la diversidad del tipo de datos que se recogen.

2. Acquisition and integration layer (Capa de adquisición e integración):

Una vez adquiridos los datos, se hace necesario recibir los datos en tiempo real e integrarlos con los *No Real-time data*. Estos datos hacen referencia a las etapas de información que ya posee la base de datos histórica de la empresa que forma parte de cualquier ciclo de vida de producto: información de los productos análogos de la

competencia, información de materiales, información de los usuarios (experiencia, emociones, etc.) e información histórica de la cartera de productos.

En este grupo de datos se incluyen también las bases de datos estandarizadas de las que se sirve el ACV integrado. Estas bases de datos se utilizan en la evaluación de los efectos de los impactos y quedan incluidas en la capa 5 (Application Layer). Se hace necesario puntualizar que esta estructura de conectividad supone la propuesta de combinación de datos estandarizados con datos en tiempo real para caracterizar y calcular impactos a través de la metodología del Análisis del Ciclo de Vida Integrado. Este nuevo escenario permite el desarrollo de modelos predictivos de los impactos.

3. Data storage layer (Capa de almacenamiento):

Antes de que los datos se almacenen en esta capa, deben ser sometidos a un proceso de preprocesamiento con esta secuencia de tareas: limpieza, integración, reducción y transformación. Una vez preprocesados, el almacenamiento en bases de datos puede tener diversas estructuras: no estructurados, con la propuesta

de bases de datos NoSQL o HDFS; semiestructurados (XML) o estructurados.

4. Processing layer (Capa de procesamiento):

Tras el almacenamiento, los datos se encuentran ordenados en bases de datos que se encargan de aportar la información que será procesada. Se proponen en esta capa dos tipos de data mining: universal models, así como los Special Models, que proponen la optimización de los procesos de diseño de los productos, de los procesos productivos y de las estrategias de mantenimiento y recuperación o remanufactura de materiales.

5. Application layer (Capa de aplicación):

La última capa se corresponde con la aplicación de los datos para la toma de decisiones en el P&PLM. Dependiendo de la fase en la que se sitúe, los resultados del procesamiento de datos sugieren decisiones asociadas a las entradas, salidas y procesos de cada etapa.

Existe una capa independiente, la Global Service Layer (Capa de servicio global), que se encuentra conectada a todas las anteriores ya que se encarga del manteni-



Figura 5: Articulación del marco de trabajo de la sostenibilidad conectada. Fuente: Elaboración Propia

miento del sistema, las tareas, los usuarios y el servicio. Es importante resaltar que esta plataforma posee una actualización de datos constantes así como acceso libre por parte de todos los stakeholders de la empresa y por las otras *smart factories* que se encuentren conectadas.

4. CONCLUSIONES

Gracias al potencial de la inclusión de la conectividad al producto que aporta la industria 4.0 y la aparición de los facilitadores digitales, es posible manejar la información ligada al contexto de uso del producto, lo que se traduce en una mejora en la calidad de evaluación de las causas y los efectos de los impactos generados desarrollado en el marco de trabajo en el que se basa esta propuesta metodológica.

El modelo expuesto incluye la socialización del producto por la incorporación de técnicas y herramientas que, en la fase de domesticación, recuperan los aspectos

sociales del producto en las etapas referidas a la domesticación que serán devueltos a la fase adenómica contribuyendo al desarrollo de un producto inteligente conectado sostenible 4.0 (figura 5).

Así mismo, el desarrollo de la CDMngP como soporte para la gestión de la información del producto así como para el intercambio de datos ofrece la posibilidad de una correcta manipulación de los datos. Esto supone un escenario que desarrolla la innovación abierta y mejora continua con la inclusión de las perspectivas top-down y bottom-up en la fabricación distribuida en ciclos cerrados.

Por último, destacar la posibilidad que ofrece esta nueva propuesta donde se recuperan los datos en tiempo real de productos y procesos de fabricación posibilitando la creación de bases de datos de un escenario concreto que ofrezcan una mayor contextualización en la evaluación de la sostenibilidad.

La línea de investigación futura del

presente trabajo es la aplicación del modelo a un caso de estudio para un producto inteligente conectado, concretamente se está desarrollando en la inclusión de sensores IoT en un electrodoméstico de forma que se pueda obtener información de consumo energético y de recursos en tiempo real para ofrecer una evaluación de la sostenibilidad proyectada sobre la etapa de uso y explotación así como en la etapa de eliminación.

PARA SABER MÁS

- [1] Foster John Bellamy. *Marx's Ecology: Materialism and Nature*. 1a ed. Londres: Monthly Review Press, 2000. ISBN 9781583670125
- [2] AENOR. *Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia*. UNE-EN ISO 14040:2006. Madrid:AENOR, 2006.
- [3] McDonough W, Braungart M. *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*. 1 ed. Estados Unidos: Random hous, 2002. ISBN 9780865475878.
- [4] Adamson, G., Wang, L., HOLM, M. "Cloud manufacturing – a critical review of recent development and future trends". *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2015, pp. 1-34. ISSN 0951-192X. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/0951192X.2015.1031704>
- [5] Fallan K. *Design History: Understanding Theory and Method*. 1a ed. Estados Unidos: Berg Publishers, 2010. ISBN 978-1847885371
- [6] Jiang P, Leng J, Ding K. "Social manufacturing: A survey of the state-of-the-art and future challenges". En: 2016 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI) . 2016, p. 12-17. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/SOLI.2016.7551654>
- [7] Leng J.W, Jiang P.Y, Zhang F.Q, Cao, W. "Framework and Key Enabling Technologies for Social Manufacturing". *Applied Mechanics and Materials*. 2013, vol. 312, pp. 498-501. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.312.498>
- [8] Ritzer G, Jurgenson N. "Production, Consumption, Prosumption". *Journal of Consumer Culture*. 2010, vol. 10, p. 13-36. ISSN 1469-5405. DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/1469540509354673>
- [9] ISO. *ISO 10303-233:2012. Industrial automation systems and integration -- Product data representation and exchange -- Part 233: Application protocol: Systems engineering*. 1o., 2012. ISO, International Organization for Standardization.

ACRÓNIMOS

3E	Triple Bottom Line
ACV	Análisis del Ciclo de Vida
C2C	De la Cuna a la Cuna (Cradle to Cradle)
CDMngP	Cloud Desing Manufacturing Platform
CEC	Contibución de energía de cada coproducto
CED	Demanda Acumulada de Energía
IoT	Internet de las Cosas
MDESA	Modelo de Diseño y Evaluación Sostenible Adenómico
MECO	Clasificación de imitación a la naturaleza en ecosistema
MFO	Clasificación de imitación a la naturaleza por la morfología
MFRS	Materiales del producto procedentes de fuentes recicladas
MFU	Clasificación de imitación a la naturaleza por función
MTBR	Materiales que serán reciclados o compostados
P&PLM	Gestión del Ciclo de Vida de Productos y Procesos
RTP	Toxicidad relativa de los materiales del producto
TTM	Peso Total de Toxicidad

Función y desarrollo de los gráficos de control multivariantes

Function and development of multivariate control graphs



Edgar-Augusto Ruelas-Santoyo, Bertha-Laura Vargas-Rodríguez, José-Jovani Cardiel-Ortega y Geraldo Llamas-Perez

Instituto Tecnológico Superior de Irapuato (Méjico)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8674>

1. INTRODUCCIÓN

Los gráficos del control son una herramienta del control estadístico de procesos. Resultan útiles para lograr la estabilidad y mejorar la capacidad del proceso mediante la reducción de la variabilidad. El objetivo del gráfico de control es lograr una alta calidad del producto, reduciendo costos de producción y minimizando los defectos del producto. En cualquier proceso de fabricación no siempre se producen los mismos efectos, ya que los elementos que intervienen no siempre funcionan de forma exacta, dando lugar a cierta variabilidad, cuyas causas es preciso investigar. La variabilidad de un proceso puede deberse a causas no asignables y a causas asignables. Las primeras, también llamadas aleatorias son de naturaleza probabilística y forman parte de la variación propia del proceso. Por otro lado, las causas asignables dan lugar a variaciones irregulares no predecibles, que hay que eliminar o corregir. En esta etapa es donde los gráficos de control constituyen una excelente herramienta, pues permiten decidir cuándo hay que intervenir en el proceso para modificar una situación no deseada.

En los procesos de producción actuales, suelen existir características que influyen de forma conjunta e interrelacionada en la calidad final de los productos, cuando dicha condición ocurre las características de calidad deberían ser estudiadas conjuntamente ya que una anomalía en el proceso puede estar anunciada no sólo por la detección de una señal fuera de control en los gráficos individuales correspondientes a algunas de las variables, sino también en la relación entre las variables que se estudian. Una solución consiste en controlar todas de forma si-

multánea mediante técnicas de control estadístico multivariantes. De esta forma no sólo será analizado el efecto de cada una de las características sobre la calidad del producto, sino que también se toma en cuenta el efecto de las interacciones entre ellas.

Dentro de los procedimientos de control multivariante destacan: el gráfico T^2 de Hotelling, el gráfico de control multivariante de sumas acumuladas (MCUSUM) y el gráfico de control multivariante exponencial con peso promedio móvil (MEWMA). Actualmente la gráfica T^2 de Hotelling es el procedimiento de control con más investigación y aplicación en la industria para monitorear p características de calidad correlacionadas en un proceso de producción, en donde dichas características de calidad pueden ser modeladas por una distribución de probabilidad normal p -variante [1]. El estadístico T^2 es un escalar que combina información de medidas de dispersión (Σ) y posición (μ) de las variables. Cuando, como generalmente ocurre en los sistemas de producción, μ y Σ son parámetros desconocidos de una población normal p -variada con media μ y matriz de covarianzas Σ , estos son estimados por \bar{X} y S respectivamente, de acuerdo a las Ec. (1) y (2), [2].

Vector de medias (\bar{X}). Se agrupa en un vector el promedio de las mediciones realizadas para cada una de las p características de calidad correlacionadas.

$$\bar{X} = [\bar{X}_1, \bar{X}_2 \dots \bar{X}_p] \quad (1)$$

Matriz de covarianzas (S) La estructura de esta matriz, es de naturaleza simétrica y se agrupan las medidas de variación bivariada generadas en el proceso. En la diagonal principal se encuentran las varianzas y en el resto las covarianzas de cada una de las variables inspeccionadas en el sistema de producción.

$$S = \begin{bmatrix} S_{11}^2 & S_{12}^2 & \dots & S_{1p}^2 \\ S_{21}^2 & S_{22}^2 & \dots & S_{2p}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{p1}^2 & S_{p2}^2 & \dots & S_{pp}^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

La variable aleatoria T^2 de Hotelling muestral, se expresa de acuerdo a la Ec. (3).

$$T^2 = (X - \bar{X})' S^{-1} (X - \bar{X}) \quad (3)$$

En este caso se calcula el límite control a partir de la Ec. (4):

$$\text{Límite de control} = \left[\frac{p(n+1)(n-1)}{n(n-p)} \right] F_{(\alpha, p, n-p)} \quad (4)$$

Dónde:

n = número de datos

$F_{(\alpha, p, n-p)}$: distribución F

α : probabilidad de falsa alarma del gráfico de control

De aquí en adelante, cuando se mencione a la T^2 se refiere al estadístico generado en la Ec. (3), donde los estadísticos \bar{X} y S son el vector de medias y la matriz de covarianzas respectivamente, de la distribución de referencia, y donde n es el número de datos. La gráfica controla cambios en el vector de medias suponiendo que la matriz de covarianzas del proceso es igual a la matriz de covarianzas de la distribución de referencia.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Para mostrar el funcionamiento de la carta de control T^2 de Hotelling como mecanismo de control en procesos multivariantes, se implementó en una línea de producción de transformadores eléctricos. El caso de estudio se limitó al análisis de transformadores del tipo monofásico con una potencia de 25 KVA (kilo-voltampere), debido a que es el que mayor volumen presenta dentro de la empresa donde se llevó a cabo la ejecución, pero no es una limitante para extender los resultados propuestos a otros tipos de transformadores que se fabriquen bajo el mismo esquema, u otros procesos de manufactura que requieran un control multivariante.

Una parte importante en la manufactura de un transformador eléctrico, es el ensamble de la bobina y el núcleo denominada parte activa. Para un ensamble adecuado es vital controlar las dimensiones del largo en la bobina (A), el ancho del núcleo (B) y largo del núcleo (C), por lo tanto $p=3$. Obsérvese la Fig. (1), se muestra un diseño del ensamble entre la bobina y los núcleos.

Para establecer un control estadístico del proceso adecuado, se deben de vigilar

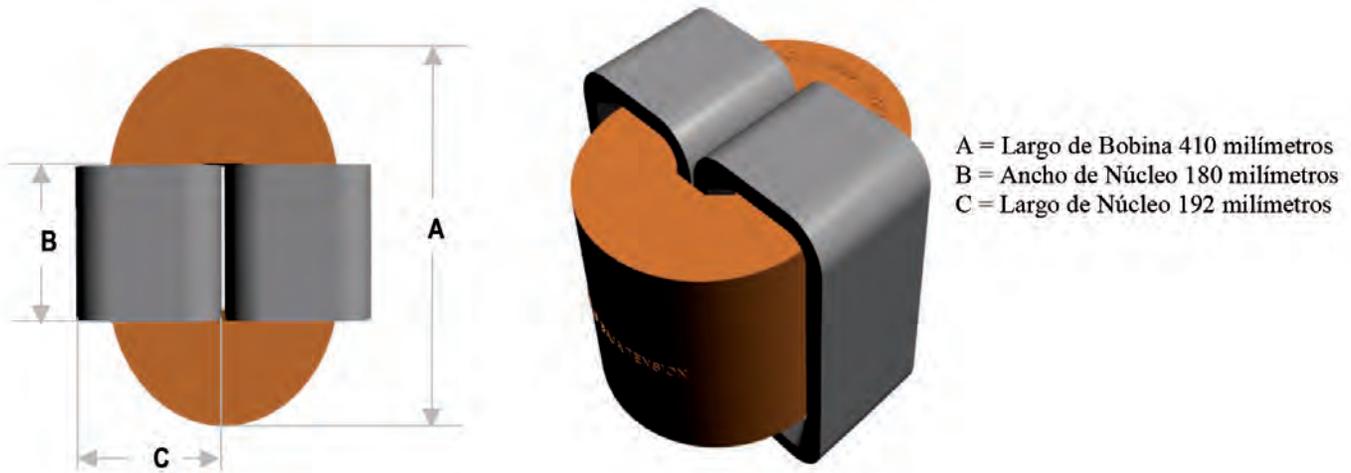


Fig. 1: Diseño de ensamble bobina-núcleo

las tres características de calidad del ensamble y no obviar la posible relación que pudiera existir entre las variables, como generalmente se lleva a cabo en el control estadístico tradicional. En términos estadísticos, se estaría obviando la información contenida en la estructura de covarianza de las características de calidad vigiladas en el producto.

2.1. GENERACIÓN DE DATOS

Para la construcción del gráfico de control multivariante T² de Hotelling como primer paso se procede a estimar el vector de medias y la matriz de covarianzas por medio de las Ec. (1) Ec. (2) respectivamente. Tanto el vector de medias y la matriz de covarianzas se calcularon a partir de 45 mediciones realizadas a transformadores para cada una de sus tres características de calidad críticas en la parte activa del transformador. Ver Tabla 1.

Vector de Medias calculado. Ver Ec. (5)

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} 409.9279 \\ 179.6246 \\ 192.1582 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Matriz de covarianzas calculada. Ver Ec. (6)

$$S = \begin{bmatrix} 1.7826 & -0.3891 & -0.4085 \\ -0.3891 & 1.1798 & -0.2816 \\ -0.4085 & -0.2816 & 1.6438 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Como ejemplo, considere el cálculo del estadístico T² para la medición uno, utilizando notación matricial, se tiene que:

Se calcula otro valor del estadístico T², ahora con la medición cuarenta.

Para determinar si una observación está fuera de control, el valor del estadístico T² debe compararse con el límite de control superior de acuerdo a la Ec. (4):

Medición	A	B	C	Estadístico T ²
1	409.464	178.337	194.062	3.1188
2	409.213	179.711	192.496	0.3070
3	409.688	178.003	192.001	3.0175
4	409.539	178.988	192.887	0.6700
5	406.919	179.296	191.967	7.0009
6	410.421	180.335	192.345	0.9812
7	410.108	181.547	190.953	3.7084
8	410.082	180.619	190.961	1.4435
9	409.429	179.093	190.727	2.6945
10	411.141	180.372	192.334	2.2068
11	408.877	181.084	191.830	2.0177
12	411.213	180.276	191.499	1.7215
13	410.335	178.706	192.876	0.9190
14	410.124	180.089	192.653	0.6119
15	411.120	180.961	191.371	3.1262
16	407.821	180.359	193.699	3.4888
17	411.923	178.805	191.788	2.3691
18	409.508	179.708	191.300	0.7421
19	408.630	180.573	190.806	2.7731
20	409.400	179.802	192.048	0.1908
21	411.241	177.813	192.179	3.1178
22	412.658	179.420	192.687	5.4839
23	409.422	181.099	192.991	2.8181
24	410.737	177.121	193.595	5.8012
25	408.658	180.295	190.562	3.2054
26	410.359	178.170	191.954	2.0197
27	411.582	179.652	191.950	1.7370
28	410.180	179.965	192.679	0.5348
29	411.020	180.870	192.083	3.0023
30	410.717	179.376	191.918	0.3598
31	410.236	180.711	190.638	2.0560
32	409.942	179.919	190.809	1.1693
33	411.250	179.599	192.595	1.5260
34	411.578	178.858	191.521	1.7888
35	409.994	177.437	193.089	4.3467
36	408.895	178.270	192.849	2.8833
37	408.831	180.235	190.654	2.6654
38	410.575	178.714	192.026	0.8174
39	411.499	179.725	192.250	1.8187
40	406.261	180.592	197.889	24.7465
41	411.035	179.059	190.856	1.7250
42	409.597	178.972	191.280	1.5511
43	409.900	178.372	193.620	2.1908
44	406.935	181.398	190.496	8.8914
45	408.697	180.800	193.347	2.6349
Promedio	409.9279	179.6246	192.1582	

Tabla 1: Mediciones y cálculo del estadístico T²

$$T_1^2 = \left(\begin{bmatrix} 409.464 \\ 178.337 \\ 194.062 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 409.9279 \\ 179.6246 \\ 192.1582 \end{bmatrix} \right)' \begin{bmatrix} 1.7826 & -0.3891 & -0.4085 \\ -0.3891 & 1.1798 & -0.2816 \\ -0.4085 & -0.2816 & 1.6438 \end{bmatrix}^{-1} \left(\begin{bmatrix} 409.464 \\ 178.337 \\ 194.062 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 409.9279 \\ 179.6242 \\ 192.1582 \end{bmatrix} \right)$$

$$T_1^2 = [-0.4639 \ -1.2876 \ 1.9038] \begin{bmatrix} 0.6690 & 0.2714 & 0.2127 \\ 0.2714 & 0.9938 & 0.2377 \\ 0.2127 & 0.2377 & 0.7019 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.4639 \\ -1.2876 \\ 1.9038 \end{bmatrix} = 3.1188$$

Se calcula otro valor del estadístico T^2 , ahora con la medición cuarenta T_{40}^2 .

$$T_{40}^2 = \left(\begin{bmatrix} 406.261 \\ 180.592 \\ 197.889 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 409.9279 \\ 179.6242 \\ 192.1582 \end{bmatrix} \right)' \begin{bmatrix} 1.7826 & -0.3891 & -0.4085 \\ -0.3891 & 1.1798 & -0.2816 \\ -0.4085 & -0.2816 & 1.6438 \end{bmatrix}^{-1} \left(\begin{bmatrix} 409.464 \\ 178.337 \\ 194.062 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 409.9279 \\ 179.6242 \\ 192.1582 \end{bmatrix} \right)$$

$$T_{40}^2 = [-3.6669 \ 0.9674 \ 5.7308] \begin{bmatrix} 0.6690 & 0.2714 & 0.2127 \\ 0.2714 & 0.9938 & 0.2377 \\ 0.2127 & 0.2377 & 0.7019 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -3.6669 \\ 0.9674 \\ 5.7308 \end{bmatrix} = 24.7465$$

$$\text{Límite de control} = \frac{3(46)(44)}{45(42)} F_{(0.0027, 3, 42)}$$

$$\text{Límite de control} = \frac{3(46)(44)}{45(42)} 5.5367 = 17.787$$

Los valores del estadístico T^2 calculado para cada una de las mediciones se grafican de forma conjunta y ordenada al igual que el límite de control para completar el gráfico de control T^2 de Hotelling. De acuerdo a la Fig. (2), donde se ejemplifica la carta de control multivariante aplicada al proceso de manufactura de transformadores, el estadístico T^2 calculado a partir de las mediciones realizadas al transformador número cuarenta T_{40}^2 se encuentra fuera de control estadístico debido a que supera el límite de control calculado y se deberá investigar la fuente que causa la señal fuera de control.

En el caso de los gráficos univariantes cuando existe una señal de fuera de control puede concluirse fácilmente sobre el problema y dar una solución. En el caso multivariante la solución no es tan directa. Cuando el valor del estadístico T^2 supera el límite de control se debe detectar a la(s) variable(s) responsable(s) lo cual es un tema de investigación que se encuentra en desarrollo y que se aborda en la siguiente sección. Para llevar a cabo un control estadístico de procesos bajo el enfoque multivariante se recomienda seguir el esquema presentado en la Fig. (3).

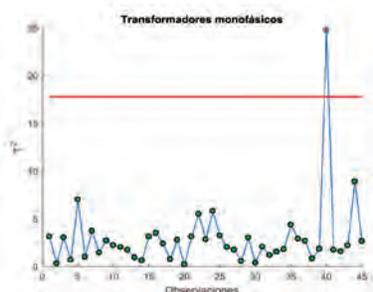


Fig. 2: Gráficos de control multivariantes T^2 de Hotelling

3. LIMITACIÓN Y AVANCES EN LOS GRÁFICOS DE CONTROL MULTIVARIANTES

Los gráficos de control estadístico multivariantes mencionados en la sección anterior son considerados paramétricos, ya que parten del supuesto de normalidad.

Además, las señales de fuera de control en las cartas de control multivariantes no revelan cuál variable (o combinación de variables) causó la señal, lo cual complica la interpretación y generación de estrategias para eliminar la causa asignable de la variación.

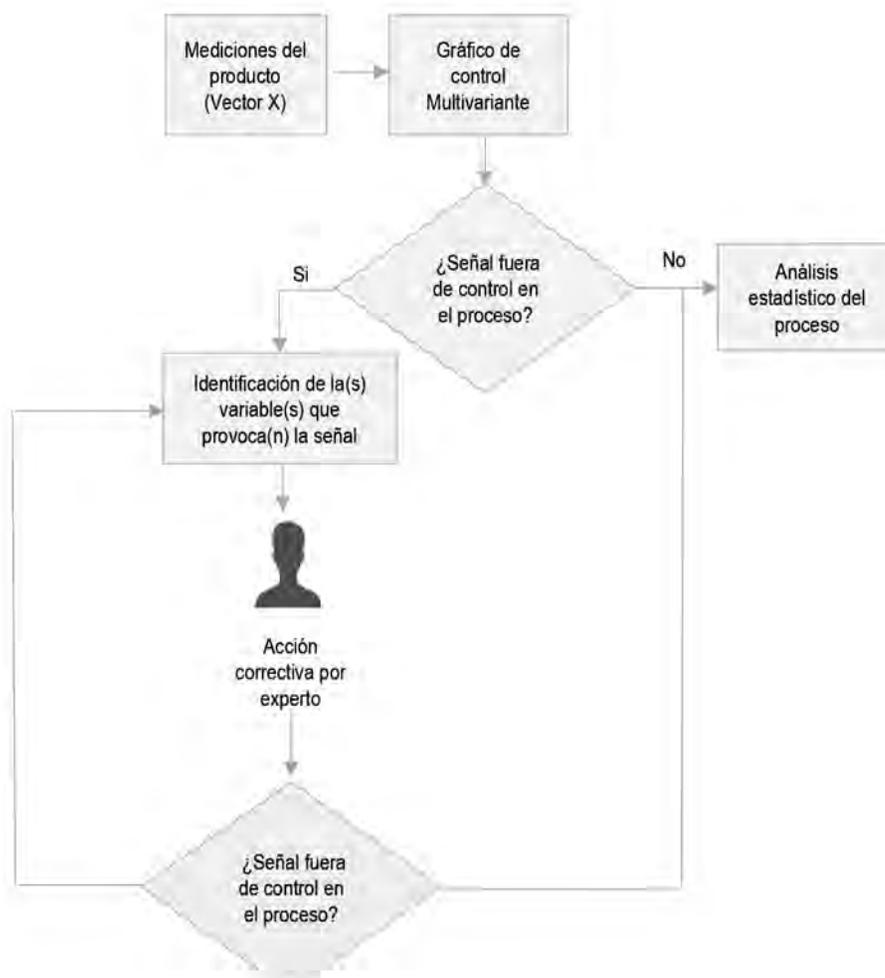


Fig. 3: Metodología para el control de procesos multivariantes

El problema de la interpretación de señales fuera de control en los gráficos multivariantes ha frenado el desarrollo de estas técnicas en la industria, ya que requiere un trabajo posterior nada simple para poder encontrar las variables que han cambiado, dado que una situación fuera de control puede deberse a una o varias variables fuera de control o a un cambio en la relación existente entre las variables.

Se han desarrollado técnicas para ayudar en la interpretación de las señales fuera de control, si bien la más utilizada consiste en analizar gráficos de control univariantes para cada una de las características de calidad. Este camino presenta ciertos inconvenientes: el primero es que cuando hay muchas variables, esta técnica puede resultar tediosa por el gran número de gráficos univariantes para analizar; y el segundo es que normalmente una señal fuera de control no es causada sólo por una variable, sino más bien por la relación existente entre variables, por lo que si son utilizadas gráficas de control univariadas separadas en una situación multivariada, el error de tipo I y la probabilidad de que un punto caiga correctamente dentro de los límites de control no es igual a sus valores esperados. La distorsión de estos valores aumenta con el número de variables de medición.

Para detectar la variable que ha causado la señal fuera de control también se puede recurrir a la descomposición del estadístico T^2 de forma que mida la influencia de cada una de las variables [3]. Si T^2 es el valor del estadístico y $T_{(i)}^2$ es el valor de ese estadístico para todas las variables del proceso excepto la i -ésima, es posible calcular un indicador de la contribución de la variable i -ésima sobre el conjunto mediante la Ec. (7).

$$d_{(i)} = T^2 - T_{(i)}^2 \quad (7)$$

Cuando aparece una situación fuera de control en un gráfico de control multivariante es conveniente calcular esta contribución para cada una de las variables y centrar la atención en aquellas variables cuya contribución sea superior. En el trabajo presentado por [4], se propone una descomposición del estadístico T^2 en dos componentes: T^2 no condicionada, que equivale al valor del estadístico T^2 para cada una de las variables y T^2 condicionada, que equivale al comportamiento de dicho estadístico basado en los residuos de la regresión de cada variable sobre las demás.

Siguiendo otro enfoque como el de componentes principales, actualmente dicha herramienta se ha utilizado con éxito

para detectar fallas en procesos multivariantes que cuentan con variables altamente correlacionadas. En [5], se presenta un método de monitoreo de procesos estadísticos para mejorar el rendimiento de la supervisión. El método se denomina análisis de componentes principales en movimiento, el cual plantea monitorear los cambios en la estructura de correlación de las variables de proceso, en lugar de los cambios en los puntajes de los componentes principales predefinidos. En el trabajo desarrollado por [6], se plantea un método de supervisión de procesos multivariantes a partir de un método basado en análisis de componentes independientes, el método demuestra tener una mejor eficiencia en comparación con el análisis de componentes principales para cumplir tareas de monitoreo y control de procesos.

Otra alternativa, más reciente, en la interpretación de gráficos de control multivariantes, consiste en el uso de redes neuronales artificiales que permiten automatizar la selección de las variables que han provocado el cambio en el proceso. En [7], se lleva a cabo una integración entre la carta de control multivariante de promedio móvil ponderado exponencialmente (MEWMA) y una arquitectura de red neuronal artificial con el fin de desarrollar un procedimiento que permita identificar la(s) causa(s) del descontrol estadístico ocurrido en un sistema de producción. Dentro de [8], se desarrolló un modelo basado en redes neuronales de cuantificación de vectores con el fin de monitorear y diagnosticar los cambios ocurridos en las medias de las características que se vigilan dentro de los procesos de fabricación. El trabajo presentado por [9], propone la aplicación de un sistema de clasificación para determinar la variable o variables que han causado la situación fuera de control detectada por el gráfico de control multivariante T^2 , en concreto, se estudió la aplicación de la red neuronal artificial Fuzzy ARTMAP como alternativa para detectar la fuente de variación asignable presente en procesos de producción multivariantes. En el estudio realizado por [10], se plantea un método para detectar fallas potenciales en turbinas de forma temprana e identificar las variables que probablemente contribuyen a la generación de dichas fallas durante un cierto período, así como en un momento específico. El método incorpora el uso de minería de datos para seleccionar las variables más importantes del sistema bajo supervisión además del uso de cartas de control multivariantes MEWMA como mecanismo para detección de señales fuera de control.

4. CONCLUSIONES

Es importante que los métodos estadísticos usados en el control estadístico de procesos se adapten a las nuevas necesidades de los procesos de producción, tales como las mediciones de múltiples variables de interés que muy posiblemente se relacionan y definen la calidad del producto manufacturado. Los gráficos de control multivariantes, como el T^2 de Hotelling satisfacen estos requerimientos. De acuerdo a lo estudiado en secciones anteriores, parece conveniente utilizar los gráficos de control multivariantes no de forma aislada, sino complementado con alguna técnica de análisis de señales fuera de control, obteniendo así una interpretación más clara de los resultados obtenidos al monitorear la calidad de los sistemas de producción bajo un enfoque multivariante. Otro punto importante, es que actualmente el uso de herramientas estadísticas pero sobre todo informáticas han venido a complementar las cartas multivariantes permitiendo realizar el análisis de grandes cantidades de información logrando para el caso de los valores fuera de control multivariantes identificar e interpretar los cambios ocurridos en las correlaciones entre las variables involucradas en los procesos de fabricación actuales, de esta forma los sistemas de producción son corregidos de forma más rápida y consiguen una mayor productividad y eficiencia.

PARA SABER MÁS

- [1] AIAG Statistical process control (SPC). Manual reference. Second edition Daimler Chrysler Corporation, Ford Motor Company and General Motors Corporation. 2005.
- [2] Montgomery, D. (2011). Control estadístico de la calidad. Edición 3. Limusa Noriega. ISBN: 9789681862343
- [3] Runger, G.C., Alt, F.B. Montgomery, D.C. (2007). Contributors to Multivariate Statistical Process control Signal. Communications in Statistics-Theory and Methods, Vol. 25, No.10. DOI: <https://doi.org/10.1080/03610929608831832>
- [4] Mason, R.L.; Young, J.C. (2002). Multivariate statistical process control with industrial applications. American Statistical Association and the Society for Industrial and Applied Mathematics (ASA-SIAM): Philadelphia.
- [5] Kano, M. Hasebe, S. Hashimoto, I. Ohno, H. (2001). A New Multivariate Statistical Process Monitoring Method Using Principal Component Analysis. Computers & Chemical Engineering. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(01\)00683-4](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(01)00683-4)
- [6] Kano, M. Hasebe, S. Hashimoto, I. Ohno, H. (2004). Evolution of multivariate statistical process control: application of independent component analysis and external analysis. Computers and Chemical Engineering. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2003.09.011>
- [7] Ahmadzadeh, F., Lundberg, J. & Strömberg, T. (2013). Multivariate process parameter change identification by neural network. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 69: 2261. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5200-x>
- [8] Yang, WA. (2015). Monitoring and diagnosing of mean shifts in multivariate manufacturing processes using two-level selective ensemble of learning vector quantization neural networks. Journal of Intelligent Manufacturing 26: 769. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-013-0833-z>
- [9] Ruelas-Santoyo, E., Vazquez-Lopez, J., Jimenez-Garcia, J., Cruz-Dominguez, O., Vargas-Rodriguez, B. (2017). System for the monitoring and control of multivariate processes through the statistical T^2 hotelling and fuzzy artmap artificial neural network. DYNA Management, 5(1). [12 p.]. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/MN8206>
- [10] Yang, H. Huang, M. Lai, C. Jin, J. (2018). An approach combining data mining and control charts-based model for fault detection in wind turbines. Renewable Energy. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.003>

Novel method of 3D slope stability analysis and its engineering application



Nuevo método de análisis de estabilidad de taludes en 3D y su aplicación en ingeniería



Shuren Wang^{1,2*}, Jing Tian¹, Huihui Jia³ and Yan Zhang¹

¹ International Joint Research Laboratory of Henan Province for Underground Space Development and Disaster Prevention, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China

² School of Mining Engineering, University of New South Wales, Sydney, NSW 2052, Australia

³ 514 Brigade of North China Geological Exploration Bureau, Chengde 067000, China

* Corresponding author, e-mail: w_sr88@163.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8885> | Recibido: 27/06/2017 • Inicio Evaluación: 27/06/2017 • Aceptado: 19/07/2018

RESUMEN

- Es difícil dar un resultado de evaluación definitivo cuando se utiliza el método de probabilidad difusa para evaluar la pendiente tridimensional (3D) y para desarrollar un método efectivo es necesario para evaluar la estabilidad de un gran número de ingeniería en taludes 3D. Para resolver este problema, se propone un nuevo método de análisis de estabilidad de taludes en 3D basado en el grupo de renormalización y la función de la superficie de respuesta. Después de determinar la probabilidad de inestabilidad crítica de la pendiente 3D basada en la teoría del grupo de renormalización, se emplea el método de superficie de respuesta para construir una función que resuelva la probabilidad de inestabilidad difusa de la pendiente 3D. De este modo, la estabilidad de la pendiente 3D puede determinarse comparando los valores de probabilidad de inestabilidad crítica y difusa. Cuando la probabilidad de inestabilidad difusa es menor que la probabilidad de inestabilidad crítica, la pendiente 3D se encuentra en un estado estable, de lo contrario se encuentra en un estado inestable. Este nuevo método para el análisis de estabilidad de taludes en 3D es verificado mediante la ingeniería de taludes de vertederos de minas. Los resultados muestran que el nuevo método propuesto es preciso y fiable. Este estudio resuelve el problema de la evaluación cuantitativa de la estabilidad de taludes en 3D, y las conclusiones obtenidas en el estudio son de gran valor de referencia para la práctica directa de ingeniería semejante.
- **Palabras clave:** Pendiente 3D, Grupo de renormalización, Probabilidad difusa, Análisis de estabilidad.

ABSTRACT

It is difficult to give a definitive evaluation result when using the fuzzy probability method to evaluate the three-dimension (3D) slope and to develop an effective method is necessary to evaluate the stability of a large number of 3D slope engineering. To solve this problem, a novel method of 3D slope stability analysis is proposed based on renormalization group and response surface function. After determining the critical instability probability of 3D slope based on the theory of renormalization group, the response surface method is employed to construct a function to solve the fuzzy instability probability of the 3D slope. Then the stability of the 3D slope can be determined by comparing the critical and fuzzy instability probability values. When the fuzzy instability probability is less than the critical instability probability, the

3D slope is in stable state, otherwise it is in unstable state. The novel method for 3D slope stability analysis is verified by the mine dump slope engineering. Results show that the proposed novel method is accurate and reliable. This study solves the problem of quantitative evaluation of 3D slope stability and the conclusions obtained in the study are of important reference value to direct similar engineering practice.

Keywords: 3D slope, Renormalization group, Fuzzy probability, Stability analysis.

1. INTRODUCTION

Due to the diversity and randomness properties of geotechnical media, the fuzzy probability method is often used to evaluate and analyze the stability of a three-dimension (3D) slope engineering. The fuzzy probability method is usually based on the limit equilibrium method to construct a functional function to characterize the stability of the slope. The 3D slope problem is usually simplified as a plain slope treatment, and the mechanical balance of the slope section is used to solve the problem [1-3]. However, the 3D slope engineering often there are obvious 3D deformation characteristics during the sliding failure process, and this is often accompanied by significant interactions among these sliding bodies in different spatial regions in the 3D slope [4-6].

Since the fuzzy probability method ignores the interactions among the different sliding bodies, it usually makes poor evaluation results of 3D slope stability. In addition, because there is no critical probability value to distinguish between stability and instability, it is difficult to give a definitive evaluation result when using the fuzzy probability method to evaluate 3D slope stability. With the rapid development of economic construction and infrastructural facilities in China, a large number of 3D slope projects came into being, so an effective method for 3D slope stability evaluation is urgently needed.

Therefore, to solve the above-mentioned problems, based on renormalization group and response surface function, a novel method is proposed to analyze 3D slope stability of the mine dumping in this study.

2. STATE OF THE ART

Recently, many scholars have discussed the fuzzy stability of the slope. For example, considering the influence of fuzzy random

factors, Tan et al. put forward an improved fuzzy point estimation method and applied it to the reliability analysis of a slope [7]. Since the parameters affecting slope stability are both fuzzy and random, the concept and numerical characteristics of fuzzy random variables have been reported [8-9]. Giais et al. used convex set and first-order reliability methods to analyze the fuzzy random reliability of the slope [10]. Park et al. expressed the uncertain parameters of a slope as fuzzy numbers and fuzzy sets, and used Monte Carlo simulation technology to analyze the fuzzy reliability of the slope [11]. Tan et al. discussed the fuzzy distribution of slope reliability based on parameter fuzziness and randomness [12]. Based on classical reliability theory, Jia & He solved the slope reliability under different cut set levels [13]. According to the statistical results of a large number of slope engineering, Jiang & Xu obtained the fuzzy random reliability evaluation index for the slope stability [14].

With the development of computer technology, some scholars combine numerical method with fuzzy probability to analyze the slope stability. For example, Jiang et al. solved the fuzzy instability probability of a slope by using fuzzy finite element method [15]. Wang et al. used fuzzy measure method to solve the fuzzy reliability index of each point at a slope [16]. Tan et al. transformed the fuzzy variable into random variable by the equivalent transformation method and studied the method of solving the fuzzy failure probability and the fuzzy random reliability index by using the probability integral method [17]. Most scholars usually simplified the mechanical equilibrium of a section of a slope instead of analyzing the overall stability of the slope by using the limit equilibrium method. Due to the complexity of the 3D slope sliding failure, it is difficult to perform a comprehensive evaluation of the overall stability of the 3D slope by the above-mentioned methods.

In view of the advantages of renormalization group theory in the study of critical problem, Gao et al. studied the self-organizing characteristics and critical conditions of rock failure process using renormalization group theory [18]. Zhou et al. established the renormalization group model of red-bed soft rock and calculated the percolation threshold to judge the stability of this soft rock [19]. Xue et al put forward an improved renormalization group model and revealed the critical behavior of rock deformation process [20]. Using renormalization group theory, Zhang et al. studied the relationship between deformation mechanism and permeability of brittle rock [21]. Gu et al. established a global damage model of prism element based on renormalization group method and studied the critical damage probability of concrete [22]. Guo & Liu studied the critical instability failure of coal pillar by using renormalization group theory [23]. Zhang et al. studied the critical stability of roof system of coal pillar by means of probability analysis and renormalization group theory [24]. All these studies demonstrate the applicability of renormalization group in solving critical problems.

The essence of slope progressive failure is the process that the basic components of the slope system undergo a series of instability and failure transfer, which ultimately leads to the overall macroscopic instability of the slope. The fixed point of the renormalization group is the critical failure probability of the slope. Therefore, the one-dimension, two-dimension and three-dimension renormalization group models of the slope were established in this study, and the unstable fixed points of the three slope models were solved respectively, which were regarded as the critical points for the overall instability of the slope. At the same time, parameter inversion analysis was used to reduce the fuzziness of rock and soil parameters, and the response surface method and numerical method were used to construct the slope stability function and the membership function,

which represented the whole failure of the 3D slope. By comparing the instability probability with the critical instability probability, the 3D stability of the dump slope was evaluated synthetically. This is an effective quantitative evaluation of 3D slope stability to consider the 3D deformation effects and to give a definitive evaluation result than other methods.

The remainder of this study is organized as follows. In Section 3, the novel method for 3D slope stability analysis is proposed based on renormalization group and response surface function. In Section 4, the novel method is verified by a dump engineering practice and the research results are discussed. Section 5 summarizes the conclusions.

3. METHODOLOGY

3.1. RENORMALIZATION GROUP METHOD

A renormalization group is a mathematical tool that examines changes in physical systems at different length scales. The change in scale is called the "scale conversion". The renormalization group has a close relationship with "scale invariance" and "conformal invariance". The conformal invariance includes scale transformations, all of which is related to self-similarity. In renormalization theory, the system is self-similar to a smaller scale on a certain scale, and the variables of the system are described by the interaction between the system components.

The renormalization group was first applied to quantum field theory, which is an effective tool to solve critical problems. It is a method based on scaling invariance to observe the variation law of physical quantities by changing the scale in the system. Suppose the value of parameter a is changed from P to P' because the scale is magnified n times. If the scaling function is denoted as f_n according to reference [19], then the relation between P and P' is:

$$P' = f_n(P) \tag{1}$$

If the scale is magnified n times, then

$$P' = f_n(P') = f_{n \times n}(P) \tag{2}$$

By changing formula (2) into a general relation, its transformation function f has the following properties:

$$f_a \times f_a = f_{ab} \tag{3}$$

When using renormalization group theory to study the critical probability of slope stability, the following basic assumptions are made: (a) When the basic unit in the original package is completely destroyed, the original package is destroyed. (b) The probability of instability transfer from unstable element to its adjacent element is the same, and the energy loss in the transmission process can be ignored. (c) The instability transfer occurs only in the original package.

3.1.1. One-dimension renormalization group model

The slope system is divided into n segments and each segment is a basic unit. The whole stability of slope is related to the stability of basic unit. When n is large enough, the basic unit is small enough. In one-dimensional renormalization group model, two basic units are primary package, two primary packages constitute a secondary primary package, and two secondary primitive packets constitute a tertiary primary package. As shown in Fig. 1, the model diagram of the tertiary primary package is given.

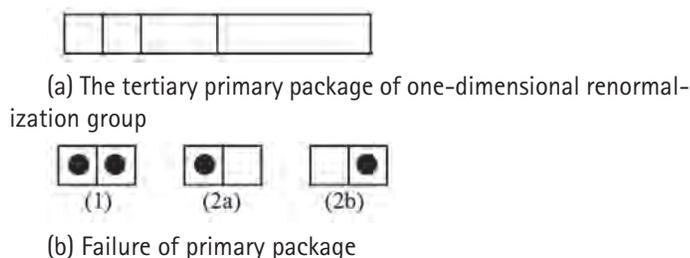


Fig. 1: One-dimension renormalization group model

It is assumed that the instability probability of the basic unit is P_0 and it satisfies the quadratic Weibull distribution:

$$P_0(F) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^2\right] \quad (4)$$

where F is the action value of instability index, and F_0 is the reference value of instability index.

According to the assumption, there are two cases of primary package instability. As shown in Fig. 1b, both of the basic units in the primary package are unstable in the first case. In the second case, there is a basic unit that is unstable in the primary package, and another basic unit is unstable due to the instability transfer. So the instability probability of the primary package is:

$$P_1 = P_0^2 + 2P_0(1 - P_0)P_{ab} \quad (5)$$

where P_1 is primary package instability probability, and P_{ab} is the conditional probability of unstable transfer of one base unit to its adjacent units. According to reference [25], P_{ab} can be expressed as

$$P_{ab} = \frac{P_b - P_a}{1 - P_a} \quad (6)$$

where P_b is the instability probability of the adjacent basic unit after the failure of the basic unit, and P_a is the instability probability of the adjacent basic unit before the failure of the basic unit. After the failure of the basic unit, the instability index of adjacent basic unit is $2F$:

$$P_b = P(2P) = 1 - (1 - P_0)^4 \quad (7)$$

In summary, the instability probability of the original package is as follows:

$$P_1 = 2P_0 \left[1 - (1 - P_0)^4 \right] - P_0^2 \quad (8)$$

According to the recursive relation of logistic one-dimensional mapping, the instability probability of n -order original packet can be obtained as follows:

$$P_n = 2P_{n-1} \left[1 - (1 - P_{n-1})^4 \right] - P_{n-1}^2 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} P_1 &= P_0^4 + C_4^3 P_0^3 \left[1 - P_0 - (1 - P_0)^{16} \right] + C_4^2 P_0^2 \left[1 - P_0 - (1 - P_0)^4 \right]^2 + C_4^2 C_2^1 P_0^2 \left[1 - P_0 - (1 - P_0)^4 \right] \left[(1 - P_0)^4 - (1 - P_0)^{16} \right] \\ &+ C_4^1 C_3^1 P_0 \left[(1 - P_0)^{16/9} - (1 - P_0)^{16} \right] \left[1 - P_0 - (1 - P_0)^{16/9} \right]^2 + C_4^1 C_3^1 P_0 \left[1 - P_0 - (1 - P_0)^{16/9} \right] \left[(1 - P_0)^{16/9} - (1 - P_0)^4 \right]^2 \\ &+ C_4^1 P_0 \left[1 - P_0 - (1 - P_0)^{16/9} \right]^3 + C_4^1 C_3^1 C_2^1 P_0 \left[1 - P_0 - (1 - P_0)^{16/9} \right] \left[(1 - P_0)^{16/9} - (1 - P_0)^4 \right] \left[(1 - P_0)^4 - (1 - P_0)^{16} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

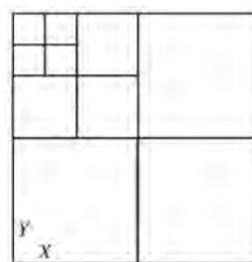
The formula (8) is one-dimensional renormalization group equation for slope instability probability, which is written as a function as follows:

$$f(x) = 2x \left[1 - (1 - x)^4 \right] - x^2 \quad (10)$$

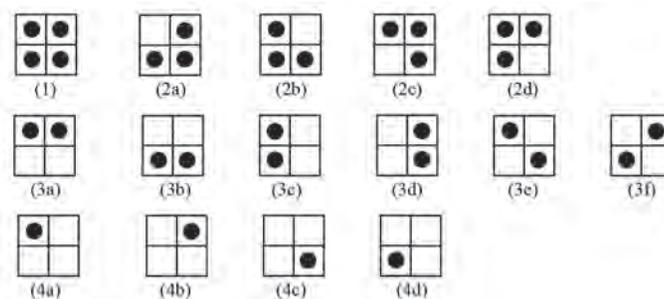
The upper formula has three fixed points in the range of $[0, 1]$, which are 0, 0.206, and 1, respectively. According to the criterion, when $\left| \frac{df(x)}{dx} \right| = 1, x$, x is unstable point, otherwise it is stable point. The result shows: when $x = 0$, there are no basic elements in the slope and the slope is stable as a whole. When $x = 1$, each basic unit in the slope is unstable and the whole slope is in a state of ultimate instability. $x = 0.206$ is the one-dimension critical instability probability of the slope. When $x < 0.206$, the instability element exists in the slope, but the whole slope develops to the stable state. When $x > 0.206$, most of the basic units in the slope are unstable, and the whole slope develops to the unstable state.

3.1.2. Two-dimension renormalization group model

As shown in Fig. 2, the slope system can be divided into $n \times n$ basic units, four basic units constitute one primary package, and four primary packages constitute one secondary primary package. Fig. 2 is the third-order primary package of two-dimensional renormalization group model.



(a) The tertiary primary package of two-dimensional renormalization group



(b) Failure of primary package

Fig. 2: Two-dimension renormalization group model

In accordance with the one-dimensional renormalization group model, assuming that P_0 is the instability probability of the basic unit, the instability probability of the primary package can be expressed as:

According to the recursive relation of logistic mapping, the instability probability of n -order original packet can be obtained as follows:

$$P_n = f(P_{n-1}) \tag{12}$$

So the critical instability probability of the slope obtained by using the two-dimensional renormalization group model is 0.1707.

3.1.3. Three dimension renormalization group model

In three-dimensional case, one primary package consists of eight basic units and one secondary primary package consists of eight primary packets. The model is shown in Fig. 3.

In accordance with the method of analyzing one-dimension and two-dimension problems, the instability probability equation of n -order original packet can be obtained according to the recursive relation of logistic mapping. The critical instability probability of slope is 0.1599, which is obtained by three-dimensional renormalization group model.

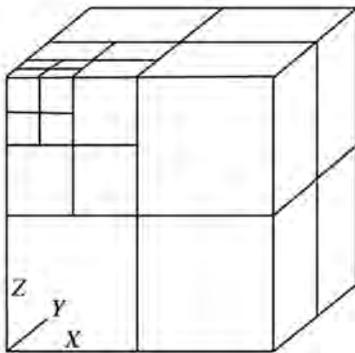


Fig. 3. Three-dimension renormalization group model

3.2. FUZZY PROBABILITY ANALYSIS METHOD

In slope stability analysis, the function of slope stability can be described as $Z(x_i)$, in which:

$$Z(x_i) = g(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n) = F_s - 1 \tag{13}$$

where, $x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n$ are the uncertain factors affecting slope stability, and F_s is the slope safety factor.

According to fuzzy probability [17], the expression of fuzzy failure probability of slope is as follows:

$$P_f = \int_{-\infty}^{+\infty} \mu_A(z) f(z) dz \tag{14}$$

where P_f is the fuzzy instability probability of slope, $\mu_A(z)$ is the membership function of the slope stability function, and $f(z)$ is the probability density function of the slope stability function.

3.2.1. Statistical characteristics of uncertain variables

The statistical characteristics of uncertain variables affect the accuracy of evaluation results. The parameter inversion analysis method is adopted to determine the range and statistical characteristics of uncertain variables affecting slope stability by using FLAC^{3D} technique.

First of all, the range of given uncertain variable is adjusted according to the actual survey results by conducting FLAC^{3D} numerical simulation. Secondly, the range of the uncertain variable is given on the basis of the agreement between the slope deformation signs and the actual slope deformation signs in the simulation results. The range of uncertain variables obtained is $[x_{iR}, x_{iL}]$. In

addition, assuming that the uncertain variables follow the normal distribution, and the confidence of the determined interval is 85%, the mean value μ_{x_i} and mean square deviation σ_{x_i} can be expressed as

$$\mu_{x_i} = \frac{x_{iR} + x_{iL}}{2} \tag{15}$$

$$\mu_{x_i} - 1.44\sigma_{x_i} = x_{iL} \tag{16}$$

3.2.2. Construction the function of slope stability

According to the limit equilibrium method, the function of slope stability is usually constructed by using the simplified mechanical equilibrium on a section of the slope. The premise of applying this method is that the slope can be simplified as a plane strain problem. Because of the obvious 3D deformation characteristics of the mine dump, the overall stability of the dump is closely related to the interactions among various elevation platforms, it cannot be reduced to a plane strain problem. Therefore, the fuzzy probabilistic method based on the limit equilibrium method cannot accurately evaluate this dump slope stability.

In this study, based on numerical simulation, the approximate original function obtained by response surface method is used to replace the slope stability function for fuzzy probability analysis. The specific steps are as follows:

- (1) The quadratic polynomial with no crossover term is selected as the response surface function.
- (2) Based on the range of the uncertain variable, the Bucher method is used to determine the test point. The sampling radius is $f\sigma_i$, f is deviation coefficient, and its value is 2, $\sigma_i = \frac{x_{iR} - x_{iL}}{2}$.
- (3) The stability function values of each test point are calculated by FLAC^{3D}, and the undetermined coefficients in the response surface function are obtained by solving the linear equations. Thus the approximate function can be expressed as:

$$Z(x_i) = g(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n) = F_s - 1 = G(x_i) \tag{17}$$

3.2.3. Probability density function solution

The specific form of the membership function directly affects the evaluation results of slope stability. The form of the membership function should be similar to the fuzzy distribution characteristics of the object studied. An arbitrary stability function value Z_i , when n is large enough, its membership degree μ_{z_i} to the unstable event A can be approximated as the unstable membership frequency P_{z_i} .

$$\mu_{z_i} \approx P_{z_i} = \frac{Z_i \in A}{n} \tag{18}$$

where n is the number of samples whose stability function value is Z_i in a fuzzy statistical sample.

The results show: when $Z_i < 0$, the variation rate of μ_{z_i} is larger than that when $Z_i > 0$. Therefore, the membership function form used in this study is quadratic polynomial type.

For the slope engineering, the closer instability membership is to 1, the higher possibility of slope instability is. Conversely, the closer the instability membership is to 0, the smaller the probability of slope instability is. Combined with the related specifications, the membership function may be expressed in the general form:

$$\mu_1(z) = \begin{cases} 1, & z \leq -0.1 \\ 8.33z^2 - 4.167z + 0.5, & -0.1 < z < 0.2 \\ 0, & z \geq 0.2 \end{cases} \quad (19)$$

Assuming that the stability function is normally distributed, the mean value μ_z and the variance σ_z of the stability function can be obtained by the center point method as follows:

$$\mu_z = G(\mu_x) \quad (20)$$

$$\sigma_z = \left[\sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial G}{\partial x_i} \Big|_{\mu_x} \sigma_{x_i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

where μ_{x_i} is the mean value of x_i , and σ_{x_i} is the mean square deviation of x_i .

Thus the probability density function can be expressed as:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left[-\frac{(z - \mu_z)^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad (22)$$

Combining the three formulas (19), (22), and (14), the fuzzy instability probability P_f can be calculated. Comparing the critical instability probability P_L with the fuzzy instability probability, if $P_f > P_L$, the slope is unstable, otherwise the slope is stable.

4. ENGINEERING VERIFICATION ANALYSIS

4.1. ENGINEERING BACKGROUND

The Guangyuan dumping site is located in the middle section of the Yanshan Mountains in Chengde City, China. The area is a tectonic denuded landform. The terrain near the dumping site is high in the north and low in the south, and the mountain is relatively slow.

The horizontal area of this site is about 5600 m². The mine dump is placed on a moderately weathered gneiss with an inclination angle of about 15°. There is a weak bedding with a layer thickness of 2.0 m between the mine dump and the bedrock. The mine dump is composed of six different elevation platforms. The computational model is shown in Fig. 4. The physical and mechanical parameters of the model are shown in Table I.

The following are the deformation characteristics of Guangyuan mine dump:

- (1) The maximum vertical displacement appears in No. 3 and No. 5 elevation platforms, which are formed by consolidation settlement.

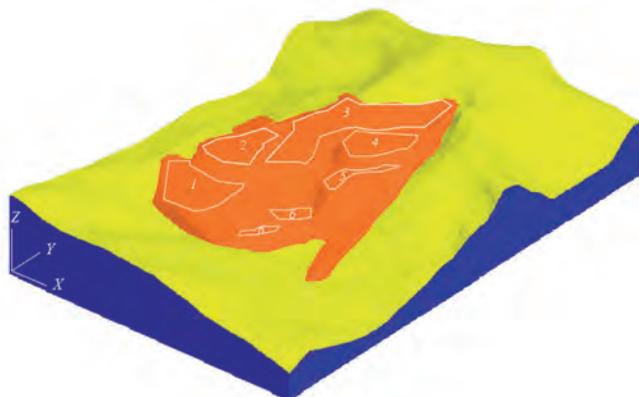


Fig. 4: The computational model of Guangyuan mine dump

Name	Bulk modulus (MPa)	Shear modulus (MPa)	Internal friction angle (°)	Cohesion (kPa)	Tensile strength (kPa)
Mine dump	55.6	18.5	27	50	2.0
Weak bedding	18.0	3.57	12	15	0.1
Bedrock	9800	3760	56	10000	2200

Table I Physical and mechanical properties of the computational model

- (2) The horizontal displacements of No. 1, No. 3, and No. 5 elevation platforms are larger, and the whole platform develops towards the sloping direction. At the tops of elevation platforms No. 1, No. 3, and No. 5, the tensile damage was caused by the settlement of self-weight consolidation, and a crack of about 8.0 cm in width was produced there.
- (3) Slippage occurs at steep ridges and steep slopes of No. 1, No. 3, No. 5, and No. 6 elevation platforms.

4.2. STATICAL CHARACTERISTICS OF UNCERTAIN VARIABLES

The stability of the Guangyuan mine dump was evaluated by using the strength parameters (cohesion c and internal friction angle ϕ) of the dump and weak bedding as uncertain variables. According to the physical and mechanical parameters of the computational model and the deformation characteristics of the dump, the parameter inversion analysis of the Guangyuan mine dump was carried out. That is, when the parameters were not reduced, the deformation characteristics of the model should be consistent with the results of the on-site survey. The numerical results show that the variation range of strength parameters affecting slope stability is shown in Table II, and the statistical characteristics of uncertain variables are counted in Table II according to formulas (15) and (16).

Uncertain variables	Cohesion of dump (kPa)	Internal friction angle of dump (°)	Cohesion of weak bedding (kPa)	Internal friction angle of weak bedding (°)
Range	[40, 60]	[26, 30]	[10, 30]	[12, 16]
Mean value	50	28	20	14
Mean square deviation	6.94	1.39	6.94	1.39

Table II Range of uncertain parameters and its statistical characteristics

4.3. STABILITY ANALYSIS OF GUANGYUAN MINE DUMP

The response surface function was assumed to be a quadratic polynomial function with no crossover term. It can be expressed as:

$$F_s - 1 = g(x) \approx G(x) = a + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n c_i x_i^2 \quad (23)$$

where a , b_i , and c_i are the undetermined coefficients of the response surface function, and x_i is an uncertain variable, for $i = 1, 2, 3$, and 4.

The test points selected according to the Bucher test method are shown in Table III.

The strength reduction of each test point in Table III was calculated by numerical analysis and the safety factor of each test point was obtained. Then the stability function value of each test

Test points	Constant	Cohesion of dump (kPa)	Internal friction angle of dump (°)	Cohesion of weak bedding (kPa)	Internal friction angle of weak bedding (°)	$F_s - 1$
1	1	50	28	20	14	0.38
2	1	30	28	20	14	0.29
3	1	70	28	20	14	0.48
4	1	50	24	20	14	0.31
5	1	50	32	20	14	0.46
6	1	50	28	10	14	0.32
7	1	50	28	30	14	0.44
8	1	50	28	20	10	0.19
9	1	50	28	20	18	0.52

Table III The test points and the results of the test

point was found in the last column of Table III. According to the values of uncertain variable and response function of each test point, the response surface function of Guangyuan mine dump is as follows:

$$G(x) = -1.11 + 0.0035x_1 + 0.0012x_2 + 0.006x_3 + 0.083x_4 + 0.0003x_2^2 - 0.0016x_4^2 \quad (24)$$

When statistical characteristics of the uncertain variables in Table II are substituted into the formulas (20), (21), and (24), the mean value of the stability function is 0.3302, and the mean square deviation is 0.078. Therefore, the probability density function of the dump stability is as follows:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 0.078} \exp\left[-\frac{(z - 0.3302)^2}{(2 \times 0.078^2)}\right] \quad (25)$$

Substituting formulas (25), (19) into formula (14), the instability probability P_f of Guangyuan dump is 0.087, which is less than the critical instability probability $P_{L1} = 0.1599$. So the stability of the Guangyuan mine dump is good. The evaluation results are consistent with the actual conditions of the mine dump.

After the sections being set up along the main slide direction at the No. 4 and No. 5 elevation platforms, the stability function was constructed based on the Swedish slice method, then the instability probability of this model was solved. The results are shown in Table IV, in which the FLAC+RSM method is the novel method determined in this study.

Method	Mean value	Mean square deviation	Instability probability	Safety factor
Sweden slice method	0.200	0.065	0.093	-
FLAC+RSM	0.330	0.078	0.087	-
FLAC ^{3D} simulation	-	-	-	1.24

Table IV The results of different methods

According to the data in Table IV, the slope instability probability obtained by the Swedish slice method is larger than that by the novel method. This is because during the slope failure, No. 4 and No. 5 elevation platforms were destroyed before No. 3 elevation platform. However, the main sliding direction of No. 4 and No. 5 elevation platforms is adjacent to the spatial position of No. 3 elevation platform, which makes No. 3 elevation platform

play a certain role in restraining the slippage damage of No. 4 and No. 5 elevation platforms. At the same time, the instability of the dump spread to No. 3 elevation platform, and then to No. 2 elevation platform, which resulted in the overall instability of the Guangyuan mine dump.

The stability function based on the novel method is obtained by simulating the real instability of the mine dump and it can reflect the deformation characteristics and interactions among different sliding bodies of the slope. However, the stability function based on the limit equilibrium method only represents the failure of single landslide of the selected section, and this cannot reflect the interactions among these platforms when Guangyuan mine dump is unstable as a whole. So the instability probability obtained by the limit equilibrium method is larger than the true value.

The safety factor of Guangyuan mine dump is 1.24 by using FLAC^{3D} technique. It is larger than 1.20 required by China Slope Engineering Specifications, that is the Guangyuan mine dump is stable. The results are consistent with the novel method described in this study. In addition, the similar mine dumps, such as Jinguanli mine dump, Antaibao mine dump, and Anjialing mine dump were evaluated by this method and all the evaluation results were consistent with the field monitoring data. Therefore, it is feasible to evaluate 3D slope stability by using the novel method and the results are more reliable than those based on the limit equilibrium method.

5. CONCLUSIONS

To give a definitive evaluation result by using the fuzzy probability method to evaluate 3D slope stability, renormalization group theory is introduced into the fuzzy probability analysis, and the slope stability analysis of the mine dump is carried out based on the novel method. The main conclusions are as follows:

- (1) By introducing renormalization group theory into the fuzzy probability analysis, the critical instability probability of the slope is given and the subjectivity and fuzziness of evaluating the slope instability are weakened.
- (2) When the fuzzy probability method is used to analyze the slope stability, the stability function is key to reflect the failure characteristics of the 3D slope engineering.
- (3) The novel method has been verified by the practical 3D slope engineering. Compared with the stability function based on limit equilibrium method, the quantitative evaluation results are more effective and reliable.

The novel method can give a definitive evaluation result to

evaluate the 3D slope stability, which can provide a reference for the similar engineering practice. However, to make this method more perfect, the energy transfer loss will be considered in the slope renormalization group model in the further study.

BIBLIOGRAPHY

- [1] Kim SH, Chung KY. "3D simulator for stability analysis of finite slope causing plane activity". *Multimedia Tools and Applications*. January 2014. Vol. 68-2. p. 455-463. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-013-1356-5>.
- [2] Wines D. "A comparison of slope stability analyses in two and three dimensions". *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. May 2016. Vol. 116-5. p. 399-406. DOI: <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2016/v116n5a5>.
- [3] Singh R, Umrao RK, Singh TN. "Hill slope stability analysis using two and three dimensions analysis: A comparative study". *Journal of the Geological Society of India*. March 2017. Vol. 89-3. p. 295-302. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12594-017-0602-2>.
- [4] Wang SR, Feng JL. "3D deformation effect and optimal excavated design of surface mine under mining engineering". *Journal of coal science and engineering (China)*. December 2009. Vol.15-4, p. 361-366. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12404-009-0405-1>.
- [5] Xiao T, Li DQ, Cao ZJ, Au SK, Phoon KK. "Three-dimensional slope reliability and risk assessment using auxiliary random finite element method". *Computers and Geotechnics*. October 2016. Vol. 79. p. 146-158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.05.024>.
- [6] Yang XL, Pan QJ. "Three dimensional seismic and static stability of rock slopes". *Geomechanics and Engineering*. January 2015. Vol. 8-1. p. 97-111. DOI: <https://doi.org/10.12989/gae.2015.8.1.097>.
- [7] Tan WH, Cai MF, Zhou RD. "Modified fuzzy point estimate method and its application to slope reliability analysis". *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*. December 2003. Vol. 10-6, p. 5-10.
- [8] Feng YH, Hu L, Shu H. "The variance and covariance of fuzzy random variables and their applications". *Fuzzy Sets & Systems*. June 2001. Vol. 120-3, p. 487-497. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(99\)00060-3](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(99)00060-3).
- [9] Bernd M, Graf W, Beer M. "Safety assessment of structures in view of fuzzy randomness". *Computers & Structures*. July 2003. Vol. 81-15, p. 1567-1582. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(03\)00147-0](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(03)00147-0).
- [10] Giasi CI, Masi P, Cherubini C. "Probabilistic and fuzzy reliability analysis of a sample slope near Aliano". *Engineering Geology*. January 2003. Vol. 67-3, p. 391-402. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00222-3](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00222-3).
- [11] Park HJ, Um JG, Woo I, Kim JW. "Application of fuzzy set theory to evaluate the probability of failure in rock slopes." *Engineering Geology*. January 2012. Vol. 125-1, p. 92-101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.11.008>.
- [12] Tan XH, Hu XJ, Chu CF, Shi XP. "Fuzzy response surface method and its application in the reliability analysis of slope stability." *Journal of University of Science and Technology Beijing*. September 2011. Vol. 41-3, p. 233-237. DOI: <https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-2778.2011.03.008>.
- [13] Jia HH, He HJ. "Analysis of fuzzy-random reliability of slope stability". *Rock and Soil Mechanics*. September 2003. Vol. 24-4, p. 657-660. DOI: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7598.2003.04.037>.
- [14] Jiang JQ, Xu H. "Reliability analysis of slope stable capacity based on fuzzy probability". *Journal of Hydroelectric Engineering*. August 2006. Vol. 25-4, p. 126-130.
- [15] Jiang ZM, Zhang XM, Xu WY. "Study on fuzzy finite element method of rock and soil slope analysis". *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. September 2005. Vol. 27-8, p. 922-927. DOI: <https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-4548.2005.08.014>.
- [16] Wang YJ, Zhang WH, Jin LW. "Stochastic finite element analysis for fuzzy probability of embankment system failure by first-order approximation theorem". *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*. April 2007. Vol. 41-1, p. 52-56. DOI: <https://doi.org/10.3785/j.issn.1008-973X.2007.01.011>.
- [17] Tan XH, Hu XJ, Wu KM. "Fuzzy random finite element reliability analysis of slope stability with fuzzy basic variables and fuzzy states". *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. January 2010. Vol. 28-z2, p. 3952-3958. DOI: <https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-6915.2009.z2.096>.
- [18] Gao ZN, Yao LK, Xu GX. "Study on self-organized characteristics and criticality condition in the course of rock failure". *Advanced Engineering Sciences*. March 2009. Vol. 41-2, p. 91-95. DOI: <https://doi.org/10.15961/j.jsuese.2009.02.028>.
- [19] Zhou CY, Li BT, Zhang XH, Liu Z. "Study on percolation threshold of red-layer soft rock failure process based on the renormalization group method".

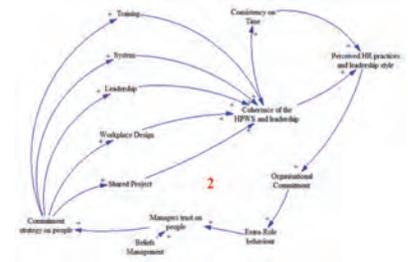
Journal of Engineering Geology. November 2015. Vol. 23-5, p. 965-970. DOI: <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2015.05.021>.

- [20] Xue L, Qin S, Sun Q, Wang YY, Qian HT. "A quantitative criterion to describe the deformation process of rock sample subjected to uniaxial compression: From criticality to final failure". *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*. September 2014. Vol. 410-12, p. 470-482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2014.05.062>.
- [21] Zhang R, Jiang ZQ, Sun Q, Zhu SY. "The relationship between the deformation mechanism and permeability on brittle rock". *Natural Hazards*, January 2013. Vol. 66-2, p. 1179-1187. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0543-4>.
- [22] Gu P, Deng C, Tang L. "A model of overall damage probability of triangular prism unit based on renormalization group method". *Advances in Science & Technology of Water Resources*. May 2014. Vol. 34-3, p. 16-19. DOI: <https://doi.org/10.3880/j.issn.1006-7647.2014.03.004>.
- [23] Guo SM, Liu T, Cheng G, Yan WB. "Pillar critical failure condition of mined-out zone groups based on RG method". *Metal Mine*. October 2014. Vol. 43-8, p. 125-128.
- [24] Zhang SK, Zhang XD, Sun Q, Song K. "Study on critical instability probability of coal pillar group in goaf based on renormalization group theory". *Journal of Safety Science and Technology*. August 2016. Vol. 12-5, p. 104-108. DOI: <https://doi.org/10.11731/j.issn.1673-193x.2016.05.018>.
- [25] Yang GD, Zhang DQ, Shi XJ. "Study on the rupture behavior of focal body by renormalization group method". *South China Journal of Seismology*. June 1997. Vol. 17-2, p. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.13512/j.hndz.1997.02.001>.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (51774112; 51474188), the International Cooperation Project of Henan Science and Technology Department (182102410060), the Doctoral Fund of Henan Polytechnic University (B2015-67), and Taihang Scholars Program. All these are gratefully appreciated.

Identificación de factores que influyen en el compromiso de los empleados utilizando pensamiento sistémico



Identification of the factors which influence employee commitment using systems thinking



María Ruiz-Amurrio¹, Unai Elorza-Iñurrítegi¹, Gary Linnéusson-Iñurrítegi^{1,2} y Noemí Zabaleta-Etxebarria¹

¹ Mondragon Goi Eskola Politeknikoa (MGEP). Dpto. Mecánica y Producción Industrial. Loramendi, 4 - 20500 Mondragón (España).

² Universidad de Skövde. Escuela de Ciencias de la ingeniería. Högskolevägen, 1 - 541 28 Skövde (Suecia).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8743> | Recibido: 15/02/2018 • Inicio Evaluación: 01/12/2017 • Aceptado: 09/03/2018

ABSTRACT

- In our increasingly globalised economy, managing continuous change and remaining competitive has become a central issue for organisations in the industrial sector. Building a sustainable competitive advantage through effective decision making and the use of decision making tools has been widely studied [1,2]. The success of a company will be dependent on the skills of the workers, their capacity for learning, and adapting to special and evolving client necessities. Culture change via, communication and participation are the elements of change identified for engineering companies [3]. Thus, the main objective of this research is to understand the behaviour of commitment, the variables that influence it and the variables that are influenced by it. Commitment is considered a key factor due to its influence on performance. The methodology that was followed was based on the modelling methodology proposed by Sterman [4]. The first step was the problem definition, the second step was data collection. The purpose was to define the feedback loops of which the conceptual model (CM) is composed. Thirdly, conceptual model definition was developed. As a result, the outcome that is achieved through this research is a conceptual model. The main function of this model is to facilitate the understanding of the behaviour of commitment through Systems Thinking tools. This research contributes to both Strategic Human Resource Management (SHRM) and Systems Thinking (ST) fields of study. The most notable contribution for ST is the fact of combining more than one input source (Literature + Group Model Building + prior research) for the conceptual model definition. The combination of these input sources for an ST model is not common in the scientific community. Moreover, the use of ST in SHRM is limited.
- **Keywords:** Commitment, Systems Thinking, Group Model Building, Strategic Human Resource Management.

RESUMEN

En el entorno globalizado en el que vivimos, la capacidad de gestionar el cambio y ser competitivo se ha convertido en el foco central de las organizaciones en el sector industrial. La obtención de ventaja competitiva mediante la toma de decisiones efectiva y la utilización de herramientas resulta de interés [1,2].

El éxito de las organizaciones depende de las habilidades de los trabajadores, su capacidad de aprendizaje, y de adaptación a las

necesidades de los clientes. El cambio de cultura organizacional, comunicación y participación son los elementos clave identificados para las organizaciones de ingeniería [3].

Así, el objetivo principal de esta investigación es la comprensión del comportamiento de la variable compromiso, las variables que influyen, y las alteradas por el mismo. El compromiso se considera clave debido a su influencia en el rendimiento.

La metodología que se ha seguido está basada en el proceso propuesto por Sterman [4]. El primer paso fue la definición del problema, el segundo paso, la recogida de datos. El objetivo fue la definición de círculos de retroalimentación que componen el modelo conceptual (MC). En tercer lugar, se realizó la definición del modelo.

Finalmente, el resultado obtenido es un modelo conceptual. La función principal de éste es facilitar la comprensión del comportamiento de la variable comportamiento mediante pensamiento sistémico.

Este estudio contribuye a ambos campos de Gestión Estratégica de los Recursos Humanos (GRH), y pensamiento sistémico (PS). La mayor contribución para el PS es el hecho de combinar más de una fuente (Literatura + Group model building + investigación previa para la definición del modelo conceptual. La combinación de estas fuentes para la construcción de modelos PS no es común en la comunidad científica. Además, el uso de PS en la GRH es limitada.

Palabras clave: Compromiso, Pensamiento sistémico, Group Model Building, Gestión Estratégica de Personas.

1. INTRODUCCIÓN

El origen de este estudio se ha centrado en una investigación previa llamada Bateratzen. Comenzó en 2010 con el objetivo de ayudar a los gerentes a alinear a las personas con la estrategia de sus organizaciones. Este proyecto fue apoyado por la Diputación Foral de Guipúzcoa. La actividad principal de este proyecto fue la recopilación de encuestas con el objetivo de obtener evidencia empírica para ayudar a los responsables de la toma de decisiones. La base de datos Bateratzen está compuesta por 510 empresas y 72.000 encuestas. Entre las diversas variables medidas están el compromiso, y el desempeño.

El efecto de la globalización es especialmente importante en el caso de las pequeñas y medianas empresas (PYME) [5,6], que componen la base de datos. En el actual contexto socio-económico, la reflexión estratégica de muchas empresas ha destacado la nece-

sidad de transformación organizacional para obtener trabajadores más comprometidos y proactivos [7]. Estos trabajadores comprometidos y proactivos toman un papel activo en el logro de los objetivos estratégicos de sus organizaciones. Esta transformación implica el aprendizaje continuo y dinámico. Esto es especialmente importante en el ámbito de la gestión porque los gerentes tienen la facultad de aplicar cambios y hacerlos eficaces para el logro de nuevas estrategias de valor agregado. Lo que es aún desconocido, sin embargo, es cómo los trabajadores proactivos pueden ser alentados y motivados para conseguir una organización más competitiva. No existe una base científica para ayudar a las empresas a impulsar comportamientos más proactivos por parte de los trabajadores [8].

Existen diversos factores que afectan a la compleja situación de las pymes industriales. La crisis económica, el bajo coste de los productos de países extranjeros, el aumento de la competitividad global, los rápidos cambios tecnológicos y la reducción del ciclo de vida de productos entre otros [9]. La clave para el éxito de los cambios resultantes en la mejora de la competitividad de las empresas, tales como la innovación (entendida como una ventaja competitiva sostenible para garantizar la supervivencia de las empresas), se basan en el desarrollo de capacidades, valores, aptitudes y conducta de las personas en lugar de en el dominio técnico [10].

A pesar de la lógica de esta declaración, hay una pregunta sin respuesta: ¿Cuáles son las variables que deben activarse para producir un efecto positivo sobre el rendimiento y la competitividad? Esta investigación contribuye a dar respuesta a esta pregunta. El compromiso (práctica de gestión de personas de alto rendimiento) fue identificado como un factor clave para la competitividad, debido a su efecto directo sobre el rendimiento.

Así, el objetivo principal de esta investigación es conocer el comportamiento de compromiso e identificar las variables que influyen en el compromiso y están influidas por él, usando PS. Los resultados se centraron en los bucles de retroalimentación que fueron alimentados por tres fuentes de datos y directamente influían al compromiso en el MC.

2. EL PENSAMIENTO SISTÉMICO PARA LA GESTIÓN DEL CAMBIO

El pensamiento sistémico es un enfoque que puede ayudar en la resolución de desafíos en el ámbito de la gestión. El pensamiento sistémico ayuda a obtener una visión holística de la totalidad del sistema [11].

El pensamiento sistémico posee cualidades beneficiosas que lo convierten en una herramienta aplicable para gestionar y comprender retos de carácter sistémico y complejo [12]:

- (I) Se centra en el todo en lugar de las partes, y se basa en las relaciones de causa y efecto.
- (II) Funciona de manera circular, en vez de lineal. Se centra en "interdependencias cerradas", donde todas las varia-

bles influyen sobre el resto.

- (iii) Ofrece herramientas visuales, como bucles causales de diagramas y gráficos de comportamiento a lo largo del tiempo. Estos diagramas proporcionan una gran cantidad de consecuencias y conocimientos, y promueven el aprendizaje.
- (iv) Abre una ventana en nuestros modelos mentales, convirtiendo las percepciones en imágenes explícitas que pueden revelar profundas diferencias esenciales en diferentes puntos de vista.

Los desafíos a ser analizados con esta técnica están representados a través de la retroalimentación y diagramas de circuito causal (DCC). "Cuando un elemento de un sistema influye indirectamente en sí mismo se llama bucle de realimentación o circuito causal. Más explícitamente, un bucle de retroalimentación es una secuencia cerrada de causas y efectos, es decir, un trazado cerrado de acción e información"[13].

3. METODOLOGÍA: EL MODELO CONCEPCIONAL (CM) DEFINICIÓN

La definición del MC fue precedida por la recopilación de datos de tres fuentes de datos diferentes, ver Fig. 2). (1).

En primer lugar, se identificó problema para proporcionar una orientación clara para la fase siguiente.

En segundo lugar, se realizó la recolección de datos para la definición del MC: (i) la revisión de la Literatura, (ii) 11 *Group Model Building* (GMB) con empresas industriales, y (iii) las evidencias empíricas de la base de datos Bateratzen. Según Pascual-Barrera Samaniego-Guevara [14] esta fase de recolección de variables se considera fundamentales. En su caso una identificación eficaz de variables era vital para la correcta construcción del modelo de simulación. En tercer lugar, los CMs fueron desarrollados. Se desarrollaron seis iteraciones diferentes del modelo. La razón para desarrollar más de una versión del modelo fue la validación. Los expertos de las empresas validaron y propusieron mejoras para el modelo, y ésta fue la razón por la que se realizaron diferentes versiones del modelo a medida que avanzaba la validación.

3.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA: COMPROMISO DE LOS EMPLEADOS

Construir una ventaja competitiva sostenible es el objetivo final de las empresas, y varios estudios han reportado grandes correlaciones positivas entre el compromiso y el rendimiento en el trabajo [15,16,17]. Las características de los empleados comprometidos son descritas de la siguiente manera: (i) identificación de alto nivel con los objetivos y valores de la organización, (ii) los empleados comprometidos están dispuestos a hacer un esfuerzo adicional para el beneficio de la organización y (iii) la fuerte ambición para mantener la membresía en la organización [18]. Así pues, la base del MC es el compromiso.

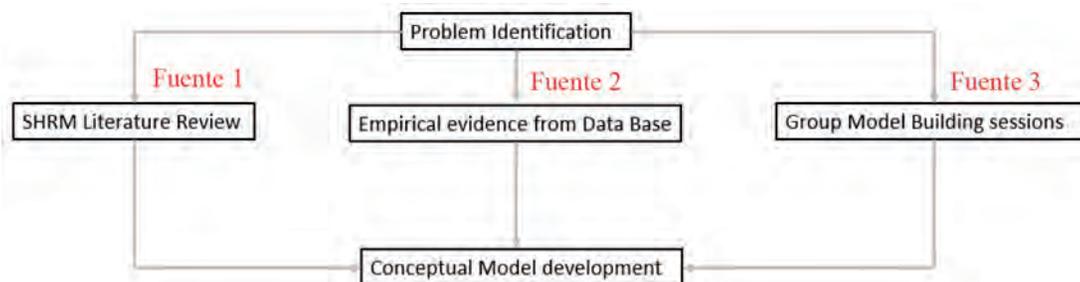


Fig. 1: Metodología marco

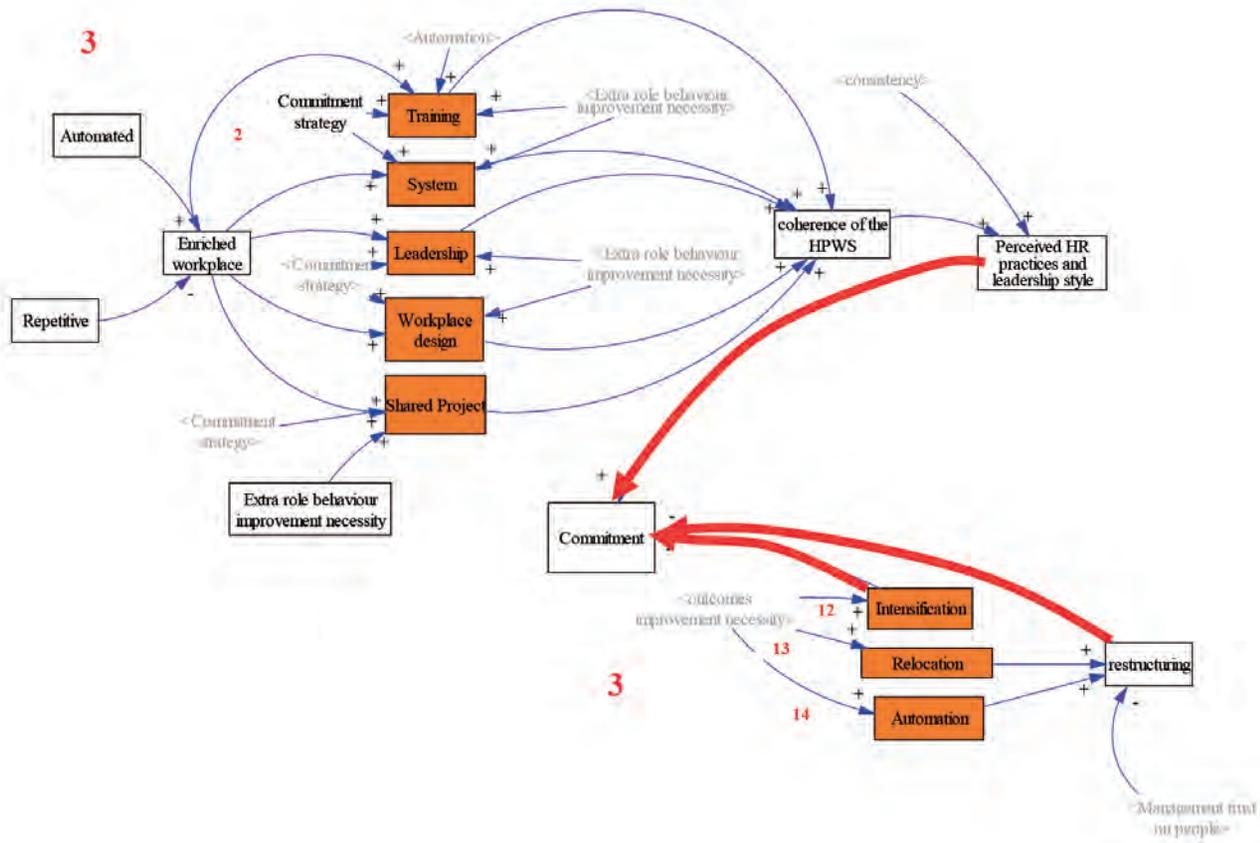


Fig. 2: Bucle y Bucle de 2, 12, 13, 14

3.2. DATOS DE ENTRADA AL MODELO

Las fuentes de recogida de datos utilizadas, como se ha explicado antes han sido tres (literatura, GMBs con empresas y evidencias empíricas de Bateratzen). El modelo se compone de 16 bucles de retroalimentación. El 40 % de ellos fueron recogidos en la literatura, el 80 % se definen desde los diagramas GMB, y el 26% se obtuvieron de las evidencias de la base de datos. Hay cinco bucles que fueron alimentados por las tres fuentes y tres bucles que fueron recopilados a partir de dos.

Este documento se centra en el bucle 2 (efecto de los sistemas de alto rendimiento (STAD) sobre el compromiso) y bucles

12-13-14 (el efecto de intensificación, reubicación y automatización sobre el compromiso). La razón para elegir estos 2 bucles es la combinación de dos hechos: (i) Estos bucles son alimentados por las 3 fuentes, y (ii) estos bucles influyen directamente en el compromiso, la Fig. 2.

3.2.1. Fuente 1: revisión de la literatura sobre los antecedentes del compromiso

Las variables seleccionadas para el MC de esta investigación fueron sistemas fueron los STAD. Los sistemas de gestión de Recursos humanos (RRHH) apuestan por estrategias de compromiso

Funciones de relaciones industriales	Tipo de sistema	
	Reducción de costes	Compromiso maximizar
Organización de los trabajos	Las tareas de trabajo definidos estrictamente	Trabajos ampliamente definidas
Relaciones con los empleados	Empleado muy poca influencia sobre las decisiones de "administración"	Alto nivel de participación de los empleados
	Ningún empleado formal denuncia	Procedimientos de resolución de controversias formales
	Poco esfuerzos de comunicación	Compartir información comercial regularmente con los empleados
Personal y supervisión	Bajos requisitos de habilidades	Alto porcentaje de trabajadores cualificados
	Intensa supervisión/control	Auto - gestión de equipos
Formación	Los esfuerzos de capacitación limitado	Más extensa, formación general
Indemnización	Beneficios limitados	Prestaciones más amplias
	Salarios relativamente bajos	Regularmente los altos salarios
	Basadas en incentivos	Todos los asalariados/stock ownership

Tabla 1: Costo y compromiso estrategias [25]

de trabajo en lugar de estrategias de control [19]. Estos sistemas permiten una mejora en el compromiso colectivo debido a su efecto sobre el rendimiento. Esta declaración defiende que sistemas de implementación coherente de prácticas de gestión de personas (ajuste horizontal) alineadas con la estrategia de negocio son la base para desarrollar capacidades y fomentar actitudes y comportamientos que mejoran el rendimiento [20-25].

El STAD sugirió dos diferentes estrategias de gestión: estrategia de control y estrategia de compromiso [26,27]. La estrategia de compromiso es invertir en prácticas de RR.HH (tales como la autonomía, la información, etc.), con el objetivo de involucrar a la gente en las metas de la organización. En contraste, la estrategia de control se basa en la reducción del trabajo, bajando los salarios, y desarrollo de jerarquías, con el fin de reducir los costes de mano de obra y aumentar la productividad [26-29].

En la Tabla 1 se muestran las características específicas de cada una de las estrategias propuestas por Arthur [25]. La estrategia de control se denomina "reducción de costes", porque el objetivo principal de la estrategia de "control" es reducir los costos de mano de obra directa y otros gastos relacionados con el empleo (es decir, capacitación y actividades de participación de los empleados).

Por otro lado, la estrategia de compromiso es clave para estas empresas que persiguen una estrategia empresarial de diferenciación. La lógica de esta estrategia defiende que las personas comprometidas son más flexibles y están más propensas a adaptarse. En este contexto, se propone que los empleados deben tener las aptitudes y la capacitación para realizar tareas de carácter variado. La estandarización se reduce así como las decisiones bajo condiciones de alta incertidumbre [30-32]. En resumen, ofrecer altos niveles de participación, autonomía y formación a empleados cualificados puede ser entendido como atractivo y motivador para los trabajadores. De esta manera, la organización va a conseguir trabajadores cualificados que están comprometidos con sus organizaciones.

Como resultado, ambas perspectivas de estrategia de "control" y "compromiso" se incluyeron a través de diferentes variables en el MC.

3.2.2. Fuente 2: Group Model Building

Los GMB se describen como una forma de apoyo a las decisiones en grupo que involucra a actores que trabajan con un equi-

po para resolver un problema centrado en un sistema de carácter complejo [33].

El propósito de desarrollar un número considerable de GMBs (11) era obtener el punto de saturación, es decir, el punto en el que los circuitos de retroalimentación (las narrativas o historias para explicar el razonamiento y la aportación de los participantes para su problema usando PS) en las sesiones se repiten. Este procedimiento persigue conseguir una mayor validez y solidez para el modelo. Además, debe señalarse que la mayoría de los bucles de retroalimentación eran también apoyados por la literatura.

El proceso específico seguido en esta investigación fue:

- **Definición del problema:** Ésta es la primera etapa donde el desafío a ser analizado en las sesiones fue presentado a los participantes, con una declaración clara y breve. Un ejemplo de una de las empresas que participaron en esta investigación es presentada a continuación, el facilitador presenta el problema y juntos y en consenso se define lo siguiente:

A. Desafío/ problema: Formulación del proceso en todas las sesiones: mejora del compromiso de los trabajadores para lograr una relación ganar-ganar entre: (i) personas, bienestar y sentirse parte de la organización, (ii) sostenibilidad y competitividad.

- **Definición del horizonte de tiempo:** El período de tiempo para el análisis fue definido. Debería comenzar tan atrás en la historia como sea necesario para mostrar cómo el problema ha surgido y describir sus síntomas. En esta investigación, 10 años fue seleccionado como marco de tiempo tanto para los períodos de sesiones como para la simulación. Se definió un comportamiento oscilatorio del compromiso en la mayoría de las sesiones.
- **Definición de variables individuales:** Cada participante enumera los factores que afectan positivamente o negativamente al compromiso. Cada participante definió una variable en post-its individuales.
- **Intercambio de opinión:** Se comparten todas las variables en grupo. Los post-its se apilan en la pared, la ventana o la pizarra para mostrarlos a todos los participantes.
- **MC FINAL Definición:** El facilitador de la reunión incluye las variables planteadas por el grupo en el modelo final, siempre en consenso. Las polaridades de cada relación entre las variables, y las conexiones con las flechas también se definen, véase la Fig. (3) la cual está en español porque las

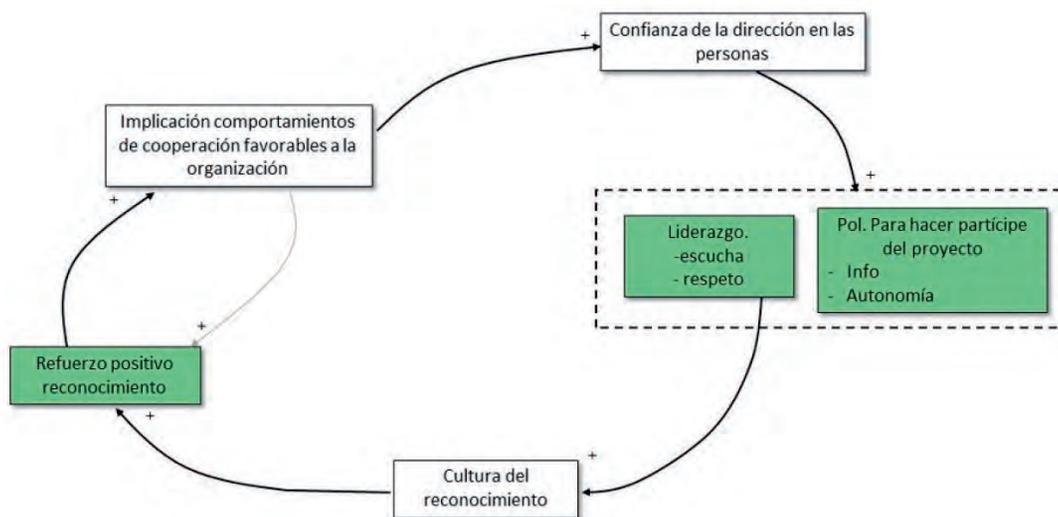


Fig.3: diagrama de un final GMB

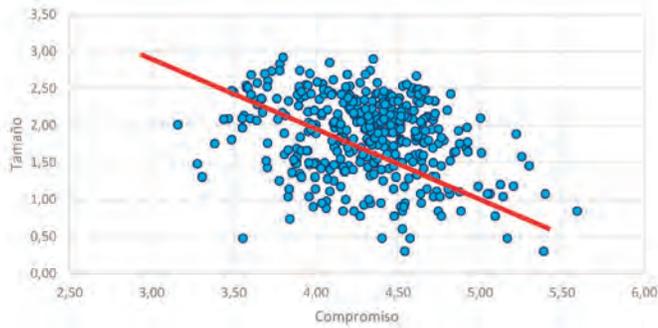


Fig. 4: Relación entre tamaño y nivel de compromiso

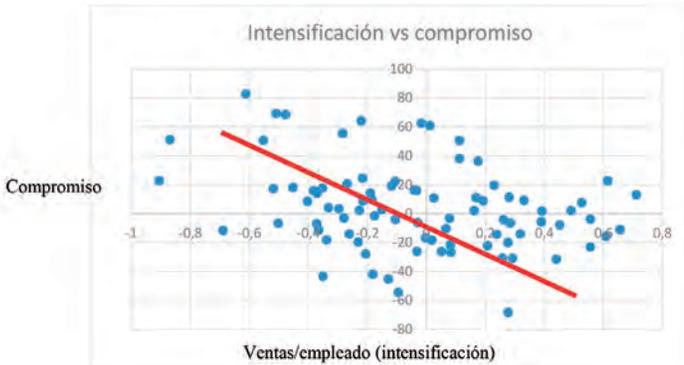


Fig. 5: Relación entre productividad y compromiso

sesiones fueron desarrolladas tanto en euskera como en castellano. Se debe mencionar que los diagramas finales fueron cerrados en la posterior fase de trabajo, es decir, los modelos fueron refinados y optimizados en la oficina por los modelistas (algunas relaciones que no se cerraron en los periodos de sesiones se rectificaron después).

- **Ronda de validación:** el 50% de los esquemas finales fueron validados con las organizaciones correspondientes. Para este

propósito, el facilitador se reunió de nuevo con los participantes de la sesión, y explicó cada bucle de retroalimentación inicialmente y el conjunto después a fin de validarlos o modificarlos.

3.2.3. Fuente 3: evidencia empírica de la base de datos Bateratzen

Bateratzen está compuesto por 510 empresas y 72.000 encuestas. El principal objetivo de la utilización de la base de datos era agregar factores que no fueron identificados en GMBs o revisión de la literatura, pero los datos empíricos demostraron que eran importantes.

1) Relación entre el tamaño de la organización y el compromiso

El objetivo era comprender la relación entre el tamaño de la organización y el compromiso. Según la base de datos las empresas con mayor tamaño de la compañía resultaron tener niveles más bajos de compromiso. Organizaciones pequeñas (menos de 50 trabajadores) presentan mayor compromiso que las organizaciones grandes, véase la Figura 4.

Para este propósito, se desarrolló una correlación. El alfa de Cronbach fue de 0,89. La fiabilidad fue asegurada cuando alfa fue superior a 0,7. La correlación con el tamaño era negativa y estadísticamente significativa, la correlación de Pearson entre el tamaño de la organización y el compromiso era -0.248 ($p < 0,01$). 422 organizaciones y 34707 encuestas comprenden la muestra del estudio.

Cada círculo en la Fig. (4) representa una organización. En el eje horizontal fue medido el compromiso (2,5-6,0). En el eje vertical, el tamaño de la empresa (0-3,5).

Así, se podría afirmar que existe una correlación negativa entre el tamaño de la organización y el grado de compromiso de los trabajadores. Esta variable, el tamaño de la organización, se incluyó en el MC.

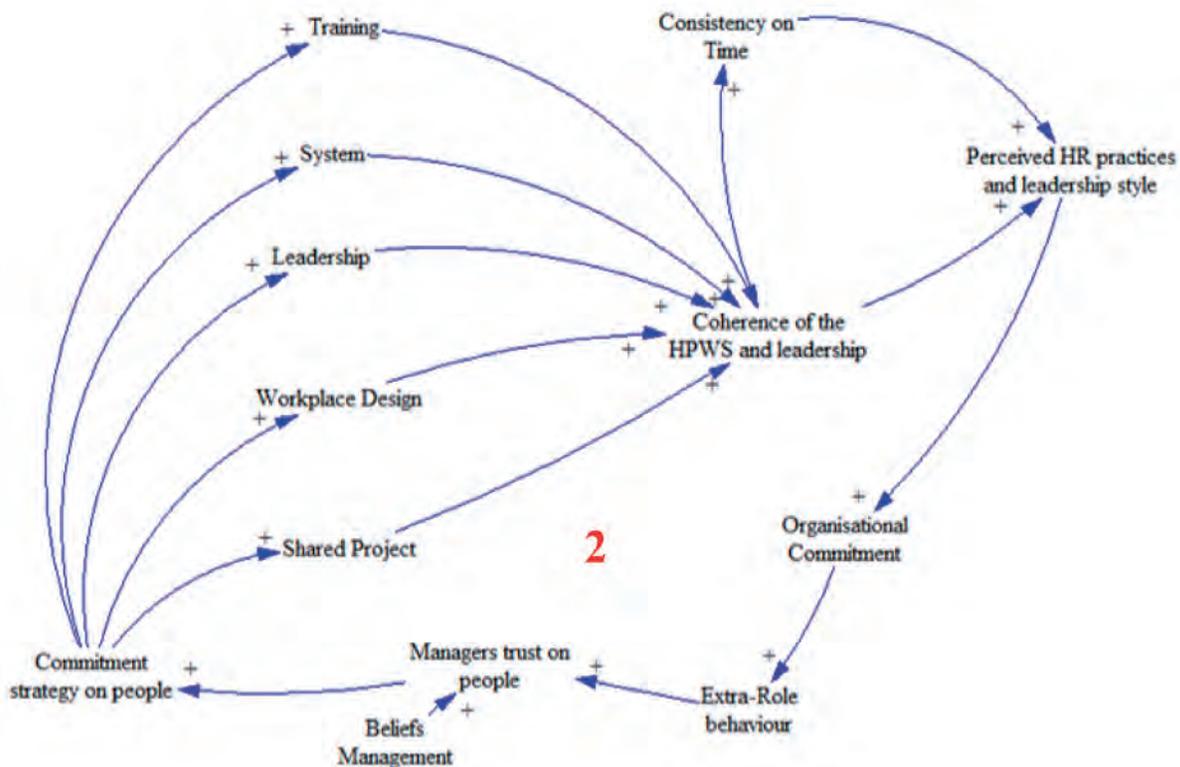


Fig. 6: efecto sobre el compromiso STAD

2) El diseño del trabajo

El diseño del trabajo fue escogido como una variable de entrada debido a la influencia sobre el compromiso demostrado que presenta en la base de datos. Para ello, se elaboraron dos análisis diferentes. En primer lugar, las percepciones de las prácticas relativas a los recursos humanos fueron controladas con el fin de obtener una visión clara de las diferencias en el compromiso entre la mano de obra directa e indirecta. En este análisis de las prácticas del sistema de Gestión de Personas (GP), la implementación percibida fue neutralizado para observar más claramente la importancia del diseño de los puestos de trabajo. Para este fin, una media ponderada fue desarrollada sin residuos estandarizados. Después de la comparación de los promedios de los residuos guardados, una comparación entre la mano de obra directa e indirecta se obtuvo a través de T-Student ($t= 6,23$; $p < 0,01$). El coeficiente alfa de Cronbach fue de 0,85 y la fiabilidad está garantizada, $> 0,7$.

En segundo lugar, utilizando este residuo, se realizó una segunda comparación para entender las diferencias entre sectores (automoción y la máquina herramienta), ($t= 7,05$; $p < 0,01$). Se entiende que en la automatización las tareas son repetitivas y no enriquecidas. La máquina herramienta se caracteriza por tareas de carácter enriquecido (trabajan con proyectos, en lugar de actividades repetitivas).

35 organizaciones y 5700 encuestas que comprenden la muestra del estudio. El objetivo de esta media ponderada fue poner a prueba las diferencias producidas en el compromiso debido a la concepción del puesto de trabajo.

Por lo tanto, el diseño del trabajo parece ser una variable con un efecto considerable sobre el compromiso, tal como se muestra en el estudio, las personas que trabajan en los lugares de trabajo no enriquecidos están menos comprometidos con su organización. Como resultado, esta variable fue incluida en el MC de esta investigación.

3) Relación entre la intensificación de la carga de trabajo y compromiso

El objetivo principal en este caso fue analizar la correlación entre la productividad y el compromiso. Según la base de datos la intensificación de la carga de trabajo tiene un efecto negativo sobre el compromiso. Como se muestra en la Figura 5, la correlación entre la productividad (medida como ventas/empleado) y el compromiso actual (datos de 2011) es negativa y estadísticamente significativa: $-0,32$ ($p < 0,01$).

103 organizaciones y 5705 encuestas comprenden la muestra del estudio. Todas las empresas están operando en España.

Por lo tanto, la intensificación de la carga de trabajo se considera una variable significativa antes de aplicar cualquier sistema de práctica de RRHH, y fue incluido en el MC de esta investigación.

Como se explica en el capítulo 3.2, este documento se centra en los bucles 2 y 12-13-14.

Bucle 2: efecto STAD sobre el compromiso

Este bucle, Fig. 6, se centra en la literatura, GMB (10 repeticiones) y la base de datos Bateratzen (job design en la base de datos = workplace design). Según los GMBs, las iniciativas extra-rol alientan la confianza en los trabajadores. Como resultado, la estrategia de compromiso se consolida en toda la organización. Cuando la aplicación de estas prácticas se percibe como coherente y consistente, se aumenta el nivel de compromiso. Como se muestra en Bateratzen diseño del puesto de trabajo parece ser una variable con un efecto considerable sobre el compromiso, las personas que trabajan en los lugares de trabajo no acondicionadas están menos comprometidos con su organización.

La estrategia de compromiso impulsa el liderazgo y los STAD [20]. La aplicación efectiva de estos elementos favorece la percepción de la gente. La relación entre la palanca y la percepción de la aplicación de las palancas (STAD y liderazgo transformacional) depende del nivel de coherencia de la aplicación y su coherencia en el tiempo [20-25,34]. La coherencia y la consistencia de las prácticas aplicadas generan un contexto organizativo "fuertes" [35].

Cuanto mayor sea la "fortaleza" del sistema, es más probable percibir las palancas STAD y el liderazgo transformacional. Cuando esta percepción aumenta, la confianza en las personas es mayor. Como consecuencia, es más probable que aumenten su compromiso. Un mayor compromiso fomentará un comportamiento extra-rol, que al mismo tiempo reforzará la confianza en la gestión de personas.

La teoría sugiere que la confianza extra-rol ayuda a mejorar el nivel de confianza que refuerza la estrategia de adhesión. La percepción de la aplicación de STAD, y el liderazgo transformacional contribuye a un mejor nivel de compromiso. Todas estas relaciones se muestran en Becker et al. [36] y Wright y Nishii [37].

BUCLE 12+ 13+ 14: El efecto de la intensificación, reubicación y automatización sobre el compromiso

El bucle 12 fue recolectado en el GMB (3 repeticiones), la revisión de la literatura y la base de datos Bateratzen (intensificación



Fig. 7: Intensificación, reubicación y automatización como posibles soluciones a la crisis

de la carga de trabajo). El resto fueron recolectados de los GMBs (3 repeticiones), véase la Fig. 7. En los GMBs emprendidos en esta investigación, la reubicación de los procesos de fabricación en otros países de bajo costo se propuso como posible solución cuando existía la necesidad de mejorar los resultados. Cuando los comportamientos extra-rol son dominantes, el nivel de rendimiento es superior y, en consecuencia, la necesidad de mejorar era menor. La reestructuración es altamente probable que ocurra en esas situaciones, lo que se traduce en una disminución en las personas de los niveles de compromiso. Esta necesidad a veces son resultado de la necesidad de crecimiento continuo. La reestructuración resultante tiene un efecto negativo sobre el compromiso como causa de grandes trastornos en los trabajadores.

La automatización es la tercera estrategia identificada para resolver la necesidad en la mejora de los resultados de los períodos de sesiones. En estos casos, el efecto directo de la automatización fue la reestructuración que influye negativamente una vez más en el compromiso.

Como se indica en el capítulo 3.2, la intensificación de la carga de trabajo tiene un efecto negativo sobre el compromiso. La correlación entre la productividad y el compromiso fue negativa, una mayor intensificación de la carga de trabajo se convirtió en un nivel bajo de compromiso.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Esta investigación se centra en el entendimiento del compromiso con un modelo de PS. Los bucles seleccionados (2 y 12-13-14) fueron seleccionados como clave para la explicación para ambos HPWS y la coherencia de su aplicación. Estos bucles son alimentados por tres fuentes y están directamente conectados con el compromiso en el MC. Está probado que la estrategia de "compromiso" es beneficiosa para el rendimiento y debe aplicarse de manera coherente. Por otro lado, las soluciones a corto plazo, tales como la intensificación, dañan el compromiso, que a su vez tiene un impacto negativo en el rendimiento.

Como presenta el bucle 2, la información obtenida de las diferentes fuentes coincide. Los participantes en los GMBs definen una relación entre iniciativas extra-rol, confianza en los trabajadores, el compromiso de las personas y la coherencia del sistema. Estas relaciones están apoyadas por la literatura, que defienden que los líderes transformacionales y la estrategia de compromiso mejoran la aplicación coherente de HPWS. Esto estimula los comportamientos extra-rol y deriva en mayores niveles de confianza. Además, el análisis desarrollado en Bateratzen confirmó que el diseño del trabajo no enriquecido (diseño del lugar de trabajo), que forma parte de la variable HPWS, tiene una influencia negativa sobre el compromiso.

Respecto a los bucles 12, 13, 14, se podría afirmar que la influencia negativa de la intensificación y la reestructuración en el compromiso es apoyada por las tres fuentes de entrada. Los participantes en los GMBs, identificaron la intensificación, la reubicación y la automatización como las más frecuentes soluciones propuestas para la mejora del rendimiento. Además, el análisis desarrollado en Bateratzen también demostró que, a mayor intensificación, menor es el compromiso.

5. CONCLUSIONES

El objetivo principal de esta investigación era entender el comportamiento del **compromiso e identificar las variables que influyen al compromiso y están influidas por él**, usando PS. Fue-

ron utilizadas tres diferentes fuentes: i) Revisión de Literatura, ii) 11 Group Model Building con diferentes empresas, y iii) evidencias empíricas de la base de datos Bateratzen. Esta variedad es la clave para la robustez.

La primera fuente datos fue la **revisión de la literatura**. Las prácticas de recursos humanos pueden dividirse en prácticas de "control" o "compromiso" [25,26], y ambos conceptos se han incluido en nuestro modelo, lo que es inusual. La segunda fuente fueron los once **GMBs en diferentes empresas industriales**, y las variables y bucles de retroalimentación con los cuales se definió el MC. También se considera de valor agregado, ya que no es común realizar tantas sesiones. La gran variedad de sesiones nos dio la oportunidad de identificar diferentes bucles de retroalimentación relacionados con el compromiso. Por último, la tercera fuente vino a partir de la **evidencia empírica de Bateratzen** (510 empresas y 72.000 encuestas). Esta evidencia ha contribuido a algunas nuevas narrativas acerca del compromiso en el lugar de trabajo, incluyendo: tamaño de la organización, el diseño del lugar de trabajo, y la intensificación de la carga de trabajo.

La contribución y conocimientos obtenidos a partir de esta investigación y de acuerdo con los principios de la heurística para la construcción de teorías basadas en modelos (System Dynamics as Model-Based Theory Building) son también notables [38].

Cuestión de orientación: el modelo obtenido en esta investigación pretende comprender el comportamiento del compromiso. Este conocimiento parece ser muy apropiado para la obtención de teorías de rango medio, la colección de 16 relatos relacionados entre sí en un único modelo y pertenecientes a la combinación de tres principales teorías de amplio alcance (STAD+ Liderazgo Trust) puede ser considerado como una teoría.

Generalización: el modelo computacional ha sido construido basándose en 11 GMB de distintas empresas, y los patrones de comportamiento de una base de datos suministrados por 510 empresas y 72.000 encuestas. La variedad de fuentes parece garantizar el carácter genérico de la modelo.

Explicación: El MC ayuda a representar y explicar cuáles son las interrelaciones entre las variables que forman parte del sistema del compromiso y cómo funcionan.

Los conocimientos y la comprensión obtenida de la presente investigación, ofrecen una **vista de los sistemas de pensamiento en el campo de la GRH**. Esta perspectiva mejora la comprensión debido a la visión holística del sistema que ofrece. Además, el **uso de modelos PS en el campo de la GRH** es muy limitada. La información que se encuentra en la literatura se centró principalmente en campos como la sanidad y la gestión de proyectos. La principal explicación para esto podría estar relacionada con la dificultad de informatización de variables sociales. Es más fácil traducir variables cuantificables en ecuaciones matemáticas en lugar de hacerlo con cualitativas.

5.1. LIMITACIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Dos limitaciones son identificadas en esta investigación. Primero, todas las empresas que han participado en los GMBs son industriales. Aunque el objetivo era construir un modelo genérico, puede decirse que esta comprensión no podría transferirse eficazmente a otros sectores. Segundo, todas las empresas que han participado en los GMBs son de la misma región geográfica y cultural. Así, la generalidad del modelo podría ser discutible, esta comprensión no podría transferirse eficazmente a las empresas desde otra región.

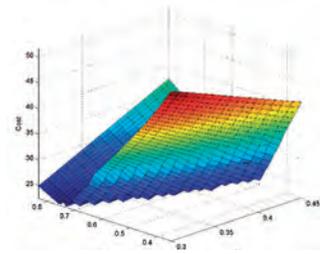
La línea futura principal está relacionada con la construcción de un modelo de simulación utilizando este MC. La técnica que se

puede utilizar es la dinámica del sistema (DS). Ofrece una flexibilidad que permite a modelizadores incorporar una amplia gama de influencias específicas en situaciones particulares.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Antunes, L., Respício, A., Balsa, J., & Coelho, H. "Policy decision support through social simulation". In *Gaming and Simulations: Concepts, Methodologies, Tools and Applications*. 2011. pp. 1530-1538. IGI Global.
- [2] Janssen, M., Wimmer, M. A., & Deljoo, A. "Policy practice and digital science: Integrating complex systems, social simulation and public administration in policy research". 2015. (Vol. 10). Springer.
- [3] Bacon, N., Ackers, P., Storey, J., & Coates, D. "It's a small world: managing human resources in small businesses". *International journal of human resource management*. 1996. Vol.7(1),pp 82-100.
- [4] Serman, J. D. "Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world". . 2000. (No. HD302 S7835 2000).
- [5] Miranda, I. G. "Aplicación de las mejores prácticas de innovación inversa en las pymes". *DYNA Management*. 2014. Vol.2(1).
- [6] Sanchez, E. G., Rojas, R. M., & Perez, V. F. "Influencia de la alta dirección y las variables tecnológicas en la gestión del conocimiento". *DYNA Management*. 2016.Vol. 4(1).
- [7] Hornung, S., & Rousseau, D. M. "Active on the job—proactive in change: How autonomy at work contributes to employee support for organizational change". *The Journal of Applied Behavioral Science*. 2007. Vol. 43(4), pp.401-426.
- [8] Mason, P. A., & Hambrick, D. C. "The Organization as a Reflection of Its Organization Top Management". *Academy of management review*, 1984, vol. 9, no 2, p. 193-206
- [9] Cegarra-Leiva, D., Sánchez-Vidal, M. E., Cegarra-Navarro, J. G., Arizkuren-Eleta, A., & Martínez-Caro, E. "Cómo afecta la conciliación laboral y personal en la innovación de la pyme industrial. Estudio en el sector del metal de la región de Murcia". *DYNA Management*. 2013. Vol.1, pp.1-11.
- [10] Gowen, C. R., Mcfadden, K. L., Hoobler, J. M., & Tallon, W. J. "Exploring the efficacy of healthcare quality practices, employee commitment, and employee control". *Journal of Operations Management*. 2006. Vol. 24(6), pp.765-778.
- [11] Forrester, J. "Industry dynamics". 1961. (C. Massachusetts, Ed.).
- [12] Johnson, V. A. L. "System thinking basics from concepts to causal loops". 1997. (P. Communications, Ed.).
- [13] Richardson, G. "Problems for the future of System Dynamics". *System Dynamics Review*. 1996. Vol. 12(2), pp.141-157.
- [14] Samaniego, H., & barrera, A. E. P. "Un modelo de gestión empresarial basado en dinámica de sistemas para la pequeña y mediana empresa". *DYNA Management*. 2017. Vol. 5(1).
- [15] Bauer, T.N; Green, S. G. "Testing the combined effects of newcomer information seeking and manager behavior on socialization". *Journal of Applied Psychology*. 1998. Vol. 83, pp.72-83.
- [16] Stumpf, S.A., & Hartman, K. "Individual exploration to organizational commitment or withdrawal". *Academy of Management Journal*. 1984. Vol. 27, pp. 308-329.
- [17] Wood, S. J. & Wall, T. D. "Work enrichment and employee voice in human resource management-performance studies". *International Journal of Human Resource Management*. 2007. Vol. 18, pp. 1335-1372.
- [18] Raguz-Bojic, S., & Temiz, S. "Determinants of commitment: A study of a multinational IT company". 2013.
- [19] Becker, B. E., Huselid, M. A., Becker, B. E., & Huselid, M. A. "High performance work systems and firm performance: A synthesis of research and managerial implications". In *Research in personnel and human resource management*. 1998.
- [20] Delaney, J. T. & Huselid, M. A. "The impact of human resource management practices on perceptions of organizational performance". *Academy of Management Journal*. 1996. Vol.39, pp.949-969.
- [21] Delery, J. E. & Shaw, J. D. (2001)."The strategic management of people in work organizations: Review, synthesis, and extension". *Research in Personnel and Human Resource Management*, Vol. 20, pp.165-197.
- [22] Dyer, L. & Reeves, T. "Human resource strategies and firm performance: What do we know and where do we need to go?" *International Journal of Human Resource Management*. 1995. Vol. 6, pp. 656-670.
- [23] Huselid, M. A. "The impact of human resource management practices on turnover, productivity, and corporate financial performance". *Academy of Management Journal*. 1995. Vol. 38, pp. 635-672.
- [24] Ichniowski, C., Shaw, K. & Prensushi, G. "The effects of human resource management practices on productivity". *American Economic Review*. 1997. Vol 87, pp.291-313.
- [25] Arthur, J. B. "Effects of human resource systems on manufacturing performance and turnover". *Academy of Management Journal*. 1994. Vol. 37, pp.670-687.
- [26] Walton, R. E. "From control to commitment in the workplace". *Harvard Business Review*. 1985. Vol. 63(2),pp. 77-84.
- [27] Whitener, E. M. "Do high commitment human resource practices affect employee commitment: a cross level analysis using hierarchical linear modelling". *Journal of Management*. 2001. Vol. 27, pp. 515-535.
- [28] Wood, S., Van Veldhoven, M., Croon, M. & de M. "Enriched job design, high involvement management and organizational performance: The mediating roles of job satisfaction and well-being". *Human Relations*. 2012. Vol. 65(4), pp.419-445.
- [29] Galbraith, J. R. "Organization design". 1977. Addison Wesley Publishing Company.
- [30] Organ, D. W. "A restatement of the satisfaction-performance hypothesis". *Journal of management*. 1988. Vol. 14(4), pp. 547-557.
- [31] Schuler, R. S., & Jackson, S. E."Linking competitive strategies with human resource management practices". *The Academy of Management Executive*. 1987. pp.207-219.
- [32] Andersen, D., & Richardson, G. "Scripts for group model building". *System Dynamics Review*. 1997. Vol. 13(2), pp. 107-129.
- [33] Van Dyne, L., & LePine, J. A. "Helping and voice extra-role behaviors: Evidence of construct and predictive validity". *Academy of Management Journal*. 1998. Vol. 41(1), pp. 108-119.
- [34] Bowen, D., & Ostroff, C."Understanding HRM-firm performance linkages: The role of the "strength" of the HRM system". *Academy of Management Review*.2004.Vol. 29(2), pp. 203-221.
- [35] Ko, J. W., Price, J. L., & Mueller, C. W. "Assessment of Meyer and Allen's three-component model of organizational commitment in South Korea". *Journal of applied psychology*. 1997. Vol. 82(6), p. 961.
- [36] Wright, P. M., & Nishii, L. H. "Strategic HRM and Organizational Behavior : Integrating Multiple Levels of Analysis". 2006.
- [37] Green, F. "Work intensification, discretion, and the decline in well-being at work". *Eastern Economic Journal*. 2004. Vol. 30(4), pp.615-625.
- [38] Schwabinger, M., & Grösser, S. "System dynamics as model-based theory building". *Systems Research and Behavioral Science*. 2008. Vol. 25(4), pp. 447-465.

Dimensionamiento y armado óptimo de secciones de hormigón solicitadas a flexocompresión



Optimum reinforcement and sizing of concrete cross sections subjected to flexural and axial loading



Antonio Tomás Espín y Gregorio Sánchez-Olivares

Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT). Dpto. Ingeniería Civil. Pº Alfonso XIII, 52 - 30203 - Cartagena.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8676> | Recibido: 11/12/2017 • Inicio Evaluación: 16/01/2018 • Aceptado: 01/03/2018

ABSTRACT

- Although the cross-section optimization problem has been sufficiently studied in the past, a disadvantage persists regarding the programming complexity, with the need to use methods which are not straightforward for the structural engineer in his/her routine work and require excessive computing time. This contribution aims not so much as to obtain the dimensions of the section and the required reinforcement, which have already been solved, but to provide an automated design procedure for calculating the optimum dimensions and reinforcement. A simple optimization method has been programmed in a MATLAB® routine that is attached in the Appendix of this paper. Conventional-strength or high-strength concrete may be chosen, the minimum reinforcement area may be considered selecting the ACI 318 or Eurocode 2 standards, and the neutral axis depth may be constrained in order to guarantee a certain cross-sectional ductility. Therefore, the interest of the proposal is focused on providing an automated procedure for optimizing the dimensions and reinforcement of a concrete cross-section, together with the corresponding calculation routine, in which the structural engineer may include certain design conditions. Three examples are presented and comparisons between the results from different methods and standards are drawn.
- Keywords:** optimization, automated design, reinforced concrete, cross section dimensioning, flexural/axial loading.

RESUMEN

La optimización de secciones de hormigón es un problema ampliamente analizado en la literatura. No obstante, en el problema persiste un inconveniente, la complejidad de su programación, empleando métodos que no son sencillos de implementar por el ingeniero estructural y que requieren tiempos de cálculo excesivos.

La contribución presentada en este trabajo no pretende tanto obtener las dimensiones y el armado de una sección -problema ya resuelto- sino proporcionar un procedimiento de diseño automatizado para calcular las dimensiones y armaduras óptimas, para lo que se ha programado un sencillo método de optimización en una rutina implementada en el programa MATLAB® y que se adjunta en el apéndice del artículo. Al ejecutar la rutina se puede elegir entre hormigón de resistencia convencional u hormigón de alta resistencia, armadura mínima según el código ACI 318 o el Eurocódigo 2, y limitar la profundidad de la fibra neutra para garantizar determinada ductilidad en la sección transversal.

Por tanto, el interés de la propuesta se centra en aportar un procedimiento automatizado de optimización de las dimensiones y armado de una sección de hormigón, adjuntando además la correspondiente rutina de cálculo, en el que el ingeniero estructural pueda incluir determinadas condiciones de diseño.

Como ejemplos de aplicación se presentan tres casos y se establecen comparaciones entre los resultados obtenidos con diferentes métodos y códigos normativos.

Palabras clave: optimización, diseño automatizado, hormigón armado, dimensionamiento seccional, flexocompresión

1. INTRODUCCIÓN

El diseño de elementos de hormigón armado para la combinación de flexión y carga axial es un caso común en ingeniería estructural. En este tipo de diseño, la armadura de una sección transversal se obtiene con el fin de resistir un cierto esfuerzo axial y momento flector. La sección transversal es generalmente rectangular. Se sabe que la solución a este tipo de problemas es indeterminado, puesto que hay tres variables desconocidas (la armadura superior e inferior y la profundidad de la fibra neutra) y sólo dos ecuaciones de equilibrio. En los procedimientos de cálculo convencional [1,2], es necesaria una condición adicional para resolver el problema, por lo que es aconsejable programar estos procedimientos en un código informático.

Debido a las infinitas soluciones existentes, si se desea obtener la cantidad óptima de armadura en la sección transversal puede proponerse un problema de optimización como método para resolver el sistema de ecuaciones [3-9]. Sin embargo, los procedimientos para resolver problemas de optimización suelen implicar, en la mayoría de casos, excesivo tiempo de computación y complejos métodos numéricos con los que, generalmente, no suelen estar familiarizados los ingenieros estructurales en su trabajo habitual.

En esta contribución se propone un problema de optimización de fácil implementación y que implica un insignificante coste computacional en cualquier ordenador personal en la actualidad: del orden de décimas de segundo (si se optimiza sólo la armadura) o de segundos (si se optimiza, además de la armadura, las dimensiones de la sección transversal).

El método propuesto permite:

- considerar hormigón de alta resistencia, es decir, una resistencia característica del hormigón $f_{ck} > 50$ MPa según el Eurocódigo 2 [10] y $41.37 \text{ MPa} < f'_c < 82.74 \text{ MPa}$ según el código ACI 318 [11],

- ii) considerar una cuantía mínima de armadura,
- iii) limitar la profundidad de la fibra neutra para garantizar una determinada curvatura y cumplir con un cierto criterio de ductilidad, y
- iv) escoger entre el código ACI 318 o el Eurocódigo 2 (EC 2).

Se presentan tres ejemplos numéricos para la optimización de la armadura. En dos de ellos se comparan los resultados obtenidos empleando el ACI 318 con los obtenidos empleando el EC 2 y el método convencional, mientras que en el tercer ejemplo se utiliza hormigón de alta resistencia. Los mismos tres ejemplos se utilizan posteriormente para ilustrar la optimización de la sección transversal completa (hormigón y acero).

2. HERRAMIENTAS Y MÉTODOS

2.1. INTERÉS DE LA INVESTIGACIÓN

Este estudio tiene como objetivo, no tanto obtener las dimensiones de la sección transversal y la armadura necesaria, lo cual es algo que ya está resuelto desde hace años y que puede consultarse, por ejemplo, en las siguientes referencias [4,5,8,12,13], sino disponer de un procedimiento de diseño automatizado capaz de obtener las dimensiones y armaduras óptimas. Este procedimiento se basa en un sencillo método de optimización que puede implementarse en cualquier software de ingeniería estructural. Por lo tanto, el interés de esta investigación se centra en automatizar la resolución de un problema de optimización de dimensionamiento de un modo sencillo, en el que el ingeniero estructural puede incluir ciertas condiciones de diseño, como la cuantía mínima de armadura, hormigón de alta resistencia y/o un determinado criterio de ductilidad.

Indicar que la automatización del problema sólo de armado óptimo, bajo cualquier combinación de flexión y carga axil, ya fue propuesto en [14]. Sin embargo, en este estudio se han incluido dos mejoras significativas: (i) la implementación del diseño óptimo de la sección transversal, y (ii) gráficos adicionales para mejorar la visualización de los resultados desde el punto de vista de la curvatura y la ductilidad.

Respecto de la primera mejora, indicar que en [14] sólo se determinaba la cantidad mínima de armadura para un conjunto prescrito de resistencia y condiciones, basándose el cálculo en unas dimensiones fijas de la sección transversal. Sin embargo, estas dimensiones pueden variar significativamente, pues un determinado flector resistente se puede conseguir aumentando el canto de la sección y disminuyendo la armadura de tracción y/o compresión. Por tanto, el procedimiento empleado en [14] se ha ampliado para incluir la optimización, no sólo del acero, sino también toda de la sección transversal. Conviene señalar que una sección transversal con más área y una menor proporción de armadura puede ofrecer diversas ventajas (mayor ductilidad por la menor profundidad de la fibra neutra; menor coste porque emplear más hormigón y menos acero suele ser más económico; menos cantidad de armadura reduce el problema de la congestión de barras en los nudos viga-columna y en las zonas de posible formación de rótulas plásticas).

En relación a las segunda mejora, la variable x (profundidad de la fibra neutra) está relacionada con φ (curvatura de la sección), pudiendo los gráficos adicionales representarse en función de x o de φ . En este sentido, representar la armadura superior, inferior y total frente a la curvatura puede ser de interés de cara al terremoto de diseño [15].

2.2. PROBLEMA DE DISEÑO ÓPTIMO

En el diseño de secciones transversales de hormigón suele estar latente la idoneidad de los valores obtenidos para la armadura, no sólo desde el punto de vista de la resistencia (estos valores se obtienen a partir de las ecuaciones de equilibrio), sino desde la perspectiva de cuál es la solución óptima (coste del material y de la colocación de barras, así como aspectos medioambientales por la reducción de los recursos consumidos en la producción del acero de armar).

En el diseño de elementos sometidos a flexo-compresión es habitual emplear métodos convencionales para obtener la armadura con distribución simétrica. Esto puede ser apropiado en algunos casos de momentos flectores con diferentes signos pero valores similares. Sin embargo, en otros casos esta distribución simétrica puede resultar antieconómica y medioambientalmente inadecuada, siendo preferible emplear otra distribución de armadura óptima [3,5]. Este es el caso, por ejemplo, de los muros de contención con carga vertical en la parte superior (el empuje del terreno provoca en el alzado del muro flexión de un único signo), o de los pilotes circulares para formar muros o pantallas de contención, en los que la armadura longitudinal pueden reducirse en más de un 50 % en comparación con el diseño convencional [16]. Ciertamente, la probabilidad de error del posicionamiento de las barras aumenta en este caso en el que se emplea armadura asimétrica, pero esto puede prevenirse con un control más cuidadoso en esta fase de la construcción.

En este apartado se analiza el problema de calcular la armadura óptima en una sección transversal rectangular sometida a flexión combinada con axil. La resolución de este problema se basa en las investigaciones realizadas en [8,13], en las que se presentan los diagramas de dimensionamiento de armado (RSD) y el teorema del armado de la sección bajo criterios de optimalidad. Se implementa un sencillo método de optimización que permite considerar hormigón de alta resistencia, cuantías mínimas de armado según ACI 318 o EC 2, y una restricción de curvatura afectando a la profundidad de la fibra neutra para poder garantizar así cierta ductilidad.

Conviene destacar que al resolver el problema lo que realmente se está consiguiendo es automatizar, con un insignificante tiempo computacional, el diseño óptimo de la sección transversal y su armadura, sometida a flexión y axil. Por otra parte, la gráfica de resultados de la profundidad de la fibra neutra permite visualizar el sentido físico del problema, al conocer el estado tenso-deformacional de la sección de forma instantánea.

2.2.1. Función objetivo

La función objetivo del problema de optimización es el coste de una sección transversal de hormigón armado por unidad de longitud

$$Cost = P_c A_c + P_s A_{st} \quad (1)$$

donde P_c y P_s son los precios de hormigón y acero, respectivamente, A_c es el área de la sección transversal de hormigón y A_{st} es el área total del acero de la armadura.

El área de la sección transversal de hormigón A_c depende del ancho b y altura h de la sección transversal. El área total de la armadura de acero A_{st} depende de la geometría de la sección transversal, la resistencia de los materiales, la profundidad de la fibra neutra, y el momento flector y el esfuerzo axil

$$A_{st} = A_{st}(P_u, M_u, \phi, f'_c, f_y, b, h, d, d', x) \quad (2)$$

Esta función se obtiene a partir de las ecuaciones de equilibrio en la sección transversal; estas ecuaciones han sido desarrollados en [14], utilizando el bloque rectangular de tensiones de compresión en el hormigón (Figura 1). La armadura de la sección transversal depende de la profundidad de la fibra neutra. Por tanto, hay un espacio de diseño que contiene posibles soluciones de armadura, entre las cuales hay una que proporciona la óptima configuración de armadura. La denominada profundidad óptima de la fibra neutra corresponde con la configuración óptima. Las ecuaciones para la armadura y las restricciones se han desarrollado en las secciones 2.2.1.1 a 2.2.2. Aunque están expresadas según ACI 318, también se ha implementado el EC 2 en el código del programa adjunto en el apéndice.

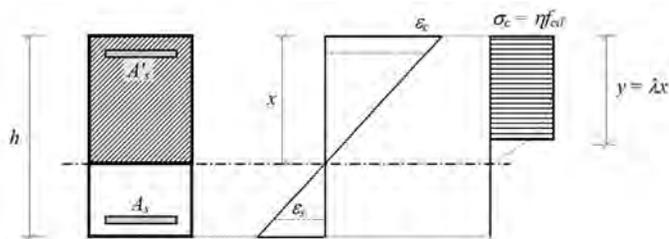


Fig. 1: Bloque rectangular equivalente de tensiones de compresión en el hormigón (según EC 2)

Las Ecuaciones (3) a (6) definen el bloque de compresión en el hormigón según ACI 318

$$\sigma_c = 0.85 f'_c \quad (3)$$

$$y = \beta_1 x \quad (4)$$

donde

$$\beta_1 = 0.85 - 0.008(f'_c - 30) \quad (5)$$

$$0.65 \leq \beta_1 \leq 0.85 \quad (6)$$

con f'_c en MPa.

Las Ecuaciones (7) a (10) definen el bloque de compresión en hormigón según EC 2:

$$\sigma_c = \eta f'_{cd} \quad (7)$$

$$y = \lambda x \quad (8)$$

donde

$$\eta = 1$$

$$\lambda = 0.8$$

$$f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$$

$$\eta = 1 - \frac{f_{ck} - 50}{200}$$

$$\lambda = 0.8 - \frac{f_{ck} - 50}{400}$$

$$f_{ck} > 50 \text{ MPa}$$

(10)

2.2.1.1. Área de la armadura traccionada

Las Ecuaciones (11) a (13) se utilizan para obtener la tracción en la armadura dependiendo de la profundidad de la fibra neutra x (mediante la profundidad y y del bloque rectangular equivalente de tensiones):

$$A_s = \frac{\frac{M_u}{\phi} - \frac{P_u}{\phi} \left(\frac{h}{2} - d' \right)}{-\sigma_s (d - d')} \quad \text{Si } y \leq 0 \quad (11)$$

$$A_s = \frac{\frac{M_u}{\phi} - \frac{P_u}{\phi} \left(\frac{h}{2} - d' \right) - 0.85 f'_c y b \left(d' - \frac{y}{2} \right)}{-\sigma_s (d - d')} \quad \text{Si } 0 < y \leq h \quad (12)$$

$$A_s = \frac{\frac{M_u}{\phi} - \left(\frac{P_u}{\phi} - 0.85 f'_c h b \right) \left(\frac{h}{2} - d' \right)}{-\sigma_s (d - d')} \quad \text{Si } y > h \quad (13)$$

2.2.1.2. Área de la armadura comprimida

Las Ecuaciones (14) a (16) se utilizan para obtener la compresión en la armadura dependiendo de la profundidad de la fibra neutra x (mediante la profundidad y y del bloque rectangular equivalente de tensiones):

$$A'_s = \frac{\frac{M_u}{\phi} + \frac{P_u}{\phi} \left(d - \frac{h}{2} \right)}{\sigma'_s (d - d')} \quad \text{Si } y \leq 0 \quad (14)$$

$$A'_s = \frac{\frac{M_u}{\phi} + \frac{P_u}{\phi} \left(d - \frac{h}{2} \right) - 0.85 f'_c y b \left(d - \frac{y}{2} \right)}{\sigma'_s (d - d')} \quad \text{Si } 0 < y \leq h \quad (15)$$

$$A'_s = \frac{\frac{M_u}{\phi} + \left(\frac{P_u}{\phi} - 0.85 f'_c h b \right) \left(d - \frac{h}{2} \right)}{\sigma'_s (d - d')} \quad \text{Si } y > h \quad (16)$$

2.2.1.3. Área total de armadura

Las Ecuaciones (17) a (19) se utilizan para calcular el área total de acero. La función objetivo es minimizar la suma de ambas (armadura de tracción y de compresión):

$$A_{st} = \frac{\frac{M_u}{\phi} - \frac{P_u}{\phi} \left(\frac{h}{2} - d' \right)}{-\sigma_s (d - d')} + \frac{\frac{M_u}{\phi} + \frac{P_u}{\phi} \left(d - \frac{h}{2} \right)}{\sigma'_s (d - d')} \quad \text{Si } y \leq 0 \quad (17)$$

$$A_{st} = \frac{\frac{M_u}{\phi} - \frac{P_u}{\phi} \left(\frac{h}{2} - d' \right) - 0.85 f'_c y b \left(d - \frac{y}{2} \right)}{-\sigma_s (d - d')} + \dots \quad (18)$$

$$\dots + \frac{\frac{M_u}{\phi} + \frac{P_u}{\phi} \left(d - \frac{h}{2} \right) - 0.85 f'_c y b \left(d - \frac{y}{2} \right)}{\sigma'_s (d - d')} \quad \text{Si } 0 < y \leq h$$

$$A_{st} = \frac{\frac{M_u}{\phi} - \left(\frac{P_u}{\phi} - 0.85 f'_c h b \right) \left(\frac{h}{2} - d' \right)}{-\sigma_s (d - d')} + \dots \quad (19)$$

$$\dots + \frac{\frac{M_u}{\phi} + \left(\frac{P_u}{\phi} - 0.85 f'_c h b \right) \left(d - \frac{h}{2} \right)}{\sigma'_s (d - d')} \quad \text{Si } y > h$$

2.2.2. Restricciones

Las restricciones de las variables de diseño A_s , A'_s y x se indican en los siguientes apartados.

2.2.2.1. Restricciones de la armadura

Como se mencionó en el apartado 2.2, la función objetivo se obtiene a partir del método RSD [13]. En este método, el signo de las tensiones y esfuerzos en los materiales es positivo en compresión y negativo en tracción. Puesto que tanto el esfuerzo como su distribución de tensiones asociada tienen el mismo signo, los valores de A_s y A'_s , que corresponden a la relación entre ambos, deben ser positivos.

Además, la opción de considerar la cuantía mínima según ACI 318 o EC 2 se puede activar antes de iniciar el cálculo de la armadura óptima. La cuantía de acero de la armadura traccionada según el código ACI 318 no debe ser inferior a:

$$A_s \geq \frac{\sqrt{f_c}}{4f_y} bd \geq \frac{1.4bd}{f_y} \quad (20)$$

ACI 318 no considera cuantía mínima alguna para la armadura comprimida.

Según EC 2, la cuantía de acero de la armadura traccionada es:

$$A_s \geq 0.26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} bd > 0.0013bd \quad (21)$$

En el caso combinado de flexión y axil, la cuantía mínima de la armadura comprimida A'_s es:

$$A'_s \geq \frac{0.05N_d}{f_{yd}} \quad (22)$$

En el caso de excentricidad reducida, la armadura total mínima A_{st} es:

$$A_{st} = A_s + A'_s \geq 0.1 \frac{N_d}{f_{yd}} > 0.002bh \quad (23)$$

Por último, en el caso de flexión y axil de tracción, la armadura total debe satisfacer:

$$A_{st} \geq A_c \frac{f_{ctm}}{f_{yd}} \quad (24)$$

2.2.2.2. Restricciones de la profundidad de la fibra neutra

Como se mencionó en el apartado 2.2.1, la función objetivo se evalúa para valores de la profundidad de la fibra neutra que se encuentran acotados dentro del intervalo.

$$\rho_i h \leq x \leq \rho_s h \quad (25)$$

donde ρ son relaciones de proporcionalidad, inferior ($\rho_i \leq 0$) y superior ($\rho_s > 0$).

En el caso de flexión combinada con un axil de tracción que domine el comportamiento de la sección transversal, la armadura (Ecuaciones (11), (14) y (17)) es constante para valores de x entre $-\infty$ y $(\rho_i h)$, para los cuales la deformación en la armadura se

corresponde con una tensión igual al límite elástico. En este caso sólo es necesario evaluar la función objetivo dentro del intervalo $\rho_i h \leq x \leq 0$, con un valor de ρ_i según EC 2.

$$\rho_i = \frac{\varepsilon_y d - 0.01d'}{(0.01 - \varepsilon_y)h} \quad (26)$$

Es necesario utilizar una deformación máxima admisible en el acero para obtener ρ_i . El valor 0,01 proporcionado por EC 2 puede utilizarse para obtener un valor realista de ρ_i y evaluar la función objetivo dentro del intervalo mencionado.

El caso combinado de flexión y axil de compresión que domine el comportamiento de la sección transversal presenta una situación similar. La armadura (Ecuaciones (11), (14) y (17)) es prácticamente constante para valores de x en un rango desde ρ_{sh} hasta $+\infty$. Para el valor ρ_{sh} la armadura alcanza la tensión máxima de compresión de 400 MPa según EC 2 o 420 MPa según ACI 318. En este caso es suficiente con evaluar la función objetivo en el rango $h < x \leq \rho_{sh}$. El parámetro ρ_s no se obtiene analíticamente sino numéricamente, como se describe en el apartado 2.3.

Los casos extremos sólo con axil de compresión o de tracción se han evaluado analíticamente, ya que la deformación en la armadura es conocida y, por consiguiente, también lo es la tensión y, por tanto, la profundidad de la fibra neutra.

Finalmente, si fuera necesaria una mayor ductilidad en la sección transversal, la profundidad de la fibra neutra no debe estar restringida a un cierto valor máximo $\rho_s h$. Para ello, ACI 318 recomienda el uso de una deformación mínima en la armadura de tracción de 0.0075, lo que significa que la profundidad de la fibra neutra debe ser menor que el correspondiente a la deformación de 0.005. Esta limitación puede ser utilizada como restricción de ductilidad utilizando un factor ρ_i obtenido a partir de una profundidad de la fibra neutra x correspondiente a una deformación en la armadura de 0.0075. Para más información sobre los criterios de ductilidad puede consultarse, por ejemplo, [17-20].

2.3. METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN

Entre los métodos actuales de optimización, los deterministas pueden utilizarse en este tipo de problemas para encontrar el mínimo global mediante una búsqueda exhaustiva sobre el espacio de diseño. Debido a la naturaleza del problema (con pocas variables de diseño), es conveniente utilizar los de fuerza bruta [21], en lugar de otros como los basados en algoritmos genéticos [3,5,12,22-24] o en criterios de optimalidad [25-29].

La idea básica de los métodos de fuerza bruta consiste en la búsqueda del mínimo global barriendo el espacio de diseño mediante la evaluación de la función objetivo en cada punto. Esto es, por supuesto, un cálculo infinito y, por tanto, imposible de implementar y utilizar. En el caso particular del problema de diseño de esta investigación es posible aplicar un enfoque de fuerza bruta como una sencilla forma de evaluar la función objetivo en un número finito de puntos, con suficiente precisión y reducido coste computacional.

Hasta hace épocas recientes habría sido imposible implementar estos procedimientos, ya que emplean algoritmos para resolver el problema que necesitan gran potencia de procesamiento en el ordenador. Sin embargo, esto es posible debido a la evolución de los procesadores que en la actualidad se incorporan en cualquier ordenador personal.

Por tanto, la metodología de optimización es bastante sencilla a la vez que eficaz:

- (i) Implica barrer el espacio de diseño para cada dimensión de la sección transversal dentro de un determinado rango, con

un incremento que se considera suficiente en la práctica del diseño, por ejemplo 10^{-2} m. En cada iteración (para cada par de valores de canto y ancho de la sección) la armadura mínima se calcula utilizando el procedimiento detallado en el inciso ii) a continuación, y el coste del hormigón armado de la sección transversal se obtiene a partir del precio de los materiales (hormigón y acero). Estos datos se almacenan en la memoria RAM para cada iteración y, al final del proceso, se recupera el coste mínimo.

Aunque la función objetivo en esta investigación es el coste de hormigón armado de la sección transversal (hormigón y acero), también sería interesante utilizar otras funciones objetivo, como las relacionadas con el diseño sísmico [2,5].

(ii) La optimización de la armadura consiste en establecer un intervalo para la profundidad de la fibra neutra, desde un valor inicial de $x(p_{ih})$ hasta un valor final (p_{sh}) de acuerdo al apartado 2.2.2.2, y el empleo de un valor de esta profundidad (x) que aumente en un pequeño incremento (p) desde la iteración $i-1$ a la i :

$$x_i = x_{i-1} + p \quad (27)$$

En primer lugar se realiza un barrido de la función objetivo. Esta función y los parámetros A_s , A'_s y A_{st} se calculan para cada profundidad de la fibra neutra x , que se incrementa un valor p de 10^{-2} m. Entre todos los posibles diseños (los de armadura negativa son eliminados), se escoge el área mínima total de armadura, que corresponde a un valor de la profundidad de la fibra neutra óptima x_{opt} .

En segundo lugar se realiza una ampliación de la zona alrededor del mejor diseño, repitiendo el paso anterior durante tres iteraciones más mediante el incremento $p/10$, $p/100$ y $p/1000$ de la profundidad de la fibra neutra x , en cada iteración, respectivamente. De esta manera, se calcula el mejor diseño para un incremento $p = 10^{-6}$ m, lo cual provoca un error muy reducido, cercano a cero.

Para los casos con reducida excentricidad (fibra neutra fuera de la sección transversal), el valor final p_{sh} es el punto a partir del cual la armadura permanece constante. Este valor puede ser muy grande, pues el comportamiento de la sección transversal tiende hacia el estado puro de compresión ($M_u = 0$) y, por tanto, la fibra neutra tiende a $+\infty$.

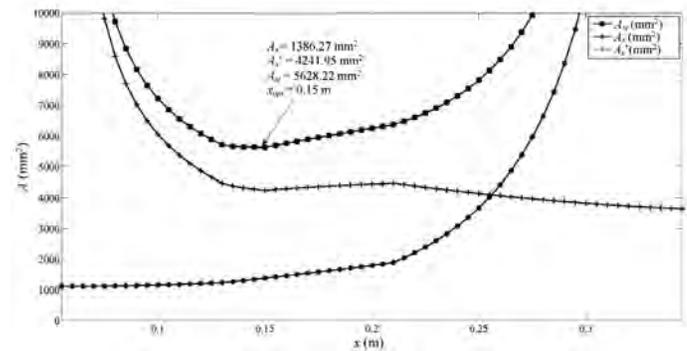
Esta situación se ha resuelto haciendo que el incremento p aumente gradualmente conforme se busca el valor de p_s para el cual el total de armadura es mínimo. Este mínimo se obtiene cuando la diferencia en la armadura es inferior o igual a una cierta tolerancia entre iteraciones consecutivas. Se puede elegir casi cualquier tolerancia y seguir siendo eficiente el proceso con un reducido coste computacional. En este caso se ha elegido 10^{-6} mm² como tolerancia. Obviamente, esta tolerancia no tiene ningún sentido práctico, sino puramente matemático para poder encontrar el mínimo global.

El proceso de optimización se ha realizado mediante una rutina de programación en MATLAB® que se adjunta en el Apéndice.

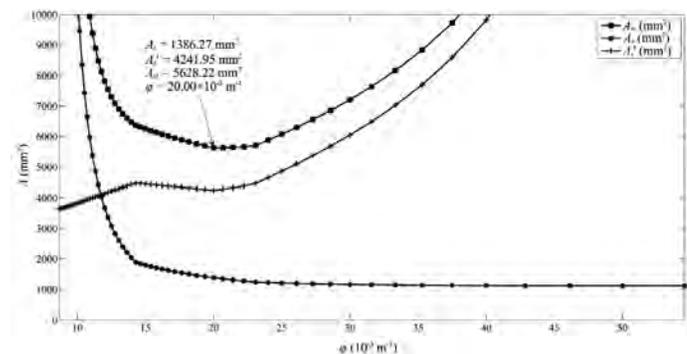
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan tres ejemplos numéricos que muestran la automatización del cálculo de la armadura óptima bajo diversas combinaciones de flexión y axil. En los dos primeros, se utiliza hormigón de resistencia convencional y los resultados obtenidos empleando ACI 318 y EC 2 se comparan con los obtenidos mediante métodos

convencionales. En el tercer ejemplo se emplea hormigón de alta resistencia. Además, se optimiza el coste de la sección transversal completa de hormigón armado por medio de la variación de sus dimensiones y la obtención de la armadura óptima en cada iteración hasta encontrar la solución óptima.



(a) Armadura función de la profundidad de la fibra neutra x



(b) Armadura función de la curvatura ϕ de la sección

Fig. 2: Armadura en el espacio de diseño empleando ACI 318 para una sección de 0,30x0,40 m bajo $N_u = 1800 \text{ kN}$ y $M_u = 400 \text{ kNm}$ (excentricidad elevada)

3.1. SECCIÓN SOLICITADA A FLEXOCOMPRESIÓN (CON EXCENTRICIDAD ELEVADA)

Se analiza una sección rectangular de 0,30x0,40 m bajo un momento flector de 400 kNm y un axil de 1800 kN. La resistencia de los materiales son $f'_c = 30 \text{ MPa}$ para el hormigón y $f_y = 500 \text{ MPa}$ para el acero. El recubrimiento mecánico d' de la armadura superior es 0,05 m. En las Figuras 2a y 2b se muestra la variación de la armadura según ACI 318 en función de la profundidad de la fibra neutra x y la curvatura ϕ de la sección, respectivamente.

En el caso de emplear EC 2, la armadura óptima se obtiene para una fibra neutra situada en la profundidad límite (profundidad a la cual la armadura de tracción está tensionada al límite elástico del acero). En el caso de ACI 318, la fibra neutra está situada a una profundidad menor que aquella para la cual la armadura se encuentra equilibrada, en una zona a la que ACI 318 denomina "región de transición".

Para resolver el caso de flexocompresión por el procedimiento convencional es necesario utilizar el ordenador, o bien los diagramas de interacción, para obtener el valor de la armadura incluyendo compatibilidad de deformaciones. El método de optimización numérica propuesto en este artículo se ha realizado adaptándolo al procedimiento convencional. Dado que los fundamentos de ambos métodos son los mismos, la columna de resultados para el método convencional se ha eliminado en las tablas de los ejemplos siguientes, mostrando sólo los resultados del método de optimización. Estos resultados del método de optimización utilizando ACI 318 y EC 2 se muestran en la Tabla 1. La utilización de ACI 318

proporciona una armadura un 30 % mayor que la obtenida por EC 2, lo que indica un menor conservadurismo de este último en el caso de flexocompresión. El coste inicial se ha calculado utilizando un precio de 100 Eu/m³ para el hormigón y de 1,20 Eu/kg para el acero. Además, a estos precios de los materiales se les ha conferido una variabilidad del 20 % para comprobar la sensibilidad de los resultados, siendo insignificante como puede desprenderse de la Tabla 2 (el diseño final sólo cambia ligeramente para el caso del precio más reducido en el hormigón y el más elevado en el acero).

	ACI 318	EC 2
A_s (mm ²)	1386.27	1285.55
A'_s (mm ²)	4241.95	3042.01
A_{st} (mm ²)	5628.22	4327.56
x (m)	0.150	0.216
φ (10 ⁻³ m ⁻¹)	20.00	16.21
Coste (Eu/m)	65.02	52.77

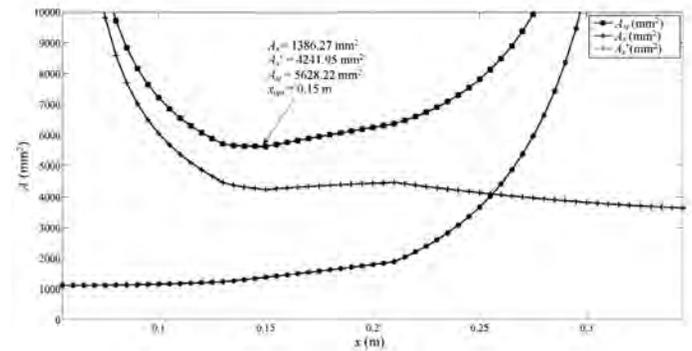
Tabla 1: Resultados para el problema de armado óptimo en una sección de 0.30x0.40 m solicitada a $N_d = 1800$ kN y $M_d = 400$ kNm (excentricidad elevada)

Los resultados para el caso de utilizar el coste como función objetivo se presentan en la Tabla 2. La variable ancho b está restringida en el intervalo (0.30, 0.45) m y el canto h en (0.35, 0.85) m. La evolución de la función objetivo coste dependiendo de b y h se muestra en la Figura 3. Los ahorros logrados en la solución óptima son del 64.89 y 57.08 % para ACI 318 y EC2, respectivamente.

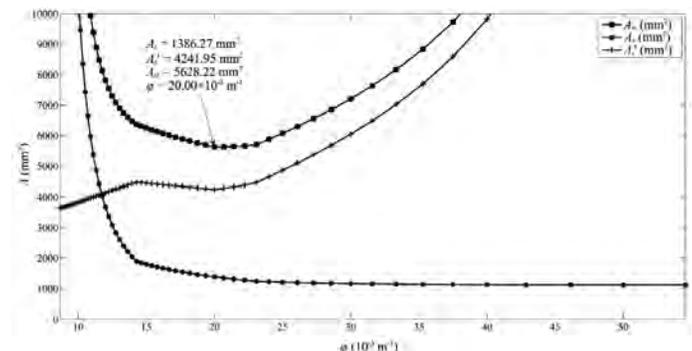
3.2. SECCIÓN SOLICITADA A FLEXOCOMPRESIÓN (CON EXCENTRICIDAD REDUCIDA)

Se analiza una sección rectangular de 0.40x0.40 m bajo un momento flector de 80 kNm y un axil de 4000 kN. La resistencia de los materiales son $f'_c = 30$ MPa para el hormigón y $f_y = 500$ MPa para el acero. El recubrimiento mecánico d' de la armadura superior es 0.05 m.

La relación entre la armadura y la profundidad de la fibra neutra, o entre la armadura y la curvatura seccional, utilizando ACI 318 se muestran en las Figuras 4a y 4b, respectivamente. La armadura óptima se logra para una profundidad de la fibra neutra siendo la armadura casi constante. Esa profundidad no se ha mostrado en la Figura 4a debido a su elevado valor, por lo que se ha reflejado



(a) Armadura función de la profundidad de la fibra neutra x



(b) Armadura función de la curvatura φ de la sección

Fig. 4: Armadura en el espacio de diseño empleando ACI 318 para una sección de 0.40x0.40 m bajo $N_d = 4000$ kN y $M_d = 80$ kNm (excentricidad reducida)

	ACI 318	EC 2								
Precio de hormigón (Eu/m ³)	100	100	80	80	80	80	120	120	120	120
Precio del acero (Eu/kg)	1.20	1.20	0.96	0.96	1.44	1.44	0.96	0.96	1.44	1.44
b (m)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.31	0.30	0.30	0.30	0.30
h (m)	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73
A_s (mm ²)	0.01	79.28	0.01	79.28	0.01	25.35	0.01	79.28	0.01	79.28
A'_s (mm ²)	99.19	0.01	99.19	0.01	99.19	0.06	99.19	0.01	99.19	0.01
A_{st} (mm ²)	99.21	79.29	99.21	79.29	99.21	25.40	99.21	79.29	99.21	79.29
x (m)	0.340	0.382	0.340	0.382	0.340	0.365	0.340	0.382	0.340	0.382
φ (10 ⁻³ m ⁻¹)	8.83	9.16	8.83	9.16	8.83	9.59	8.83	9.16	8.83	9.16
Coste (Eu/m)	22.83	22.65	18.27	18.12	18.64	18.39	27.03	26.88	27.40	27.18

Tabla 2: Resultados para el problema de dimensionamiento y armado óptimos de una sección solicitada a $N_d = 1800$ kN y $M_d = 400$ kNm (excentricidad elevada) y diferentes precios de materiales

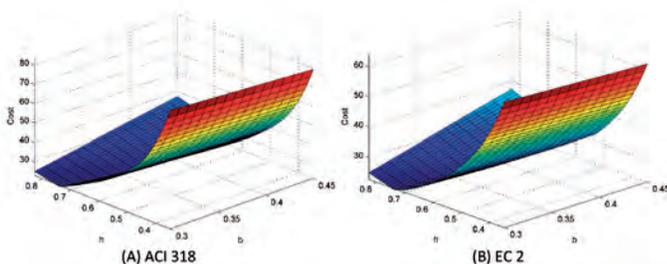


Fig. 3: Evolución de la función objetivo coste [Eu/m] dependiendo de las variables b y h [m] de una sección solicitada a $N_d = 1800$ kN y $M_d = 400$ kNm (excentricidad elevada)

	ACI 318	EC 2
A_s (mm ²)	583.06	333
A'_s (mm ²)	2331.69	1667
A_{st} (mm ²)	2914.75	2000
x (m)	16	17,658,019.840
φ (10 ⁻³ m ⁻¹)	0.18	1.13x10 ⁻⁷
Coste (Eu/m)	43.46	34.84

Tabla 3: Resultados para el problema de armado óptimo en una sección de 0.40x0.40 m solicitada a $N_d = 4000$ kN y $M_d = 80$ kNm (excentricidad reducida)

	ACI 318	EC 2
b (m)	0.36	0.30
h (m)	0.62	0.70
A_s (mm ²)	0.60	0.19
A'_s (mm ²)	12.22	54.21
A_{st} (mm ²)	12.82	54.40
x (m)	0.683	0.829
φ (10 ⁻³ m ⁻¹)	4.39	3.78
Coste (Eu/m)	22.44	21.51

Tabla 4: Resultados para el problema de dimensionamiento y armado óptimos de una sección solicitada a $N_d = 4000$ kN y $M_d = 80$ kNm (excentricidad reducida)

	ACI 318	EC 2
A_s (mm ²)	1258.97	1366.19
A'_s (mm ²)	2823.71	1450.93
A_{st} (mm ²)	4082.68	2817.12
x (m)	0.150	0.200
φ (10 ⁻³ m ⁻¹)	20.00	14.45
Coste (Eu/m)	54.06	42.14

Tabla 5: Resultados para el problema de armado óptimo en una sección de 0.30x0.40 m solicitada a $N_d = 1800$ kN y $M_d = 400$ kNm (excentricidad elevada) con hormigón de alta resistencia (60 MPa)

	ACI 318	EC 2
b (m)	0.30	0.30
h (m)	0.57	0.59
A_s (mm ²)	64.54	67.04
A'_s (mm ²)	0.00	0.09
A_{st} (mm ²)	64.54	67.13
x (m)	0.211	0.207
φ (10 ⁻³ m ⁻¹)	14.25	13.93
Coste (Eu/m)	22.84	23.64

Tabla 6: Resultados para el problema de dimensionamiento y armado óptimos de una sección solicitada a $N_d = 1800$ kN y $M_d = 400$ kNm (excentricidad elevada) con hormigón de alta resistencia (60 MPa)

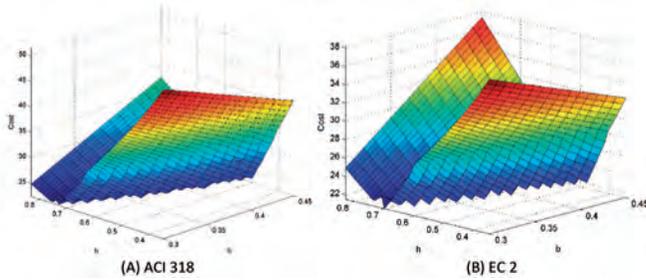


Fig. 5: Evolución de la función objetivo coste [Eu/m] dependiendo de las variables b y h [m] de una sección solicitada a $N_d = 4000$ kN y $M_d = 80$ kNm (excentricidad reducida)

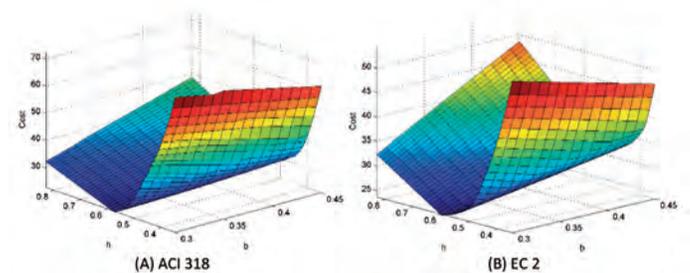
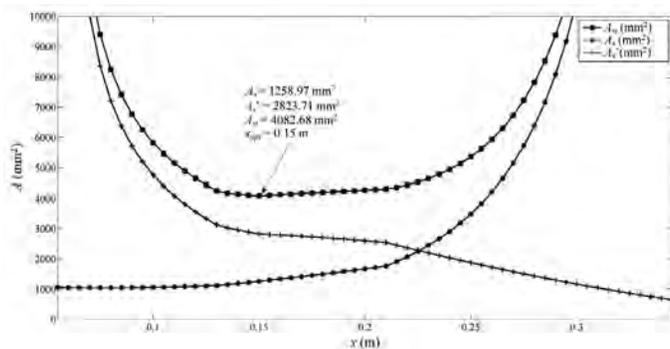
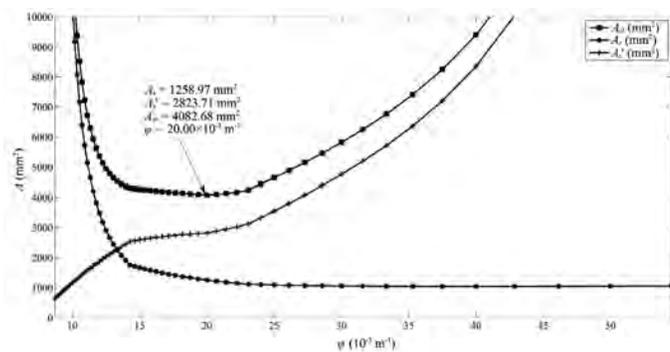


Fig. 7: Evolución de la función objetivo coste [Eu/m] dependiendo de las variables b y h [m] de una sección solicitada a $N_d = 1800$ kN y $M_d = 400$ kNm (excentricidad elevada) con hormigón de alta resistencia (60 MPa)



(a) Armadura función de la profundidad de la fibra neutra x



(b) Armadura función de la curvatura φ de la sección

Fig. 6: Armadura en el espacio de diseño empleando ACI 318 para una sección de 0,30x0,40 m bajo $N_d = 1800$ kN y $M_d = 400$ kNm (excentricidad elevada) con hormigón de alta resistencia (60 MPa)

solo un tramo en el que la armadura tiende a un valor prácticamente constante y muy cercano al óptimo. La armadura mínima no se ha mostrado en la Figura 4 con el fin de no distorsionar los resultados y poder establecer comparaciones con los resultados obtenidos utilizando ACI 318 y EC 2 (Tabla 3). La armadura obtenida con ACI 318 es del 79.90 % mayor que la obtenida con EC 2.

Los resultados para el caso de utilizar el coste como función objetivo se presentan en la Tabla 4. La variable ancho b está restringida en el intervalo (0.30, 0.45) m y el canto h en (0.35, 0.85) m. La evolución de la función objetivo coste dependiendo de b y h se muestra en la Figura 5. Los ahorros logrados en la solución óptima son del 48.37 y 38.26 % para ACI 318 y EC2, respectivamente.

3.3. SECCIÓN DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA

El procedimiento de optimización propuesto se ha implementado también para utilizar hormigón de alta resistencia. A continuación se emplean los mismos datos del ejemplo 3.1 pero con la diferencia de la resistencia del hormigón ($f'_c = 60$ MPa) y su precio unitario (130 Eu/m³). En las Figuras 6a y 6b se muestra la variación de la armadura en función de la profundidad de la fibra neutra x y la curvatura φ de la sección, respectivamente. Y en la Tabla 5 se relacionan los valores de la armadura óptima y su correspondiente profundidad de la fibra neutra utilizando ambos códigos. El coste se ha calculado utilizando un precio de 130 Eu/m³ para el hormigón y 1,20 Eu/kg para el acero. La armadura obtenida con ACI 318 es un 45 % superior a la obtenida con EC 2.

Los resultados para el caso de utilizar el coste como función objetivo se presentan en la Tabla 6. La variable ancho b está restringida en el intervalo (0.30, 0.45) m y el canto h en (0.35, 0.85) m.

La evolución de la función objetivo coste dependiendo de b y h se muestra en la Figura 7. Los ahorros logrados en la solución óptima son del 57.75 y 43.90 % para ACI 318 y EC2, respectivamente.

4. CONCLUSIONES

Tradicionalmente los ordenadores se han utilizado en el proceso de diseño de secciones de hormigón para calcular la armadura empleando métodos convencionales. La aplicación de técnicas de optimización al proceso de diseño amplía la utilización del ordenador para permitir al estructurista alcanzar diseños óptimos a partir de unas condiciones de diseño determinadas.

En este trabajo se presenta un procedimiento automatizado para diseñar el dimensionamiento y armado óptimos de secciones de hormigón sometidas a flexión y axil. Para resolver el problema de optimización estructural se ha utilizado una metodología de fuerza bruta, basándose el procedimiento en las ecuaciones de equilibrio de momentos y fuerzas en la sección, e incluyendo el hormigón de alta resistencia y diversas limitaciones de diseño, como la cuantía mínima y la posibilidad de limitar la profundidad de la fibra neutra para asegurar una cierta ductilidad en la sección. El proceso de optimización se ha implementado en una rutina de programación en MATLAB® que se presenta en el apartado de "Material adicional".

Los resultados se obtienen empleando escaso tiempo computacional: décimas de segundo, para optimizar la armadura, o unos pocos segundos (entre 4 y 10 para la mayoría de casos probados), para la optimización de las dimensiones de la sección y su armadura, utilizando para ello un ordenador personal de los actualmente disponibles, con un procesador Intel® Core™ i7 r en este caso.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Calavera J. Design and Calculation of Concrete Structures. Madrid: Intemac, 2008. 2116 p. ISBN: 978-84-88764-05-8 (in Spanish).
- [2] Nilson AH, Darwin D, Dolan CW. Design of Concrete Structures: 14th edition. New York: McGraw-Hill, 2010. 816 p. ISBN: 978-00-73293-49-3.
- [3] Lepš M, Šejnoha M. "New approach to optimization of reinforced concrete beams". Computers and Structures. 2003. Vol. 81-18-19, p. 1957-1966. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(03\)00215-3](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(03)00215-3).
- [4] Barros MHFM, Barros AFM, Ferreira CA. "Closed form solution of optimal design of rectangular reinforced concrete sections". Engineering Computation. 2004. Vol. 21-7, p. 761-776. DOI: <https://doi.org/10.1108/02644400410565298>.
- [5] Govindaraj V, Ramasamy JV. "Optimum detailed design of reinforced concrete continuous beams using Genetic Algorithms". Computers and Structures. 2005. Vol. 84-1-2, p. 34-48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2005.09.001>
- [6] Raue E, Hahn S. "Optimum reinforcement design of concrete cross-sections considering deformation constraints". Journal of Civil Engineering and Management. 2005. Vol. 11-1, p. 65-71. DOI: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13923730.2005.9636334>
- [7] Tomás A, Martí P. "Design of reinforcement for concrete co-planar shell structures using optimization techniques". Meccanica. 2010. Vol. 45-5, p. 657-669. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11012-009-9263-6>.
- [8] Gil-Martín LM, Aschheim M, Hernández-Montes E, et al. "Recent developments in optimal reinforcement of RC beam and column sections". Engineering Structures. 2011. Vol. 33-4, p. 1170-1180. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.12.038>.
- [9] Bertagnoli G, Giordano L, Mancini S. "Design and optimization of skew reinforcement in concrete shells". Structural Concrete. 2012. Vol. 13-4, p. 248-258. DOI: <https://dx.doi.org/10.1002/suco.201200009>.
- [10] Technical Committee CEN/TC250. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [11] ACI Committee 318. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-14) and commentary (318R-14). Farmington Hills: American Concrete Institute, 2014.
- [12] Koumousis VK, Arsenis SJ. "Genetic algorithms in optimal detailed design of reinforced concrete members". Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 1998. Vol. 13-1, p. 43-52. DOI: <https://dx.doi.org/10.1111/0885-9507.00084>.
- [13] Hernández-Montes E, Gil-Martín LM, Aschheim M. "Design of concrete members subjected to uniaxial bending and compression using reinforcement sizing diagrams". ACI Structural Journal. 2005. Vol. 102-1, p. 150-158. DOI: <https://dx.doi.org/10.14359/13540>.
- [14] Tomás A, Alarcón A. "Automated design of optimum longitudinal reinforcement for flexural and axial loading". Computers and Concrete. 2012. Vol. 10-2, p. 149-171. DOI: <https://dx.doi.org/10.12989/cac.2012.10.2.149>.
- [15] Fragiadakis M, Lagaros ND. "An overview to structural seismic design optimisation frameworks". Computers and Structures. 2011. Vol. 89-11-12, p. 1155-1165. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2010.10.021>.
- [16] Gil-Martín LM, Hernández-Montes E, Aschheim M. "Optimal reinforcement of RC columns for biaxial bending". Materials and Structures. 2010. Vol. 43-9, p. 1245-1256. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9576-x>.
- [17] Cohn MZ, Riva P. "Flexural ductility of structural concrete sections". PCI Journal. 1991. Vol. 36-2, p. 72-87.
- [18] Bai ZZ, Au FTK. "Ductility of symmetrically reinforced concrete columns". Magazine of Concrete Research. 2009. Vol. 61-5, p. 345-357. DOI: <https://doi.org/10.1680/mac.2008.00149>.
- [19] Ho JCM. "Limited ductility design of reinforced concrete columns for tall buildings in low to moderate seismicity regions". The Structural Design of Tall and Special Buildings. 2011. Vol. 20-1, p. 102-120. DOI: <https://dx.doi.org/10.1002/tal.610>.
- [20] Au FTK, Leung CCY, Kwan AKH. "Flexural ductility and deformability of reinforced and prestressed concrete sections". Computers and Concrete. 2011. Vol. 8-4, p. 473-489. DOI: <https://dx.doi.org/10.12989/cac.2011.8.4.473>.
- [21] Arora JS. Introduction to Optimum Design. London: Elsevier Academic Press, 2016. 968 p. ISBN: 978-01-28008-06-5.
- [22] Rajeev S, Krishnamoorthy CS. "Genetic algorithms-based methodology for design optimization of reinforced concrete frames". Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 1998. Vol. 13, p. 63-74. DOI: <https://dx.doi.org/10.1111/0885-9507.00086>
- [23] Camp CV, Pezeshk S, Hansson H. "Flexural design of reinforced concrete frames using a genetic algorithm". ASCE Journal of Structural Engineering. 2003. Vol. 129-1, p. 105-115. DOI: [https://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:1\(105\)](https://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:1(105))
- [24] Perera R, Varona FB. "Flexural and shear design of FRP plated RC structures using a genetic algorithm". ASCE Journal of Structural Engineering. 2009. Vol. 135-11, p. 1418-1429. DOI: [https://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2009\)135:11\(1418\)](https://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2009)135:11(1418))
- [25] Zou XK, Chan CM. "An optimal resizing technique for seismic drift design of concrete buildings subjected to response spectrum and time history loadings". Computers and Structures. 2005. Vol. 83-19-20, p. 1689-1704. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2004.10.002>.
- [26] Kaliszky S, Logo J. "Optimal-design of dynamically loaded reinforced-concrete frames under displacement and rotation constraints". Structural Optimization. 1991. Vol. 3-2, p. 121-131. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01743282>
- [27] Chan CM, Wang Q. "Optimal drift design of tall reinforced concrete buildings with non-linear cracking effects". Structural Design of Tall and Special Buildings. 2005. Vol. 14-4, p. 331-351. DOI: <https://doi.org/10.1002/tal.275>
- [28] Zou XK, Chan CM, Li G, Wang Q. "Multiobjective optimization for performance-based design of reinforced concrete frames". ASCE

Journal of Structural Engineering. 2007. Vol. 133-10, p. 1462-1474.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2007\)133:10\(1462\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2007)133:10(1462))

[29] Li G, Lu H, Liu X. "A hybrid genetic algorithm and optimality criteria method for optimum design of RC tall buildings under multi-load cases". Structural Design of Tall and Special Buildings. 2010. Vol. 19-6, p. 656-678. DOI: <https://doi.org/10.1002/tal.505>

MATERIAL SUPLEMENTARIO

https://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/8676-1



ACRÓNIMOS

A_c	área de la sección transversal de hormigón	P_u	axil de cálculo -factorizado- en la sección transversal (en ACI 318)
A_s	área de la armadura de tracción	x	profundidad de la fibra neutra desde la fibra más comprimida
A'_s	área de la armadura de compresión	y	profundidad del bloque rectangular equivalente de tensiones. Profundidad genérica de una fibra
$A_{s,min}$	área mínima de la armadura de tracción	β_1	coeficiente que relaciona la profundidad del bloque rectangular equivalente de tensiones de compresión con la profundidad de la fibra neutra (en ACI 318)
$A'_{s,min}$	área mínima de la armadura de compresión	ϵ_c	deformación en la fibra más comprimida del hormigón
A_{st}	área total de armadura	ϵ_s	deformación en la armadura de tracción
b	ancho de la sección transversal	ϵ'_s	deformación en la armadura de compresión
d	canto útil: distancia de la fibra más comprimida al centro de la armadura traccionada (d_t en ACI 318)	ϵ_t	deformación en la armadura traccionada a la resistencia nominal, excluyendo las deformaciones debidas al pretensado, fluencia, retracción y temperatura
d'	recubrimiento mecánico de la armadura comprimida	ϵ_y	deformación de la armadura en el límite elástico
E_s	módulo de elasticidad del acero de la armadura	ϕ	factor de reducción de resistencia (en ACI 318)
f'_c	resistencia especificada a la compresión del hormigón	η	factor de resistencia efectiva (EC 2)
f_{cd}	resistencia de cálculo de compresión del hormigón (en EC 2)	φ	curvatura de la sección transversal
f_{ck}	resistencia característica de compresión del hormigón (en EC 2)	λ	factor de profundidad efectiva del bloque de tensiones de compresión (en EC 2)
f_{ctm}	resistencia media a la tracción del hormigón (EC 2)	ρ	relación entre A_s y bd
f_y	resistencia especificada del acero de la armadura	ρ_b	relación entre A_s y bd produciendo condiciones de deformación equilibrada
f_{yd}	resistencia de cálculo del acero de la armadura (EC 2)	ρ_i	factor inferior de la proporción de la profundidad de la fibra neutra ($\rho_i \leq 0$)
f_{yk}	resistencia característica del acero de la armadura (en EC 2)	ρ_s	factor superior de la proporción de la profundidad de la fibra neutra ($\rho_s > 0$)
h	canto de la sección transversal	σ_c	tensión en la fibra más comprimida del hormigón
M_d	momento de cálculo en la sección transversal (EC 2)	σ_s	tensión en la armadura de tracción
M_n	momento nominal en la sección transversal (en ACI 318)	σ'_s	tensión en armadura de compresión
M_u	momento de cálculo -factorizado- en la sección transversal (en ACI 318)		
N_d	axil de cálculo en la sección transversal (EC 2)		
P_c	precio unitario del hormigón, utilizado en la función objetivo		
P_s	precio unitario del acero, utilizado en la función objetivo		

Análisis de un colector solar utilizando policarbonato alveolar para sistemas de calentamiento de agua de baja temperatura



Analysis of a solar collector using cellular alveolar polycarbonate for ecological and low temperature water heating systems



Jacqueline Almache-Almeida¹, Sebastián Andrade-Becerra¹, Alexander Ibarra-Jácume², Lenin Abatta-Jácume³, Diego Arcos-Aviles²

¹ Carrera de Ingeniería Mecatrónica, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, 1715-231B, Sangolquí, (Ecuador)

² Departamento de Eléctrica y Electrónica, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, 1715-231B, Sangolquí, Ecuador. Tfno: +593 2 3989400 ext. 1867. oai Barra@espe.edu.ec

³ Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, 1715-231B, Sangolquí, Ecuador

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8767> | Recibido: 12/03/2018 • Inicio Evaluación: 16/03/2018 • Aceptado: 09/04/2018 • Publicado Online: 23/04/2018

ABSTRACT

- This article presents the analysis of a new alternative for ecological heaters based on alveolar polycarbonate with eight millimeters of thickness as a flat solar collector without cover. The analysis is developed in a simple system which comprises two solar collectors and an automatic data acquisition stage that periodically provides the meteorological and system data of one month. For determining the utility and applicability of this type of solar collector, a comparison with a black body polycarbonate is performed. The resulting experimental data allows carrying out an energetic comparative analysis with respect to a commercial solar collector without a cover.
- **Keywords:** Cellular polycarbonate; sola collector; ecological heater; energy efficiency, domestic hot water.

RESUMEN

En este artículo se describe el análisis de una nueva alternativa para calentadores ecológicos, mediante el uso de policarbonato alveolar con ocho milímetros de espesor como colector solar plano sin cubierta. El análisis se realizó a través de un sistema que consiste en dos colectores solares montados en una estructura con veinte grados de inclinación, y monitoreado por un sistema de adquisición automático de datos, que proporciona periódicamente información meteorológica y del sistema durante un mes. Dada la necesidad de comparar los resultados del policarbonato con un cuerpo negro, uno de los colectores fue pintado de color negro mate. Para demostrar la eficiencia del colector diseñado, se efectuó un análisis del rendimiento energético de los colectores y se realizó la comparación con un colector solar sin cubierta comercial.

Palabras clave: Policarbonato alveolar, colector solar, calentador ecológico, calentador de baja temperatura, rendimiento energético, agua caliente sanitaria.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la energía juega uno de los roles más importantes en la vida cotidiana de las personas en todo el mundo y en Ecuador no es la excepción, la mayoría de los hogares en todo el país utilizan duchas eléctricas o soluciones basadas en recursos no renovables (gas licuado de petróleo) para cubrir sus

necesidades de consumo de agua caliente sanitaria (ACS). Esto ha aumentado el uso de combustibles fósiles y, por consiguiente, ha incrementado las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) resultantes de esta combustión (dióxido de carbono CO₂) [1]. Al tener en cuenta el uso desproporcionado de energías no renovables específicamente para la producción mundial y local de ACS, se puede observar que el uso de fuentes de energía renovables (RES), específicamente relacionadas con la energía solar térmica, constituyen una solución adecuada para los requisitos de esta necesidad energética. Como consecuencia, el uso de RES ha incrementado en las últimas décadas, siendo la energía solar térmica una de las cinco fuentes de energía más prometedoras que ha logrado el mayor crecimiento con tasas anuales promedio del 12,3% desde 1990 [2].

La energía solar, especialmente energía fotovoltaica [3] y energía solar térmica [4], se puede utilizar de varias maneras. Ambos tipos de generación tienen diferentes aplicaciones en las actividades comunes de la sociedad. Por un lado, la energía fotovoltaica se utiliza para generar electricidad empleada en dispositivos cotidianos, por ejemplo, electrodomésticos. Por otro lado, la energía térmica, que concentra la luz solar y la convierte en calor que se transfiere a un fluido activo (aire, agua o aceite), se utiliza para proporcionar calefacción y ACS a la vivienda [5,6].

Una aplicación específica de la energía solar térmica es el colector solar térmico [7], que es un tipo especial de intercambiador de calor que transforma la irradiación solar en calor. Los colectores solares se clasifican generalmente en dos categorías de acuerdo con las relaciones de concentración [4]: colectores sin concentración y colectores con concentración. Un colector sin concentración tiene la misma área para captar y absorber la radiación solar, mientras que un colector solar con concentración y seguimiento solar generalmente tiene superficies reflectantes cóncavas para captar y enfocar la irradiación del rayo solar a un área de recepción más pequeña.

El colector plano es el tipo de colector sin concentración más común y se pueden diseñar para aplicaciones que requieren la entrega de energía a temperaturas moderadas [8]. Los principales usos de estas unidades son el calentamiento solar de agua para consumo de ACS, la construcción de sistemas de ventilación y aire acondicionado y procesos de calentamiento a nivel industrial [9]. Por lo tanto, este trabajo presenta una solución innovadora de un diseño de colector solar plano basado en policarbonato alveolar

de 8mm para ser utilizado para consumo de ACS. El policarbonato es un tipo de termoplástico ampliamente utilizado para la fabricación de cubiertas y techos de plástico en Ecuador debido a sus excelentes cualidades relacionadas con la durabilidad, resistencia y economía [10]. Tiene claras ventajas en comparación con otros materiales tradicionales y costosos, como el vidrio y el acero inoxidable. El policarbonato es un material que tiene una resistencia al impacto de aproximadamente 300 veces mayor que el vidrio y 30 veces mayor que el acrílico [11], es muy flexible y liviano ya que pesa un tercio menos que el acrílico y 16 veces menos que el vidrio [12]. Además, el policarbonato tiene una gran durabilidad y es capaz de manejar diferentes cambios climáticos, como el sol, el viento, la lluvia, el granizo y los rayos ultravioleta (UV). Tiene gran resistencia a altas temperaturas y deformación térmica y, puede preservar sus propiedades físicas y químicas en un rango de temperatura entre -40°C y 120°C [13].

La eficiencia del colector solar propuesto se estudia mediante el análisis térmico del material. La comparación con un colector solar comercial sin cubierta demostrará la efectividad del diseño propuesto. El diseño propuesto proporcionará una doble funcionalidad al policarbonato alveolar, por lo que, podría ser utilizado como techo o cubierta y como colector solar plano al mismo tiempo, lo que optimiza su instalación en entornos residenciales en Ecuador. Es necesario recalcar que en el área de construcción del Ecuador, las cubiertas de policarbonato se utilizan generalmente como techos para la protección de los rayos UV emitidos por el sol, sin embargo, la energía disipada por este material se desperdicia en su totalidad. Por lo tanto, este estudio busca emplear la energía solar absorbida por el policarbonato, que se convierte en energía térmica, para ser utilizada para el calentamiento de ACS requerida para el consumo de una vivienda, de esta manera, se aprovecha la instalación de este tipo de cubiertas y se da una alternativa al uso de energías convencionales.

La novedad de este estudio es aprovechar los techos o cubiertas de policarbonato que se encuentran ya instalados para calentar agua necesaria para consumo de ACS de una vivienda. Por un lado, dado que el sistema de ACS tiene la ventaja de ser construido en una instalación ya realizada, los costos de instalación se reducen. Por otro lado, dada la alta radiación solar que tiene Ecuador, el sistema de ACS reducirá los costos de operación con respecto a los sistemas de electricidad que se usan comúnmente en entornos residenciales para el calentamiento de agua. Finalmente, este diseño contribuirá a la reducción de las emisiones de GEI derivadas de la combustión de los sistemas de calentamiento basados en combustibles fósiles.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Para determinar el comportamiento adecuado del sistema propuesto, es necesario encontrar su eficiencia, de modo que se pueda comparar con diferentes tipos de colectores y determinar su funcionalidad y utilidad. El diseño completo del colector propuesto se presenta a continuación.

2.1. DISEÑO DEL COLECTOR

El colector solar de policarbonato se ha diseñado sobre la base de una estructura de techo para darle un uso doble, es decir, para aprovechar la energía recibida por el techo para proteger a las personas del sol y para usarlo como colector térmico para el proceso de calentamiento de agua. Se construyeron dos diseños para comparar su rendimiento. El primer diseño es un colector solar basado en policarbonato en su estado original (color bronce)

y el segundo diseño se consideró un policarbonato color negro mate. Ambos colectores se colocaron en la misma posición para realizar el análisis bajo las mismas condiciones climáticas y de control. Se incorporó al diseño un *Sistema de Adquisición de Datos* (DAQ) que proporciona datos de irradiancia, velocidad de flujo de agua, velocidad del viento, temperatura ambiente y temperatura de los colectores de entrada y salida.

Los colectores solares fueron diseñados de tal manera que se pueden comparar con otros tipos de calentadores solares. Por lo tanto, se diseñaron con un área de recepción estándar de 2m^2 . Se debe tener en cuenta que dada la condición del sistema de estar prácticamente en el Ecuador, la inclinación óptima es mínima. Sin embargo, los colectores solares están inclinados 20° de acuerdo con las condiciones típicas de una instalación de techo de policarbonato en el país.

El sistema consta de cuatro componentes principales: la estructura de soporte, colectores solares de policarbonato, dos acumuladores de agua caliente y un sistema de recirculación de agua que se encarga de suministrar y recircular el agua a través del colector.

2.1.1 Balance de Energía

Para encontrar la eficiencia de un colector solar, que determina la energía útil transmitida al fluido, se requiere el balance de energía. El cálculo del balance de energía [14] establece la energía útil del colector, Q_U , como la diferencia entre la energía solar absorbida (W), Q_{Abs} , y las pérdidas térmicas totales del colector (W), Q_P , de la siguiente manera:

$$Q_U = Q_{Abs} - Q_P \quad (1)$$

La eficiencia térmica del colector es un parámetro importante a considerar en su diseño, ya que crea la base para la comparación de diferentes diseños y materiales. La eficiencia térmica, η , se define como [15] [16]:

$$\eta = \frac{Q_U}{A_c \cdot G} \quad (2)$$

donde G es la radiación solar incidente a 0° de inclinación (W/m^2) y A_c es el área del colector solar (m^2). Se debe tener en cuenta que el denominador de (2) constituye la energía total recibida por el colector solar. Además, se debe considerar que la irradiancia solar en un plano inclinado se estima mediante el procedimiento descrito en [17] al considerar la irradiancia solar medida a 0° .

El balance de energía también puede expresarse mediante la ecuación de Bliss-Hotel-Whillier [18,19], de la siguiente manera:

$$Q_U = A_c \cdot F_R \left[G_T \cdot (\tau \cdot \alpha) \cdot K_T - U_L \cdot (T_m - T_a) \right] \quad (3)$$

donde G_T es la irradiancia solar para el cielo isotrópico (W/m^2) a 20° de inclinación; τ es la transmitancia térmica de la cubierta del colector ($\tau=1$ para el colector solar sin cubierta); α es el coeficiente de absorción de policarbonato; K_T es el factor de sombreado [20]; U_L es el coeficiente de transferencia de calor [$W/(m^2 \cdot K)$]; T_m es la temperatura promedio del fluido (K); T_a es la temperatura ambiente (K); y, F_R es un factor ($F_R=0.9375$ para policarbonato color negro mate y $F_R=1.459$ para policarbonato color bronce), que relaciona la ganancia de energía útil real del colector con la ganancia útil

si toda la superficie del colector estuviera a la temperatura de entrada del fluido (factor de eliminación de calor del colector) [20]. Las pérdidas de energía térmica del colector pueden representarse como $U_L \cdot (T_m - T_a)$.

2.1.2 Cálculo del coeficiente global de pérdidas de calor

El coeficiente global de pérdidas de calor se define como [21]:

$$U_L = U_T + U_B \quad (4)$$

donde U_T y U_B son coeficientes de pérdida globales [W/(m²·K)] en la parte superior e inferior del colector, respectivamente.

El diagrama térmico del colector solar de policarbonato se muestra en la Figura 1(a). Debido a que se trata de un colector sin cubierta, las pérdidas de energía a través de la parte superior resultan por convección y radiación entre: la superficie superior y el ambiente, la superficie superior y su base, mientras que la pérdida de energía a través de la parte inferior resulta por convección y radiación entre la base y el medio ambiente. Además, el esquema de resistencias térmicas, del colector propuesto se muestra en la Figura 1(b). Por medio de ambas figuras se puede apreciar las pérdidas térmicas, ya sea por convección o radiación, que existen en el sistema.

donde $h_{r,c-a}$ y $h_{c,c-a}$ son coeficientes de transferencia de calor por radiación y convección, respectivamente, entre la parte superior y el medio ambiente (W/m²·K); $h_{r,c-b}$ y $h_{c,c-b}$ son coeficientes de transferencia de calor por radiación y convección, respectivamente, entre la parte superior e inferior (W/m²·K); $h_{r,b-a}$ y $h_{c,b-a}$ son coeficientes de transferencia de calor por radiación y convección, respectivamente, entre el fondo y el medio ambiente (W/m²·K), V_w es la velocidad del viento (m/s); β es el ángulo de inclinación del policarbonato; T_1 es la temperatura de entrada del agua (°C); T_2 es la temperatura de salida del agua (°C); y, T_a es la temperatura ambiente (°C).

Así, el coeficiente de pérdidas global en la superficie superior del colector se define como [22]:

$$U_T = \frac{1}{R_1 + R_2} \quad (5)$$

donde las resistencias térmicas R_1 y R_2 (m²·K/W) se expresan en términos de los coeficientes de transferencia de calor entre la parte superior y el medio ambiente, mediante convección entre la

parte superior y el medio ambiente, mediante radiación entre la parte superior e inferior, y por convección entre la parte superior e inferior, de la siguiente manera:

$$R_1 = \frac{1}{h_{r,c-a} + h_{c,c-a}} \quad (6)$$

$$R_2 = \frac{1}{h_{r,c-b} + h_{c,c-b}} \quad (7)$$

Por otro lado, el calor transferido a través de la convección y la radiación entre el fondo y el medio ambiente se define como:

$$U_B = \frac{1}{R_3} \quad (8)$$

donde R_3 es la resistencia térmica (m²·K/W) definida en términos de los coeficientes de transferencia de calor por radiación y convección entre el fondo y el medio ambiente, de la siguiente manera:

$$R_3 = \frac{1}{h_{r,b-a} + h_{c,b-a}} \quad (9)$$

Así, el coeficiente de transferencia de calor entre las superficies y el medio ambiente se calcula al considerar la constante de Boltzmann [W/(m²·K⁴)], k , la temperatura promedio entre las superficies y el entorno (K), $T_{m(c/b-a)}$ y la emisividad de una superficie, ϵ_s , como sigue [23]:

$$h_{r,(s/b-a)} = 4 \cdot k \cdot [T_{m(c/b-a)}]^3 \cdot \epsilon_s \quad (10)$$

Además, al considerar la emisividad del fondo, ϵ_b , el coeficiente de transferencia de calor entre la superficie y el fondo se define mediante [24]:

$$h_{r,s-b} = \frac{4 \cdot k \cdot [T_{m(c/b-a)}]^3}{\frac{1}{\epsilon_s} + \frac{1}{\epsilon_b} - 1} \quad (11)$$

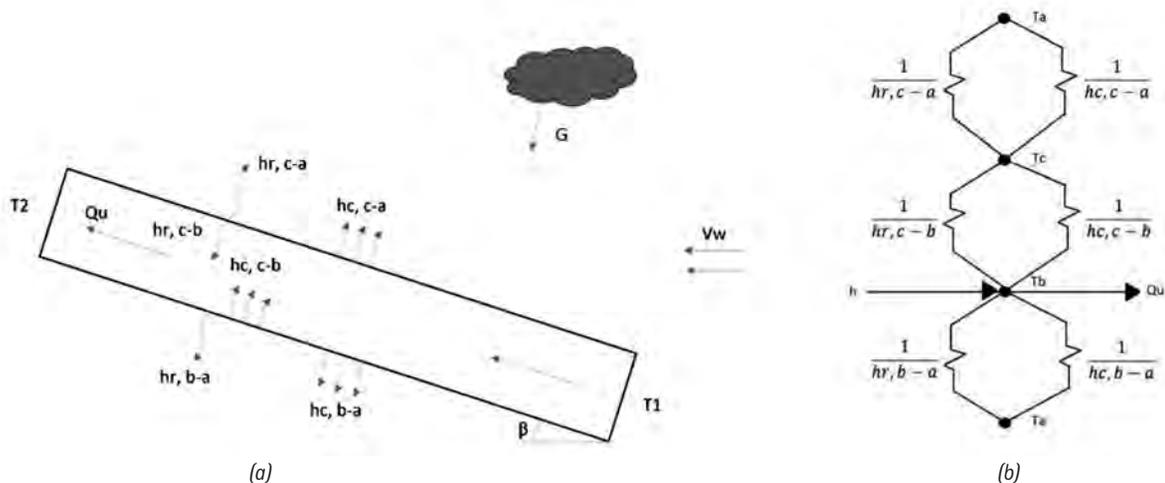


Fig. 1. (a) Diagrama térmico del colector solar. (b) Resistencias térmicas del colector solar

Adicionalmente, según la ecuación de Watmuff [25], los coeficientes de transferencia de calor por convección entre la superficie/fondo y el medio ambiente ($W/m^2 \cdot K$) se calculan al tener en cuenta la velocidad del viento (m/s), V_w , de la siguiente manera:

$$h_{c,e-a} = 2.8 + 3 \cdot V_w \quad (12)$$

Tenga en cuenta que este estudio considera un valor medio de la velocidad del viento $V_w = 1.59$ (m/s) para el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor (superficie y fondo).

Finalmente, el coeficiente de transferencia de calor por convección entre la superficie y el fondo está dado por [26,27]:

$$h_{c,e-b} = \frac{Nu \cdot k_T}{DH} \quad (13)$$

donde Nu es el número de Nusselt, k_T es la conductividad térmica del fluido ($W/m \cdot K$) [28], y DH es el diámetro hidráulico (m), definido por [29]:

$$DH = \frac{4 \cdot A_R}{P_R} \quad (14)$$

donde A_R y P_R son el área y el perímetro de la sección de alveolo rectangular, respectivamente, al considerar un alveolo rectangular de 10.8×8.0 (mm) y un espesor de pared de policarbonato de 0.4 (mm).

2.2. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

La estructura del colector solar desarrollado basado en policarbonato alveolar se instaló en el techo del Laboratorio de

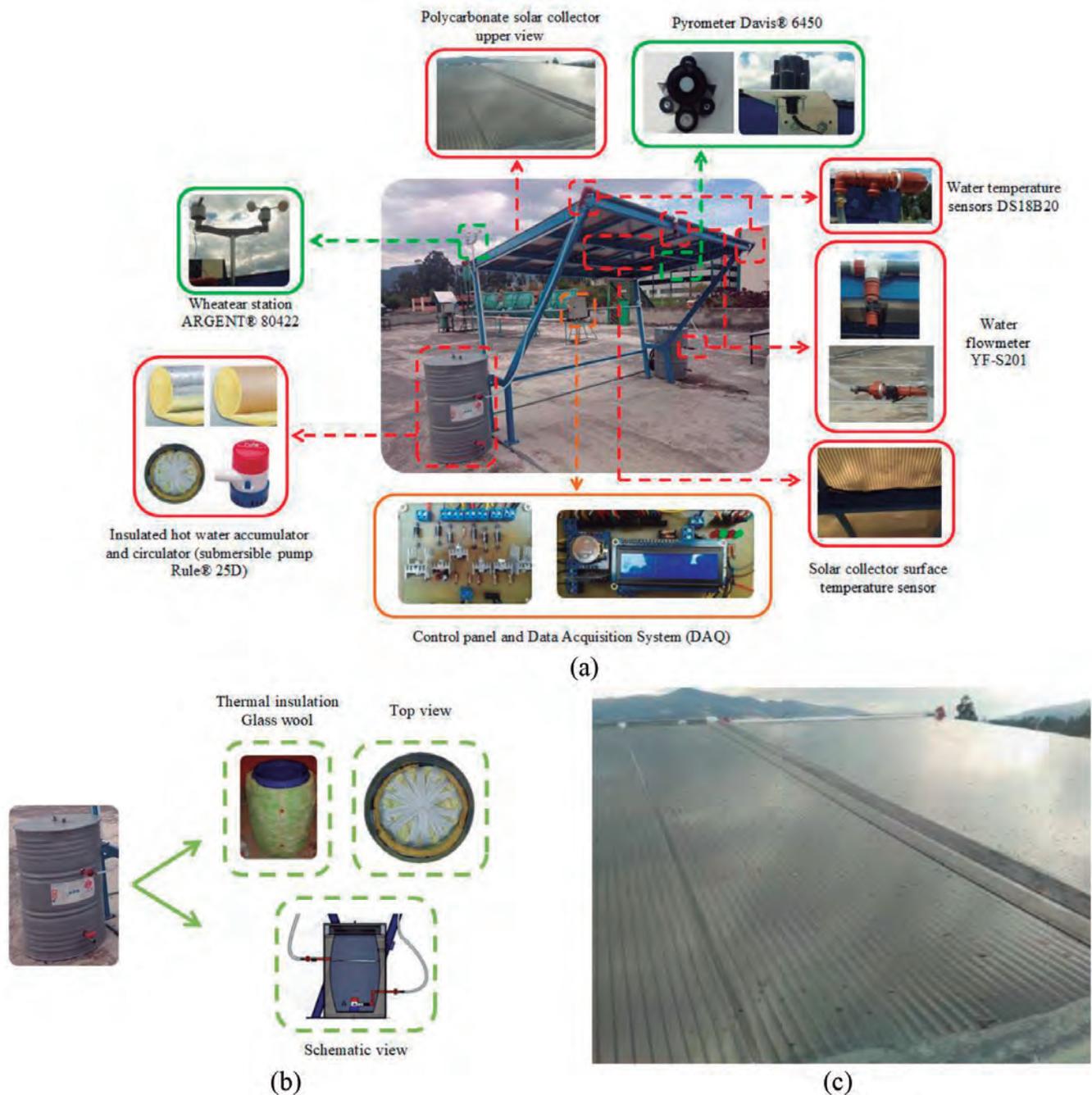


Fig. 2. (a) Sistema de colector solar de policarbonato propuesto. (b) Acumulador de agua caliente aislado. (c) Colector solar de policarbonato

Energías Renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE (Sangolquí, Ecuador: 0°18'48.56"S). El sistema del colector solar se presenta en la Figura 2(a).

Acumulador aislado de agua caliente y re-circulador de agua: El sistema de almacenamiento térmico consiste en un tanque de almacenamiento, que se encarga de almacenar, en forma de agua caliente, la energía térmica producida por el colector solar. El tanque de almacenamiento tiene varias conexiones para entrada y salida del fluido, así como tomas de corriente para dispositivos de medición de temperatura. Su volumen es de 50 l/m² y, debido a que el colector solar tiene un área de 2m², su capacidad total es de 100 litros. Estos tanques de almacenamiento están aislados térmicamente con lana de vidrio de 50mm de espesor, lo que ayuda a reducir las pérdidas de calor del fluido almacenado por su exposición a la intemperie. Para proteger el acumulador de las condiciones climáticas, se lo colocó dentro de un tanque de metal, como se observa en la Figura 2(b). Las bombas sumergibles RULE 25D se usaron como dispositivo recirculador para cada colector. Estas bombas están ubicadas dentro de los tanques de almacenamiento. La altura máxima de bombeo de estos dispositivos es de 3.7m y el caudal máximo es de 1817 l/h.

Colector solar de policarbonato: El colector solar fue diseñado con policarbonato alveolar de 8mm. Es un colector solar plano sin cubierta, es decir, no está aislado o cubierto por ninguna caja y/o vidrio, como se muestra en la Figura 2(c). El colector es responsable de captar el calor proveniente del sol y transferirlo al fluido de trabajo que circula dentro del colector. El colector ha sido diseñado con un área de captación estándar de 2m² posibilitando su comparación con otros tipos de colectores solares.

Pirómetro: El sistema utiliza un pirómetro Davis 6450 con las siguientes características: señal de salida de 0 a +3VDC y 1.67mA por W/m², rango de salida del sensor de 0 a 1800W/m², resolución de 1W/m² y precisión de ±5% a escala completa [30]. Se colocó a un lado de la estructura donde no recibió sombra y se ajustó en posición horizontal para medir la irradiación solar incidente a 0°.

Sensores de temperatura del agua: Los sensores de temperatura DS18B20 se instalaron en las entradas/salidas de agua del acumulador y en la superficie inferior del colector solar, como se muestra en la Figura 2(a). Este sensor tiene un rango de temperatura de -55°C a 125°C y una precisión de ±5°C.

Medidor de caudal de agua: Estos medidores permiten conocer el caudal del fluido caloportador. Este trabajo utiliza el medidor de flujo YF-S201, cuya instalación se realizó en línea con la tubería que transporta el agua desde el colector hasta el tanque de almacenamiento. Estos medidores tienen un flujo de operación de 1 a 30 l/m y una precisión de ±10%.

Estación meteorológica: La estación meteorológica ARGENT 80422 permite conocer las condiciones meteorológicas alrededor del colector solar. El anemómetro incluido en la estación mide la velocidad del viento en un rango de 0.5 a 60m/s con una precisión de ±5%.

Panel de control y sistema DAQ: El sistema DAQ se implementó en un microcontrolador Arduino Mega, ya que el experimento no requiere un tiempo de muestreo extremadamente rápido. Este microcontrolador es responsable de leer y almacenar los datos de los diversos sensores instalados en el sistema. Recopila los datos de diferentes variables: 13 variables de temperatura, 2 de flujo, 1 de humedad (sensor HTU21D), 1 de velocidad del viento y 1 de irradiancia. El DAQ recopila la información cada 5 segundos (periodo de muestreo) y luego obtiene su valor promedio cada 30 minutos. Estos valores promedio se almacenan en una memoria externa (micro SD, 2 GB), por medio de la creación de

un archivo de texto que luego es transferido a una hoja de cálculo para su procesamiento. En este sentido, para almacenar los datos en tiempo real se utilizó el módulo RTC, que permite al sistema registrar los datos con la fecha y hora actual. Además, este módulo funciona como un temporizador, que proporciona al sistema la capacidad de trabajar durante periodos de tiempo específicos. Este módulo funciona independientemente del microcontrolador gracias a la batería que integra, es decir, en caso de que el sistema se apague, el módulo RTC mantiene los datos de fecha y hora constantemente. Este módulo utiliza una comunicación I2C.

Un video que describe la configuración del sistema, el procedimiento de implementación, equipamiento y su funcionamiento se puede encontrar en [31].

El experimento se llevó a cabo durante 15 días consecutivos en el momento de máxima radiación solar (de 9a.m. a 2p.m. en Ecuador), se recolectaron 3600 muestras/día para cada variable, con un total de 54.000 muestras/día para cada variable durante el experimento. Para el cálculo de los coeficientes de calor, las resistencias térmicas y el coeficiente de pérdidas global, se eligieron las propiedades ópticas del policarbonato que se encuentran en el material suplementario publicado en el enlace web del artículo.

3. RESULTADOS

Las eficiencias térmicas de ambos colectores analizados se calculan mediante (1) a (14) y al considerar las propiedades ópticas del policarbonato y los valores promedio de las diferentes variables obtenidos en un día (material suplementario publicado en el enlace web del artículo), se obtiene la eficiencia térmica resultante (η) de cada colector (Tabla I).

El análisis de ambos colectores se realizó durante 15 días en el mes de noviembre de 2015. La recirculación del fluido a través del sistema se realizó mediante un sistema de control de una bomba capaz de regular automáticamente el caudal del fluido de acuerdo

Descripción	Policarbonato color bronce	Policarbonato color negro mate
Eficiencia térmica	58 %	62 %
Reflectancia	4.72	4.0
Absortancia	58.24	96
Emisividad	73	96

Tabla I: Eficiencia térmica para cada colector

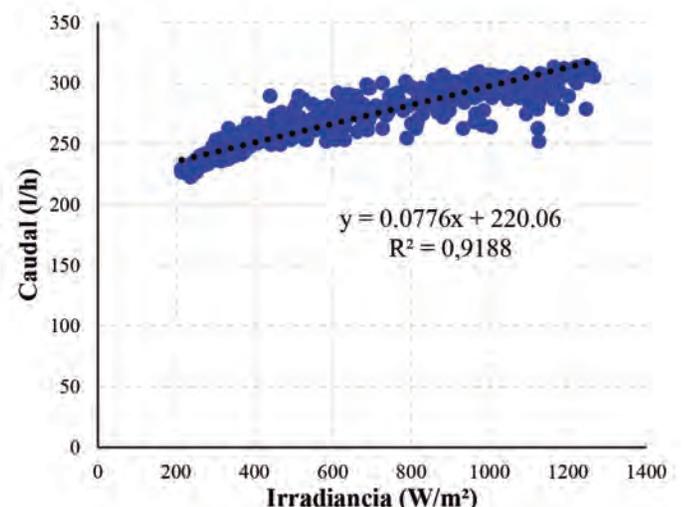


Fig. 3. Gráfico de Caudal vs Irradiancia

Día	Colector solar			
	Policarbonato color negro mate		Policarbonato color bronce	
	$(T_{mf}-T_a)/G$	η	$(T_{mf}-T_a)/G$	η
1	0.0106	60 %	0.0081	55 %
2	0.0145	51 %	0.0108	46 %
3	0.0126	52 %	0.0091	48 %
4	0.0095	61 %	0.0081	53 %
5	0.0123	53 %	0.0091	49 %
6	0.0146	53 %	0.0112	48 %
7	0.0113	56 %	0.0095	48 %
8	0.0086	62 %	0.0076	54 %
9	0.0111	56 %	0.0079	52 %
10	0.0077	67 %	0.0042	65 %
11	0.0082	61 %	0.0062	56 %
12	0.0121	53 %	0.0098	45 %
13	0.0131	54 %	0.0105	48 %
14	0.0121	55 %	0.0111	44 %
15	0.0113	59 %	0.0088	54 %

Tabla II: Comparación de eficiencia térmica durante un periodo de tiempo de 15 días para cada colector térmico

con el nivel de irradiación. La Figura 3 muestra la relación entre la irradiancia y el caudal obtenido a partir de los datos adquiridos.

La Tabla II presenta una comparación, durante 15 días, de la eficiencia térmica para los dos colectores diseñados. Esta eficiencia se obtiene a través del gráfico η vs $(T_{mf} - T_a)/G$, donde T_{mf} es la temperatura promedio del fluido y G es la irradiancia solar promedio. Estos valores se utilizaron para obtener, mediante

regresión lineal, la expresión de la eficiencia térmica de cada colector.

Las líneas de tendencia y las expresiones que ajustan todos los puntos de eficiencia térmica de cada colector descrito en la Tabla II se muestran en la Figura 4(a) y la Figura 4(b), donde la pendiente de las líneas es $F_R \cdot U_L$ representa el coeficiente de pérdidas térmicas de cada colector. Se debe considerar que un valor más alto de la pendiente implica mayores pérdidas de calor del colector y, mientras la temperatura aumenta, la eficiencia térmica del colector disminuye. Además, otro valor importante en ambas figuras es la intersección de la línea con el eje de ordenadas (Y) que corresponde con $K \cdot F_R \cdot \tau \cdot \alpha$, donde $F_R \cdot \tau \cdot \alpha$ representa la eficacia óptica del colector o su eficiencia máxima al tener en cuenta que cuanto más cerca esté este valor de 1 el colector podría tener una mayor capacidad para absorber el calor del sol. En este estudio se considera una constante $K=0,9$ (coeficiente de sombreado), ya que es el valor aproximado indicado por las hojas técnicas de los fabricantes del policarbonato [32].

La ecuación de ajuste de los colectores de policarbonato color negro mate y color bronce se define por (15) y (16) respectivamente, de la siguiente manera:

$$\eta = -21.209 \left(\frac{T_{mf} - T_a}{G} \right) + 0.81, \tag{15}$$

$$\eta = -28.88 \left(\frac{T_{mf} - T_a}{G} \right) + 0.765, \tag{16}$$

Donde el valor de 0.8401 corresponde al coeficiente de correlación para el colector color negro mate y el valor 0.8631

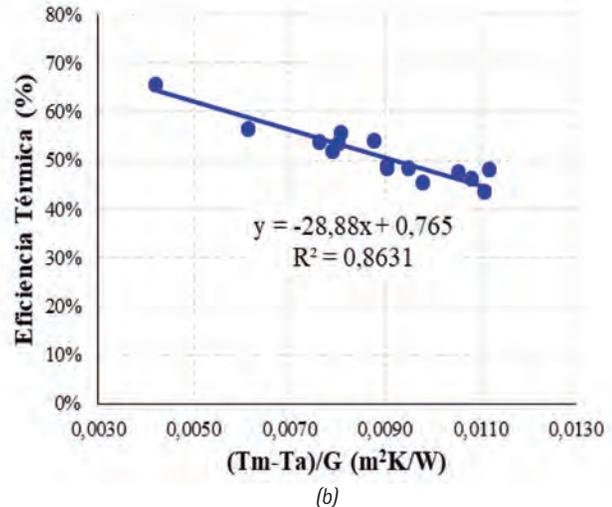
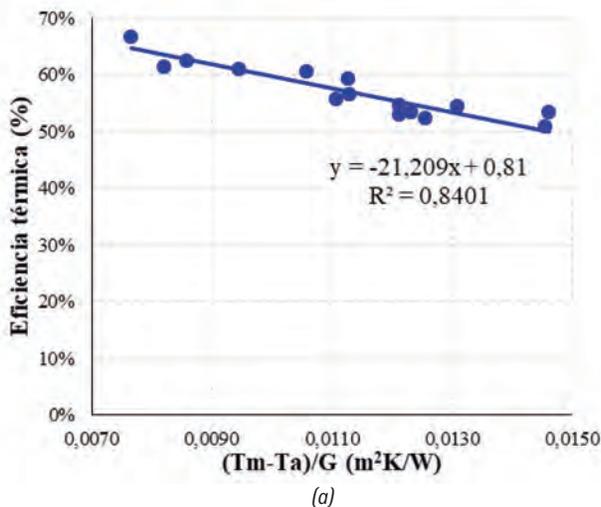


Fig. 4. Diagrama de dispersión de: (a) colector de policarbonato color negro mate y (b) colector de policarbonato color bronce

Descripción	Valor	Imagen
Tipo de construcción	Sin cubierta	
Área de captación	3,25 m²	
Temperatura máxima	34 °C	
Caudal	300-400 l/h/m²	
Ecuación de eficiencia	$\eta = -39.04 \left(\frac{T_{mf} - T_a}{G} \right) + 0.82$	
Material	Polipropileno	

Tabla III: Características técnicas del colector solar ECOSUN

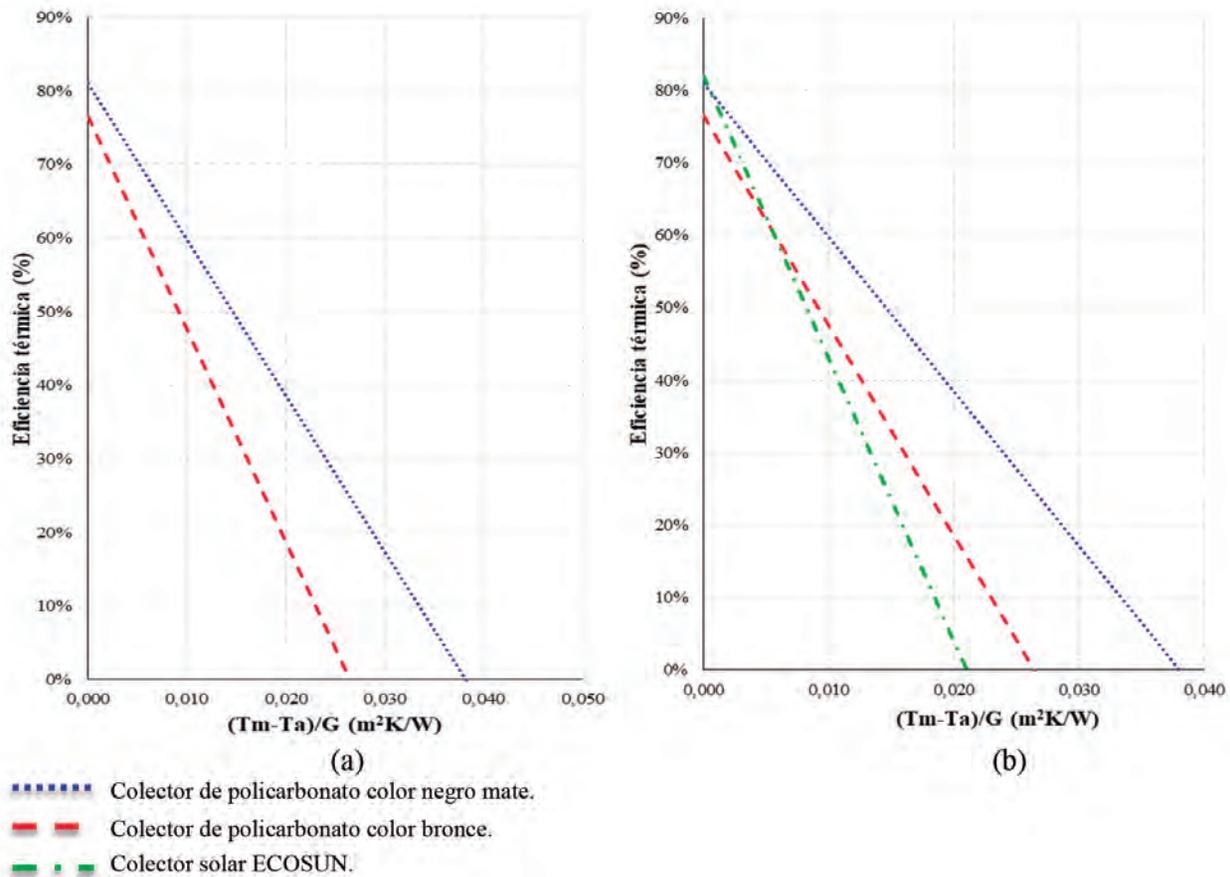


Fig. 5. (a) Diagrama de eficiencia térmica para los colectores solares de policarbonato diseñados. (b) Gráfico comparativo de eficiencia térmica con un colector comercial

corresponde al coeficiente de correlación para el colector color bronce.

4. DISCUSIÓN

La mayor eficiencia del colector solar de policarbonato color negro mate se evidencia en la Figura 5(a), donde el decaimiento de la línea (línea punteada) es menor en comparación con el colector solar de policarbonato color bronce (línea discontinua). En este sentido, la máxima eficiencia térmica alcanzada por el colector negro mate es del 81% (76,5% para el colector color bronce). Este aumento está relacionado con las propiedades ópticas del material y la mayor capacidad de absorber calor del cuerpo negro. Los valores máximos de temperatura del fluido durante el mes de noviembre de 2015 para diferentes valores diarios de irradiancia solar se los puede encontrar en el material suplementario publicado en el enlace web del artículo.

Además, para destacar el comportamiento adecuado de los colectores solares diseñados se realizó la comparación con un colector comercial con las similares características que los diseñados, es decir, se comparó con un colector sin cubierta. Se escogió el colector solar térmico sin cubierta ECOSUN, ya que posee características similares a las de los colectores diseñados. La Tabla III presenta las principales características de este colector son [33].

La Figura 5(b) muestra un gráfico comparativo de la eficiencia térmica para el colector solar ECOSUN y los colectores solares de policarbonato analizados.

Como se muestra en la Figura 5(b), el colector ECOSUN presenta la eficiencia térmica más baja con un coeficiente de pérdida de 39.04. Además, se puede observar que el colector más eficiente es

el colector de policarbonato color negro mate con un coeficiente de pérdida de 21.209. Se puede apreciar adicionalmente que el colector de polipropileno ECOSUN tiene una eficiencia menor que los colectores solares de policarbonato alveolar diseñados. Por lo tanto, ambos colectores diseñados podrían considerarse una solución adecuada para esta aplicación, dada su superioridad en términos de coeficiente de pérdida y eficiencia óptica.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo ha proporcionado un diseño alternativo de un colector solar térmico a ser utilizado para consumo de ACS. El sistema térmico fue diseñado para usarse simultáneamente como techo o cubierta y como colector solar plano, optimizando de esta manera su instalación en entornos residenciales en Ecuador. El colector solar propuesto ha sido diseñado para realizar el calentamiento adecuado de 100 litros de agua por día a través de un sistema de circulación forzada con una bomba sumergible. El análisis experimental se desarrolló durante 15 días consecutivos, con un tiempo de adquisición de 5 segundos de 9a.m. a 2p.m. hora de Ecuador, se recolectaron 3600 muestras/día para cada una de las variables, con un total de 54,000 muestras/día para cada variable durante el experimento. El análisis comparativo entre colectores solares de policarbonato color negro mate y color bronce ha puesto de relieve la mayor eficiencia térmica del colector solar color negro mate que alcanza una temperatura máxima del agua de 46.72°C y una eficiencia térmica máxima del 81% mientras que el colector de policarbonato color bronce alcanzó un máximo temperatura de 44.40°C y una eficiencia térmica máxima de 76.5%. Una comparación con un colector solar comercial ha demostrado la efectividad del diseño propuesto logrando un menor

coeficiente de pérdida de 21.209 para el colector de color negro mate (28.88 para el policarbonato color bronce) con respecto al 39.04 presentado por el colector solar comercial.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] International Energy Agency. CO2 Emissions from Fuel Combustion Highlights. IEA Stat 2015:1–15. doi: <https://doi.org/10.1787/co2-table-2011-1-en>.
- [2] International Energy Agency. Excerpt from Renewables Information (2015 Edition) 2015:1–8.
- [3] Aman MM, Solangi KH, Hossain MS, Badarudin A, Jasmon GB, Mokhlis H, et al. A review of Safety, Health and Environmental (SHE) issues of solar energy system. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;41:1190–204. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.086>.
- [4] Tian Y, Zhao CY. A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Appl Energy* 2013;104:538–53. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.051>.
- [5] Arcos-Aviles D, Sotomayor D, Proano JL, Guinjoan F, Marietta MP, Pascual J, et al. Fuzzy energy management strategy based on microgrid energy rate-of-change applied to an electro-thermal residential microgrid. 2017 IEEE 26th Int. Symp. Ind. Electron., Edinburg, Scotland, UK: IEEE; 2017, p. 99–105. doi: <https://doi.org/10.1109/ISIE.2017.8001230>.
- [6] Pascual J, Sanchis P, Marroyo L. Implementation and Control of a Residential Electrothermal Microgrid Based on Renewable Energies, a Hybrid Storage System and Demand Side Management. *Energies* 2014;7:210–37. doi: <https://doi.org/10.3390/en7010210>.
- [7] Atia DM, Fahmy FH, Ahmed NM, Dorrah HT. Optimal sizing of a solar water heating system based on a genetic algorithm for an aquaculture system. *Math Comput Model* 2012;55:1436–49. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.10.022>.
- [8] Schütz T, Streblov R, Müller D. A comparison of thermal energy storage models for building energy system optimization. *Energy Build* 2015;93:23–31. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.031>.
- [9] Duffie JA, Beckman WA. Flat-Plate Collectors. *Sol. Eng. Therm. Process.* 4th ed., Hoboken, NJ, EEUU: John Wiley & Sons, Inc.; 2014, p. 236–65.
- [10] Pérez JM, Vilas JL, Laza JM, Arnáiz S, Mijangos F, Bilbao E, et al. Effect of reprocessing and accelerated ageing on thermal and mechanical polycarbonate properties. *J Mater Process Technol* 2010;210:727–33. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.12.009>.
- [11] Hwang DK, Moon JH, Shul YG, Jung KT, Kim DH, Lee DW. Scratch Resistant and Transparent UV-Protective Coating on Polycarbonate. *J Sol-Gel Sci Technol* 2003;26:783–7. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1020774927773>.
- [12] Slaman M, Griessen R. Solar collector overheating protection. *Sol Energy* 2009;83:982–7. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.01.001>.
- [13] Balakrishnan S, Neelakantan NR. Mechanical properties of blends of polycarbonate with unmodified and maleic anhydride grafted ABS. *Polym Int* 1998;45:347–52. doi: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0126\(199804\)45:43.O.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0126(199804)45:43.O.CO;2-R).
- [14] Rodríguez-Hidalgo MC, Rodríguez-Aumente PA, Lecuona A, Gutiérrez-Urueta GL, Ventas R. Flat plate thermal solar collector efficiency: Transient behavior under working conditions. Part I: Model description and experimental validation. *Appl Therm Eng* 2011;31:2394–404. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.04.003>.
- [15] Ceylan I. Energy and exergy analyses of a temperature controlled solar water heater. *Energy Build* 2012;47:630–5. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.040>.
- [16] Cozzini M, Pipicciello M, Fedrizzi R, Hassine I Ben, Pietruschka D, Söll R. Performance Analysis of a Flat Plate Solar Field for Process Heat. *Energy Procedia* 2016;91:11–9. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.164>.
- [17] Lorenzo E. Energy Collected and Delivered by PV Modules. In: Luque A, Hegedus S, editors. *Handb. Photovolt. Sci. Eng.*, Chichester, UK, UK: John Wiley & Sons, Ltd; 2011, p. 984–1042. doi: <https://doi.org/10.1002/9780470974704.ch22>.
- [18] Ko M. Analysis and Optimization Design of a Solar Water Heating System Based on Life Cycle Cost Using a Genetic Algorithm. *Energies* 2015;8:11380–403. doi: <https://doi.org/10.3390/en81011380>.
- [19] O'Hegarty R, Kinnane O, McCormack S. Efficiency Analysis of Flat Plate Collectors for Building Façade Integration. CISBAT 2015 Int. Conf. "Future Build. Dist. - Sustain. from Nano to Urban Scale, Lausanne, Switzerland: 2015, p. 735–40.
- [20] Duffie JA, Beckman WA. *Solar Engineering of Thermal Processes.* 4th ed. New Jersey, NJ, USA: 2013.
- [21] Klein SA. Calculation of flat-plate collector loss coefficients. *Sol Energy* 1975;17:79–80. doi: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(75\)90020-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(75)90020-1).
- [22] Agarwal VK. Convective heat losses in flat-plate collectors. *Int J Energy Res* 1984;8:297–301. doi: <https://doi.org/10.1002/er.4440080312>.
- [23] Raja Sekhar Y, Sharma K V., Basaveswara Rao M. Evaluation of Heat Loss Coefficients in Solar. *ARPN J Eng Appl Sci* 2009;4:15–9.
- [24] Agbo SN, Chijioke Okoroigwe E. Analysis of Thermal Losses in the Flat-Plate Collector of a Thermosyphon Solar Water Heater. *Res J Phys* 2007;1:35–41. doi: <https://doi.org/10.3923/rjp.2007.35.41>.
- [25] Watmuff, J. H., Charters, W. W. S., Proctor D. Solar and wind induced external coefficients - Solar collectors. *Coop Mediterr Pour l'Energie Solaire, Rev Int d'Heliotechnique* 1977:56.
- [26] Ziapour BM, Aghamiri A. Simulation of an enhanced integrated collector-storage solar water heater. *Energy Convers Manag* 2014;78:193–203. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.10.068>.
- [27] Akhtar N, Mullick S. Computation of glass-cover temperatures and top heat loss coefficient of flat-plate solar collectors with double glazing. *Energy* 2007;32:1067–74. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.07.007>.
- [28] Dagdougui H, Ouammi A, Robba M, Sacile R. Thermal analysis and performance optimization of a solar water heater flat plate collector: Application to Tétouan (Morocco). *Renew Sustain Energy Rev* 2011;15:630–8. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.010>.
- [29] Helio Confort. Silvasol 2007. http://www.helioconfort.com/catalogos/CATALOGO_TERMICO.pdf (accessed March 4, 2018).
- [30] Davis. Solar Radiation Sensor (6450) 2010:1–2. <https://www.davisnet.com/support/solar-radiation-sensor-6450/> (accessed March 4, 2018).
- [31] Almache J, Andrade S. Cellular polycarbonate solar collector 2016. https://www.youtube.com/watch?time_continue=137&v=-kblRbssgaw (accessed April 4, 2018).
- [32] Aislux. Ficha técnica Policarb-Policomp-Arcoplus 2011:8–15. <http://www.aisluxgalicia.com/cms/wp-content/uploads/2014/09/Ficha-t%E9cnica-Policarb-Policomp-Arcoplus.pdf> (accessed March 4, 2018).
- [33] ECOSUN. Calentadores solares para albercas n.d. <http://www.modulosolar.com.mx/ECOSUN/> (accessed January 5, 2018).

AGRADECIMIENTOS

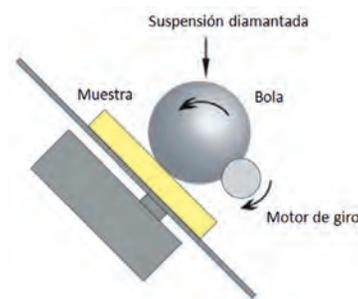
Este trabajo es parte del proyecto 2016-PIC-044 de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Un agradecimiento especial al Laboratorio de Energías Renovables del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, especialmente al Profesor José Guasumba.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

https://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/8767-1.pdf



Metodología de preparación superficial para la nanoindentación de recubrimientos de alta rugosidad



Surface preparation methodology for nanoindentation of high roughness coatings



Javier Martínez-de-Bujanda-Carasusán¹, José Fernández-Palacio¹, Eluxka Almandoz-Sánchez¹, Jonathan Fernández-de-Ara¹, Purificación Landa-Lazcano² y Gonzalo García-Fuentes¹

¹ Asociación de la Industria Navarra. Área de Tecnología de Superficies. Ctra. Pamplona, 1 - Edificio AIN - 31191 Cordovilla (España).

² Universidad del País Vasco. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao. Plaza Ingeniero Torres Quevedo, 1 - 48013 Bilbao (España).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8744> | Recibido: 16/02/2018 • Inicio Evaluación: 19/02/2018 • Aceptado: 11/05/2018

ABSTRACT

• This work presents a methodology for the preparation of the surface prior to nanoindentation tests that increases the precision of the results in rough surfaces. In applications where the maximum indentation size is dimensionally comparable with the specimen roughness, the accuracy and precision may be too poor. The developed methodology is focused on these cases.

The methodology has been developed for thin coatings that are harder than the substrate. It has been validated and applied on TiO₂ coatings deposited by PVD on Inconel® 718 and subjected to temperatures between 600 °C and 1100 °C, treatment that increases the specimen roughness. Modifying different parameters, it has been possible to analyse the improvement of the results due to the method and its uncertainty sources and to compare it with the usual nanoindentation technique.

• **Keywords:** Nanoindentation, thin layers, roughness, surface abrasion, PVD, titanium oxide.

RESUMEN

El presente trabajo muestra una metodología de preparación superficial previa a ensayos de nanoindentación que permite reducir las imprecisiones producidas por una rugosidad superficial excesiva. En aplicaciones en las que el tamaño máximo de indentación es dimensionalmente comparable con la rugosidad de la muestra, la dispersión y falta de exactitud de los resultados puede resultar excesiva. Son estos casos a los que se dirige la metodología desarrollada.

El desarrollo del método se ha realizado para capas finas en las que el recubrimiento presenta mayor dureza que el sustrato. Para ello, este se ha validado y aplicado utilizando recubrimientos PVD de TiO₂ depositados sobre Inconel 718, los cuales han sido posteriormente sometidos a temperaturas entre 600 °C y 1100 °C, produciéndose un aumento en la rugosidad de las muestras. Modificando diferentes parámetros del ensayo ha sido posible analizar la mejora en los resultados que aporta el procedimiento y sus fuentes de incertidumbre, y compararlo con la metodología habitual de nanoindentación.

Palabras clave: Nanoindentación, capas finas, rugosidad, abrasión superficial, PVD, óxido de titanio.

1. INTRODUCCIÓN

La medición de propiedades mecánicas en capas finas siempre ha resultado una difícil tarea debido a la influencia del sustrato en los resultados una vez que el indentador sobrepasa una penetración límite [1-3]. La nanoindentación, gracias a su preciso control del desplazamiento de la punta, del orden de nanómetros, permite la obtención de diversas propiedades de una capa, tales como dureza, módulo elástico o tenacidad a fractura, aislándolas de la influencia del sustrato.

Este es el caso de los recubrimientos finos para aplicaciones tribológicas, que a lo largo de las últimas décadas se han ido desarrollando, entre otras razones, para minimizar el desgaste de elementos en diferentes aplicaciones, y que emplean tecnologías de deposición como la deposición física en fase vapor (PVD). Actualmente es habitual utilizar en este campo recubrimientos cerámicos de espesor comprendido entre 0,5 y 10 μm basados en óxidos o nitruros de titanio, cromo, cromo-aluminio, etc.

Estos recubrimientos depositados sobre un sustrato metálico conforman un sistema de capa dura y sustrato blando. Al realizar indentaciones sobre estos sistemas es comúnmente aceptado que para aislar las propiedades mecánicas, y particularmente la dureza, de la capa respecto de las del sustrato, no se debe penetrar más de una décima parte del espesor total de aquella [4,5]. De esta forma se evita la deformación plástica del sustrato y, consecuentemente, su influencia en la obtención de resultados.

Por otra parte, en capas de espesor cercano o inferior a una micra, el estado superficial puede suponer un importante inconveniente en la obtención de resultados precisos, ya que la rugosidad puede ser de un orden similar a la profundidad de indentación. Grau et al. [6] concluyeron experimentalmente que para obtener valores de dureza por nanoindentación con desviación estándar inferior a un 10 % del valor obtenido, la rugosidad media aritmética (Ra) debía ser inferior una vigésima parte de la profundidad de indentación.

Esta problemática surge en los recubrimientos cerámicos sometidos a alta temperatura, superior a 500 °C, donde las transformaciones presentes en el recubrimiento generan un aumento de la rugosidad superficial que, combinado con el bajo espesor del mismo, dificultan la obtención de resultados precisos por nanoindentación. En estos casos es necesario definir la penetración del indentador según una solución de compromiso, que habitualmente consiste en ajustarse a la penetración máxima marcada por el espesor del sustrato en detrimento de una mayor variabilidad de los resultados.

En este artículo se presenta una metodología para la modificación superficial en un paso previo al ensayo de nanoindentación y su aplicación en recubrimientos TiO₂ depositados por PVD. El método se basa en la disminución de la rugosidad de la superficie mediante una abrasión controlada, con el fin de obtener resultados precisos de las propiedades mecánicas del recubrimiento. Anteriormente, otros autores han llevado a cabo métodos similares [7,9], si bien en ningún caso han sido validados ni se han analizado las incertidumbres que puedan generar. El análisis realizado en el presente estudio permite un mayor conocimiento de estas incertidumbres y una optimización de la metodología desarrollada.

2. PROCEDIMIENTO DESARROLLADO

2.1. MATERIALES UTILIZADOS

Los recubrimientos utilizados en el presente estudio consisten en capas de óxido de titanio formadas mediante PVD sobre un sustrato de Incone[®] 718, a través de la técnica de arco catódico. Tras la deposición, las muestras han sido sometidas a temperaturas de 600 °C, 700 °C, 800 °C, 900 °C, 950 °C, 1000 °C, 1050 °C y 1100 °C en atmósfera de aire durante 2 h, dejándose enfriar lentamente en el horno tras este periodo. La tabla 1 muestra la relación entre la temperatura de tratamiento de las muestras y los parámetros de espesor y rugosidad de los recubrimientos utilizados en el estudio, medidos mediante *calotest* e interferometría óptica, respectivamente. La nomenclatura establecida para las muestras se indica como la composición del recubrimiento (TiO₂) y la temperatura a la que se ha realizado el tratamiento térmico.

Siguiendo este procedimiento se han obtenido recubrimientos con una estructura de fases evolutiva en función de la temperatura de tratamiento, que reflejan el estado de los mismos en las aplicaciones a alta temperatura. Las fases presentes en la superficie de la muestra se han obtenido mediante difracción de rayos X (DRX), utilizando la técnica de incidencia rasante.

De estos recubrimientos, los sometidos a 800 °C se han utilizado en la etapa de desarrollo y validación del método de preparación superficial previo a nanoindentación. En el caso práctico de aplicación del método se han utilizado todos los recubrimientos mencionados anteriormente.

2.2. PREPARACIÓN SUPERFICIAL

El modo en el que una alta rugosidad condiciona los resultados de nanoindentación sobre capas finas [8,10] hace que, en muchos casos, sea necesario pulir la superficie previamente al ensayo. Un pulido plano implica una abrasión no controlada del recubrimiento, que abarca toda la superficie de la muestra y que, en el caso

de capas de espesor cercano a una micra, es muy probable que dé lugar a una reducción excesiva del espesor. Por ello, en este estudio se ha realizado una preparación superficial previa al ensayo a través de una abrasión controlada con el equipo *calotest*.

El *calotest* es un equipo utilizado para generar un desgaste puntual en una superficie a partir del giro de una esfera metálica de diámetro conocido (Fig. 1). Con el objeto de promover una abrasión de la capa se introduce, entre la esfera y la superficie a erosionar, unas gotas de dispersión de partículas de diamante, a la vez que el tiempo de erosión y la velocidad de giro de la esfera son previamente definidos. La fricción entre los tres cuerpos erosiona la muestra, creando un cráter con forma de casquete esférico de gran diámetro en relación a la profundidad (Fig. 2) y de muy baja rugosidad. Esta es la superficie sobre la que se realizan posteriormente las indentaciones. El tamaño del cráter puede controlarse actuando sobre los parámetros del proceso, de manera que la profundidad de abrasión sea muy superficial y no se traspase la capa.

Un primer parámetro a tener en cuenta es el tamaño de partícula de la suspensión diamantada. Al disminuir este, también lo hacen la tasa de erosión y la rugosidad obtenida tras el pulido.

Otro parámetro es el ángulo de inclinación de los puntos donde posteriormente se va a indentar. De acuerdo a Kashani y Madhavan [11], la exactitud de los resultados de indentación disminuye al inclinar el plano de indentación a causa de variación de la forma de la huella, sobreestimando la dureza y el módulo elástico del material. Con el objetivo de minimizar la pendiente del cráter, se deben utilizar esferas del mayor diámetro posible, de manera que el cráter generado tenga poca profundidad en relación a su radio.

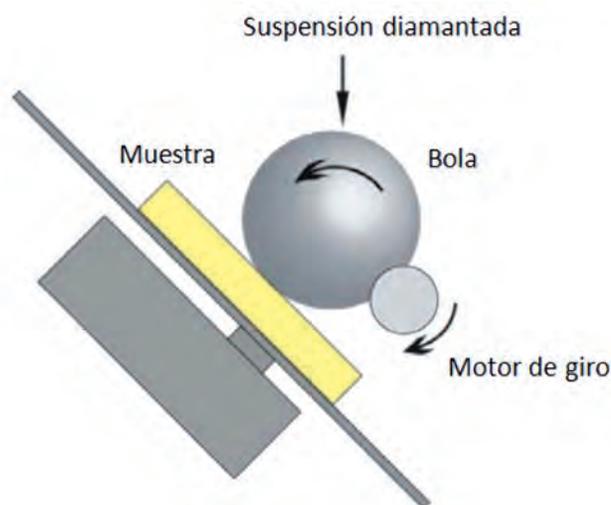


Fig. 1: Esquema de funcionamiento del equipo *calotest*

2.3. NANOINDENTACIÓN

Para realizar un estudio en el que las indentaciones sean comparables, es necesario que todas ellas se encuentren en zonas de igual inclinación y profundidad con respecto a la superficie inicial de la muestra. Esto se consigue creando patrones circulares concéntricos al cráter que marcan las posiciones donde se realizarán las indentaciones (Fig. 2). Estas posiciones se encuentran equiespaciadas a lo largo del patrón circular, respetando la distancia mínima entre indentaciones marcada por la norma UNE-EN ISO 14577-1:2016 [12], estipulada como cinco veces el diámetro del círculo circunscrito de la indentación.

Conocida la profundidad de indentación, es posible obtener la zona en la que se pueden realizar las nanoindentaciones según se cumpla o no la regla del 10% (Fig. 3). Si el cráter es muy profundo,

Designación	T tratamiento térmico (°C)	Ra (nm)	Espesor (µm)
TiO ₂ _0	Sin tratamiento térmico	83 ± 15	2,7
TiO ₂ _600	600	122 ± 24	2,5
TiO ₂ _700	700	159 ± 9	3,0
TiO ₂ _800	800	167 ± 11	3,0
TiO ₂ _900	900	222 ± 39	0,6
TiO ₂ _950	950	214 ± 7	0,9
TiO ₂ _1000	1000	272 ± 20	1,0
TiO ₂ _1050	1050	318 ± 12	5,9
TiO ₂ _1100	1100	502 ± 36	4,0

Tabla 1: Parámetros correspondientes a los recubrimientos depositados. Los valores de Ra se muestran como valor medio ± desviación estándar

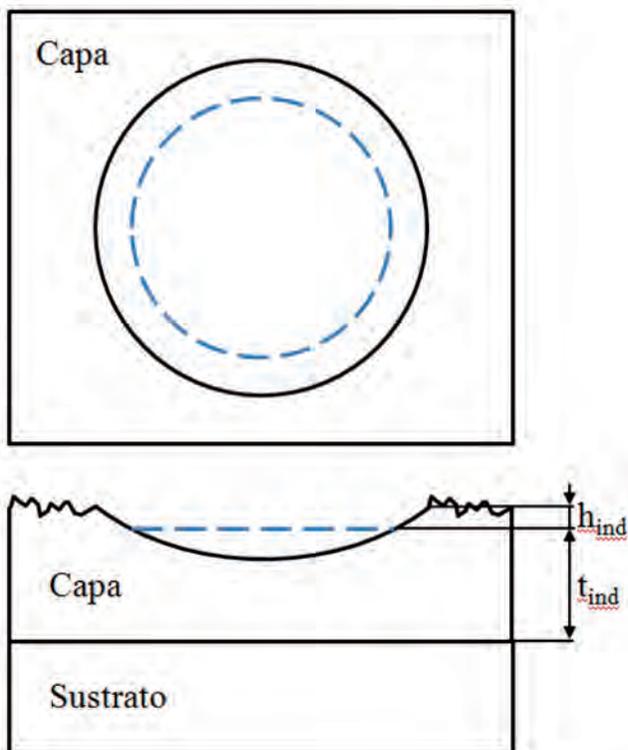


Fig. 2: Esquema del cráter creado mediante calotest y patrón de indentaciones en el mismo, indicado en línea discontinua. Plano cenital (arriba) y sección transversal (abajo). h_{ind} marca la cota a la que se realizan las indentaciones con respecto a la superficie original y t_{ind} el espesor remanente de la capa bajo esta cota

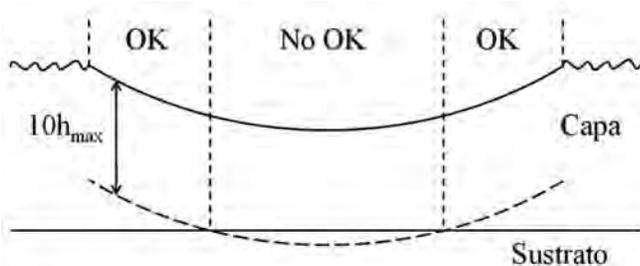


Fig. 3: Zonas en las que se pueden realizar las indentaciones. Se consideran no válidas la superficie inicial, de alta rugosidad, y la zona del cráter con un espesor de capa inferior a 10 veces la penetración máxima del indentador (h_{max}), espesor marcado por la línea discontinua paralela al cráter

esta regla únicamente se cumplirá en la zona más externa del mismo.

En el estudio realizado, los valores de espesor inicial de la capa se han obtenido mediante calotest, y la cota del patrón de indentación se ha determinado tras la obtención de un mapa tridimensional de la superficie del cráter mediante microscopía interferométrica.

La curva carga-desplazamiento de cada indentación presenta una primera fase de incremento lineal de carga de 5 s hasta carga máxima, una segunda fase de mantenimiento de carga durante 2 s que da cuenta de la fluencia del material, y una tercera fase de disminución lineal de carga hasta 0 mN en 5 s. Estas indentaciones se han realizado utilizando una punta de geometría Berkovich.

Tras una primera fase de evaluación en la que se realizó un barrido de cargas entre 500 μN y 10 mN, se estableció que la carga óptima que permitía penetrar de manera suficiente la capa y obtener las propiedades de la misma sin influencia del sustrato era de 5 mN.

Posteriormente a la nanoindentación, se analizaron las curvas carga-desplazamiento obtenidas mediante el método de Oliver y Pharr [13] para extraer los valores medios de dureza y de módulo de elasticidad de las capas.

3. VALIDACIÓN DEL PROCEDIMIENTO

3.1. INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD

3.1.1. Procedimiento experimental

La influencia de la rugosidad en el método se ha determinado mediante la realización de ensayos de nanoindentación en zonas de diferente acabado superficial, siguiendo la metodología desarrollada en los apartados 2.2 y 2.3. Para ello, se han realizado mediante calotest dos cráteres sobre el recubrimiento TiO_2 -800 con una esfera de 30 mm de diámetro y suspensiones diamantadas de diferente tamaño de partículas: una de granulometría comprendida entre 0,5 μm y 1 μm y otra de granulometría inferior a 0,2 μm .

La nanoindentación se ha realizado tanto en los dos cráteres como en la superficie inicial de la muestra, superficies que presentan una rugosidad mostrada en la tabla 2. En cada una de estas zonas se han realizado un total de 60 indentaciones a igual carga y equiespaciadas en un patrón circular concéntrico al cráter.

3.1.2. Resultados y discusión

Los resultados de rugosidad de las tres zonas analizadas y los correspondientes a los ensayos de nanoindentación se muestran en la Tabla 2.

Uno de los factores que se han tenido en cuenta en la comparación entre zonas es el número de curvas que presentan anomalías evidentes al representarse las curvas carga-desplazamiento (Fig. 4). Estas anomalías pueden deberse a diferentes tipos de fallo de la capa: fallos de adhesión entre la capa y el sustrato [3], presencia y formación de grietas en la capa [2,14], micro gotas en el recubrimiento que se sueltan al indentar sobre ellas, contaminación sobre la capa o sobre la punta [8], etc. En la tabla 2 se observa que el porcentaje de indentaciones sin fallo varía de forma importante entre el cráter obtenido con la suspensión diamantada más fina y las otras dos zonas de mayor rugosidad. Esto se asocia a que el relieve más abrupto de la superficie de indentación en las zonas de mayor rugosidad facilita la formación de grietas en la capa depositada, así como la contaminación de la superficie, en relación a superficies de menor rugosidad.

Analizando los resultados de profundidad de indentación (h_{max}), dureza (H) y módulo elástico reducido (E_r) de la tabla 2, se aprecia que los valores más precisos corresponden, en todos los casos, al cráter obtenido con suspensión diamantada fina. Ese es el único caso en el que la penetración máxima supera el valor de Ra en más de un orden de magnitud.

	Ra (nm)	h_{max} (nm)	H (GPa)	E_r (GPa)	Indent. sin fallo (%)
Cráter 0,2 μm	8 ± 3	126 ± 8	$14,5 \pm 1,5$	176 ± 10	88
Cráter 0,5-1 μm	88 ± 3	130 ± 21	$14,3 \pm 3,8$	179 ± 38	40
Superficie inicial	167 ± 15	148 ± 14	$10,9 \pm 1,7$	167 ± 16	42

Tabla 2: Parámetros de la capa y resultados de nanoindentación sobre superficies de diferente rugosidad. h_{max} , H y E_r mostrados como valor medio \pm desviación estándar

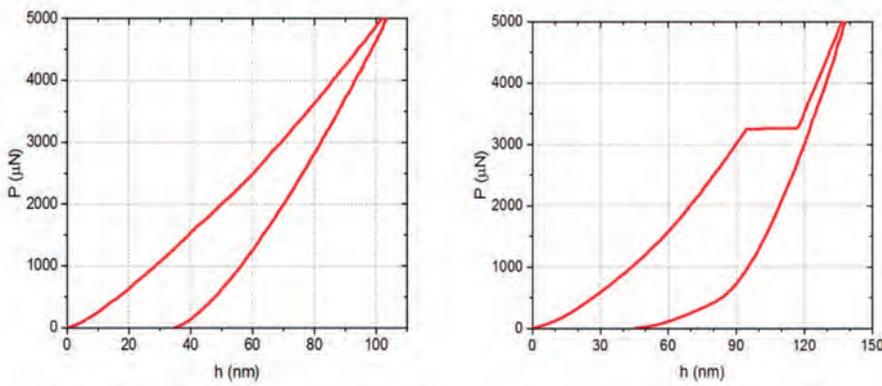


Fig. 4: Curva carga-desplazamiento sin fallo (izda.) y con fallo por rotura de capa (dcha.). En la segunda se aprecia un desplazamiento brusco sin apenas variación en la carga en el momento de la rotura

do con la primera esfera se obtienen zonas de mayor inclinación que en el generado con la segunda.

Se han realizado nanoindentaciones en cuatro patrones de diferente inclinación, repartidas entre los dos cráteres: 0,03°, 0,24°, 0,45° y 1,06°. El número de indentaciones por patrón es de 40, excepto en el de menor ángulo, donde sólo se han realizado 10 para evitar influencia entre indentaciones. El esquema de carga es el mismo que el definido en el apartado 2.3.

3.2. INFLUENCIA DE LA INCLINACIÓN

3.2.1. Procedimiento experimental

La influencia de la inclinación en el método se ha determinado mediante la realización de ensayos de nanoindentación en zonas de diferente inclinación de dos cráteres diferentes sobre la muestra TiO_2 -800, siguiendo la metodología desarrollada en los apartados 2.2 y 2.3. Ambos cráteres se han obtenido mediante *calotest* con una solución diamantada de partículas inferiores a 0,2 μm . La diferencia entre ambos es la esfera utilizada, siendo esta de 15 mm y 30 mm de diámetro. De esta forma, en el cráter genera-

3.2.2. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos de la nanoindentación se muestran en la tabla 3. En ella no es posible apreciar ninguna tendencia para los valores medios de h_{max} , H y E_r en función de las inclinaciones tomadas, ni tampoco del porcentaje de indentaciones sin fallo. Sin embargo, sí se aprecia un ligero aumento de la dispersión de los valores al aumentar la inclinación. Por lo tanto, la inclinación de la superficie del cráter cuando esta se encuentra en valores cercanos o inferiores a 1° no genera una pérdida de exactitud apreciable, como indican Kashani y Madhavan [11], pero sí una disminución en la precisión de los resultados. Para evitar la imprecisión por la inclinación del cráter, las indentaciones en el interior los mismos

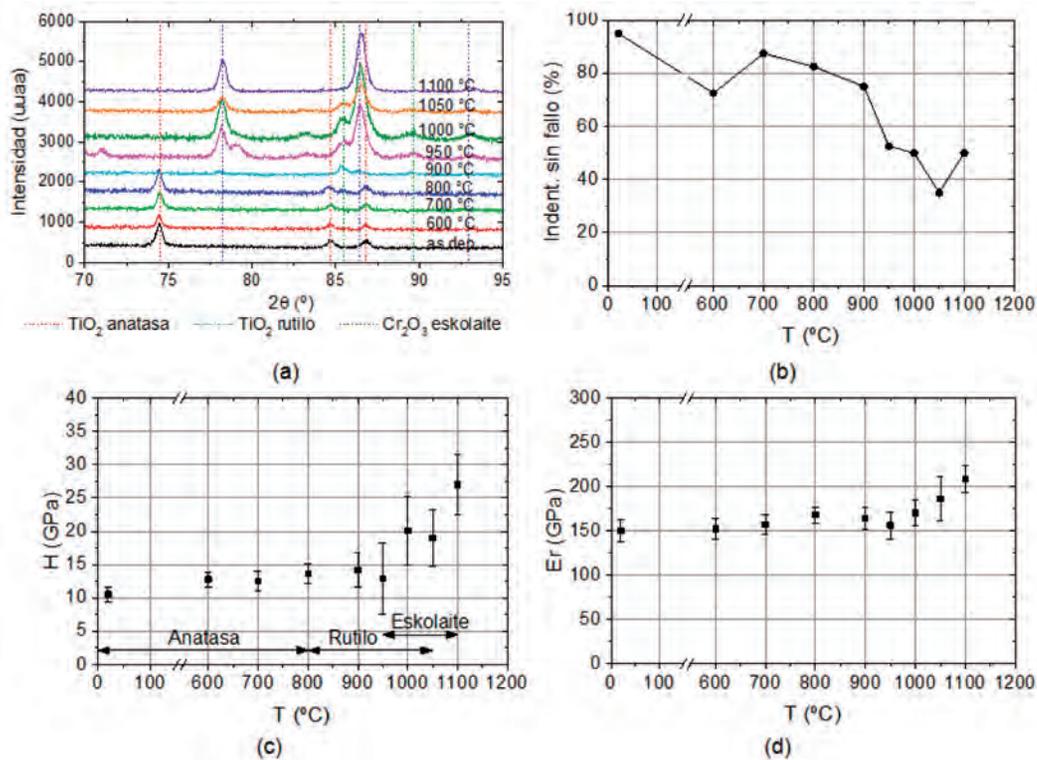


Fig. 5: Espectros de difracción de rayos X (a), número de indentaciones sin fallo (b), dureza (c) y módulo elástico reducido (d) de las muestras recubiertas con TiO_2 y tratadas a diferentes temperaturas. El gráfico (c) muestra las fases presentes a las diferentes temperaturas de tratamiento

Inclinación (°)	h_{max} (nm)	H (GPa)	E_r (GPa)	Indent. sin fallo (%)
0,03±0,03	126±4	14,3±0,9	175±6	80
0,24±0,03	125±6	14,7±1,4	174±8	82
0,45±0,07	130±7	13,6±1,5	168±9	92
1,06±0,09	126±10	14,4±1,8	176±15	85

Tabla 3: Resultados de nanoindentación sobre superficies de diferente inclinación. h_{max} , H y E_r mostrados como valor medio ± desviación estándar

deben realizarse en la zona de menor pendiente que cumpla la regla empírica del 10 %.

4. CASO PRÁCTICO. RECUBRIMIENTOS DE TiO₂

Los recubrimientos finos depositados mediante PVD, tras someterlos a altas temperaturas y provocar transformaciones en los compuestos presentes, dan lugar habitualmente a superficies de rugosidad elevada para obtener sus propiedades mecánicas mediante nanoindentación. Por ello, se ha aplicado el método desarrollado a recubrimientos de TiO₂ depositados por deposición física en fase vapor y sometidos posteriormente a temperaturas comprendidas entre 600 °C y 1100 °C.

A todas las muestras se les han realizado 40 indentaciones repartidas en 2 cráteres, utilizando para la abrasión una esfera de 30 mm de diámetro y una suspensión diamantada de partículas de tamaño inferior a 0,2 μm. Los parámetros de abrasión del *calotest* se han regulado para obtener cráteres comprendidos entre 250 μm y 300 μm de diámetro. Así mismo, se ha obtenido espectros de difracción de rayos X para observar las transformaciones de fase presentes y correlacionarlas con los resultados obtenidos por nanoindentación. Los resultados de ambos ensayos se muestran en la fig. 5.

Los resultados de DRX (Fig. 5(a)) muestran que la fase presente en la muestra sin tratar térmicamente corresponde a la fase anatasa del TiO₂. En las muestras tratadas hasta 800°C no se aprecian variaciones, pero al tratar a 900°C el TiO₂ sufre un reordenamiento cristalino para formar la fase rutilo. A tratamientos térmicos a temperatura superior a 1000 °C ocurre una degradación del TiO₂ para dejar paso a una capa de Cr₂O₃ en forma *eskolaite*, proveniente de la oxidación del cromo del sustrato que ha difundido a la superficie.

En referencia a los resultados obtenidos por nanoindentación se observa que, si bien el porcentaje de curvas sin fallo es alto para los ensayos sobre muestras tratadas hasta 900°, superior a, 70 %, este disminuye a valores comprendidos entre el 30 % y el 50 % tras el cambio de fase. A pesar de la disminución de este parámetro, este ha sido suficiente para poder obtener resultados de dureza y módulo elástico mediante la metodología desarrollada.

La evolución de la dureza y el módulo elástico se muestra en la fig. 5(c) y fig. 5(d), apreciando un aumento escalonado en los cambios de fase. Ambos parámetros aumentan notablemente al aparecer el *eskolaite*, alcanzando los valores máximos de 27 GPa y 208 GPa al tratar térmicamente a 1100 °C.

Los valores de dureza obtenidos para las diferentes fases encontradas en la superficie son: 13 GPa para la anatasa, 19 GPa para el rutilo y 25 GPa para el *eskolaite*. Estos valores son similares a los encontrados en bibliografía [15-16], si bien se puede encontrar un gran abanico de valores según la técnica y las condiciones de deposición utilizadas [17-20].

5. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un método que permite conseguir una mayor precisión en las medidas de nano-indentación sobre sistemas de capa dura de alta rugosidad y sustrato blando. Esto se ha conseguido mediante una erosión controlada de la superficie mediante *calotest* y utilizando una suspensión de diamante de tamaño de partícula inferior a 0,2 μm, obteniendo un cráter de poca profundidad y muy baja rugosidad.

La inclinación de la superficie del cráter tiene influencia en la precisión de los resultados obtenidos. Realizando ensayos si-

milares en patrones de 0,03° y 1,06° de inclinación, la desviación estándar de los resultados de dureza y módulo elástico obtenidos en el segundo se ve multiplicada por 2. Por tanto, la realización de las indentaciones en la zona de menor inclinación del cráter aporta mayor precisión a los resultados.

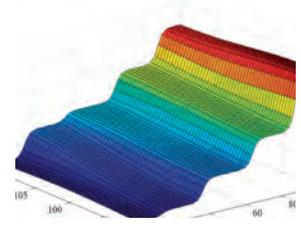
Los ensayos realizados han servido para comprobar que el método desarrollado es válido, mejorando los resultados obtenidos en nanoindentación de capas finas de alta rugosidad que siguen un esquema de capa dura y sustrato blando.

Tras aplicar el método desarrollado a muestras de TiO₂ sometidas a tratamientos térmicos entre 600 °C y 1100 °C con superficies con Ra entre 80 nm y 500 nm, se ha observado un aumento de la dureza y módulo elástico reducido al aumentar la temperatura de tratamiento, el cual se maximiza a partir de 1000 °C tras la formación de óxidos de cromo proveniente del sustrato (Inconel® 718). Los valores iniciales son de H=10,6 GPa y E_r=150 GPa, y los máximos, al tratar a 1100 °C, son de H=27,8 GPa y E_r=208 GPa.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Korsunsky A.M., McGurk M.R., Bull S.J. et al. "On the hardness of coated systems". Surf. Coatings Technol. Vol.99 p.171-183. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(97\)00522-7](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(97)00522-7)
- [2] Page T.F., Hainsworth S.V. "Using nanoindentation techniques for the characterization of coated systems: a critique". Surf. Coatings Technol. Vol.61 p.201-208. DOI: [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(93\)90226-E](https://doi.org/10.1016/0257-8972(93)90226-E)
- [3] Fischer-Cripps A.C. Nanoindentation. 3ª edición. Springer-Verlag New York, 2011. 282 p. ISBN:978-1-4614-2960-9
- [4] Tabor D. The Hardness of Metals. Oxford University Press, New York, 1951
- [5] Saha R., Nix W.D. "Effects of the substrate on the determination of thin film mechanical properties by nanoindentation". Acta Mater. Vol.50 p.23-38. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(01\)00328-7](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(01)00328-7)
- [6] Grau P., Ullner C., Behncke H.H. "Uncertainty of depth sensing hardness. Effect of roughness". Materialprüfung. Vol.39 p.362-367.
- [7] Nitti M.A., Cicala G., Brescia R. et al. "Mechanical properties of MWPECVD diamond coatings on Si substrate via nanoindentation". Diam. Relat. Mater. Vol.20 p.221-226. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2010.12.002>
- [8] Demas N.G., Lorenzo-Martin C., Ajayi O.O. et al. "Measurement of Thin-film Coating Hardness in the Presence of Contamination and Roughness: Implications for Tribology". Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci. Vol.47 p.1-12. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3342-9>
- [9] Vašina P., Soucek P., Schmidtová T. et al. "Depth profile analyses of nc-TiC/a-C:H coating prepared by balanced magnetron sputtering". Surf. Coatings Technol. Vol.205 p.S53-S56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.02.038>
- [10] Laurent-Brocq M., Béjanin E., Champion Y. "Influence of roughness and tilt on nanoindentation measurements: A quantitative model". Scanning. Vol.37 p.350-60. DOI: <https://doi.org/10.1002/sca.21220>
- [11] Kashani M.S., Madhavan V. "Analysis and correction of the effect of sample tilt on results of nanoindentation". Acta Mater. Vol.59 p.883-895. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.09.051>
- [12] Ensayo de penetración monitorizado para la determinación de la dureza y otros parámetros de los materiales. Parte 1: método de ensayo, (2016).
- [13] Oliver W.C., Pharr G.M. "An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments". J. Mater. Res. Vol.7 p.1564-1583. DOI: <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564>
- [14] Whitehead A.J., Page T.F. "Nanoindentation studies of thin film coated systems". Thin Solid Films. Vol.220 p.277-283. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(92\)90585-Y](https://doi.org/10.1016/0040-6090(92)90585-Y)
- [15] Bendavid A., Martin P.J., Takikawa H. "Deposition and modification of titanium dioxide thin films by filtered arc deposition". Thin Solid Films. Vol.360 p.241-249. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(99\)00937-2](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(99)00937-2)
- [16] Hones P., Diserens M., Lévy F. "Characterization of sputter-deposited chromium oxide thin films" Surf. Coatings Technol. Vol.120-121 p.277-283. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00384-9](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00384-9)
- [17] Kaczmarek D., Domaradzki J., Wojcieszak D. et al. "Hardness of Nanocrystalline TiO₂ Thin Films". J. NANO Res. Vol.18-19 p.195-200. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.18-19-195>
- [18] Kaczmarek D., Wojcieszak D., Domaradzki J. "Influence of nanocrystalline structure and composition on hardness of thin films based on TiO₂". Cent. Eur. J. Phys. Vol.9 p.349-353. DOI: <https://doi.org/10.2478/s11534-010-0112-y>
- [19] Abu-Shgair K., Abu-Safe H.H., Aryasomayajula A. et al. "Characterizing crystalline chromium oxide thin film growth parameters". Rev. Adv. Mater. Sci. Vol.24 p.64-68. http://194.226.210.10/e-journals/RAMS/no_12410/abu-shgair2.pdf
- [20] Khojier K., Savaloni H., Ashkabi Z. et al. "Structural, mechanical and tribological characterization of chromium oxide thin films prepared by post-annealing of Cr thin films". Appl. Surf. Sci. Vol.284 p.489-496. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.07.123>

Optimización de resistencia a la tensión en piezas de poliamida-6 moldeadas por inyección usando técnicas de redes neuronales y programación no lineal



Optimization of tensile strain on injection molded polyamid-6 parts by neural networks and nonlinear programming techniques

Jaime Navarrete-Damián¹, Mario Calderón-Ramírez¹, Roberto Zitzumbo-Guzmán² y José-Francisco Louvier-Hernández³

¹ CRODE Celaya. Departamento de Diseño. Diego Arenas Guzmán #901, Fracc. Zona de Oro 1, C.P. 38020, Celaya, Guanajuato (México).

² CIATEC A. C. Departamento de Materiales. Omega 201, Fracc. Delta, C.P. 37545, León, Guanajuato (México).

³ Instituto Tecnológico de Celaya. Departamento de Química. Antonio García Cubas Pte. 600 esq. Av. Tecnológico, 38010 Celaya, Guanajuato (México).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8691> | Recibido: 20/12/2017 • Inicio Evaluación: 17/01/2018 • Aceptado: 10/04/2018

ABSTRACT

The objective of this research is optimize tensile stress of injection molded parts of polyamide-6 to establish process conditions that maximize tensile strength of parts in a real industrial process. The methodology consisted in development of essays based on I-optimal experimental design in order to get a data base. Four parameters were considered as inputs: injection holding pressure, injection time holding, % wt virgin material and % wt recycled material. Measurement of maximum tensile stress in parts was made according to ISO 527-1 standard.

Three models were developed by the techniques Response Surface Methodology, Back Propagation Neural Network and Generalized Regression Neural Network to predict parts maximum tensile stress. Finally, the best model (lowest forecasting error) was optimized by Trust Region Method Based on Interior Point Techniques for Nonlinear Programming to maximize tensile strength.

This proposed methodology is capable for modeling the process with low error and for establish process conditions to obtain the maximum tensile stress on molded parts.

Keywords: Plastic Injection Molding; Tensile stress; Polyamid-6; Response Surface; Backpropagation Neural Network; Generalized Regression Neural Network; Nonlinear programming.

RESUMEN

Esta investigación tiene por objeto optimizar la resistencia a la tensión en piezas de poliamida-6 moldeadas por inyección para establecer las condiciones que permitan maximizar el esfuerzo de tensión de piezas en un proceso industrial real. La metodología consistió en el desarrollo de ensayos basados en un diseño de experimentos tipo I-óptimo, para generar una base de datos. Se consideraron cuatro parámetros de entrada: presión de sostenimiento de inyección, tiempo de sostenimiento de inyección, % de material virgen y % de material reciclado. Las mediciones del esfuerzo máximo de tensión en las piezas se realizaron bajo la norma ISO 527-1.

Fueron desarrollados tres modelos con las técnicas Superficie de Respuesta, Red Neuronal Back Propagation y Red Neuronal de Regresión Generalizada para predecir el esfuerzo máximo de tensión. Finalmente se optimizó el modelo con el menor error mediante la técnica de región de confianza basado en técnicas

de punto interior para programación no lineal, para maximizar la resistencia a la tensión.

Con esta propuesta metodológica es posible modelar el proceso con bajo error y establecer las condiciones que permiten alcanzar el máximo esfuerzo a la tensión de las piezas inyectadas.

Palabras clave: Moldeo por inyección de plásticos; Esfuerzo de tensión; Poliamida-6; Superficie de Respuesta; Red Neuronal de Retro-propagación; Red Neuronal de Regresión Generalizada; Programación no lineal.

1. INTRODUCCIÓN

El esfuerzo máximo de tensión en piezas moldeadas por inyección es una característica de calidad importante para la industria automotriz, por ejemplo, en engranes de poliamida-6 (PA6) utilizados en motores de arranque automotriz, posiblemente debido a los esfuerzos que soportan durante su uso. La empresa mexicana Troquelados Rex, S.A. de C.V. fabrica estos engranes y busca identificar el efecto de mezclar material reciclado con virgen en el esfuerzo de tensión, y saber si esta propiedad es afectada por las variables Presión y Tiempo de sostenimiento del proceso; esto motivó el presente estudio, para su aplicación en un proceso industrial real. Esta investigación compara el desempeño de tres técnicas para modelar y predecir el efecto de las variables de proceso y de mezcla de materiales en el esfuerzo máximo de tensión; el modelo con el mejor desempeño se optimizó mediante la técnica Región de confianza basado en técnicas de punto interior para programación no lineal, buscando que el conocimiento obtenido pueda ser utilizado por los ingenieros de proceso de la empresa.

El moldeo por inyección es el proceso industrial más importante en la manufactura de productos de plástico [1]. Las propiedades mecánicas de una pieza inyectada pueden ser influenciadas, tanto por los materiales como por las condiciones de proceso. Es importante para la industria establecer correctamente estas variables para fabricar productos con mejor calidad, sin embargo, generalmente se utiliza el método de prueba y error para definir sus condiciones, aunque este método requiere gran cantidad de pruebas y de tiempo, además, no asegura encontrar las condiciones óptimas deseadas. Existe necesidad de contar con herramientas confiables para modelar y evaluar mediante simulación, diferentes escenarios en el proceso, además de optimizar las condiciones de procesamiento y de mezcla de materiales para mejorar la calidad de las piezas. Un método confiable para determinar esas condiciones se convierte en la clave para mejorar la calidad.

Han sido publicadas diversas técnicas para modelar y optimizar el proceso de moldeo por inyección de plásticos (PIM), algunas aprovechan la gran capacidad de los computadores actuales, como las basadas en redes neuronales artificiales, con buen desempeño en sistemas complejos, no lineales y con cierto nivel de imprecisión [2], como la mayoría de los procesos industriales. Diversos estudios proponen métodos para simular y optimizar los efectos de parámetros del PIM.

Una investigación [3] utilizó redes neuronales con función de base radial (RBFNN) para analizar distorsiones en piezas inyectadas de polipropileno y propone un método de modelación-optimización combinando RBFNN con programación cuadrática secuencial (SQP); generó datos a partir de un diseño de experimentos (DOE) Taguchi considerando factores de proceso para minimizar distorsiones; comparó el desempeño del método propuesto contra el DOE Taguchi usando el error cuadrático medio (MSE); las RBFNN mostraron un mejor desempeño.

Varios estudios han aplicado redes neuronales *back propagation* (BPNN) para modelar el PIM; [2] combinó este método con un sistema de inferencia adaptativo neuro-difuso (ANFIS) para predecir propiedades mecánicas de composites de poliamida-6 mezclando elastómero EPR-g-MA y fibra de vidrio, considerando parámetros del proceso y concentración de componentes en la mezcla. Sus predicciones se adaptaron bien a datos experimentales con baja raíz del error cuadrático medio (RMSE). Otro estudio, [4] propone una combinación de BPNN con algoritmos genéticos (GA) minimizando la contracción; considera 5 parámetros de proceso. Los autores generaron una base de datos para entrenamiento. El modelo demostró buenas predicciones. De forma similar [5], [6] y [7] aplicaron BPNN considerando parámetros de proceso y optimizando la calidad de piezas inyectadas; en [5] optimizaron el peso, en [6] minimizaron el combado; [7] optimizó longitud y peso; estos tres estudios calcularon el error de predicción y encontraron buen desempeño de la BPNN para modelar y predecir el PIM. Por su parte, [8] combinó BPNN con mapas auto-organizables (SOM) como sistema dinámico de predicción de combado en el PIM comparando su desempeño (midiendo RMSE) contra una BPNN simple; su propuesta mostró mejor desempeño.

Investigadores han utilizado DOE para estudiar el PIM, como [9] que comparó la predicción de un modelo de superficie de respuesta (RSM) contra una BPNN mediante el MSE evaluando rugosidad superficial en un molde de inyección. Consideraron tres variables de maquinado; la BPNN presentó mejor predicción que la RSM. Por otra parte, [10] propone un método de optimización adaptativa basado en BPNN con función de expectativa de mejora para piezas de PC/ABS, utilizando un DOE Hipercubo Latino para integrar la base de datos de entrenamiento; definieron condiciones para minimizar combado.

Se han estudiado propiedades mecánicas de piezas inyectadas con PA6 (Nylon); [11] analizaron propiedades de tribología en piezas de PA6 pura y reforzada con fibras, optimizaron algunos parámetros del ensayo de tribología mediante hibridación del método Taguchi, *Gray Relational Analysis* y el algoritmo de búsqueda Cukoo, identificando la significancia estadística de los factores y minimizando el coeficiente de fricción y la tasa de desgaste. Por otra parte, [12] aplicó BPNN para predecir propiedades mecánicas y de desgaste por fricción en composites de poliamida reforzados con fibras, optimizando el desempeño de diversas configuraciones de red y concentración de fibras mediante el error y tiempo de cómputo; encontraron que la predicción puede mejorar si la base de datos para entrenamiento se agranda o si es optimizada la configuración de red.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación propone una metodología con cuatro etapas: 1, se prepararon mezclas con distintas concentraciones de material y se inyectaron especímenes variando parámetros de operación del PIM, determinando esfuerzo de tensión y registrando la información; 2, utilizando los datos experimentales se plantearon tres modelos matemáticos: red neuronal de regresión generalizada (GRNN), BPNN y RSM para relacionar las entradas con la respuesta; 3, se seleccionó el modelo que predice mejor; 4, este modelo se combinó con un algoritmo de optimización, para obtener el nivel de componentes de la mezcla y de parámetros de proceso ideales para maximizar la resistencia a la tensión.

2.1. INYECCIÓN DE ESPÉCIMENES

Se fabricaron probetas de Poliamida-6 en una inyectora Demag-Ergotech 50-270, las corridas experimentales se basaron en un DOE tipo I-óptimo combinado (incluye factores de mezcla y de proceso) aleatorizado, con tres réplicas, utilizando el software DesignExpert; los diseños I-óptimos minimizan la varianza promedio de predicción y se consideran apropiados para experimentos con mezclas; se utilizó este diseño generado por computador porque reduce el número de corridas localizando los puntos de forma óptima.

Los experimentos fueron desarrollados en la planta de Troquelados Rex, garantizando que la información proviene de un entorno de aplicación industrial práctico. Para preparar el material, se pesaron y mezclaron los lotes hasta su completa homogeneización; las probetas se inyectaron purgando el equipo con cada

Experimento	% Poliamida Virgen	% Poliamida Reciclado	Presión de sostenimiento (MPa)	Tiempo de sostenimiento (s)
1	100	0	90	1
2	25	75	110	2
3	50	50	110	1
4	100	0	90	3
5	0	100	110	1
6	25	75	90	2
7	50	50	90	3
8	50	50	110	1
9	50	50	90	1
10	0	100	110	3
11	100	0	110	1
12	50	50	110	3
13	50	50	110	3
14	0	100	90	3
15	75	25	100	2
16	0	100	90	1
17	50	50	110	1
18	25	75	100	3
19	100	0	110	3
20	50	50	90	3
21	0	100	100	1.5
22	50	50	90	1
23	75	25	110	2
24	75	25	90	2
25	75	25	100	3
26	66	33	100	3
27	66	33	100	1
28	66	33	90	1
29	66	33	90	3
30	66	33	110	1
31	66	33	110	3

Tabla 1: Parámetros de entrada y sus niveles. El fondo gris muestra las corridas de corroboración

cambio de material. Se descartaron las primeras 10 piezas de cada corrida para permitir que el proceso alcanzara un estado estable. Las probetas se mantuvieron a 22 grados Celsius durante 48 horas antes de medir su resistencia a la tensión.

La Tabla 1 presenta el plan experimental con los factores y niveles considerados; se expandió con 3 repeticiones para agregar más corridas y tener información más detallada del comportamiento del proceso, sumando 75 pruebas para entrenamiento de los modelos. El nivel 1.5 s del tiempo de sostenimiento (corrida 21), aparentemente anómalo, fue definido automáticamente por el software del método I-óptimo mediante puntos adicionales (que pueden ser centrales, axiales o medios) para obtener la máxima información. Para mayor certeza estadística, se realizaron 17 pruebas adicionales (con concentraciones de mezcla diferentes a las utilizadas en las corridas de entrenamiento), definidas bajo un criterio empírico, buscando que fueran distintas a las de entrenamiento para corroborar las predicciones de los modelos, totalizando 92 probetas experimentales. Todos los demás factores involucrados en el PIM se mantuvieron fijos durante los experimentos. Los especímenes fueron ensayados a tensión en una máquina universal Zwick/Roell-Z050, con una celda de carga de 5 kN, utilizando mordazas de cierre mecánico a velocidad constante de 50 mm/min; se utilizó un extensómetro de largo recorrido con longitud inicial 50 mm; las mediciones se realizaron bajo el estándar

ISO527-1, obteniendo el esfuerzo máximo de tensión de los datos de la curva esfuerzo-deformación; todas las mediciones se desarrollaron bajo las mismas condiciones.

Los factores de concentración porcentual en peso de PA6 virgen y reciclada se consideraron para conocer si la mezcla afecta la resistencia de tensión: por la degradación del material reciclado se esperaría que a mayor concentración de material reciclado disminuya la resistencia a tensión; los factores de inyección Presión de sostenimiento y Tiempo de sostenimiento, pueden influir en la compactación de cadenas poliméricas y en la cristalización mientras desciende la temperatura del polímero; al incrementar estos factores se esperaría alcanzar mejores propiedades mecánicas de tensión; no obstante, al combinar factores de material y de proceso, se puede lograr un punto óptimo de máxima resistencia, que es complejo fenomenológicamente para determinar mediante prueba y error, por lo que se propone una metodología que usa modelos empíricos para la simulación de relaciones entre los factores de entrada y la respuesta de interés, que posteriormente fue optimizada para su maximización; con esta metodología es posible obtener conocimiento del comportamiento del proceso y determinar los niveles de los factores que producen la mejor calidad en las piezas. La Figura 1 muestra la metodología utilizada.

2.2. MODELACIÓN

Fueron comparadas tres técnicas de modelación: RSM, BPNN y GRNN utilizando software para su generación, entrenamiento y validación. Los niveles considerados para el entrenamiento fueron: cinco niveles de concentración en peso de PA6-virgen (rango 0-100%); cinco niveles de concentración complementaria en peso de PA6-reciclada (rango 0-100%); tres niveles de presión de sostenimiento (rango 90-110 MPa) y tres niveles de tiempo de sostenimiento (rango 1-3 s); estos rangos fueron determinados mediante una pre-experimentación que permitió lograr piezas dentro de especificación.

2.2.1. BPNN

Las redes neuronales son estructuras matemáticas para procesar información a través de varias neuronas interconectadas que responden a un valor de entrada con pesos variables, fronteras y funciones de transferencia. La BPNN tiene buena capacidad para interpolación no lineal obteniendo mapeos detallados de los comportamientos experimentales internos. Este tipo de red se ha usado extensivamente en aplicaciones de ingeniería, predicción y optimización. La red utilizada tiene cuatro entradas, una capa interna con 10 neuronas, y la capa de salida (Figura 2).

En esta red cada neurona recibe el total de entradas de todas las neuronas precedentes, utilizando la expresión matemática siguiente:

$$Red_j = \sum_{i=0}^N \omega_{ij} x_i \tag{1}$$

Donde Red_j es el total de entradas, N el número de neuronas en la capa oculta, y ω_{ij} el factor de peso de la conexión generada en la estructura de red; cada neurona genera una salida que se procesa a través de una función de transferencia; para este estudio se utilizó la función tangente sigmoideal hiperbólica (Tansig) siguiente:

$$Salida_j = f(Red_j) = \frac{1 - e^{-Red_j}}{1 + e^{-Red_j}} \tag{2}$$

Esta red es la más común de las reportadas en la literatura; está ampliamente validada, por ello se consideró como la primera opción para implementarse en problemas de esta índole.

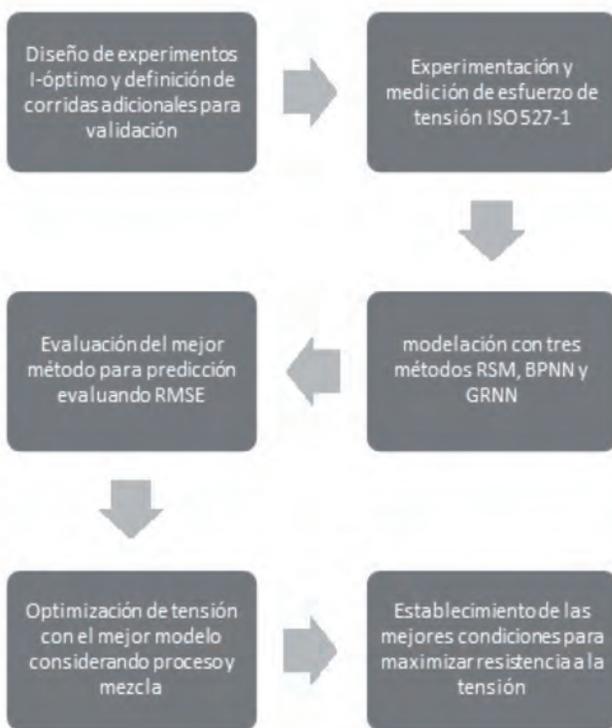


Figura 1: Metodología del estudio

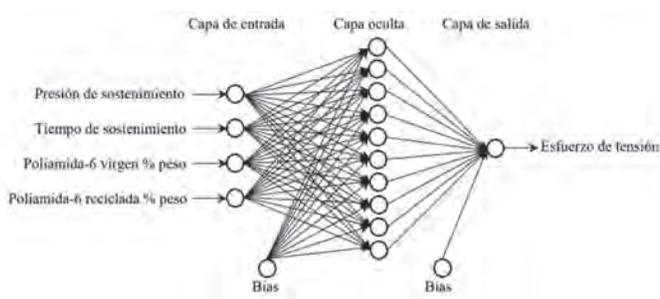


Figura 2: Arquitectura de la BPNN utilizada en este estudio

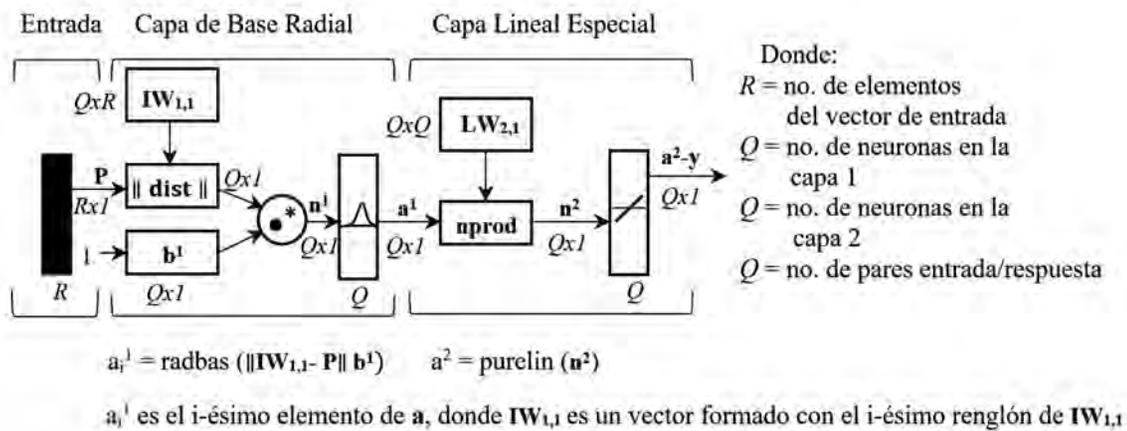


Figura 3: Arquitectura de red, GRNN

2.2.2. GRNN

La GRNN es un tipo especial de red que tiene una arquitectura definida y es frecuentemente usada para aproximación de funciones complejas no lineales; tiene tres capas: una de entrada, una oculta con función base radial (RBF) y una lineal especial de salida; la capa oculta tiene una función de transferencia exponencial cuadrática, y la capa de salida una función lineal (Figura 3). Esta red se utiliza para crear una regresión generalizada en y ; al parámetro dispersión- σ (SPREAD) usualmente se le asigna valor ligeramente menor a 1 para obtener una función que puede ajustarse a los datos individuales de una forma precisa, obteniendo características particulares como buen ajuste y mayor velocidad de entrenamiento; un spread más pequeño se ajusta mejor a los datos, pero el modelo es menos suavizado, por ello los métodos con RBF pueden lograr interpolación exacta, esto es, la superficie de regresión puede pasar por cada uno de los valores de muestreo. Esto permite buenas interpolaciones cuando las entradas en lugar de generar salidas precisas, son ruidosas. [13] mostró que las redes con RBF tienen las mejores propiedades de aproximación, lo cual no ocurre con otro tipo de redes, como la *Multilayer Perceptron*.

La función de transferencia de la capa interna en redes neuronales con RBF es:

$$f(\text{Red}_j) = e^{-n^2} \quad \phi(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad (3)$$

Este tipo de redes se aplican principalmente para ajuste de funciones, sin embargo podrían generar una función con poca suavización en problemas de alta no linealidad; es posible ajustar la suavización de la función mediante su parámetro de dispersión (spread- σ), que representa la distancia radial de un vector del dato experimental al dato predicho; una dispersión baja genera una función menos suavizada, pero de mayor precisión del modelo respecto a los datos de entrenamiento, mientras que un valor alto genera una función más suave, pero con el inconveniente que se pierde exactitud del modelo respecto a los datos de entrenamiento, generalmente se usa un valor ligeramente menor a 1; este estudio utilizó un spread de 0.7199, ya que se ajusta mejor con los datos utilizados.

La GRNN se implementó como modelo para predicción, dadas sus características particulares, y considerando que al variar el spread pueden lograr buenas predicciones y es de muy rápido entrenamiento; es considerada la red más eficiente en el proceso de cómputo, pues requiere menor tiempo de entrenamiento. El algoritmo GRNN se programó en Matlab-2017a con un procesador Intel-i7.

2.2.3. RSM

La RSM es una técnica avanzada de DOE utilizada para determinar valores óptimos al modelar procesos que permite una descripción empírica de comportamientos; se usa comúnmente para mapear interrelaciones entre parámetros y respuestas con interacciones cuadráticas; este modelo tiene la ventaja de que los factores de interacción tienen un valor directo en el modelo, lo que indica directamente su efecto en el modelo matemático, que es un sistema lineal múltiple que interrelaciona todos los factores y saca sus cuadráticos con sus relaciones respectivas. La ecuación general que representa una función de interacción doble cuadrática con dos factores es:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 \quad (4)$$

Esta ecuación es solo ilustrativa de la estructura del modelo RSM, no se utilizó, pues solo considera 2 parámetros y el problema de estudio es de 4. Para la técnica RSM se utilizó el software DesignExpert, se aplicó un modelo cuadrático para la mezcla y uno de interacción de dos factores (2FI) para las variables de proceso.

Estos tres modelos fueron elegidos por sus ventajas individuales en función del tipo de problema analizado; del espectro de métodos para modelar problemas, con ellos es posible abarcar una amplia gama de situaciones para modelar procesos de manufactura; resumiendo sus principales ventajas: la RSM permite observar los efectos de interacción de parámetros independientes en la respuesta y genera una ecuación del modelo que ayuda a clarificar la información del proceso; es eficiente, con buenas propiedades para predicción, aunque puede ser afectada en ocasiones, como cuando la respuesta ajustada se hace negativa. La BPNN tiene buen desempeño para modelado y predicción en problemas lineales y no lineales, minimiza el error con cada ciclo de propagación hacia atrás en el que se ajustan los pesos, pero requiere alto tiempo de entrenamiento. La GRNN es una red probabilística que provee estimaciones de variables continuas y converge a la superficie de regresión subyacente (lineal o no lineal); incluso con datos dispersos en un espacio de medición multidimensional, el algoritmo puede proveer transiciones discretizadas (suavizadas) entre un valor observado y otro, o lograr interpolación exacta, que pasa por cada uno de los puntos de entrenamiento; esta ventaja le confiere flexibilidad para adecuarse al problema variando su parámetro de dispersión. La GRNN puede resolver cualquier problema de aproximación de funciones, es un aproximador universal para funciones discretas, permitiendo estimar cualquier problema de variable continua cuando se tienen suficientes datos.

En contraste, el estudio [14] aplicó cinco métodos para modelar un proceso y evaluar sus capacidades de predicción en función del error: Single hidden layer feedforward neural network (SHLFFNN), es la red neuronal más simple y puede operar como regresión lineal o logística, por lo que no es frecuentemente utilizada en lugar de estas dos técnicas; Gradient Descent Back propagation neural network (GDBPNN) usa el algoritmo gradiente de descenso para modificar los pesos; Gradient Descent Back propagation with momentum neural network (GDBPMNN) puede superar problemas con mínimos locales; Back propagation with Weight decay neural network (BPWDNN) puede reducir los largos tiempos de entrenamiento de la BPNN, además previene sobre-entrenamiento; y Quantile regression neural network (QRNN) que combina regresión de cuantiles con redes neuronales mediante parámetros de regularización que penalizan la complejidad de la red para prevenir sobre-entrenamiento; sin embargo, estas técnicas no presentan las ventajas de flexibilidad, rapidez, capacidad de aproximación universal, ni mostrar efectos de interacción, características que sí presentan las técnicas usadas en esta investigación.

2.2.4. Comparativa de modelos

Después de obtener los modelos se simularon con las tres técnicas exactamente las mismas condiciones de las corridas de confirmación. Fueron generadas las gráficas de superficie 3D y de contornos para cada modelo; con los pronósticos obtenidos se calculó el error de predicción para identificar cuál modelo predice mejor la respuesta, con el fin de utilizarlo posteriormente al determinar los parámetros óptimos de operación.

Optimización

El método Región de Confianza Basada en Técnicas de Punto Interior para Programación No Lineal (RCTPIPNL), es una técnica de optimización mediante programación matemática para encontrar el mínimo de una función multivariable no lineal con restricciones. Esta técnica está basada en encontrar un punto de partida factible al interior de una región de solución, definir una dirección de movimiento conservando la factibilidad hasta un punto de reducción de la función objetivo y encontrar el punto óptimo para detener el algoritmo. Esta metodología parte de un sistema de restricciones que permite la optimización en una región específica y utiliza una estrategia no lineal, garantizando que independientemente de la topología de la función, el mínimo respectivo se alcanzará. Este algoritmo híbrido consiste en el cálculo de búsqueda lineal acoplada a una búsqueda que utiliza gradiente conjugado calculando factorización directa, garantizando que la búsqueda avanza hasta un punto estacionario [15]. A continuación, se presenta el solver para programación no lineal: Encontrar el mínimo de un problema especificado por:

$$\min_x f(x) \text{ tal que, } \begin{cases} c(x) \leq 0 \\ ceq(x) = 0 \\ A \cdot x \leq b \\ Aeq \cdot x = beq \\ lb \leq x \leq ub, \end{cases} \text{ donde,}$$

b y beq son vectores, A y Aeq son matrices, $c(x)$ y $ceq(x)$ son funciones que generan vectores, y $f(x)$ es una función que genera un escalar. $f(x)$, $c(x)$, y $ceq(x)$ pueden ser funciones no lineales. x , lb , y ub pueden considerarse como vectores o matrices. El método RCTPIPNL fue aplicado en combinación con el método de modelación que presentó el más bajo error, para identificar el punto

óptimo que permite maximizar el esfuerzo de tensión y definir las condiciones de los factores de entrada que permiten lograrlo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 4 presenta los resultados de las mediciones de tensión para los 92 experimentos realizados, correspondientes a 75 corridas de entrenamiento y 17 de corroboración. Con estos resultados se generaron los tres modelos correspondientes a las técnicas RSM, BPNN y GRNN.

Como resultados de la simulación se presentan los gráficos de superficie 3D y de contornos para cada modelo. La Figura 5 (a), muestra la superficie del modelo BPNN, presentando en el eje vertical el esfuerzo máximo de tensión y en los ejes horizontales presión de sostenimiento y concentración de la mezcla. Es posible observar una superficie ligeramente suavizada con un claro incremento en la resistencia a la tensión al incrementar el porcentaje de material virgen. Cada gráfica en Figura 5 muestra un tiempo de sostenimiento constante de 2 s.

El inciso (b) presenta la superficie 3D-GRNN. De manera análoga al caso anterior, los ejes horizontales representan presión de sostenimiento y concentración de material, y el eje vertical el esfuerzo máximo de tensión. La superficie del método GRNN muestra una superficie escalonada con bajo suavizamiento, lo que podría generar, en teoría, un buen ajuste del modelo en relación con las mediciones experimentales, ya que la regresión se ajusta bien respecto a los puntos de entrenamiento; Hay un claro incremento en la resistencia a tensión al incrementar la concentración del material virgen. El inciso (c) muestra la superficie 3D para la RSM. Los ejes de los gráficos siguen la misma lógica de los casos anteriores; se observa una curva muy suavizada, y es evidente el incremento de resistencia de tensión al utilizar mayor porcentaje de Poliamida-6 virgen.

Pruebas de confirmación

Se realizaron corridas experimentales de confirmación con porcentajes de mezcla diferentes a los utilizados en el entrenamiento; cada corrida de confirmación fue medida bajo las mismas condiciones que las de entrenamiento, obteniendo un nuevo conjunto de mediciones para evaluar por comparación el desempeño de predicción con cada técnica. El desempeño se evaluó mediante distintos criterios de error; la Tabla 2 presenta los resultados comparando mediciones experimentales contra predicciones. El mejor desempeño de predicción lo mostró el método GRNN con error medio absoluto (MAE) de 1.81, error medio porcentual (MPE) de 3.03, RMSE de 2.40, error cuadrático relativo (RSE) de 0.56, y coeficiente de determinación (R^2) de 0.50, seguido de los modelos RSM y BPNN. Estos resultados están en concordancia con lo reportado por [16],

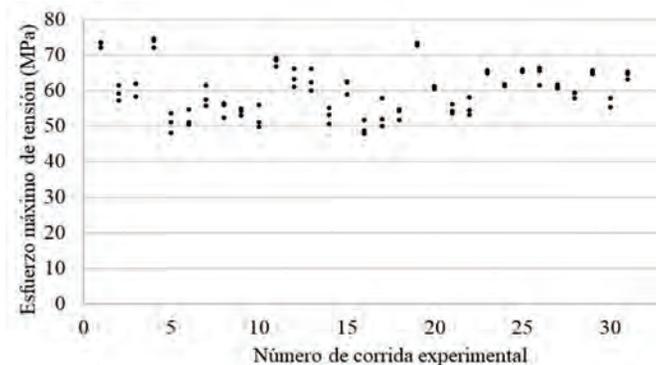
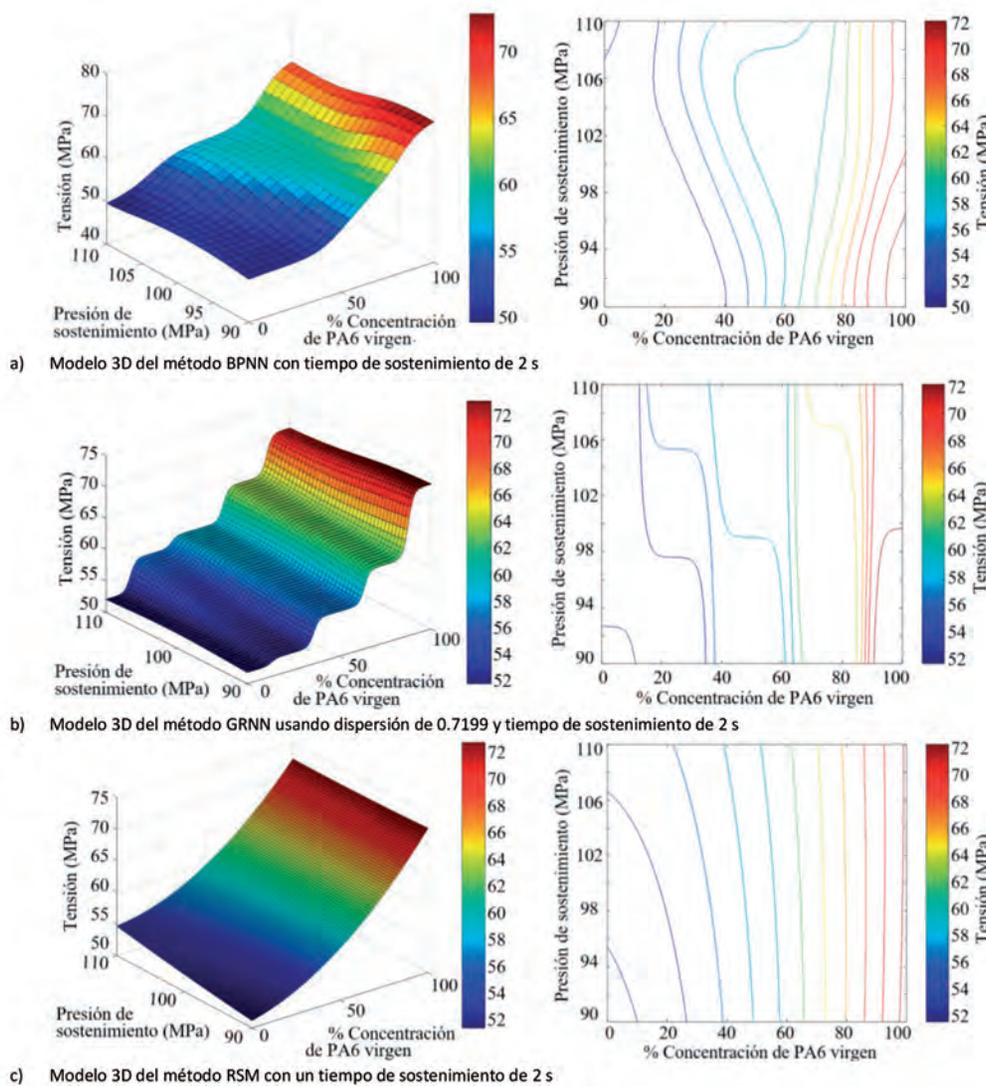


Figura 4: Resultados de los ensayos de tensión correspondientes a la Tabla 1



que encontró mejor capacidad de predicción de la GRNN respecto a la BPNN.

Estos criterios de desempeño facilitan la comparación de las predicciones respecto a los valores experimentales de las pruebas de confirmación, evaluando la bondad de ajuste de los modelos, por ello los modelos RSM y BPNN presentaron un mayor error, pues no fueron capaces de predecir con suficiente precisión algunos valores reales de esfuerzo de tensión en comparación con el modelo GRNN. La Figura 6 muestra un comparativo de predicción, respecto a las 17 corridas de confirmación; el modelo GRNN predice con menor error la respuesta mostrando mejor capacidad para modelar condiciones diferentes a las de entrenamiento en comparación con los otros dos métodos; presenta un nivel aceptable de error, lo que podría considerarse útil para la predicción de resistencia a la tensión en el PIM. Las causas que provocan errores de predicción posiblemente son el resultado de variables no consideradas en la modelación.

Figura 5: Modelos 3D y graficos de contornos, obtenidos con los métodos (a) BPNN, (b) GRNN y (c) RSM

% Mat virgen	% Mat reciclado	Presión de sostenimiento (MPa)	Tiempo de sostenimiento (segundos)	Medición real del esfuerzo de tensión (MPa)	Pronósticos del esfuerzo de tensión (MPa)		
					RSM	GRNN	BPN
66	33	100	3	65.5296	64.13	64.08	63.32
66	33	100	3	66.40	64.13	64.08	63.32
66	33	100	3	61.36	64.13	64.08	63.32
66	33	100	1	61.75	59.14	61.71	59.49
66	33	100	1	61.04	59.14	61.71	59.49
66	33	100	1	60.58	59.14	61.71	59.49
66	33	90	1	59.23	58.64	61.54	60.73
66	33	90	1	57.83	58.64	61.54	60.73
66	33	90	1	59.36	58.64	61.54	60.73
66	33	90	3	55.33	62.44	61.54	63.36
66	33	90	3	57.89	62.44	61.54	63.36
66	33	110	1	65.66	59.64	65.31	57.69
66	33	110	1	64.63	59.64	65.31	57.69
66	33	110	1	64.99	59.64	65.31	57.69
66	33	110	3	65.20	65.83	65.31	65.15
66	33	110	3	63.07	65.83	65.31	65.15
66	33	110	3	64.61	65.83	65.31	65.15
				MAE	2.77	1.81	3.31
				MPE	4.49	3.03	5.37
				RMSE	3.42	2.40	4.22
				RSE	1.13	0.56	1.72
				R2	0.017	0.50	8.18E-07

Tabla 2: Pronósticos y error para corridas de confirmación

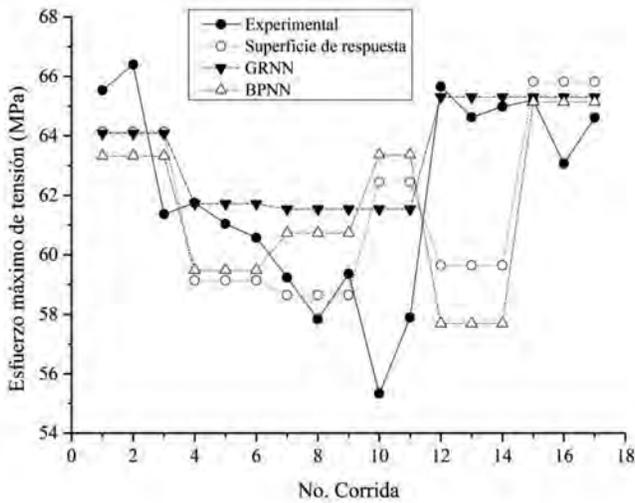


Figura 6: Comparativo gráfico de predicción

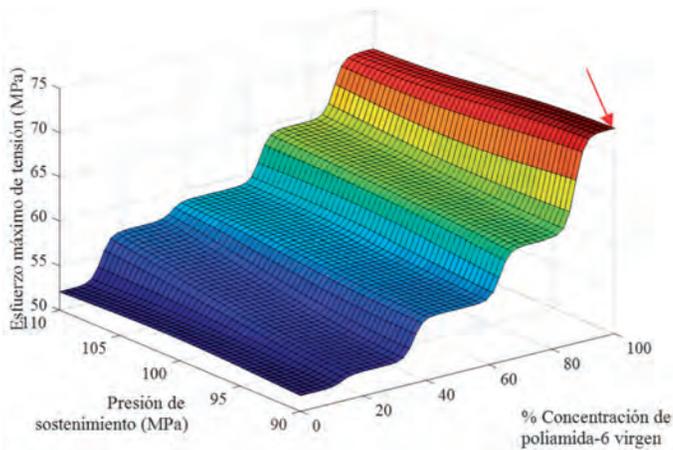


Figura 7: Optimización del PIM, la flecha roja muestra el punto óptimo

Se utilizó el modelo GRNN en combinación con el algoritmo de optimización RCTIPNL para identificar el punto óptimo que maximiza el esfuerzo de tensión de las piezas moldeadas. El resultado de esta hibridación de técnicas se muestra en la Figura 7, que muestra el punto óptimo; el resultado del algoritmo combinado define las condiciones que permiten alcanzar este punto, resultando los valores de 99.99 % de material virgen en la mezcla, 90 MPa de presión de sostenimiento y un tiempo de sostenimiento de 3 s, lo que permite alcanzar un esfuerzo máximo de tensión de 73.17 MPa.

Este resultado concuerda con la lógica intuitiva de los fenómenos que ocurren en el proceso de inyección, pues el incremento de presión y tiempo de sostenimiento genera más cristalización y compactación de las cadenas poliméricas conforme se enfría y solidifica la pieza, además, un mayor porcentaje de material virgen implica menos material con degradación, propiciado mejores propiedades mecánicas.

4. CONCLUSIONES

El PIM como algunos procesos de manufactura implica múltiples variables que pueden afectar la calidad del producto, es de naturaleza compleja y estocástica; su modelación y la optimización de sus parámetros son retos importantes. Una manera efectiva de resolver este problema consiste en identificar las relaciones entre el desempeño del proceso y sus parámetros de entrada controlables, mediante la modelación del proceso a través de técnicas matemáticas y su optimización utilizando algoritmos [17].

La metodología propuesta combina las ventajas individuales de tres técnicas de modelación: RSM, BPNN y GRNN; su aplicación

y la selección de la mejor, podría solventar algunos inconvenientes que presentan por separado; al seleccionar el mejor modelo, se descartan las técnicas que no tienen buen ajuste para el tipo de problema estudiado. Esta ventaja otorga a la metodología propuesta un carácter más general para su aplicabilidad, en comparación con otros métodos individuales reportados en la literatura con buen desempeño en aplicaciones específicas, pero no en otras: como la regresión estadística que podría no describir con precisión las relaciones complejas no lineales de algunos problemas; o la teoría de conjuntos difusos, preferible para aplicarse sólo cuando el conocimiento de expertos apoya para definir funciones objetivo y reglas; o el método Taguchi, que podría tener problemas para representar importantes efectos de interacción entre variables en el dominio del diseño propuesto [17].

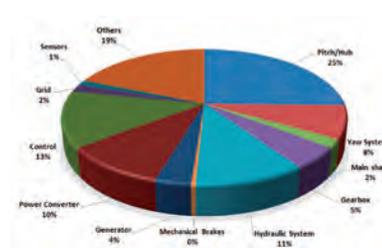
La metodología propuesta permite estudiar problemas con factores combinados de mezcla y proceso; su técnica de optimización tiene la ventaja de garantizar la localización del óptimo global, en comparación con otras técnicas que pueden tener problemas con mínimos locales o dan soluciones sub-óptimas, tales como GA o *Particle-Swarm Optimization* (PSO) [17]. El principal inconveniente de la metodología propuesta es que resulta laboriosa porque implica determinar factores, diseñar y ejecutar experimentación, la generación y análisis de tres modelos para elegir el mejor, además del proceso de optimización. Se visualiza la necesidad de evaluar su desempeño con otros tipos de problemas.

Fueron definidas las condiciones óptimas para lograr el mayor esfuerzo de tensión posible para el caso de estudio presentado; parecería obvio para un experto en inyección de plásticos que una mayor concentración de material virgen produzca piezas más resistentes, pero esta metodología podría aplicarse en casos distintos donde las condiciones óptimas no sean evidentes a primera vista; este estudio permite a la empresa plantear escenarios diversos mediante simulación, con los que podría cumplir los requerimientos de calidad del cliente con precisión aceptable, y balancear los porcentajes de materiales virgen-reciclado atendiendo sus costos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] T. A. Osswald y J. P. Hernández-Ortiz, *Polymer Processing, modeling and simulation*, Hanser, 2006.
- [2] H. Fazilat, M. Ghatbarband, S. Mazinani, Z. Asadi, M. Shiri y M. Kalae, «Predicting the mechanical properties of glass fiber reinforced polymers via artificial neural network and adaptive neuro-fuzzy inference system» *Computational Materials Science*, vol. 58, nº 2012, pp. 31-37, 2012.
- [3] J.-R. Shie, «Optimization of injection molding process for contour distortions of polypropylene composite components by a radial basis neural network» *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 36, pp. 1091-1103, 2008.
- [4] S. Changyu, W. Lixia y L. Qian, «Optimization of injection molding process parameters using combination of artificial neural network and genetic algorithm method» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 183, pp. 412-418, 2007.
- [5] W.-C. Chen, P.-H. Tai, M.-W. Wang, W.-J. Deng y C.-T. Chen, «A neural network-based approach for dynamic quality prediction in a plastic injection molding process» *Expert Systems with Applications*, nº 35, pp. 843-849, 2008.
- [6] F. Yin, H. Mao y L. Hua, «A hybrid of back propagation neural network and genetic algorithm for optimization of injection molding process parameters» *Materials and Design*, vol. 32, pp. 3457-3464, 2011.
- [7] W.-C. Chen, G.-L. Fu, P.-H. Tai y W.-J. Deng, «Process parameter optimization for MIMO plastic injection molding via soft computing» *Expert Systems with Applications: An International Journal*, vol. 36, nº 2, pp. 1114-1122, 2009.
- [8] F. Yin, H. Mao, L. Hua, W. Guo y M. Shu, «Back Propagation neural network modeling for warpage prediction and optimization of plastic products during injection molding» *Materials and Design*, vol. 32, pp. 1844-1850, 2011.
- [9] T. Erzurumlu y H. Oktem, «Comparison of response surface model with neural network in determining the surface quality of moulded parts» *Materials and Design*, vol. 28, pp. 459-465, 2007.
- [10] H. Shi, Y. Gao y X. Wang, «Optimization of injection molding process parameters using integrated artificial neural network model and expected improvement function method» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 48, pp. 955-962, 2010.
- [11] S. Kumar y K. Panneerselvam, «Multi Objective Optimization of Tribological Property of Nylon 6 Composites using Hybrid Taguchi, Grey Relational Analysis and Cuckoo Search Algorithm» *Proceedings of the 17th ISME Conference*, IIT Delhi, New Delhi, 2015.
- [12] Z. Jiang, L. Gyurova, Z. Zhang, K. Friedrich y A. K. Schlarb, «Neural network based prediction on mechanical and wear properties of short fibers reinforced polyamide composites» *Materials and Design*, vol. 29, pp. 628-637, 2008.
- [13] F. Girosi y T. Poggio, «Networks and the Best Approximation Property» *Biological Cybernetics*, pp. 169-176, 1990.
- [14] Doreswamy y C. M. Vastrad, «Performance Analysis of Neural Network Models for Oxazolines and Oxazole Derivatives Descriptor Dataset» *International Journal of Information Sciences and Techniques*, vol. 3, nº 6, pp. 1-15, 2013.
- [15] R. A. Waltz, J. L. Morales, J. Nocedal y D. Orban, «An interior algorithm for nonlinear optimization that combines line search and trust region steps» *Mathematical Programming*, vol. 107, nº 3, pp. 391-408, 2006.
- [16] H. Berk, «Application of radial basis function and generalized regression neural networks in non-linear utility function specification for travel mode choice modelling» *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 44, pp. 640-658, 2006.
- [17] R. Venkata Rao, *Advanced Modeling and Optimization of Manufacturing Processes*, International Research and Development, Ichchhanath, Surat, Gujarat: Springer, 2011.

Análisis comparativo entre aerogeneradores con generador de inducción asíncrono y control de potencia de paso fijo y aerogeneradores con generador sincrónico y control de potencia de paso variable



Comparative analysis of faults from stall controlled wind turbines with asynchronous generators and pitch controlled wind turbines with synchronous generators



Yuri Merizalde¹, Luis Hernández-Callejo², Javier Gracia Bernal³, Oscar Duque-Perez⁴, Luis-Miguel Bonilla², Ángel Zorita-Lamadrid⁴ y Daniel Morinigo-Sotelo⁴

¹ Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Química. Av. Delta entre Av. Kennedy, Guayaquil, Ecuador, Av. Kennedy, Guayaquil (Ecuador).

² Universidad de Valencia. Dpto. de Ingeniería Agrónoma y Forestal. Campus Universitario Duques de Soria - 42004 Soria (España)

³ Compañía Eólica de Tierras Altas S.A (CETASA), Calle Diputación, 1- 42002 Soria (España).

⁴ Universidad de Valladolid (UVA). Dpto de Ingeniería Eléctrica. Ell. Paseo del Cauce, 59 - 47011 Valladolid (España).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8741> | Recibido: 08/02/2018 • Inicio Evaluación: 14/02/2018 • Aceptado: 04/04/2018

ABSTRACT

• A large number of wind turbines from different manufacturers have been installed worldwide. They have different operating principles and are designed according to the climatic conditions of the installation site. The objective of this study is to perform a comparative analysis of the behavior of the different types of internal and external failures, their frequency and their duration for different types of wind turbines. To accomplish this, data collected directly from the Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) system is used to monitor two wind farms installed in Soria (Spain). The study reveals the typical faults of each type of wind turbine. Wind turbines with synchronous generator and pitch control experience more types of faults; however, the frequency and duration of faults are greater in wind turbines with stall control and asynchronous generators.

• **Keywords:** Wind turbine, stall control, pitch control, synchronous and asynchronous generators, failures type, downtime.

RESUMEN

La gran cantidad de turbinas eólicas instaladas a nivel mundial provienen de diferentes fabricantes, se diseñan de acuerdo las condiciones climáticas del lugar de emplazamiento y tienen diferentes principios de funcionamiento. El objetivo del presente estudio es realizar un análisis comparativo de los fallos internos y externos, su frecuencia y tiempo de duración entre las turbinas eólicas que utilizan generador de inducción asíncrono y control de potencia mediante palas de paso fijo y las turbinas eólicas con generador sincrónico y control de potencia con palas de paso variable. Para esto se utilizan los datos recogidos directamente del sistema SCADA mediante los cuales se supervisan y controlan dos parques eólicos instalados en la ciudad de Soria (España). El estudio revela la frecuencia y duración de los fallos típicos para cada tipo de turbina eólica. Aunque las turbinas eólicas que utilizan generador sincrónico y

control de potencia mediante palas de paso variable experimentan mayor tipo de fallos, sin embargo, la frecuencia y duración de estos son mayores en las turbinas eólicas con generador de inducción y control de potencia mediante palas de paso fijo.

Palabras clave: Aerogenerador, control de potencia fijo y variable, generador eléctrico sincrónico y asíncrono, tipos de fallos, duración de fallos.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la industria de la energía eólica se ha caracterizado por un aumento constante en la potencia instalada por año, potencia instalada total, potencia de las turbinas, empresas dedicadas a la fabricación de turbinas eólicas, parques eólicos y empresas que prestan diferentes tipos de servicios. Simultáneamente, la tendencia ha sido hacia turbinas eólicas de bajo costo y mayor potencia, [1-3]. Una de las variables más importantes en la industria de la energía eólica, es Operación y Mantenimiento (O&M), ya que esta magnitud impactará significativamente en el costo de cada kWh generado y por lo tanto en la rentabilidad y sostenibilidad de un parque eólico, [4] y [5].

Los propietarios de parques eólicos generalmente contratan a empresas externas de O&M para realizar los trabajos de mantenimiento de forma permanente, [6]. Sin embargo, la administración está a cargo de la compañía propietaria del parque eólico. Las reparaciones mayores generalmente se realizan durante el verano ya que durante el invierno serían muy difíciles debido a las duras condiciones climáticas. La supervisión y el control generalmente se realizan utilizando los sistemas Condition Monitoring Systems (CMS) y Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA), [5]. Estos sistemas registran la información obtenida de los sensores de la turbina eólica a diferentes intervalos de tiempo (cada diez minutos o segundos) y además permiten la descarga de los registros de diferentes maneras (mensual, anual, por fecha de inicio y finalización del evento, por parque eólico o por turbina eólica). Ver Tabla 1.

Unit	Serial no.	Code	Description	Detected	Reset/Run	Duration	Event type
T1	64574	49	Vector surge	06/12/2013 6:57	06/12/2013 7:07	0:10:01	Alarm log (S)
T1	64574	0	Turbine OK	06/12/2013 7:07	06/12/2013 7:07	0:00:00	Miscellaneous
T1	64574	63	High frequency L1	11/12/2013 9:39	11/12/2013 9:49	0:10:00	Alarm log (S)
T1	64574	0	Turbine OK	11/12/2013 9:49	11/12/2013 9:49	0:00:00	Miscellaneous
T1	64574	604	Remote stop	11/12/2013 14:08	11/12/2013 14:09	0:00:59	Alarm log (S)
T1	64574	605	Remote start	11/12/2013 14:09	11/12/2013 14:09	0:00:00	Warning log (W)
T1	64574	0	Turbine OK	11/12/2013 14:09	11/12/2013 14:09	0:00:00	Miscellaneous
T1	64574	226	10 min wind speed high	24/12/2013 10:48	24/12/2013 11:09	0:20:39	Alarm log (S)
T1	64574	0	Turbine OK	24/12/2013 11:09	24/12/2013 11:09	0:00:00	Miscellaneous
T1	64574	226	10 min wind speed high	24/12/2013 11:20	24/12/2013 21:47	10:26:22	Alarm log (S)
T1	64574	228	1 min wind speed high	24/12/2013 11:27	24/12/2013 21:49	10:22:13	Alarm log (A)
T1	64574	230	1 sec wind speed high	24/12/2013 12:57	24/12/2013 21:49	8:52:30	Alarm log (A)
T1	64574	998	Max stop time	24/12/2013 17:20	24/12/2013 21:49	4:29:00	Warning log (W)
T1	64574	0	Turbine OK	24/12/2013 21:49	24/12/2013 21:49	0:00:00	Miscellaneous
T1	64574	321	Pump time shaft brake too long	24/12/2013 21:49	24/12/2013 22:24	0:34:35	Alarm log (S)
T1	64574	0	Turbine OK	24/12/2013 22:24	24/12/2013 22:24	0:00:00	Miscellaneous
T1	64574	0	Turbine OK	24/12/2013 22:24	24/12/2013 22:24	0:00:00	Miscellaneous
T1	64574	605	Remote start	24/12/2013 22:24	24/12/2013 22:24	0:00:00	Warning log (W)
T1	64574	321	Pump time shaft brake too long	24/12/2013 22:25	24/12/2013 22:27	0:01:37	Alarm log (S)
T1	64574	0	Turbine OK	24/12/2013 22:27	24/12/2013 22:27	0:00:00	Miscellaneous
T1	64574	0	Turbine OK	24/12/2013 22:27	24/12/2013 22:27	0:00:00	Miscellaneous
T1	64574	605	Remote start	24/12/2013 22:27	24/12/2013 22:27	0:00:00	Warning log (W)
T1	64574	321	Pump time shaft brake too long	24/12/2013 22:28	25/12/2013 7:55	9:26:37	Alarm log (S)
T1	64574	998	Max stop time	25/12/2013 4:28	25/12/2013 7:55	3:26:37	Warning log (W)
T1	64574	0	Turbine OK	25/12/2013 7:55	25/12/2013 7:55	0:00:00	Miscellaneous
T1	64574	321	Pump time shaft brake too long	25/12/2013 7:56	25/12/2013 7:57	0:01:38	Alarm log (S)
T1	64574	0	Turbine OK	25/12/2013 7:57	25/12/2013 7:57	0:00:00	Miscellaneous
T1	64574	321	Pump time shaft brake too long	25/12/2013 7:59	25/12/2013 13:33	5:34:31	Alarm log (S)
T1	64574	0	Turbine OK	25/12/2013 13:33	25/12/2013 13:33	0:00:00	Miscellaneous
T1	64574	321	Pump time shaft brake too long	25/12/2013 13:37	26/12/2013 9:22	19:44:51	Alarm log (S)
T1	64574	998	Max stop time	25/12/2013 19:37	26/12/2013 9:22	13:44:51	Warning log (W)
T1	64574	0	Turbine OK	26/12/2013 9:22	26/12/2013 9:22	0:00:00	Miscellaneous
T1	64574	321	Pump time shaft brake too long	26/12/2013 9:23	26/12/2013 9:24	0:00:52	Alarm log (S)
T1	64574	0	Turbine OK	26/12/2013 9:24	26/12/2013 9:24	0:00:00	Miscellaneous
T1	64574	226	10 min wind speed high	27/12/2013 9:59	27/12/2013 10:18	0:18:49	Alarm log (S)
T1	64574	0	Turbine OK	27/12/2013 10:18	27/12/2013 10:18	0:00:00	Miscellaneous
T1	64574	226	10 min wind speed high	27/12/2013 11:27	27/12/2013 11:44	0:16:59	Alarm log (S)
T1	64574	0	Turbine OK	27/12/2013 11:44	27/12/2013 11:44	0:00:00	Miscellaneous
T10	64572	604	Remote stop	11/12/2013 14:08	11/12/2013 14:09	0:01:00	Alarm log (S)
T10	64572	605	Remote start	11/12/2013 14:09	11/12/2013 14:09	0:00:00	Warning log (W)
T10	64572	0	Turbine OK	11/12/2013 14:09	11/12/2013 14:09	0:00:00	Miscellaneous
T10	64572	63	High frequency L1	13/12/2013 6:05	13/12/2013 6:15	0:10:00	Alarm log (S)
T10	64572	0	Turbine OK	13/12/2013 6:15	13/12/2013 6:15	0:00:00	Miscellaneous
T10	64572	226	10 min wind speed high	18/12/2013 20:18	18/12/2013 22:32	2:13:49	Alarm log (S)

Tabla 1: Datos originales obtenidos del sistema SCADA de un parque eólico. El logo de la empresa de mantenimiento a sido omitido

Cada turbina eólica funciona de forma autónoma gracias a su propio sistema de control alimentado por sensores. El sistema de control ejecuta secuencias específicas relacionadas con arrancar o detener la turbina dependiendo de la magnitud de variables tales como: dirección y velocidad del viento, disponibilidad, potencia activa, potencia reactiva, diferencia angular máxima, mensajes de

error, tiempo en error, tiempo en alarma, mantenimiento, velocidad del eje y temperaturas del chopper DC, tiristores, generador eléctrico, multiplicadora, inversor, etc. Cuando una variable excede determinado umbral durante un intervalo de tiempo preestablecido, el generador se desconecta de la red eléctrica y el sistema de control de la turbina emite una alarma o mensaje de

error que se muestra en el sistema SCADA. La duración total de los mensajes de error es utilizada para calcular la disponibilidad del parque eólico y determinar posibles penalizaciones a la empresa de mantenimiento.

Existen varios estudios que muestran cómo la información obtenida a través del sistema SCADA se utiliza para desarrollar diferentes metodologías para mejorar la O&M de un parque eólico, [7–16]. Actualmente, el gran volumen de información obtenida del sistema SCADA se ha convertido en un recurso valioso para aplicando el concepto de big data [17], predecir los fallos, calcular el tiempo restante al fallo de los componentes, decidir si es más rentable aplicar mantenimiento para alargar la vida útil o reemplazar las turbinas eólicas.

Conocer las diferencias que existen en términos de operación, rendimiento, ventajas y desventajas entre aerogeneradores con diferentes tecnologías es fundamental al realizar un análisis costo-beneficio para elegir la turbina eólica apropiada de acuerdo con las condiciones geográficas y climáticas que prevalecen en el lugar de emplazamiento de un parque eólico. Sin embargo, el acceso, especialmente la información específica sobre fallos está limitado principalmente a los propietarios y compañías de O&M, por lo que hay poca información disponible sobre el tema. Por este motivo, el presente estudio trata de aprovechar el acceso permitido por el Director General de una empresa propietaria de cuatro parques eólicos para presentar un estudio con los siguientes objetivos:

- Realizar un análisis basado en datos originales obtenidos del sistema de control y monitoreo de un parque eólico, recopilados durante varios años de funcionamiento.
- Determinar los tipos de fallos específicos según el tipo de turbina eólica.
- Comparar el comportamiento de los fallos entre aerogeneradores con diferentes principios operativos .
- Determinar la frecuencia y duración de los fallos.
- Identificar las posibles ventajas y desventajas de seleccionar determinado tipo de aerogenerador de acuerdo con las condiciones del lugar de emplazamiento.

2. METODOLOGÍA

Soria es la capital de la provincia de Soria y parte de la comunidad autónoma de Castilla y León; su clima se caracteriza por tener abundantes recursos eólicos que han sido aprovechados por algunas compañías para instalar parques eólicos. Este estudio se realiza con los datos de una de estas empresas propietaria de 132 aerogeneradores, con una potencia total instalada de 100 MW. Los aerogeneradores se encuentran ubicados en la región de Tierras Altas, fueron instalados entre los años 2001 al 2004 y se distribuyen en cuatro parques eólicos con 33 aerogeneradores cada uno.

Dos de los parques eólicos tienen turbinas eólicas NEG Micon NM/900 con control de potencia mediante palas de paso fijo (stall-control) y generadores asíncronos, mientras que los otros dos parques cuentan con turbinas eólicas AE52 modelo 800 kW fabricadas por Made con control de potencia mediante palas de paso variable (*pitch-control*) y generadores sincrónicos. Para este estudio, se eligió un parque eólico para cada tipo de aerogenerador, denominándolos como turbina eólica 1 (WT1) del parque eólico 1 (WF1) y la turbina eólica 2 (WT2) del parque eólico 2 (WF2); ver la Tabla 2.

Para cumplir con los objetivos de este estudio, se procesaron los mensajes de error originales registrados y almacenados por cada uno de los sistemas SCADA de los parques eólicos seleccionados durante el período de 2012 a 2016 para WF1 y de 2013 a 2016 para WF2. Cada mensaje de error tiene una duración después del cual el Sistema se bloquea. Cuando esto sucede, hay un tiempo mínimo que debe transcurrir antes de que la unidad pueda reiniciarse automáticamente, bajo la condición de que se haya eliminado la causa del mensaje de error. Los sistemas SCADA pueden guardar la información en formatos como Excel (ver Fig. 1), donde se pueden organizar y procesar. La gran cantidad de datos analizados de varios años aumenta la confiabilidad de los resultados.

Para evaluar el comportamiento de las variables, se utilizan gráficos de control, mientras que el concepto de disponibilidad se utiliza para medir el efecto de la duración de los fallos en el funcionamiento del parque eólico. Las muestras utilizadas para generar los gráficos de control son la frecuencia de ocurrencia de un

	WT1	WT2
Fabricante	NEG Micon	Made
Modelo	NM52/900	AE-52/800
Diámetro	52.2 m	52
Número de palas	3	3
Regulación de potencia	Stall control	Pitch control
Potencia	900 KW	800 KW
Multiplicadora	Planetary - parallel axle Gear Type Ratio 1:67.5 Main shaft: Forged shaft and flange Main bearing: Spherical roller Cooling Heat: exchanger with pump	Planetary - parallel axle Gear Type Ratio 1:58.34
Generador Eléctrico	Asíncrono 4/6 polos Velocidad fija 2 bobinados 23 rpm/15 rpm 900 kW/200 kW 690 V/50 Hz Enfriado por líquido	Sincrónico 4 polos Velocidad variable 12,8 a 25,71 rpm 800 kW 1000 V/50 Hz
Acoplamiento a la red	Soft by thyristors	Through Converter (diode rectifier, lift chopper, IGCT 'S inverter)

Tabla 2: Datos técnicos de las turbinas eólicas (WT1 and WT2)

mensaje de error y su duración para los doce meses del año 2015, que es tomado como ejemplo. Más específicamente, la cantidad de muestras para cada aerogenerador es 12, y en consecuencia se usa una tabla X-S, [18] y [19]. Una vez que los datos se organizan en Excel, se exportan al software Minitab para obtener los gráficos de control.

Para medir el impacto de los errores en la disponibilidad de parques eólicos [20], se aplican las fórmulas (1) y (2) en función del tiempo, [21]. Se asume que una turbina eólica está disponible las 24 horas del día durante los 365 días del año. Este tiempo se multiplica por el número total de aerogeneradores. El porcentaje (%) de disponibilidad técnica es el porcentaje del tiempo total durante el cual la turbina eólica está libre de fallas y, por lo tanto, podría funcionar, a menos que exista alguna restricción, como la velocidad del viento. El porcentaje de inactividad anual total es una medida del tiempo de inactividad del parque eólico, ya sea por año o período de análisis.

$$\% \text{ Disponibilidad técnica} = \frac{\text{Tiempo total} - \text{downtime}}{\text{Tiempo total}} \times 100 \quad (1)$$

$$\% \text{ Total de downtime} = \frac{\text{Downtime}}{\text{Tiempo total}} \times 100 \quad (2)$$

Un fallo puede tener diferentes causas. Debido a que el estudio se basa exclusivamente en datos tomados del sistema SCADA, la clasificación de los fallos según el componente, se realiza acorde el manual de operación del aerogenerador. Para el análisis, se excluyen los mensajes de error que no dependen del aerogenerador tales como: alta velocidad del viento, apagado general realizado manualmente cuando se realiza tareas de mantenimiento, paradas manuales de emergencia, llaves de servicio activas, arranques y paradas remotas.

3. RESULTADOS ESTADÍSTICOS

El sistema SCADA registra variables tales como: velocidad y dirección del viento, energía consumida, energía producida, energía reactiva, potencia, vibración, corriente, voltaje, temperatura

ambiental y de cada una de las partes del aerogenerador, ect. Es posible obtener informes individuales para cada variable o un registro general de todos los errores ocurridos durante un intervalo de tiempo seleccionado (día, mes, año). Ver Tabla 1. Considerando el gran número de variables y datos disponibles, se podría realizar

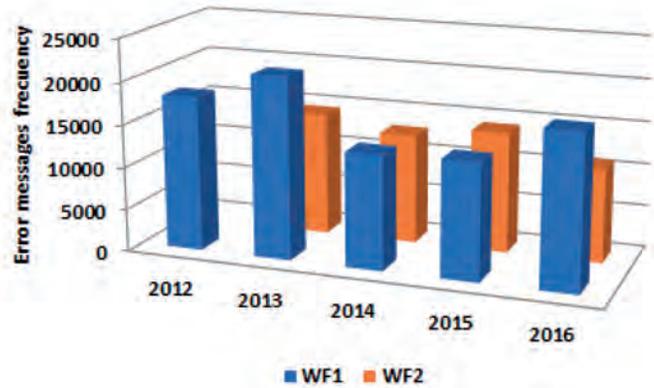


Fig. 1: Frecuencia de los mensajes de error

un análisis estadístico muy extenso, sin embargo, de acuerdo con los objetivos mencionados anteriormente, este estudio se limita a la frecuencia y duración de los fallos de acuerdo con las partes de las turbinas eólicas estudiadas, como se detalla a continuación.

El tipo de mensajes de error (alta tensión, baja tensión, temperatura de los diodos, temperatura de la multiplicadora, velocidad excesiva, vientos fuertes, etc.) de los parques eólicos permanecen casi constantes en el tiempo, aunque WF2 siempre tiene un 13% más de estos tipos de errores que WF1. La misma uniformidad se observa en la frecuencia de ocurrencia de los mensajes de error, sin embargo, WF1 es el parque eólico con los porcentajes más altos (ver Fig. 1). Esta diferencia se vuelve mucho más notable en la duración de los mensajes de error.

Según los manuales, WT1 y WT2 podrían emitir 999 y 172 tipos de mensajes de alarma y errores, respectivamente. En este estudio, se registraron 108 tipos de errores para WT1 y 123 para WT2 (ver Fig. 2 y 3).

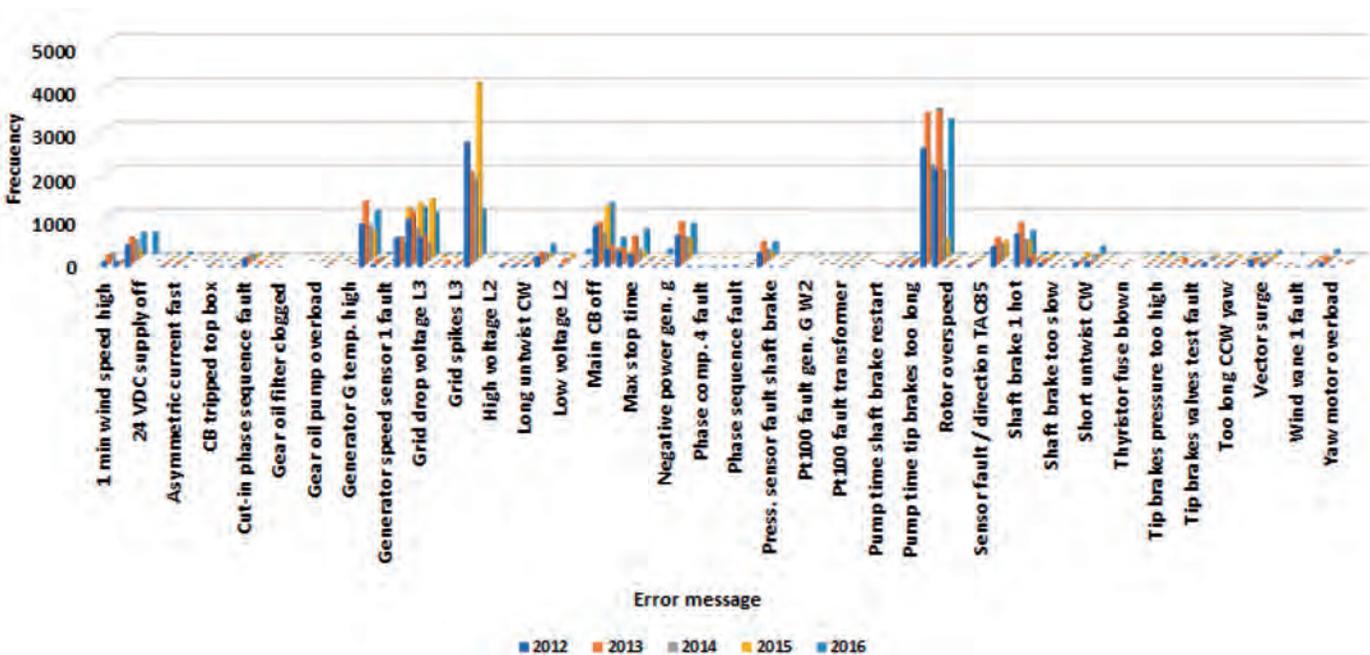


Figura 2: Frecuencia de mensajes de error según tipo de fallo, WF1

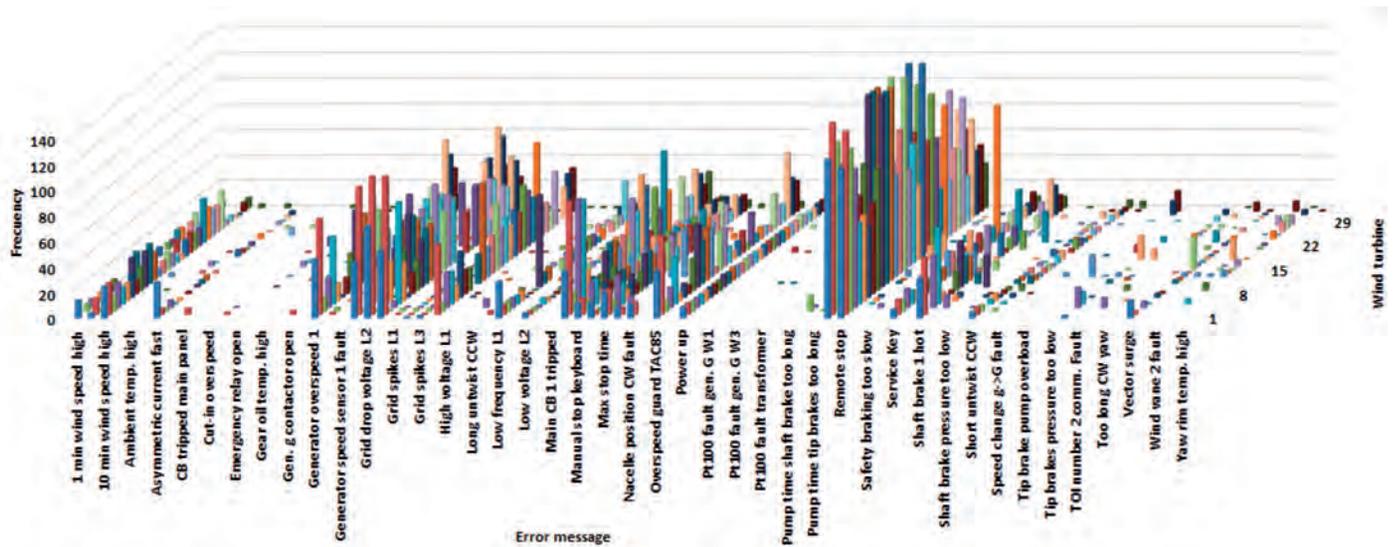


Figura 3: Frecuencia de mensajes de error para cada turbina según tipo de fallo, WF1. (2016)

Las Figuras 2 y 3 muestran que tanto a nivel individual (turbina eólica) como grupal (parque eólico), hay algunos fallos que ocurren con mayor frecuencia que otras. Para WT1, la mayor cantidad de fallos se originaron durante el acoplamiento a la red eléctrica, destacándose la velocidad excesiva del eje y el frenado. Para WT2, la frecuencia de fallos es menor y se distribuyen de manera más uniforme entre las diferentes partes de la turbina eólica. En WT2, de los mensajes registrados entre 2013 y 2016, el 20% de ellos representaba el 87% del tiempo total de mensaje de error (ver Fig. 4). Lo mismo es cierto con la frecuencia de ocurrencia, aunque en algunos casos, la causa de los mensaje de error con mayor duración no es necesariamente la causa con mayor frecuencia y viceversa.

Entre el 2012 y el 2016, el 20% de las 108 causas de mensajes de error en WF1 representaron el 91% del tiempo total de mensajes de error. Lo mismo ocurre con la frecuencia de ocurrencia, aunque nuevamente, en algunos casos, la causa que genera el tiempo de mensaje de error de mayor duración no es necesariamente el de mayor frecuencia y viceversa. En este parque eólico, además de tener aproximadamente un 17% menos de tipos de mensajes de error, se puede ver una relación mucho más directa entre la frecuencia de ocurrencia y la duración de los mensajes.

En WF2, sin considerar los mensajes de error debido al apagado manual para mantenimiento o vientos fuertes, el 24% de los tipos

de fallos representa el 81% de la frecuencia y el 79% del tiempo de error. Del mismo modo, para WF1, 20% de los tipos de fallos representa el 64% de la frecuencia y el 91% del tiempo de error. Observe que para WF1, la mayoría de los mensajes de error están relacionados con el funcionamiento del generador de inducción y el control de potencia de la turbina eólica con palas de paso fijo (ver Fig. 5), a diferencia de WF2, donde los mensajes de error se distribuyen de manera más uniforme entre diferentes partes de la turbina eólica.

En WT2, los principales fallos ocurren en el generador eléctrico, convertidor de potencia, pitch y hub (ver Fig. 6). En WT1, las partes que más contribuyen a la frecuencia de fallos son el sistema eléctrico, sistema de control, generador eléctrico y su acoplamiento a la red (ver Fig. 7).

En WF1, el porcentaje de tiempo de inactividad muestra una gran variabilidad, oscilando entre 5 y 23,3%. Para WF2, el rango de variación es mucho más pequeño y oscila entre 4,8 y 7,8%. De acuerdo con esto, los valores de producción de energía y los ingresos de su venta son más altos en WF2. A modo de resumen, los valores promedio de las variables analizadas se muestran en la Tabla 3. La diferencia entre ambas tecnologías es notoria.

4. DISCUSIÓN

El análisis de la duración total de los mensajes de error y sus frecuencias durante el período analizado para cada parque eólico, mediante las cartas de control, revela dos características principales sobre el comportamiento de los datos, [18] y [19]:

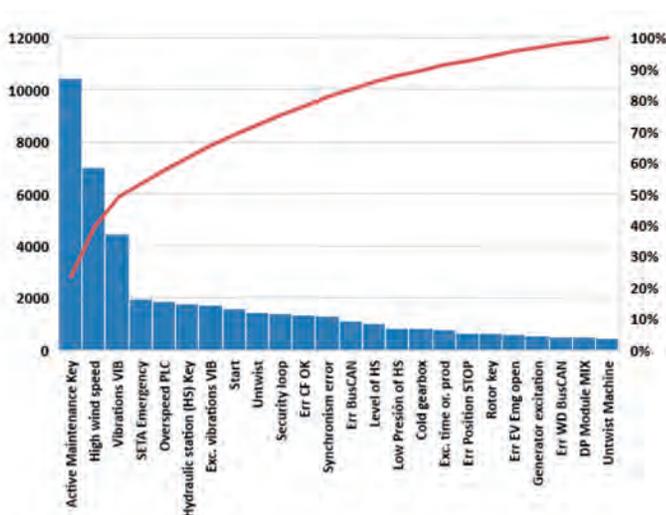


Fig. 4: Diagrama de Pareto para la frecuencia de los errores de WF2. (2013-2016)

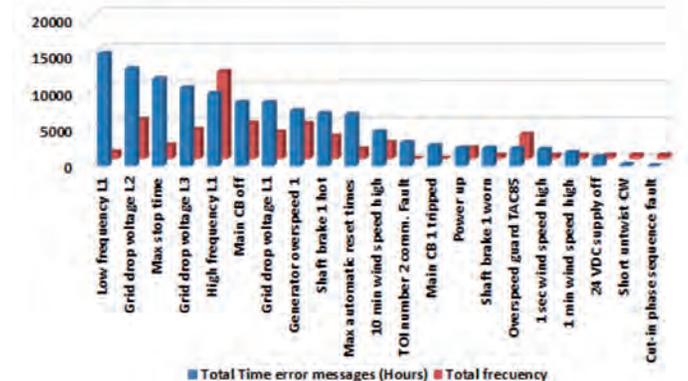


Fig. 5: Frecuencia y duración de los principales mensajes de error de WF1. (2012-2016)

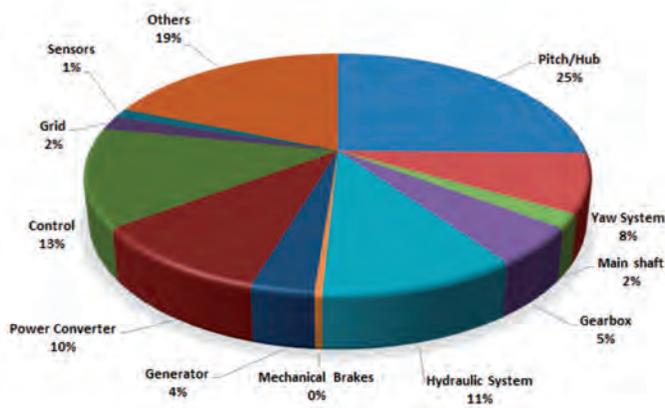


Fig. 6: Distribución de fallos según los componentes de WT2. (2013-2016)

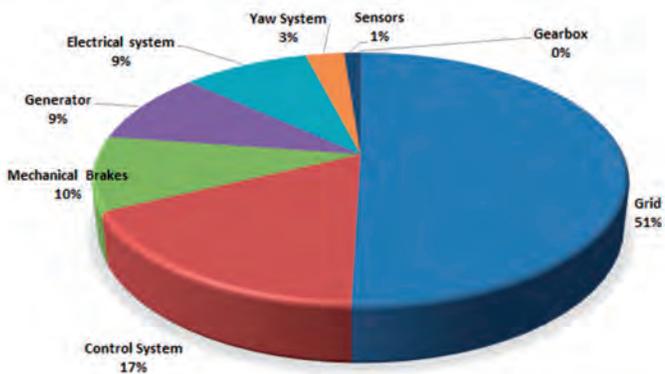


Fig. 7: Distribución de fallos según las partes de WT1. (2012-2016)

- a) Cuando los parques eólicos se analizan de manera global, ya sea por año o por mes, el comportamiento de las variables es muy similar y se pueden representar como un proceso estable y cíclico.
- b) Por el contrario, cuando se analiza cada aerogenerador por separado, el comportamiento es inestable. Esto se puede verificar mediante la carta de control para la frecuencia de errores del año 2015 del parque eólico WF2 (ver Fig. 8). El gráfico de las medias (\bar{X}) de las frecuencias de fallos, con sola una muestra fuera del Upper Control Limit (UCL), indica un proceso bajo control; sin embargo, en la gráfica de

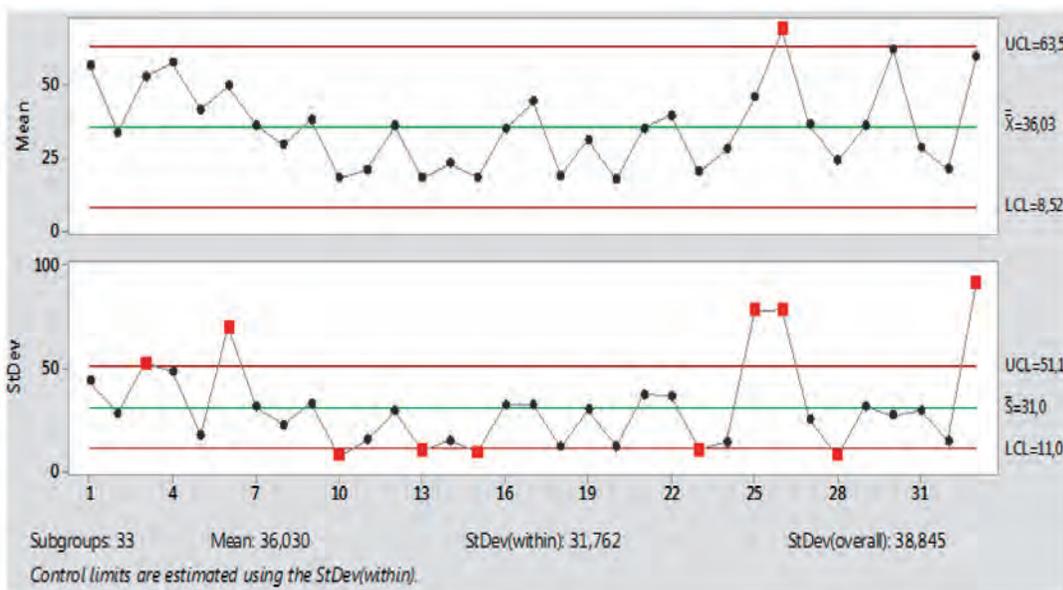


Fig. 8: Frecuencia de fallos de las turbinas eólicas de WF2. Cartas de control X-S

Variable	WF1	WF2
Cantidad de turbinas eólicas	33	33
Tipos de fallos	81	98
Duración de mensajes de error (horas)	40.529	17.958
Mensajes de error	16.528	13.091
Duración de fallos/WT (horas)	1.228	544
Frecuencia de fallos/WT	501	397
% Anual de tiempo de fallos	14	6
% Disponibilidad técnica	86	94
Producción de energía eléctrica (GW.h)	67.519.408	72.224.858
Facturación de energía (€)*	2.466.913	2.756.900

Tabla 3: Comparación general entre WF/WT1 and WF/WT2. Valores anuales promedio en el periodo 2013-2016.

* Valores anuales promedio en el periodo 2015-2016

control de la desviación estándar (S) se pueden apreciar varios puntos fuera del Lower Control Limit (LCL) and UCL, lo cual es propio de un proceso fuera de control y confirma la gran variabilidad entre turbinas eólicas. El mismo comportamiento se observa en la duración de los mensajes de error.

Según la Fig. 8, se puede ver que cuando el proceso está fuera de control, ya sea para la frecuencia o duración de los fallos, no corresponden a la misma turbina eólica; esto indica que las turbinas eólicas con más fallos no representan necesariamente la mayor cantidad de tiempo en el estado de fallo. Ambos parques eólicos muestran una gran uniformidad con respecto a los fallos (ver Fig. 2); sin embargo, existe una gran variabilidad entre los aerogeneradores (ver Fig. 3). La investigación sobre las causas que originan la gran cantidad de mensajes de error que caen fuera de los límites de un proceso bajo control está más allá del objetivo de este estudio.

Durante el periodo 2013-2016, las turbinas eólica con generador sincrónico y pitch-control (WF2 y WT2) registraron un 23% más de tipos de fallos; sin embargo, su frecuencia de ocurrencia fue un 21% menor y la duración total fue la mitad de la de las turbinas eólicas con generadores asíncronos jaula de ardilla y stall-control (WF1 y WT1). Las partes de WT1 son más robustas y sufren menos averías en comparación con WT2; sin embargo, la frecuencia y duración de los fallos es mayor.

El echo de que todas las turbinas eólicas de un mismo parque eólico presenten el mismo tipo de fallos (Fig. 3), hace pensar que este comportamiento se deba al tipo de turbina eólica. Además, la variabilidad entre las unidades sugiere que este comportamiento podría estar influenciado por su distribución dentro del parque eólico, lo que hace que cada aerogenerador reciba vientos con velocidades diferentes (ver Fig. 10). A pesar de que la disponibilidad del viento es

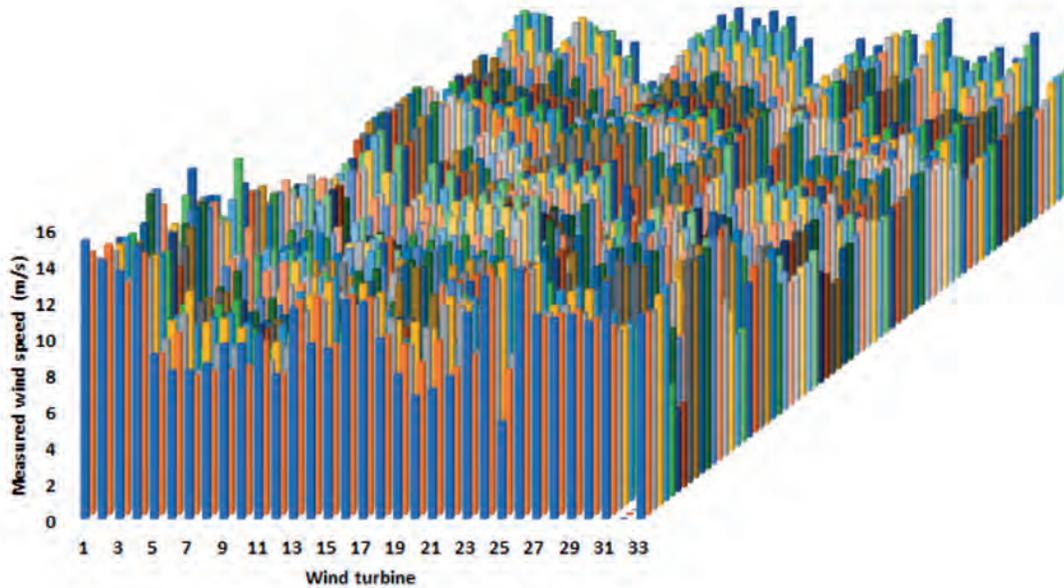


Fig. 9: Velocidad del viento medida por los sensores de cada turbina eólica de WF2. Datos diez minutos, durante un intervalo de 12 horas

una de las principales variables cuando se evalúa la viabilidad de un parque eólico, a veces una gran variabilidad en su velocidad, puede representar un problema. Para los parques eólicos ubicados en la provincia de Soria, los eventos de vientos fuertes están entre los más registrados por el sistema SCADA, especialmente en la temporada de invierno.

En lo que se refiere a la distribución de fallos entre los componentes de la turbina eólica, para WT2 el componente con mayor frecuencia de fallos es el pitch. Esto se explica por el hecho de que varios componentes del sistema de control de las palas constantemente soportan sobrecargas debido al control de potencia según la velocidad del viento, el generador sincrónico de rotor bobinado y el convertidor de potencia. El resto de fallos se distribuyen de manera uniforme entre las partes típicas de una turbina eólica de este tipo. Ver la Fig. 6.

El principio de funcionamiento de los generadores de inducción de jaula de ardilla hace que consuman una cantidad importante de potencia reactiva. La magnitud de este consumo variará mucho durante su operación, sin embargo, será mucho mayor durante los arranques y las fluctuaciones en la velocidad del viento. Ya que los bancos de condensadores no son capaces de compensar las fluctuaciones de la potencia reactiva, entonces el resultado son las caídas o huecos de tensión. Cuando baja el voltaje, se reduce el par resistente del generador y aumenta su velocidad. Si la velocidad del rotor excede ciertos límites, el generador eléctrico se desconecta de la red, pero cuando se vuelve a conectar, absorberá nuevamente una gran cantidad de energía reactiva, lo que provocará más caídas de voltaje. Este comportamiento cíclico expone la turbina eólica a muchas tensiones, cuya magnitud dependerá del tiempo que se tarda en desconectar los protectores contra sobretensiones y resolver la gran cantidad de errores que se producen. Dado que el generador de jaula de ardilla asíncrono (WT1) está acoplado directamente a la red, y la potencia se controla utilizando palas de paso fijo, la potencia reactiva no puede controlarse rápidamente, lo que causa inestabilidad en la red eléctrica y el incremento de los mensajes de error. Por el contrario, para las turbinas eólicas con pitch control y que poseen generadores sincrónicos (WT2), presentan más tipos de fallos, pero su duración y frecuencia se distribuyen más uniformemente entre todas las partes del sistema, debido a que WT2 tiene más componentes que WT1, [22]

Aunque WT1 es más sencillo, robusto y económico en comparación con WT2, sin embargo, para su operación se requiere inversiones adicionales en grandes bancos de condensadores con la finalidad de corregir los problemas técnicos y económicos que resultan de un alto consumo de potencia reactiva. El desarrollo del WT2 ocurrió precisamente para corregir las deficiencias de WT1. También se debe considerar, que aunque ambos parques eólicos tienen el mismo número de aerogeneradores y la potencia de WT1 (900 kW) es mayor que WT2 (800 kW), WF2 tiene un 7% más de producción de energía y un 12% más de facturación que WF1 (ver Tabla 3).

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una turbina eólica tiene una gran cantidad de componentes, y cada uno de ellos puede causar una gran variedad de fallos, a esto se deben sumar los factores atribuidos a las condiciones climáticas (entre otros). Esto explica la gran cantidad de mensajes de error que pueden aparecer. No se podría afirmar que todos los mensajes de error representen pérdidas de producción, ya que los errores pueden ocurrir cuando no hay demanda. Sin embargo, los errores definitivamente afectarán la disponibilidad de la turbina eólica; Además, las paradas por mantenimiento están directamente relacionadas con las alarmas que muestra el sistema. Varios mensajes de error causados por un componente son suficientes para tener que evaluar la unidad. En general, teniendo en cuenta los fallos y el trabajo de mantenimiento, para el período considerado, las pérdidas de disponibilidad anual serían de aproximadamente 13.2% para WF1 y 5% para WF2.

En general, se puede concluir que los mensajes de error generados por las turbinas eólicas analizadas son característicos del diseño y principios operativos. En WF1, la mayoría de los fallos se deben al principio de funcionamiento de las turbinas eólicas con generadores asíncronos jaula de ardilla, stall-control y acoplamiento directamente a la red. Sin embargo, en WF2, los fallos ya no son exclusivos del generador, sino que se distribuyen entre las diferentes partes de los aerogeneradores con generadores sincrónicos, pitch-control y acoplamiento a la red mediante convertidor de potencia. Si bien el tipo de aerogenerador es el mismo para un parque eólico, una tendencia que permanece constante durante los años analizados es que no todos los aerogeneradores se comportan por igual. Todas las turbinas eólicas del mismo fabricante, tipo y modelo tienen los mismos tipos de fallos; sin embargo, existe una gran variabilidad en la frecuencia y duración de los fallos. Esta variabilidad observada podría significar que el diseño y la fabricación de las turbinas eólicas podrían mejorarse para lograr un comportamiento más uniforme.

Según lo visto hasta ahora, WT2 tendría varias ventajas sobre

WT1, sin embargo, para saber qué tipo de instalación es más rentable, es necesario conocer los costos de mantenimiento. Como se mencionó anteriormente, en WF2 la frecuencia de fallos y el tiempo de inactividad es menor que en WF1, sin embargo, el número de fallos es mayor. El WT1 causa más tiempo de inactividad debido a sus principios operativos, pero es más robusto y tiene menos averías.

Con base en el análisis realizado, para optimizar los resultados obtenidos de este tipo de estudio, se recomienda:

- Realizar un análisis correlacional para determinar las variables que más influyen en fallos específicos, según cada tipo de turbina eólica.
- Investigar que fallos obedecen al comportamiento natural de las unidades y que fallos podrían depender de la O&M. Las causas del comportamiento anormal en la frecuencia y duración de dichos fallos también deben investigarse.
- Profundizar el análisis para determinar si la variabilidad entre las turbinas eólicas se debe a su ubicación dentro de un parque eólico o es debido a otras causas que podrían ser más controlables, tales como el diseño, proceso de fabricación, montaje y mantenimiento.
- Para diseñar, fabricación y selección de la turbina eólica apropiada, debería considerarse los resultados de campo obtenidos en el presente trabajo.
- Diseñar una estrategia y metodología de mantenimiento específica que considere tanto al parque eólico de forma integral, así como a cada aerogenerador de forma individual. El usar gráficos de control podría incluirse para realizar el seguimiento.
- Verificar la disponibilidad real y compararla con los resultados proporcionados por los fabricantes de aerogeneradores y proveedores del servicio de O&M.
- Analizar la evolución de la disponibilidad del parque eólico desde su instalación hasta la actualidad.
- Realizar un análisis financiero durante la vida útil de los parques eólicos, para comparar su rentabilidad.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] IRENA. Rethinking energy, Accelerating the global energy transformation, http://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena_rethinking_energy_2017.pdf; 2017 [accessed 22 January 2017].
- [2] IRENA. Renewable power generation costs in 2014, https://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena_re_power_costs_2014_report.pdf; 2013 [accessed 22 December 2016].
- [3] IRENA. Renewable energy technologies: cost analysis series, https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE_Technologies_Cost_Analysis-WIND_POWER.pdf; 2012 [accessed 25 September 2017].
- [4] Ribrant J. Reliability performance and maintenance - A survey of failures in wind power systems [dissertation]. Stockholm, Sweden: KTH University; 2006. <https://es.scribd.com/document/119723351/reliability-performance-and-maintenance>.
- [5] Andrawus J. Maintenance optimisation for wind turbines [dissertation]. Aberdeen, Scotland, United Kingdom: School of Engineering, Robert Gordon University; 2008. <https://openair.rgu.ac.uk/bitstream/handle/10059/268/AndrawusThesis.pdf>
- [6] Hernández-Callejo L, Merizalde Y., Duque-Pérez O, Bonilla L. Wind turbine maintenance: a review. *Dyna* (accepted in press).
- [7] Tchakoua P, Wamkeue R, Ouhrouche M, Slaoui-Hasnaoui F, Tameghe AT, Ekemb G. Wind turbine condition monitoring: state-of-the-art review, new trends, and future challenges. *Energies* 2014;7:2595-630. <http://www.mdpi.com/1996-1073/7/4/2595>.
- [8] Astolfi D, Castellani F, Terzi L. Fault prevention and diagnosis through SCADA temperature data analysis of an onshore wind farm. *Diagnostyka* 2014;15:71-8. http://diagnostyka.net.pl/archiwum/calyp_tekst/15_2/11.pdf.

- [9] Zaher A, McArthur SDJ, Infield DG, Patel Y. Online wind turbine fault detection through automated SCADA data analysis. *Wind Energy* 2009. Vol. 12, p. 574-93. Doi: <http://dx.doi.org/10.1002/we.319>.
- [10] Igba J, Alemzadeh K, Durugbo C, Henningsen K. Performance assessment of wind turbine gearboxes using in-service data: current approaches and future trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2015, 50, 144-59. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.139>.
- [11] Kusiak A, Verma A. Analyzing bearing faults in wind turbines: a data-mining approach. *Renew Energy* 2012. Vol. 48, p. 110-6. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.04.020>.
- [12] Bangalore P, Letzgus S, Karlsson D, Patriksson M. An artificial neural network-based condition monitoring method for wind turbines, with application to the monitoring of the gearbox. *Wind Energy* 2017. Vol. 20, p. 1421-38. Doi: <http://dx.doi.org/10.1002/we.2102>.
- [13] García-Márquez, F., Tobias, A., Pinar, J., Papaelias, M. Condition monitoring of wind turbines: Techniques and methods. *Renewable Energy*, 2012, 46, 169-178. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.03.003>
- [14] Bangalore, P., Patriksson, M. Analysis of SCADA data for early fault detection, with application to the maintenance management of wind turbines. *Renewable Energy*, 2018, 115, 521-532. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.08.073>
- [15] Astolfi, D., Castellani, F., Terzi, L. Fault Prevention and Diagnosis Through Scada Temperature Data Analysis Of An Onshore Wind Farm, *Diagnostyka*, 2014, 15, 2, 71-78. ISSN: 16416414
- [16] Zaher, A., McArthur, S., Infield, D. Online Wind Turbine Fault Detection through Automated SCADA Data Analysis. *Wind Energy*, 2009, 12, 574-593. Doi: <http://dx.doi.org/10.1002/we.319>
- [17] Helsen J, Sitter GD, Jordaens PJ. Long-term monitoring of wind farms using big data approach. In: *Proceedings of the IEEE Second International Conference on Big Data Computing Service and Applications (BigDataService)*, 2016 Mar 29; Oxford, UK: IEEE; 2016. p. 265-8. Doi: <http://dx.doi.org/10.1109/BigDataService.2016.49>.
- [18] Duncan AJ. *Quality control and industrial statistics*. 5th ed. New York, USA: John Wiley & Sons; 1986. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/qre.4680050315>
- [19] Montgomery DM. *Introduction to statistical quality control*. 6th ed. New York, USA: John Wiley & Sons; 2009. ISBN: 978-0-470-16992-6.
- [20] Guo H, Yang X, Xiang J, Watson S. Wind turbine availability analysis based on statistical data. In: *Proceedings of the International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, 2009 Apr 6-7; Nanjing, China: IEEE; 2009. p. 1-6. Doi: <http://dx.doi.org/10.1109/SUPERGEN.2009.5348175>.
- [21] Conroy N, Deane JP, Ó Gallachóir BP. Wind turbine availability: should it be time or energy based? - A case study in Ireland. *Renew Energy* 2011. Vol. 36, p. 2967-71. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.044>.
- [22] Fernández-Diez, P. <http://es.pfernandezdiez.es/libro/?id=6>, [accessed 25 January 2017].

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la empresa propietaria de los parques eólicos donde se realizó el estudio, la Universidad de Valladolid y la Universidad de Guayaquil por su ayuda en la realización de este trabajo.

Evaluación del comportamiento reológico de mezclas convencionales de caucho natural con residuos de cuero



Rheological behaviour assessment of conventional mixtures between natural rubber and leather wastes



Adrian-José Benítez-Lozano¹, William Urrego -Yepes¹, Sandra Velásquez-Restrepo² y Diego Giraldo Vásquez³

¹ Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM). Calle 73, 76a-354 - Medellín 050034 (Colombia).

² Servicio Nacional de Aprendizaje, SENA. Centro de Servicios y Gestión Empresarial. Calle 51, 57-70 - Medellín (Colombia).

³ Universidad de Antioquia. Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales. Calle 70, 52-21 - Medellín (Colombia).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8677> | Recibido: 11/12/2017 • Inicio Evaluación: 17/01/2018 • Aceptado: 26/03/2018

ABSTRACT

• The mixtures of natural rubber with post-industrial leather waste have a high potential given their technical characteristics, as evidenced in works developed by different authors; however, there is no information on the processes of transformation on an industrial scale. The rheology studies about rubber mixtures allow to define the best method for its processing, to validate the above experimental tests are required in molds that allow to determine the fluidity of various mixtures. Therefore, it is necessary to emphasize the research on the formulation of rubber-leather blends, their treatment, design and transformation to obtain products applicable on an industrial scale, as an alternative solution to the environmental problems generated by leather waste.

The present work allows to know experimentally the fluidity of 3 elastomeric mixtures (injection, extrusion and compression grade) in a mold designed for this purpose, its validation allows to determine the processing behaviour of these materials, after this relate this behaviour with the fluidity of leather rubber mixtures and the correlation with their rheological behaviour. The parameters obtained by vulcanization reometries have a direct relationship with the mixtures behaviour in the "X" type flow mold.

• **Key Words:** Elastomers, natural rubber, leather waste, elastomer rheology, flow molds.

RESUMEN

Las mezclas de caucho natural con residuos de cuero posindustrial tienen un alto potencial dado sus características técnicas, como se ha evidenciado en trabajos desarrollados por diferentes autores; sin embargo, no se cuenta con información sobre los procesos de transformación a escala industrial. Los estudios de la reología de mezclas de caucho permiten definir el mejor método para su procesado, para validar lo anterior se requieren de pruebas experimentales en moldes que permiten determinar la fluidez de diversas mezclas. Por lo tanto, es necesario centrar la investigación en la formulación de mezclas de caucho-cuero, su tratamiento, diseño y transformación para la obtención de productos aplicables a escala industrial, como una alternativa de solución a la problemática ambiental generada por los residuos de cuero.

El presente trabajo permite conocer de forma experimental la fluidez de 3 mezclas elastoméricas (grado inyección, extrusión y compresión) en un molde diseñado para tal fin, su comparación permite determinar el comportamiento en el procesado de estos

materiales, para luego relacionar dicho comportamiento con la fluidez de mezclas caucho cuero y la correlación con su comportamiento reológico. Los parámetros obtenidos mediante reometrias de vulcanización poseen una relación directa con el comportamiento de las mezclas en el molde de fluidez tipo "X".

Palabras Clave: Elastómeros, caucho natural, residuos de cuero, reología de elastómeros, moldes de fluidez.

1. INTRODUCCIÓN

El caucho es un material polimérico que ha sido usado durante siglos, su propiedad más importante es la gran elasticidad que posee. Este material se encuentra en el látex de plantas tropicales del árbol conocido como *Hevea Brasiliensis*. Desarrollar productos a base del caucho natural mezclado con residuos de cuero, constituye una alternativa amigable con el medio ambiente, esta característica es notable debido a que la disposición de dichos residuos constituyen una verdadera problemática ambiental, estos residuos son desechados en rellenos sanitarios, son quemados o son vertidos en fuentes hídricas, generando además de la problemática ambiental un problema de salud pública, debido a que el curtido del cuero se logra mediante el uso de sales de cromo, pero este material al verse en una fuente hídrica o al ser quemado puede convertir el cromo tetravalente de la estructura reticulada del cuero en cromo hexavalente que es potencialmente cancerígeno [1-3].

El molde por compresión de compuestos de caucho tiene en cuenta variables como la temperatura del molde y la presión aplicada, además de estas variables, otros factores que influyen en la calidad de las piezas moldeadas por compresión son el diseño de la pieza, la velocidad de cierre de la prensa, la plasticidad del material y las condiciones en que se encuentra la superficie de la cavidad de molde [4].

La adición de residuos de cuero en materiales naturales como el caucho es una gran alternativa en la creación y desarrollo de materiales sostenibles con el fin de abordar una de las causas y problemáticas ambientales en la disposición, reciclaje y reutilización de residuos sólidos [5]. La producción sostenible y más limpia será una cuestión clave para el desarrollo sin imponer cargas sobre el medio ambiente [6], mientras que en otro estudio se demostró que las virutas de cuero pueden también comportarse como ayudante de proceso donde las viscosidades no se ven afectadas por la adición de los residuos de cuero, esta característica depende de la granulometría de las partículas y de los tratamientos químicos previos [9].

Actualmente se fabrican artículos de caucho para usos muy diferentes, es ampliamente utilizado en la fabricación de neumáticos y/o llantas (15%), artículos impermeables y aislantes, por sus excelentes propiedades de elasticidad y resistencia ante los ácidos y las sustancias alcalinas, en el sector automotriz (15%), como agente modificador de termoplásticos (14%), en el sector de la construcción (5%), los cables (3%) y otras aplicaciones (15%) donde son necesarias sus singulares propiedades [10]. Es importante conocer el comportamiento reológico del mismo ya que es fundamental la optimización de su procesado.

El cuero curtido es un residuo que demanda especial atención por razones ambientales, y por lo tanto, si bien hay trabajos en la literatura sobre compuestos de caucho y residuos de cuero curtido [5-12], sólo se enfocan en la reometría de vulcanización y propiedades, pero muy poco o nada sobre el comportamiento de su fluidez; a partir de estos estudios, se concluye que la adición de los residuos de cuero puede mejorar la rigidez y la resistencia en tensión y compresión de los compuestos, al mismo tiempo que aumenta la dureza de los mismos, sin embargo disminuye la elongación, por lo que su capacidad de resistir deformaciones disminuye. Con base a lo anterior se pretende evaluar el comportamiento reológico de mezclas de caucho teniendo en cuenta no sólo su vulcanización sino también considerando su flujo durante la conformación. Este problema se aborda comparando tres mezclas convencionales para los tres procesos más empleados en la industria de transformación de cauchos (compresión, extrusión e inyección) y la evaluación de una novedosa mezcla compuesta de caucho y residuos de cuero curtido, usando como herramienta para conocer su fluidez un molde diseñado y conocido en la industria para tal fin.

En dos estudios realizados por investigadores brasileños, se encontró que la incorporación de residuos de cuero teñidos en una matriz de caucho natural puede tener un alto potencial para la elaboración de un material espumado amigable con el medio ambiente [8] y como un material innovador para la fabricación de suelos antiestáticos [14]. Los resultados de conductividad eléctrica mostrados por estos materiales muestran un alto potencial para ser empleados en la elaboración de suelos antiestáticos que pueden ayudar a mitigar la problemática ambiental generada por la disposición final de los residuos sólidos de cuero teñido.

El presente estudio pretende la identificación del comportamiento reológico de las mezclas de caucho natural con residuos de cuero posindustrial, buscando clasificar dichas mezclas en un grado de procesado haciendo uso del molde de fluidez tipo "X".

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Inicialmente se establece el diseño de un molde que permite determinar el comportamiento de la fluidez del material elástico con diferentes condiciones y formulaciones, molde que es empleado a nivel industrial. Se pretende entonces establecer un patrón de medida para evaluar la fluidez de los materiales elásticos y concluir acerca de la pertinencia para su procesado mediante los diferentes procesos de transformación de cauchos como el moldeo por extrusión (ME), inyección (MI) y compresión (MC).

2.1. MATERIALES

2.1.1. Diseño del molde para la determinación de la fluidez de las mezclas

Para la experimentación de este proyecto se diseñó y fabricó un molde específico para evaluar la fluidez del material. El molde elaborado consiste en 3 componentes manufacturados en un acero AISI SAE 1045. En la figura 1 se observa el diseño obtenido para este tipo de molde, el tipo de cavidad diseñada ha sido tomada a partir de moldes empleados en empresas especializadas en la manufactura del caucho; algunos moldes de transferencia que sirven para conocer la fluidez de materiales poliméricos basan su principio en la norma ASTM D 3123, la cual define el uso de un molde que tiene la capacidad de evaluar el flujo en espiral a bajas presiones y para materiales termoestables, sin embargo para el caso de los elastómeros se utilizan moldes conocidos como "moldes para flujo de caucho tipo X- "X type rubber flow molds " que no siguen una norma específica, pero son de uso común a nivel industrial y por proveedores como Struktol, que lo usan para evaluar diferentes ceras y ayudantes de proceso [16].

La pieza formada cuando el material es alimentado en el molde se muestra en la figura 1.b. Uno de los mayores problemas que se encuentran al moldear piezas poliméricas debido a la contracción, es la predicción de la forma que tendrán los componentes al volver a la temperatura normal [17], y adicionalmente si el molde será llenado completamente o parcialmente por el material; es en este punto cuando juega un papel importante el grado de procesado del material, el cual podría ser por ejemplo grado inyección, grado extrusión o grado compresión.

Esta geometría presentada es la base para el estudio del comportamiento de la fluidez de las diferentes mezclas y grados de caucho reforzado con cuero, varias formulaciones con diferentes grados de procesado fueron sometidas en el molde dispuesto en la Figura 1.a y comparadas de acuerdo con el patrón de medición que

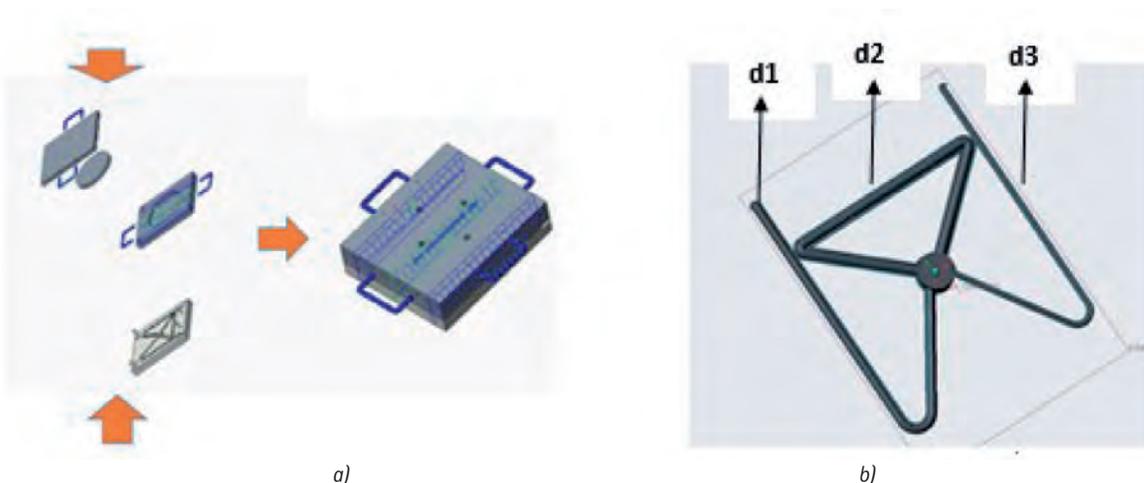


Figura 1: a) Diseño del molde para curva de fluidez b) Geometría tridimensional obtenida a partir del llenado completo con base a la fluidez del material (largo 250 mm x ancho 210 mm) Diámetro secciones circulares (d1=6 mm, d2=7.2 mm, d3=3.2 mm)

presenta el molde y por lo tanto ayudará a determinar los valores observados de la fluidez de las mezclas caucho-cuero.

2.1.2. Formulación de las mezclas de acuerdo con el grado de procesado y de las mezclas caucho-cuero

Inicialmente se establecen tres mezclas de caucho natural formuladas de acuerdo con su grado de procesado, las mezclas son grado inyección, extrusión y compresión, en la tabla 1 se muestra la formulación de cada mezcla. El propósito de la elaboración de estas mezclas es establecer el comportamiento de cada grado de procesado en el molde de fluidez y a partir de esta evaluación, poder establecer acertadamente el grado de procesado de otras mezclas de caucho, como por ejemplo las mezclas de caucho natural con cuero posindustrial que son de interés para el presente trabajo.

El caucho natural empleado para la experimentación se especifica según norma como (TSR10), y el cuero fue obtenido como residuos del proceso de rebajado de pieles de cuero ya tratadas con sales de cromo, conocidos como "blue". Para la elaboración de las mezclas de caucho natural con residuos de cuero posindustrial se establecieron formulaciones a partir de la norma ASTM D3184[18], incorporando diferentes proporciones de residuos, los cuales fueron de 20phr y 40phr. En la tabla 1 se muestran las formulaciones para las mezclas de caucho natural con residuos de cuero posindustrial.

2.2. MÉTODO

2.2.1. Incorporación de los ingredientes en la matriz de caucho

Para la realización de las mezclas elaboradas de acuerdo con el grado de procesado (tabla 1) se empleó un molino abierto de rodillos, la incorporación de los ingredientes se realizó secuencialmente incorporando al final el sistema de vulcanización, esto con

el propósito de evitar la pre-vulcanización de las mezclas, aunque es conocido que en mezcladores abiertos la disipación viscosa no genera un calentamiento significativo en las mezclas como si ocurre en los mezcladores internos, lo cual define la importancia del esquema de mezclado en los compuestos de caucho[19]. La elaboración de las mezclas de caucho natural con los residuos de cuero se realizó según norma ASTM D 3182 [20], utilizando un mezclador interno (Haake Rheodrive 7 PolyLab OS internal mixer) con rotores tipo Banbury, conocido como reómetro de par de torsión, a 60°C y a 60rpm. Este proceso de mezclado con seguimiento del perfil de temperaturas permite obtener una adecuada incorporación (dispersión y distribución) de las cargas reforzantes. Teniendo en cuenta las altas temperaturas alcanzadas en el equipo (más de 100°C), se incorporaron todos los ingredientes a excepción del sistema de vulcanización (azufre, TBBS), evitando de esta manera la pre-vulcanización. Las partículas de cuero usadas en el presente trabajo fueron las obtenidas al pasar por un tamiz malla #30 y retenidos en un tamiz malla #50 (0.30mm-0.60mm).

2.2.2. Reometría de vulcanización y oscilatorias de las mezclas de caucho

La reometría de vulcanización de las diferentes mezclas fue realizada por triplicado de acuerdo con el estándar (ASTM D-5289) [21] a 150°C para las mezclas elaboradas de acuerdo al grado de procesado y para las mezclas caucho cuero. De acuerdo con los resultados obtenidos se establecieron los tiempos de inducción de la reacción de vulcanización (t_0) y los tiempos óptimos de vulcanización (t_{100}), este último define el tiempo necesario para que el compuesto de caucho natural alcance su máxima respuesta mecánica. Adicionalmente se obtuvieron los torques máximo (M_H) y mínimo (M_L) presentados durante las reometrías.

Mediante reometrías oscilatorias usando una geometría plato-plato de superficie corrugada se obtuvieron curvas de viscosidad en función de la frecuencia de giro de las mezclas de caucho sin

Formulación para mezclas elaboradas de acuerdo con su grado de procesamiento						Formulación caucho cuero	
Mezcla grado Inyección-MI		Mezcla grado Extrusión-ME		Mezcla grado compresión-MC		Mezcla caucho cuero	
Ingredientes	Partes (phr*)	Ingredientes	Partes (phr*)	Ingredientes	Partes (phr*)	Ingredientes	Partes (phr*)
Caucho polibutadieno	20	Caucho natural	100	Caucho polibutadieno	70	Caucho natural	100
Caucho natural	80	Negro de humo N-550	30	Caucho natural	30	Óxido de Zinc	6
Colofonia	5	Aceite	10	TMQ	1.5	Residuos de cuero	0/20/40
TMQ	1.5	TMQ	1	Negro de humo 330	10	Azufre	3.5
Negro de humo 550	70	Óxido de Zinc	5	Silica	35	Ácido esteárico	0.5
Struktol WB 16	5	Acido Esteárico	1	Negro de humo 550	20	TBBS	0.7
Aceite	25	Hidróxido de Sodio	8	PEG	1.5		
Óxido de zinc	5	Cera de Polietileno	5	Colofonia	5		
Acido esteárico	1	Colofonia	5	Óxido de zinc	5		
Azufre	1.5	CBS	1	Acido esteárico	1		
CBS	2	MBTS	0.4	Azufre	1		
TMTM	1.5	TMTD	0.4	CBS	1.5		
		Azufre	2	TMTM	0.5		

Tabla 1: Formulación de las mezclas de caucho-elaboradas de acuerdo con el grado de procesado y formulación de las mezclas de caucho natural y cuero posindustrial.
 *phr: Partes por cien de caucho

vulcanizar. Se realizaron mediciones de la viscosidad de las mezclas con un barrido entre 0.1 Hz y 100 Hz, la deformación fue del 1% y los ensayos fueron realizados a tres temperaturas diferentes (100 °C, 120 °C y 140 °C) con el propósito de establecer el efecto de la temperatura en la viscosidad de los compuestos, se graficaron las curvas promedio de las tres reometrías realizadas por formulación.

2.2.3. Proceso de moldeo y evaluación de la fluidez de las mezclas

El proceso de moldeo de las diferentes mezclas en el molde de fluidez fue llevado a cabo a 150°C durante los tiempos óptimos identificados en las diferentes reometrías de vulcanización. El proceso de llenado del molde depende del comportamiento reológico de las mezclas, por lo que el llenado en el molde es diferente para cada una de las mezclas de acuerdo su grado (compresión, extrusión o inyección).

2.2.4. Estudio morfológico de las mezclas caucho-cuero moldeadas en el molde tipo X

Los compuestos de caucho natural mezclados con residuos de cuero posindustrial moldeados en el molde tipo "X" fueron cortados y preparados para ser analizados mediante microscopia este-reográfica, la sección que se observa en las micrografías corresponde a la sección transversal cortada del lado más grueso de la pieza moldeada en el molde tipo "X". La dispersión y distribución de las partículas de cuero en la matriz de caucho natural dependen del proceso de mezclado y adicionalmente del proceso del moldeo empleado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Reometría de par de torsión (proceso de mezclado)

En la Figura 2 se muestran las reometrías de par de torsión de las mezclas caucho cuero; las mezclas grado inyección, extrusión y compresión fueron elaboradas en un molino abierto de rodillos. La diferencia radica en la importancia de obtener una adecuada dispersión y distribución de los residuos de cuero en el caucho natural dado que la formulación de estos compuestos no cuenta con ayudantes de proceso como ceras, entonces se decide realizar el mezclado de estos compuestos en el réómetro de par de torsión o mezclador interno.

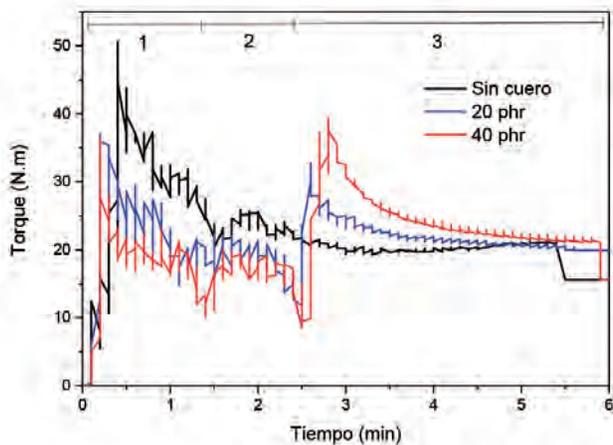


Figura 2: Reometrías de par de torsión obtenidas durante el proceso de mezclado de los compuestos de caucho natural reforzados con residuos de cuero

Las reometrías de par de torsión muestran los torques alcanzados durante el proceso de mezclado del caucho natural con el resto de los ingredientes. Se pueden diferenciar tres etapas, la primera etapa corresponde a la adición del caucho natural, este se dejó mezclar durante un minuto con el propósito de disminuir su viscosidad. En el comienzo de la etapa 2 se abre la cámara del réómetro y se adiciona el sistema de activación y se deja mezclar durante 1 minuto, se observa que el torque sigue con el mismo comportamiento. Finalmente, en la tercera etapa se adicionan los residuos de cuero y se nota un aumento inmediato en el torque reportado por el equipo; en esta tercera etapa del proceso de mezclado se permite la incorporación de los residuos de cuero en la matriz de caucho natural durante 3 minutos.

El efecto de la adición de los residuos de cuero en el procesado de los materiales fue visualizado a partir del aumento del torque al adicionar mayor proporción de dichos residuos; adicionalmente para lograr una buena interacción entre los ingredientes y la matriz de caucho natural se aconseja realizarla en tres etapas y una vez añadido el cuero, se debe dejar durante tres minutos para asegurar el mezclado de toda la masa como se ilustra en la Figura 2.

3.2. Reometría de vulcanización y oscilatoria

En la Figura 3 se muestran las reometrías de vulcanización para las mezclas de caucho grado inyección, extrusión y compresión y un análisis comparativo de las curvas reométricas de vulcanización a 150°C de las diferentes formulaciones caucho cuero. El comportamiento de las tres mezclas formuladas de acuerdo con el grado de procesado es diferente tanto al inicio del ensayo, el cual está relacionado con el tiempo de inducción y con el componente viscoso del caucho crudo, como durante la vulcanización mostrando diferentes velocidades de vulcanización, diferentes torques y adicionalmente diferente grado de reversión. En la Figura 3b se observa el efecto en los torques y en los tiempos al añadir los residuos de cuero en la matriz de caucho natural.

Los resultados y parámetros de vulcanización que se obtuvieron fueron analizados y son mostrados en la Tabla 2. Los tiempos de vulcanización de las mezclas elaboradas a partir del grado de procesado (inyección, extrusión y compresión) son muy diferentes, donde la mezcla grado extrusión presentó los menores tiempos, y además los menores torques, característica relacionada con el rendimiento mecánico de las mezclas, mientras que la mezcla grado compresión presentó el mayor torque. El torque mínimo (ML) está directamente relacionado con la componente viscosa de la mezcla, este torque se presenta en el caucho crudo, es decir, sin ningún grado de vulcanización, por lo tanto, se espera que este parámetro sea un primer indicio de la fluidez del material durante el proceso de moldeo en el molde tipo "X". De acuerdo con este principio teórico, se espera que el compuesto grado compresión tenga una menor fluidez que los compuestos de caucho grado extrusión y grado inyección; este comportamiento pudo ser demostrado a partir de los ensayos experimentales en el molde de fluidez evaluado (Figura 5). Por otro lado, se puede observar que a pesar de que la mezcla grado extrusión tiene un menor M_L , la fluidez en el molde de esta mezcla fue menor a la presentada por la mezcla grado inyección, este fenómeno se debe a que el tiempo de inducción de la reacción de vulcanización (t_0) de la mezcla grado extrusión es muy inferior al presentado por la mezcla grado inyección, por lo tanto esta mezcla comenzará a vulcanizar muy rápido en el molde de fluidez, factor que genera una disminución en la capacidad de flujo del compuesto, y por lo tanto no alcanza a llenar completamente la cavidad (Figuras 3a y 5a).

Los torques máximos y mínimos del compuesto grado compresión

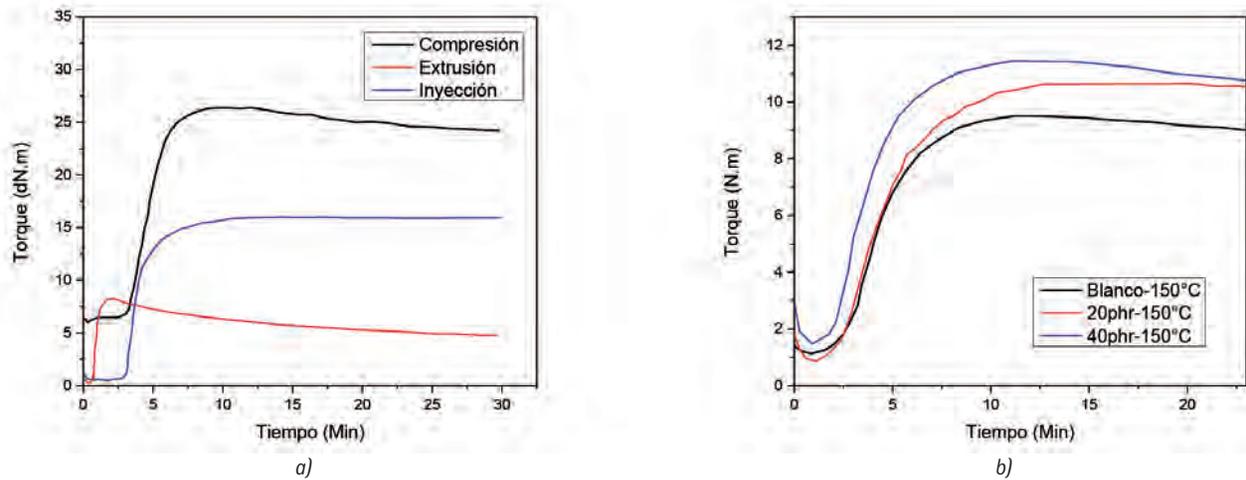


Figura 3: Reometrías de vulcanización a 150°C para las a) mezclas grados inyección, extrusión y compresión; b) compuestos elaborados con residuos de cuero posindustrial

ción fueron mayores en comparación con el resto de las mezclas. A partir de estos resultados se espera poder establecer el grado de procesamiento en el que se encuentra una mezcla de caucho natural con residuos de cuero con una formulación base donde no se em-

	Inyección	Extrusión	Compresión	Ophr	20phr	40phr
Tiempo de inducción (t_0). (min)	3.00+/-0.30	0.64+/-0.09	2.66+/-0.21	2.26+/-0.33	2.19+/-0.08	1.93+/-0.14
Tiempo de vulcanización (t_{100}). (min)	12.39+/-0.5	2.06+/-0.34	10.10+/-0.43	12.72+/-0.6	15.31+/-0.8	12.58+/-0.6
Torque máximo (M_H). (dN.m)	15.95+/-0.2	8.23+/-0.11	26.34+/-0.37	9.61+/-0.16	10.63+/-0.2	11.59+/-0.1
Torque mínimo (M_L). (dN.m)	0.49+/-0.12	0.23+/-0.06	5.89+/-0.25	1.12+/-0.16	0.98+/-0.08	1.51+/-0.11
$M_H - M_L$ (dN.m)	15.45	8.00	20.44	8.49	9.65	10.08

Tabla 2: Parámetros de vulcanización a 150°C de los diferentes compuestos de caucho

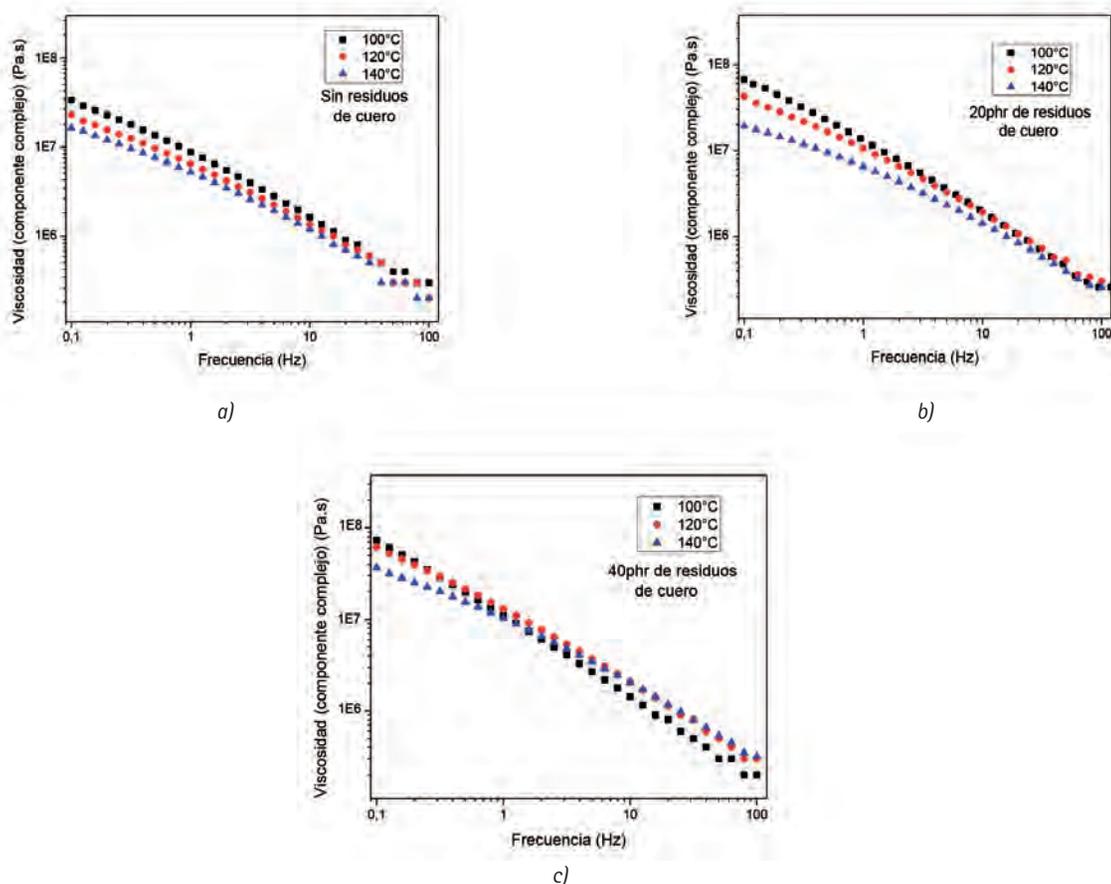


Figura 4: Reometrías oscilatorias de las mezclas caucho cuero a tres temperaturas diferentes a) sin residuos de cuero, b) con 20phr de residuos de cuero y c) con 40phr de residuos de cuero

plean ayudantes de proceso ni controladores de viscosidad.

En la Figura 3b se ilustra el comportamiento durante la vulcanización de las mezclas de caucho natural con residuos de cuero. Se observa que la mezcla con 20phr presentó los menores torques mínimos (M_L) a 150°C, este fenómeno indica que la fluidez de esta mezcla debería ser mayor que el compuesto de caucho natural sin residuos de cuero y que la mezcla de caucho natural con 40phr de residuos de cuero; esta hipótesis fue demostrada al evaluar las tres mezclas en el molde de fluidez y donde la mezcla con 20phr de residuos de cuero presentó un mayor llenado en el molde, este comportamiento puede ser visualizado en la Figura 5b.

En la Figura 4 se muestran las reometrías oscilatorias para las mezclas de caucho natural con los residuos de cuero. El comportamiento frente a la temperatura de las formulaciones sin residuos de cuero y con 20 phr mostró una tendencia esperada, donde la viscosidad de los compuestos disminuye a medida que se aumenta la temperatura.

3.4. EVALUACIÓN DE LA FLUIDEZ DE LAS MEZCLAS

En la Figura 5a se muestra el comportamiento de la fluidez de las mezclas elaboradas de acuerdo con el grado de procesado, se nota que la mezcla grado compresión no fluyó dentro del molde, mientras que las mezclas grado extrusión e inyección si lo hicieron, siendo la última la mezcla que mostró una mayor fluidez en el molde diseñado para esto.

En la Figura 5b se muestra el comportamiento de la fluidez de las mezclas elaboradas con los residuos de cuero posindustriales. Se puede observar que ninguna de las mezclas fluyó en un recorrido similar al de las mezclas grado extrusión e inyección mostradas en la figura 5a, sin embargo, todas fluyeron más que la mezcla

grado compresión. La mezcla de caucho natural con 20phr de residuos de cuero presentó la mayor fluidez, fenómeno que puede ser previsualizado desde el comportamiento de las tres formulaciones durante la reometría de vulcanización, se nota entonces que el torque mínimo (M_L) de la mezcla que tienen 20phr de residuos de cuero fue inferior a la mezcla de caucho natural con 40phr de residuos de cuero y adicionalmente al compuesto de caucho natural sin residuos de cuero.

Se establece entonces que el molde tipo "X" empleado en la evaluación de la fluidez de mezclas de caucho arroja valores importantes para conocer el grado de procesado de cada formulación, adicionalmente los resultados de los torques mínimos (ML) obtenidos mediante reometrías de vulcanización pueden significar un primer acercamiento al comportamiento reológico y de fluidez de compuestos de caucho en estado crudo o sin vulcanizar.

3.5. MORFOLOGÍA DE LAS MEZCLAS CAUCHO-CUERO

En la Figura 6 se observa la morfología, distribución y dispersión de las partículas de residuos de cuero en la matriz de caucho natural. En la micrografía tomada al caucho natural se nota una superficie plana, homogénea y de una sola fase, mientras que en las micrografías correspondientes a las mezclas caucho natural con residuos de cuero se notan dos fases, donde los residuos de cuero se diferencian claramente y se observa una adecuada dispersión y distribución de las partículas. En la figura 6c donde se encuentra la mayor cantidad de residuos de cuero, se nota que no se generó ningún fenómeno de aglomeración, esto puede deberse al adecuado proceso de mezclado generado en el reómetro de par de torsión con rotores tipo Banbury a pesar de la alta viscosidad de la matriz de caucho natural.



Figura 5: a) Llenado del molde de fluidez de las mezclas diseñadas de acuerdo con el grado de procesado de la mezcla. b) Llenado del molde de fluidez de las mezclas diseñadas con caucho natural y residuos de cuero

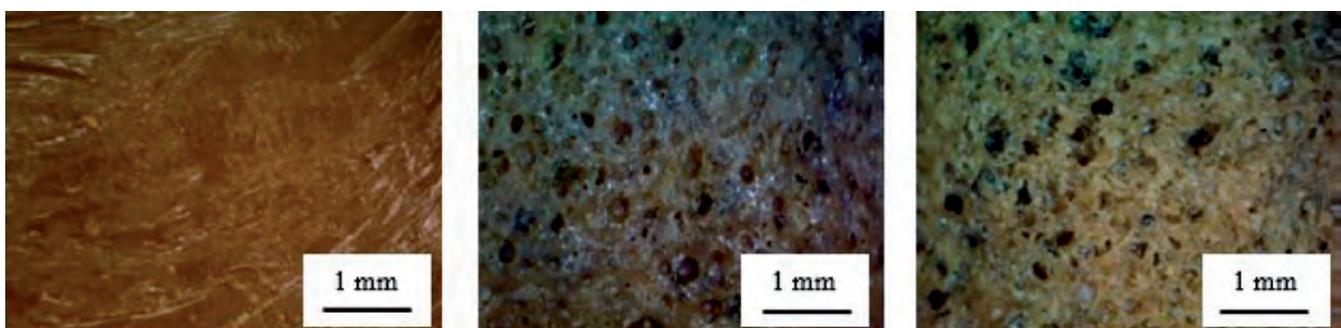


Figura 6: Morfología de las mezclas caucho natural con residuos de cuero. a) Sin residuos de cuero, b) 20phr de residuos de cuero y c) 40phr de residuos de cuero

Las partículas de cuero parecen tener una buena interacción con la matriz de caucho natural, fenómeno que ayuda a mejorar el rendimiento mecánico de las mezclas generando un efecto reforzante en las mismas como se ha encontrado en varios estudios. Los torques máximos (M_{11}) obtenidos durante la reometría de vulcanización pueden representar un primer acercamiento al rendimiento mecánico en tensión y compresión de los materiales, es por esto y de acuerdo con los valores mostrados en la tabla 2, que puede concluirse que la adición de los residuos de cuero genera un aumento en dicho torque y por lo tanto genera un mayor grado de refuerzo en los compuestos de caucho natural.

4. CONCLUSIONES

La reometría de vulcanización se emplea principalmente para la evaluación de los tiempos óptimos de vulcanización y para establecer el tiempo de inducción o el tiempo transcurrido antes de que comience la reacción de vulcanización, sin embargo, se encontró una relación directa del torque mínimo obtenido en la reometría de vulcanización y el comportamiento de fluidez de los materiales en el molde tipo "X".

De acuerdo a los resultados obtenidos en el molde de fluidez tipo "X" la mezcla que logró la mayor fluidez fue la formulada como grado inyección, seguida por la mezcla grado extrusión y finalmente la mezcla grado compresión. Las mezclas caucho cuero tienen un comportamiento intermedio entre una formulación grado compresión y una formulación grado inyección.

Bajos contenidos de residuos de cuero (20phr) pueden generar una disminución en el comportamiento viscoso del caucho natural, pero cuando se emplean altas proporciones de residuos de cuero (40phr), la componente viscosa del material vuelve a aumentar. Este efecto puede ser visualizado en las reometrías de vulcanización y en las reometrías oscilatorias.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. V. Ribeiro, S. Y. Yuan, and M. R. Morelli, "Effect of chemically treated leather shaving addition on characteristics and microstructure of OPC mortars," *Mater. Res.*, vol. 15, pp. 136–143, 2012.
- [2] S. Swarnalatha, T. Srinivasulu, M. Srimurali, and G. Sekaran, "Safe disposal of toxic chrome buffing dust generated from leather industries," *Hazard. Mater.*, vol. 150, pp. 290–299, 2008.
- [3] M. J. Ferreira, M. F. Almeida, and T. Pinto, "Influence of temperature and holding time on hexavalent chromium formation during leather combustion," *J. Soc. leather Technol. Chem.*, vol. 83, pp. 135–138, 1999.
- [4] M. B. y A. Marcilla, "Tema 6. moldeado por compresión 1.," *Tecnol. Polim.*, pp. 234–250, 2004.
- [5] S. M. Velásquez and D. H. Giraldo, "Caracterización y evaluación del tiempo de vulcanización de caucho natural colombiano obtenido de tres variedades clonales de hevea brasiliensis," *Ing. y Compet.*, vol. 233, no. 2, pp. 225–233, 2014.
- [6] H. L. Paul, A. P. M. Antunes, A. D. Covington, P. Evans, and P. S. Philips, "Bangladeshi leather industry: An overview of recent sustainable developments," in *Journal of the Society of Leather Technologists and Chemists*, 2013, vol. 97, no. 1, pp. 25–32.
- [7] M. R. Ruiz, P. L. S. Cabreira, E. R. Budenberg, E. A. P. dos Reis, F. S. Bellucci, and A. E. Job, "Chemical evaluation of composites natural rubber/carbon black/leather tannery projected to antistatic flooring," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 133, no. 27, Jul. 2016.
- [8] N. G. García et al., "Natural rubber/leather waste composite foam: A new eco-friendly material and recycling approach," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 132, no. 11, p. n/a–n/a, Nov. 2014.
- [9] N. Cardona, S. Velásquez, and D. Giraldo, "Characterization of Leather Wastes from Chrome Tanning and its Effect as Filler on the Rheometric Properties of Natural Rubber Compounds," *J. Polym. Environ.*, 2016.
- [10] R. H. Schuster, "Compounding and Mixing for High Performance Rubber Content of the Seminar Introduction Manufacturing of Elastomers

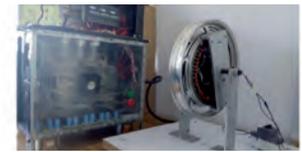
Compounding," *Semin. en Simp. Int. Mezclado del Caucho y Tecnología del Latex*, 2016.

- [11] W. Yepes, N. Vásquez, S. Velásquez, and C. Abril, "Revisión - Caracterización de compuestos de caucho con residuos de cuero posindustrial Review - Characterization of rubber compounds with post-industrial leather waste," vol. 15, no. 2, pp. 13–25, 2017.
- [12] K. Ravichandran and N. Natchimuthu, "Natural rubber: leather composites," *Polimeros*, vol. 15, no. 2, pp. 102–108, 2005.
- [13] K. Ravichandran and N. Natchimuthu, "Vulcanization characteristics and mechanical properties of natural rubber-scrap rubber compositions filled with leather particles," *Polym. Int.*, vol. 54, no. 3, pp. 553–559, 2005.
- [14] M. R. Ruiz, E. R. Budenberg, G. P. Da Cunha, F. S. Bellucci, H. N. Da Cunha, and A. E. Job, "An innovative material based on natural rubber and leather tannery waste to be applied as antistatic flooring," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 132, no. 3, pp. 1–11, 2015.
- [15] M. J. Ferreira, F. Freitas, and M. F. Almeida, "The Effect of Leather Fibers on the Properties of Rubber-Leather Composites," *J. Compos. Mater.*, vol. 44, no. 24, pp. 2801–2817, 2010.
- [16] Struktol, "Manual del Caucho," p. 132, 2014.
- [17] T. G. M. J. F. L. F. Osswald, *Ciencia de Polímeros para Ingenieros*. 2010.
- [18] ASTM, "Standard Test Methods for Rubber - Evaluation of IR (Isoprene Rubber) 1," *Astm*, vol. i, no. Reapproved 2001, pp. 1–6, 2015.
- [19] J. Wootthikanokkhan and P. Tunjongnawin, "Investigation of the effect of mixing schemes on cross-link distribution and tensile properties of natural-acrylic rubber blends," *Polym. Test.*, vol. 52, no. 2, pp. 305–312, 2002.
- [20] S. Relax-, U. Oscillating, D. Cure, U. Rotorless, C. Meters, and V. Ovens, "Standard Practice for Rubber - Materials, Equipment, and Procedures for Mixing Standard Compounds and Preparing Standard Vulcanized-D3182," *Astm*, vol. 7, no. Reapproved 2012, pp. 1–7, 2013.
- [21] ASTM D5289, "Rubber Property - Vulcanization Using Rotorless Cure," *Astm*, pp. 1–9, 2015.

AGRADECIMIENTOS

El presente estudio ha sido desarrollado al amparo del Convenio de Colaboración P15111 entre el Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín (ITM), el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) y la Universidad de Antioquia (UdeA).

Detección de fallos multicriterio de un motor BLDC (Brushless Direct Current)



Multiple criteria fault detection of a BLDC (Brushless Direct Current) motor



Víctor Arturo Maldonado Ruelas¹, Francisco Javier Villalobos Piña¹, Ricardo Alvarez Salas², José Alejandro Morones Alba¹ y Raúl Arturo Ortiz Medina^{1,3}

¹ Tecnológico Nacional de México/I.T. Aguascalientes. Dpto. de Ingeniería Eléctrica-Electrónica. Av. López Mateos 1801, Fracc. Bonagens - 20256 Aguascalientes (México). Tfno: +52 14499105002.

² Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Facultad de Ingeniería. Av. Manuel Nava 8, Zona Universitaria - 78290 San Luis Potosí (México). Tfno: +52 14448173381.

³ Universidad Politécnica de Aguascalientes. Dpto. Ingeniería en Energía. Calle Paseo San Gerardo 207, Fracc. San Gerardo - 20342 Aguascalientes (México). Tfno: +52 1449 4421400, ext. 1650.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8714> | Recibido: 04/01/2018 • Inicio Evaluación: 10/01/2018 • Aceptado: 24/04/2018 • Publicado online: 03/07/2018

ABSTRACT

- This work presents a multiple criteria approach for stator fault detection (FD) in an in-wheel brushless DC (BLDC) motor for electric vehicles. The detection of inter-turn short circuits in the stator windings of the BLDC is studied. The fault detection scheme is performed based on the instantaneous space phasor (ISP). The fault signature (residual) is built using the fast Fourier transform (FFT) and discrete wavelet transform (DWT). An experimental setup comprising a modified in-wheel BLDC was used to validate this approach. The results of signal processing based FD are verified by an analysis made with thermographic techniques.
- **Key Words:** in-wheel BLDC motor, fault detection, FFT, DWT, infrared image, electric vehicle.

RESUMEN

Este trabajo presenta un esquema de detección de fallos (DF) del estator de un motor de DC sin escobillas (BLDC por sus siglas en inglés) tipo rueda para vehículos eléctricos basado en varios criterios, los fallos que se consideran son cortocircuitos entre espiras en los devanados del estator.

El análisis para determinar los fallos se efectúa a través del cálculo del fasor espacial instantáneo (FEI) de las corrientes del estator. El indicador de fallo (residuo) se determina por varios métodos utilizando la transformada rápida de Fourier (TRF) y la transformada discreta wavelet (TDW).

Los algoritmos de DF se validan en una maqueta experimental con un motor BLDC modificado que permite emular diferentes fallos en el estator.

Se realiza también un análisis con imágenes infrarrojas del motor para corroborar los resultados obtenidos mediante las técnicas basadas en procesamiento de señales.

Palabras Clave: motor BLDC en rueda, detección de fallos, transformada rápida de Fourier, transformada discreta wavelet, imagen infrarroja, vehículo eléctrico.

1. INTRODUCCIÓN

Los motores eléctricos, elementos ampliamente utilizados en el sector industrial y doméstico, consumen la mayor parte de la energía eléctrica generada a nivel mundial. En las últimas déca-

das se han introducido nuevos tipos de motores para reducir este consumo entre los que destaca el motor de corriente directa sin escobillas o BLDC por sus siglas en inglés. El motor BLDC ha ganado una popularidad significativa debido a su alta densidad de potencia y elevada eficiencia gracias al uso de imanes permanentes, por lo anterior ocupa una posición privilegiada en el sector de vehículos eléctricos e híbridos [1]. Una variante de este tipo de motor es el llamado BLDC en rueda (*in-wheel* en inglés), éste tiene el estator fijo en el centro y el rotor exterior giratorio. Su principal ventaja es la de no requerir de engranes para su instalación ya que se monta directamente en la rueda del vehículo.

El motor BLDC, como todos los procesos industriales, puede experimentar fallos por diversas causas. Considerando que un fallo es una condición anormal que puede causar una reducción en, o pérdida de, la capacidad de un sistema para desempeñar una tarea determinada. La detección de fallos (DF) determina la presencia de fallos en un sistema así como el instante de su aparición. Para determinar la aparición de un fallo se utiliza un residuo, que es una señal que contiene información basada en la desviación entre las medidas de las entradas/salidas del sistema y estimaciones obtenidas mediante un modelo del mismo u otro método [2].

La DF en motores eléctricos se ha investigado intensamente en los últimos años con el fin de reducir costos de mantenimiento y prevenir paros no programados en procesos industriales, los cuales dan como resultados pérdidas económicas [3-4]. En este trabajo se aborda el problema de la DF en el motor BLDC en rueda motivado por la posibilidad de ser utilizado en vehículos eléctricos ligeros [5] y en sillas de ruedas [6]. Una cantidad importante de trabajos han abordado el problema de la DF en motores BLDC [7-10], sin embargo las investigaciones sobre la DF en el BLDC en rueda son menos frecuentes [11-12].

Los fallos en el motor BLDC pueden ocurrir en el estator, rotor y/o inversor. Dentro de los fallos más comunes se encuentran los del estator, generalmente causados debido al desgaste del aislamiento del devanado [4]. Esto ocurre con frecuencia en las zonas donde los terminales de los devanados entran en las ranuras del motor. La razón del desgaste puede ser provocado por:

- Defectos de manufactura.
- Operación a altas temperaturas.
- Sobrecargas.
- Transitorios elevados de tensión.
- Fricción por vibración.

Los fallos de mayor interés para evitar la degradación del motor son los de tipo incipiente, éstos se manifiestan como un

mal funcionamiento cuya magnitud crece conforme transcurre el tiempo pudiendo convertirse un fallo catastrófico (avería) con la consiguiente destrucción de la máquina [2].

2. TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE FALLOS Y MÁQUETA EXPERIMENTAL

Existen diferentes enfoques para la DF en los motores BLDC, los más populares son los de carácter no invasivo, por ejemplo, mediante la adquisición de señales de corriente del estator únicamente y su análisis con técnicas de procesamiento de señales como la transformada rápida de Fourier (TRF) y la transformada discreta wavelet (TDW) [3-4]. Otra opción para realizar la DF de manera no invasiva es monitoreando la temperatura de la máquina mediante una cámara termográfica [13].

En la Tabla 1 se presentan algunos esquemas de DF en el motor BLDC, así como las ventajas y las desventajas de cada una de ellas y la instrumentación necesaria.

2.1. FASOR ESPACIAL INSTANTÁNEO

El fasor espacial instantáneo (FEI) permite cuantificar el desequilibrio en sistemas trifásicos [15]. Para un sistema trifásico desequilibrado de cuatro hilos las corrientes de línea en las fases A, B y C y el neutro son

$$\begin{aligned} i_A &= i_A^+ + i_A^- + i_A^0 \\ i_B &= i_B^+ + i_B^- + i_B^0 \\ i_C &= i_C^+ + i_C^- + i_C^0 \\ i_N &= i_A + i_B + i_C \end{aligned}$$

donde i_A^+, i_B^+, i_C^+ son las corrientes instantáneas de secuencia positiva, i_A^-, i_B^-, i_C^- son las corrientes instantáneas de secuencia negativa y $i_A^0 = i_B^0 = i_C^0$ son las corrientes instantáneas de secuencia cero.

El FEI de la corriente en las fases A, B, and C es

$$\tilde{I} = \tilde{I}^+ + \tilde{I}^- + \tilde{I}^0$$

con

$$\tilde{I}^+ = \sqrt{3}(i_A^+ + a i_B^+ + a^2 i_C^+) = \hat{I}^+ e^{j(\omega t + \varphi^+)}$$

$$\tilde{I}^- = \sqrt{3}(i_A^- + a i_B^- + a^2 i_C^-) = \hat{I}^- e^{j(\omega t + \varphi^-)}$$

$$\tilde{I}^0 = \sqrt{3}(i_A^0 + a i_B^0 + a^2 i_C^0) = 0$$

$$\text{y } \omega = 2\pi f, a = 1 \angle 120^\circ \text{ y } \hat{I} = \sqrt{2} I.$$

Una propiedad importante del FEI es que permite separar las componentes de secuencia positiva y negativa, para el caso de la magnitud al cuadrado del FEI de la corriente se tiene

$$\begin{aligned} |\tilde{I}|^2 &= |\tilde{I}^+ + \tilde{I}^-|^2 \\ &= (\hat{I}^+)^2 + (\hat{I}^-)^2 + 2(\hat{I}^+ \hat{I}^-) \cos(2\omega t + \varphi^+ + \varphi^-) \end{aligned} \quad (1)$$

Y el valor medio de la magnitud al cuadrado del FEI es

$$\langle |\tilde{I}|^2 \rangle = (\hat{I}^+)^2 + (\hat{I}^-)^2$$

De la ecuación (1) se puede observar que $|\tilde{I}|^2$ tiene un valor máximo dado por

$$|\tilde{I}|_{M}^2 = (\hat{I}^+ + \hat{I}^-)^2$$

y un valor mínimo

$$|\tilde{I}|_{m}^2 = (\hat{I}^+ - \hat{I}^-)^2$$

Resolviendo las ecuaciones anteriores se obtienen las componentes de secuencia positiva y negativa como

$$\tilde{I}^+ = (|\tilde{I}|_{M} + |\tilde{I}|_{m}) / 2$$

$$\tilde{I}^- = (|\tilde{I}|_{M} - |\tilde{I}|_{m}) / 2$$

Esto permite determinar las corrientes de secuencia positiva \tilde{I}^+ y negativa \tilde{I}^- a partir de la medición de los extremos del FEI. El monitoreo de estas cantidades posibilita calcular el desequilibrio de las corrientes de acuerdo a

$$I_{des} \% = 100 (\tilde{I}^- / \tilde{I}^+) = 100 [(|\tilde{I}|_{M} - |\tilde{I}|_{m}) / (|\tilde{I}|_{M} + |\tilde{I}|_{m})]$$

El FEI se puede aplicar también para determinar el desequilibrio en las corrientes provocado por un fallo en el estator en el motor BLDC en rueda. Diversas investigaciones han caracterizado el comportamiento del módulo del FEI a través de espectros de firma de fallo para diferentes casos en máquinas trifásicas rotatorias [3].

El análisis de fallos con el módulo del FEI se efectúa, primeramente, refiriendo las corrientes de las fases del motor a un sistema de dos ejes en cuadratura (marco de referencia fijo con respecto al estator) utilizando la transformación de Concordia, la cual se presenta en la expresión (2):

$$\begin{aligned} i_\alpha &= \sqrt{\frac{2}{3}} i_A - \frac{1}{\sqrt{6}} i_B - \frac{1}{\sqrt{6}} i_C \\ i_\beta &= \frac{1}{\sqrt{2}} i_B - \frac{1}{\sqrt{2}} i_C \\ i_0 &= \frac{1}{\sqrt{3}} (i_A + i_B + i_C) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

donde i_A, i_B, i_C son las corrientes de las fases A, B y C del estator del motor BLDC, i_α, i_β son las componentes de las corrientes en el marco de referencia bifásico, i_0 es la componente homopolar, la

Tipo de métodos	Tipo de fallos en el motor BLDC					
	Rodamiento	Excentricidad	Cortocircuito Circuito abierto	Desmagnetización	Equipo requerido	Desventajas
Análisis espectral de la corriente	■	■	■	■	Sensores de corriente, codificador óptico	Variación con la velocidad
Análisis espectral de vibración mecánica	■	■			Acelerómetro, codificador óptico	Indicadores de fallos a la misma frecuencia
Estimación paramétrica			■	■	Sensores de corriente y tensión	Conocimiento de los parámetros del motor
Monitoreo de temperatura			■		Cámara termográfica	Variación de la temperatura por diversos factores
Monitoreo de flujo directo	■	■	■		Sensores de flujo magnético	Sensores especializados

Tabla 1: Comparación de clases y técnicas de diagnóstico en el motor BLDC [14]

cual es ortogonal al plano de las componentes i_{α}, i_{β} . El módulo del FEL $|\tilde{I}|$ se calcula de acuerdo con la expresión (3):

$$|\tilde{I}| = \sqrt{i_{\alpha}^2 + i_{\beta}^2} \quad (3)$$

En [16] se demuestra que las componentes en frecuencias asociadas a los fallos de estator (F_{EST}) empleando el módulo del FEL de las corrientes del estator se presentan en múltiplos del doble de la frecuencia fundamental de la tensión de alimentación F_L . Debido a que la magnitud de las componentes en frecuencia asociadas al fallo decrecen conforme se incrementa la frecuencia, la frecuencia distintiva del fallo se determina por simplicidad con la magnitud de la primera componente de acuerdo a la expresión (4):

$$F_{EST} = 2F_L \quad (4)$$

2.2. TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

La TRF es una herramienta que permite obtener la transformada discreta de Fourier de una señal con un mínimo de operaciones. El número de muestras de la señal y el modo de agrupación de operaciones (radix) define la cantidad de éstas que se realizan para cada transformación. Así mismo, el tamaño de las muestras está en función del radix de la transformación. El esfuerzo computacional para la transformada rápida de Fourier radix 2 es de $O =$

$N \log_2(N)$ donde O es el número de operaciones resultantes y N el tamaño de la muestra en potencias de 2 [17].

2.3. TRANSFORMADA DISCRETA WAVELET

La TDW es una técnica que permite analizar las propiedades tiempo-frecuencia de una señal. El análisis de una señal $y(k)$ con $k=1,2,\dots$ mediante la TDW es equivalente a efectuar la convolución de ésta, en el dominio del tiempo, con las secuencias de la respuesta al impulso de una serie de filtros pasa bajos $h(k)$ y pasa altos $g(k)$ seguida por un submuestreo de un factor 2 como se muestra en la Fig. 1. Así al filtrar de manera recursiva cada nivel j , se genera el coeficiente de aproximación a_j de baja frecuencia y de detalle d_j de alta frecuencia dando lugar al llamado análisis multiresolución. Los coeficientes d_j generados por la wavelet a un cierto nivel proporcionan información de la energía de la señal en esa banda de frecuencias [18].

Existen diferentes wavelets que permiten calcular la TDW de una señal, en este trabajo se consideren las siguientes: Haar, Daubechies 4 (Daub4), Daubechies 6 (Daub6) y Coiflet 6 (Coif6). La wavelet Haar es la más simple, en tanto que las Daub4 y Daub6 son dos de las más empleadas en el procesamiento de señales y la Coif6 fue diseñada para mantener una relación estrecha entre los valores de la aproximación a_j y los valores de la señal original [19].

Los coeficientes de los filtros $h(k)$ y $g(k)$ para los casos mencionados se presentan a continuación.

Haar: $h = \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}} \right\}$ y $g = \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}} \right\}$.

Daub4: $h = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4\}$ y $g = \{\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4\}$

donde $\alpha_1 = \frac{1+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}$ $\alpha_2 = \frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}$ $\alpha_3 = \frac{3-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}$ $\alpha_4 = \frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}$ y

$\beta_1 = \alpha_4$ $\beta_2 = -\alpha_3$ $\beta_3 = \alpha_2$ $\beta_4 = -\alpha_1$.

Daub6: $h = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6\}$ y $g = \{\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6\}$

donde $\alpha_1 = 0.332670552950083$ $\alpha_2 = 0.806891509311092$ $\alpha_3 = 0.459877502118491$

$\alpha_4 = -0.135011020010255$ $\alpha_5 = -0.0854412738820267$ $\alpha_6 = 0.0352262918857095$ y

$\beta_1 = \alpha_6$ $\beta_2 = -\alpha_5$ $\beta_3 = \alpha_4$ $\beta_4 = -\alpha_3$ $\beta_5 = \alpha_2$ $\beta_6 = -\alpha_1$.

Coif6: $h = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6\}$ y $g = \{\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6\}$

donde $\alpha_1 = \frac{1-\sqrt{7}}{16\sqrt{2}}$ $\alpha_2 = \frac{5+\sqrt{7}}{16\sqrt{2}}$ $\alpha_3 = \frac{14+2\sqrt{7}}{16\sqrt{2}}$

$\alpha_4 = \frac{14-2\sqrt{7}}{16\sqrt{2}}$ $\alpha_5 = \frac{1-\sqrt{7}}{16\sqrt{2}}$ $\alpha_6 = \frac{-3+\sqrt{7}}{16\sqrt{2}}$ y

$\beta_1 = \alpha_6$ $\beta_2 = -\alpha_5$ $\beta_3 = \alpha_4$ $\beta_4 = -\alpha_3$ $\beta_5 = \alpha_2$ $\beta_6 = -\alpha_1$.

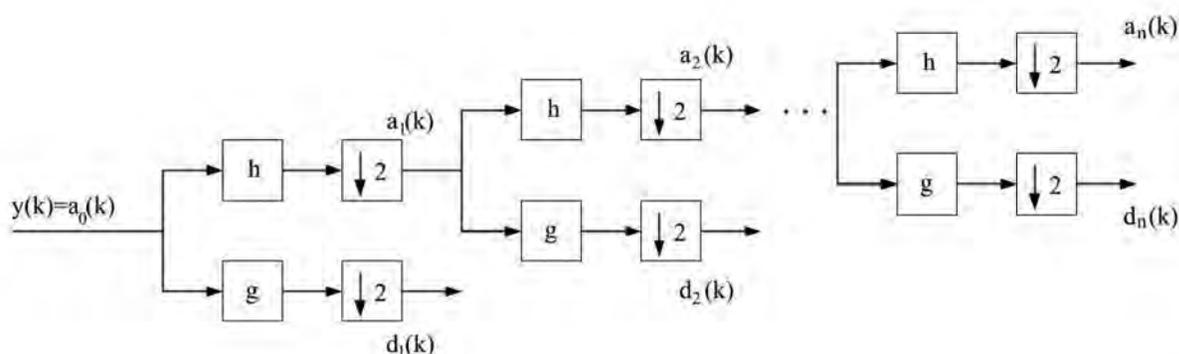


Fig. 1: Análisis multiresolución con la TDW

2.4. INDICADOR DE FALLO O RESIDUO

El indicador de fallo o residuo para la DF se determina de dos formas:

- a) Componente en frecuencia dada por la ecuación (4) calculada con la TRF del módulo del FEI.
- b) Valor eficaz de los coeficientes generados para el nivel j obtenido a partir de la descomposición con la TDW del módulo del FEI donde $j = 1, 2, \dots, o N/2$ usando las diferentes wavelets propuestas, la banda debe contener a la frecuencia dada por la ecuación (4). El valor eficaz se determina de acuerdo con la ecuación (5):

$$V_{eficaz,j} = \sqrt{\frac{1}{N_j} \sum_{k=1}^{N_j} d_{j,k}^2} \tag{5}$$

donde $d_{j,k}$ es el k -ésimo coeficiente calculado para el nivel j y N_j es el número de coeficientes de dicho nivel.

2.5. ANÁLISIS TERMOGRÁFICO

La termografía permite identificar cuándo y dónde se necesita mantenimiento en una instalación industrial, ya que los elementos mecánicos y eléctricos suelen calentarse antes de fallar. Las cámaras termográficas funcionan capturando la energía infrarroja irradiada por un objeto mediante un detector y un sistema óptico de enfoque. El detector envía los datos a un sensor electrónico para procesar la imagen. Una vez completado este paso el sensor genera una imagen compatible con el visor. Un análisis termográfico en un motor permite detectar un sobrecalentamiento, el cual puede deberse a un desequilibrio de tensión, fallo de un rodamiento, fallo del aislamiento, alineación inadecuada del eje, etc. [13].

2.6. MAQUETA EXPERIMENTAL

En la Fig. 2 se muestra el diagrama de bloques y la fotografía de una maqueta experimental con un motor BLDC en rueda para la evaluación de los algoritmos de DF y, eventualmente, de control. Consta de los siguientes elementos:

- Motor BLDC en rueda: Motor trifásico de 14" de diámetro de flujo axial de 0.5 kW, 12V, 8 A, 225 rpm (a 60 Hz) y 10 polos.
- Módulo de DF y control: Etapa basada en el procesador digital de señales (PDS) dsPIC30F4011, el PDS realiza las tareas que se describen a continuación:
 - Procesamiento de las señales de corriente del estator para calcular el FEI.
 - Procesamiento de las señales de los sensores de efecto Hall del motor para determinar la posición del rotor del motor.
 - Ejecución de los algoritmos de DF.

- Generación del patrón de modulación por ancho de pulso para el inversor trifásico.
- Selección del tipo de fallo en el motor a través del accionamiento de uno de varios contactores que ponen en cortocircuito diferentes secciones de los devanados del estator (ver Fig. 3).
- Comunicación con el ordenador personal a través de una interfaz RS-232.
- Módulo de electrónica de potencia: Etapa constituida por un rectificador con un condensador a la salida (bus de DC), el cual provee de potencia al inversor trifásico que alimenta el motor y permite operar a velocidad variable.
- Módulo de adquisición de señales: Etapa que realiza la medición de las corrientes de fase del motor y las acondiciona para que sean adquiridas por el convertidor analógico-digital del PDS, así como el acondicionamiento de las señales de los sensores de efecto Hall del motor para leerse con puerto de entrada/salida del PDS.
- Ordenador personal: Ordenador que ejecuta un programa en lenguaje Embarcadero que permite la comunicación con el PDS vía la interfaz RS-232 para mostrar la información del motor y realizar un análisis redundante de la DF en el motor.

Las modificaciones del motor BLDC en rueda para emular los fallos de diferente magnitud en el estator se muestran en la Fig. 3. Se detalla también, como ejemplo, los posibles cortocircuitos que se pueden generar en la fase A del motor (R_{FA1} , R_{FA2} y R_{FA3}) a través de las derivaciones introducidas en el devanado.

3. RESULTADOS

Las señales de corriente del estator permiten determinar el módulo del FEI. La DF en el estator del motor BLDC en rueda se efectúa de manera redundante con tres métodos para garantizar una detección confiable:

1. Análisis espectral del módulo del FEI de las corrientes del estator con la TRF.
2. Análisis con el valor eficaz de los coeficientes dados por la TDW del módulo del FEI de las corrientes del estator.
3. Análisis de imágenes infrarrojas provenientes de una cámara termográfica.

Se consideró un caso de fallo que consistió en cortocircuitar un 1/17 del devanado de la fase A del motor BLDC en rueda (3.5% de cambio en la magnitud de la resistencia total del devanado con respecto al caso sin fallo). Este fallo es de interés ya que debido a su magnitud se considera como un fallo de tipo incipiente (cambio de la resistencia de la fase menor al 5%).

La Fig. 4 muestra la magnitud de la TRF del módulo del FEI de las

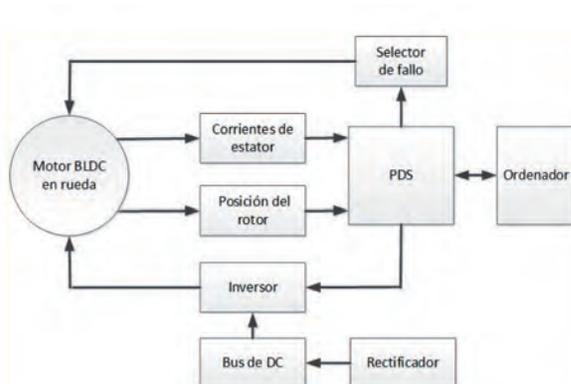


Fig. 2: Maqueta experimental del motor BLDC en rueda modificado



corrientes de estator del motor alimentado con una tensión a 60 Hz, la cual corresponde a una velocidad mecánica de 225 rpm, para los casos a) sin fallo y b) con fallo. Se puede observar que el indicador de fallo o residuo en el espectro de frecuencia aparece como una componente al doble de la frecuencia de operación del motor (120 Hz).

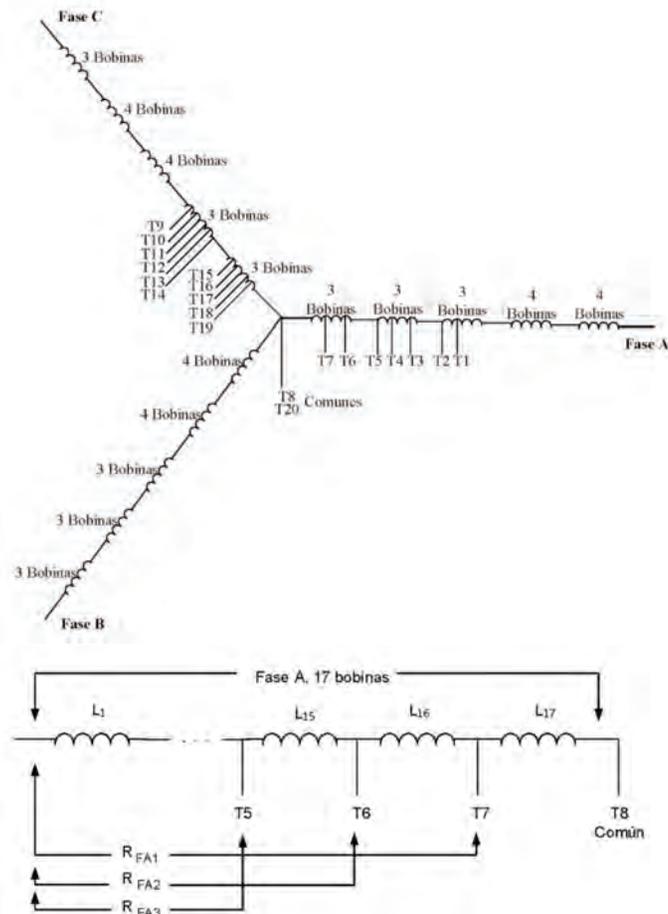


Fig. 3: Estator del motor BLDC en rueda modificado para emular fallos

Respecto al análisis con el valor eficaz de los coeficientes dados por la TDW del módulo del FEI, se implementó un algoritmo que efectúa la cuantificación, bajo las mismas condiciones de operación previas (con el mismo fallo) en el motor BLDC en rueda alimentado por una tensión a una frecuencia de 60 Hz. Se emplearon las wavelets Haar, Daub4, Daub6 y Coif6 para realizar el análisis.

Cuando se presenta un fallo en el estator del motor por cortocircuito entre espiras, se genera un desbalance en las corrientes de éste, y por consiguiente, se produce un cambio en el valor eficaz de los coeficientes de detalle d_j dados por la TDW del módulo del FEI en la banda donde se encuentra la frecuencia al doble de la frecuencia de la tensión de alimentación del motor.

Para la detección del fallo en el estator se calculó la TDW del módulo del FEI de las corrientes de estator con cada wavelet. A continuación se ubicó la banda de interés de los coeficientes wavelet. Para este caso, con la frecuencia de muestreo dada, correspondió a la quinta banda de descomposición (de 61 Hz a 122 Hz). Enseguida se efectuó la cuantificación calculando el valor eficaz de los coeficientes de esa banda para el escenario sin y con fallo. En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos usando la TDW con las cuatro wavelets propuestas.

Para evaluar la efectividad de la técnica de DF utilizando el valor eficaz de los coeficientes dados por la TDW del módulo del FEI de las corrientes de estator se utilizó la regla empírica (ver [20]), con este análisis es posible validar la aislabilidad de los fallos. La cantidad de experimentos efectuados para cada caso empleando las diferentes wavelets fue de diez experimentos para los escenarios sin y con fallo.

El método de la regla empírica consiste en obtener la media aritmética (μ) y la desviación estándar (σ) de los valores eficaces de los coeficientes de detalle d_j dados por la TDW del módulo del FEI de las corrientes de estator en la banda de interés para el número total de experimentos para los casos sin y con fallo, con estos datos se genera una distribución normal que se grafica con una extensión de 3σ . Para cada una de las wavelets (Haar, Daub4, Daub6 y Coif6) se determinaron las distribuciones normales para ambos casos, las cuales se presentan en la Fig. 5. Se puede observar que los intervalos en los que están definidas las distribuciones normales para los casos sin y con fallo para todas las wavelets no coinciden, por lo que se tiene más de un 99.7% de probabilidad que ambos eventos estén aislados y se pueda detectar el fallo.

TDW	Valor eficaz Caso a (sin fallo)	Valor eficaz Caso b (con fallo)	Diferencia del valor eficaz Caso a – Caso b
Haar	0.3041	0.3494	0.0453
Daub4	1.8202	2.4814	0.6612
Daub6	1.5689	2.0418	0.4729
Coif6	1.7582	2.1215	0.3633

Tabla 2: Valor eficaz de los coeficientes de detalle d_j de la TDW del módulo del FEI de las corrientes de estator sin y con fallo, 5ta. banda (61-122 Hz)

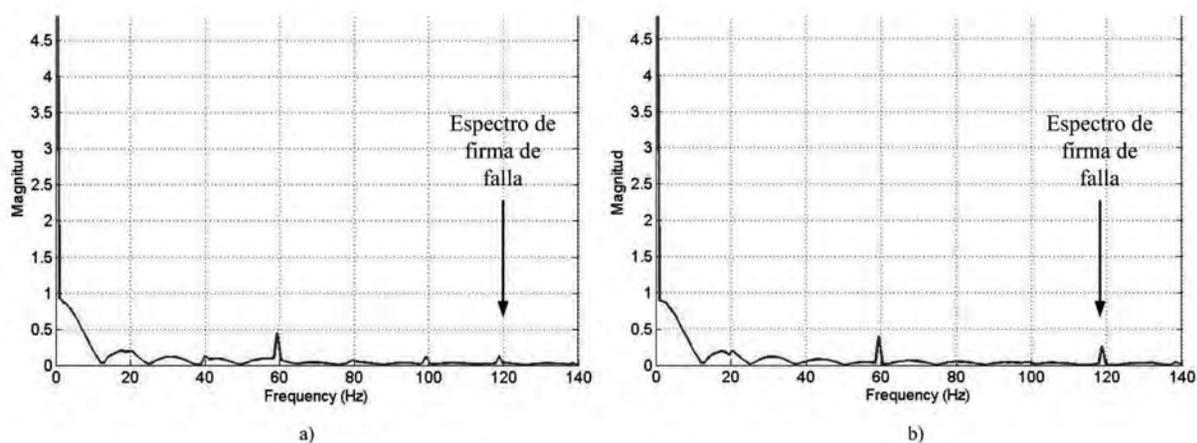


Fig. 4: Análisis espectral del módulo del FEI de las corrientes de estator con la TRF a) sin fallo y b) con fallo

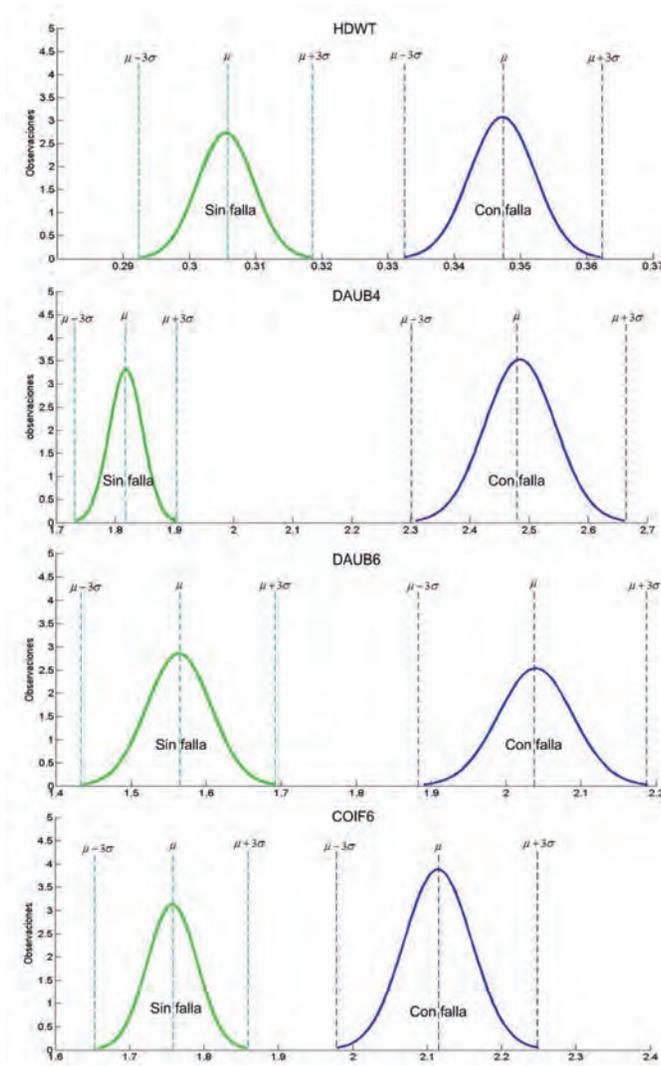
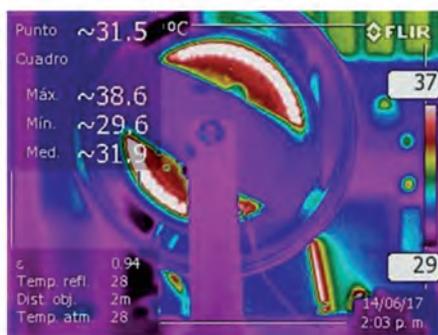


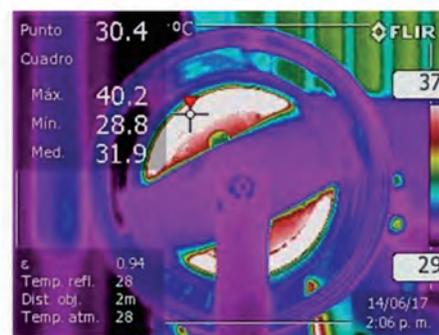
Fig. 5: Distribuciones normales de los valores eficaces de los coeficientes de detalle dados por la TDW del módulo del FEL de las corrientes de estator sin y con fallo, 5ta. banda (61-122 Hz)

Finalmente, mediante el uso de una cámara termográfica se estudió la evolución de la temperatura del motor BLDC en rueda para el caso de fallo de cortocircuito en el estator. Los resultados se muestran en la Fig. 6, las condiciones en las que se tomaron las imágenes para determinar la temperatura fueron las siguientes:

- Sin fallo en estado estable y operando a 60 Hz.
- Con fallo, el fallo con las mismas características establecida anteriormente, operando a 60 Hz. Cabe señalar que la imagen se capturó en el momento justo que se presentó el fallo de cortocircuito en el devanado del estator.



a)



b)

Fig. 6: Imágenes termográficas del BLDC en rueda a) sin fallo y b) con fallo

La temperatura en estado estable del motor sin fallo fue casi constante con un valor de 38.4° C. Esta condición de operación del motor se mantuvo por un lapso de tres minutos, presentando posteriormente un aumento de temperatura de 0.2°C. La temperatura se incrementó inmediatamente a 40.2°C al momento en que ocurrió el fallo de cortocircuito en el estator del motor. Este cambio de temperatura repentino indicó la presencia de un problema eléctrico en el estator.

Las características de la cámara termográfica utilizada son resolución infrarroja de 320 x 240 píxeles, sensibilidad térmica menor a 0.05°C, precisión ±2°C y rango de medición de temperatura de -20°C a +120°C.

4. DISCUSIÓN

Los resultados que se presentan a continuación corresponden a una condición de fallo de cortocircuito en el estator del motor de tipo incipiente, esto es, un cortocircuito de 1/17 del devanado de la fase A.

Los enfoques utilizados para la DF, basados en el procesamiento de señales, analizan el módulo del FEL de las corrientes de estator para detectar el cambio de magnitud de la componente al doble de la frecuencia de operación (120 Hz). La diferencia de la DF entre las diversas técnicas se describe a continuación:

- La detección por medio de la TRF del módulo del FEL es difícil cuando los fallos son incipientes ya que la magnitud de la componente en frecuencia a 120 Hz es pequeña cuando ocurre el fallo y de un valor próximo al caso sin fallo lo cual se puede apreciar en la Fig. 4. Lo anterior hace necesario añadir un clasificador que garantice que la variación en el espectro de frecuencia es un fallo provocado por un cortocircuito y no por una variación en las corrientes de fases debida a cambios de carga o por variación de la temperatura en el motor.
- El valor eficaz de los coeficientes dados por la TDW del módulo del FEL para cada una de las wavelets analizadas permitió detectar el fallo de cortocircuito. El procedimiento consistió en obtener el valor eficaz de los coeficientes de detalle de cada banda de descomposición para cada wavelet bajo condiciones sin y con fallo, se determinó el valor eficaz máximo para el caso con fallo así como el valor correspondiente al escenario sin fallo para la misma banda y se calculó la diferencia (máxima) de ambos valores como se muestra en la Tabla 2. La banda de frecuencia de interés para este caso fue la quinta con un rango de frecuencia de 61 Hz a 122 Hz.
- El análisis efectuado con valor eficaz de los coeficientes dados por la TDW del módulo del FEL mostró que el uso de la

wavelet Daub4 presentó la mayor efectividad de acuerdo a la Tabla 2 y la Fig. 5, de esta última se puede constatar que la separación entre las distribuciones normales es mayor para el caso en el que se emplea esta wavelet. Además la carga computacional para efectuar la TDW con la wavelet Daub4 es menor que con las wavelets Daub6 y Coif6.

- La DF de cortocircuito en el estator del motor por medio de las imágenes infrarrojas de la cámara termográfica se utiliza como medio cualitativo para corroborar los resultados obtenidos con el análisis de señales. Este método de DF es utilizado a nivel industrial en las máquinas eléctricas rotatorias debido a su sencillez y a no ser invasivo. Sin embargo el costo del equipo, la necesidad de conocer las condiciones ambientales y los rangos de operación limitados han restringido el uso de estos sistemas para la DF en línea.

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se implementó una metodología experimental basada en diferentes criterios para la DF de cortocircuito en los devanados del estator de un motor BLDC en rueda a través de mediciones no invasivas. Se emplearon dos enfoques para efectuar una DF redundante y lograr una mayor confiabilidad en el dictamen en caso de un fallo.

Las técnicas de análisis de señales se compararon contra métodos usualmente utilizados a nivel industrial en la DF producidas por cortocircuitos en los devanados de los motores como es la termografía.

El enfoque basado en procesamiento de señales de corrientes del estator del motor BLDC en rueda permitió no sólo detectar un fallo, sino también monitorear continuamente el sistema de manera económica a diferencia del método de la termografía. Además, estas técnicas se pueden incorporar eventualmente en el procesador digital que realice el control del motor.

La DF de cortocircuito en los devanados del estator del motor BLDC utilizando la TDW fue más efectiva con la wavelet Daub4 y computacionalmente más conveniente que las wavelets Daub6 y Coif6.

Como trabajo futuro se propone explorar la aplicación de los métodos estudiados para detectar otros tipos de fallos en el motor BLDC como son los problemas de desmagnetización del rotor, excentricidad y fallos en los rodamientos, o bien, analizar la factibilidad de su aplicación a otros tipos de máquinas eléctricas como los aerogeneradores [21].

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Boglietti A, El-Refaie AM, Drubel O, et al. "Electrical machine topologies: hottest topics in the electrical machine research community", IEEE Industrial Electronics Magazine. Junio 2014. Vol.8-2 p.18-30. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MIE.2013.2294077>
- [2] Isermann R. Fault-Diagnosis Systems An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. Germany: Springer, 2006. 475 p. ISBN: 3-540-24112-4
- [3] Henaio H, Capolino GA, Fernandez-Cabanas M, et al. "Trends in fault diagnosis for electrical machines: A review of diagnostic techniques", IEEE Industrial Electronics Magazine. Junio 2014. Vol.8-2 p.18-30. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MIE.2013.2287651>
- [4] Riera-Guasp M, Antonino-Daviu JA, Capolino GA. "Advances in electrical machine, power electronic, and drive condition monitoring and fault detection: state of the art", IEEE Transactions on Industrial Electronics. Marzo 2015. Vol. 62-3 p.1746-1759. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2014.2375853>
- [5] Chanpeng W, Hachanont P. "Design of efficient in-wheel motor for vehicle". Energy Procedia. 2014. Vol. 56. p.525-531. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.188>

- [6] Gottipati P, Dobzhanskyi O, Mendrela EA. "In-wheel brushless DC motor for a wheel chair drive". En: 2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, 2010. P. 1-4.
- [7] Da Y, Shi X, Krishnamurthy M. "Health monitoring, fault diagnosis and failure prognosis techniques for brushless permanent magnet machines", En: 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2011. P. 1-7.
- [8] Li Z, Fan X, Mao H, Cui J. "Simulation and fault diagnosis for BLDCM". En: 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2013. P. 3085-3090.
- [9] Liu D, Yang B, Zhao Y, et al. "Time-frequency analysis based on BLDC motor fault detection using Hermite S-method". En: IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE), 2012. P. 592-596.
- [10] Abed WR, Sharma SK, Sutton R. "Fault diagnosis of brushless DC motor for an aircraft actuator using a neural wavelet network". En: IET Conference on Control and Automation 2013: Uniting Problems and Solutions, 2013. P. 1-6.
- [11] Tashakori A, Ektesabi M. "Fault diagnosis of in-wheel BLDC motor drive for electric vehicle application". En: 2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2013. P. 925-930.
- [12] Maldonado-Ruelas VA, Villalobos-Piña FJ, Sosa-Serna GA, Alvarez-Salas R, Pazos-Flores F, Alvarez-Salas JA. "In-wheel brushless DC motor test-bed for control and fault detection". En: IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing, 2016. P. 1-5.
- [13] Garcia-Ramirez AG, Morales-Hernandez LA, Osornio-Rios RA, et al. "Fault detection in induction motors and the impact on the kinematic chain through thermographic analysis". Electric Power Systems Research. 2014. Vol. 114. P. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epr.2014.03.031>
- [14] Krishnan R. Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives. USA: CRC Press, 2009. 611 p. ISBN: 9780824753849
- [15] Milanez DL, Emanuel AE. "The instantaneous-space-phasor: a powerful diagnosis tool". IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. February 2003. Vol. 52-1. p.143-148. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2003.809069>
- [16] Verucchi CJ, Acosta GG. "Fault detection and diagnosis techniques in induction electrical machines". IEEE Latin America Transactions. March 2007. Vol. 5-1. P. 41-49. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/T-LA.2007.4444532>
- [17] Villalobos Piña FJ, Alvarez-Salas R. "Algoritmo robusto para el diagnóstico de fallas eléctricas en el motor de inducción trifásico basado en herramientas espectrales y ondeletas", Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial (RIAI). Julio 2015. Vol.12-3 p. 292-303. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2015.04.003>
- [18] Mallat S. A wavelet tour of signal processing. Second Edition. USA: Academic Press, 1999. 637 p. ISBN: 0-12-466606-X
- [19] Walker J. A primer on wavelets and their scientific applications. Second Edition. USA: Chapman and Hall/CRC Press, 2008. 293 p. ISBN: 978-1-58488
- [20] Garcia-Guevara FM, Villalobos-Piña FJ, Alvarez-Salas R, et al. "Stator fault detection in induction motors by autoregressive modeling". Mathematical Problems in Engineering. 2016. Vol. 2016 p.7 pages. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/3409756>
- [21] Martínez-Cámara E, Jiménez-Macias E, Blanco-Fernández J, et al. "Failure detection and prediction in wind turbines by using Scada data". DYNA Energía y Sostenibilidad. Enero-Diciembre 2013. Vol. 2-1. P. 10. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/ES5708>

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por el Tecnológico Nacional de México / I. T. Aguascalientes a través del Departamento de Posgrado e Investigación.

Modificación de las propiedades en los tejidos de algodón tratados con microcápsulas de esencia marina



Variation of cotton properties due to the application of sea fragrance microcapsules



Marilés Bonet-Aracil¹, Eva Bou-Belda¹, Ainhoa Lopez-Narbón^{1,2}, Marcela Ferrándiz-García² y Lucía Capablanca-Francés²

¹ Universitat Politècnica de València. Dpto. de Ingeniería Textil y Papelera. Plaza Ferrándiz y Carbonell, s/n - 03801 Alcoy.

² AITEX. Instituto tecnológico Textil. Investigador. Plaza Emilio Sala, 1 - 03801 Alcoy.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8670> | Recibido: 01/12/2017 • Inicio Evaluación: 11/12/2017 • Aceptado: 06/02/2018

ABSTRACT

- Cotton fabrics are used in multiple applications consequently, are susceptible to treatments for its functionalization. Microcapsules interest is increasing among the industry field as they allow to incorporate multiple functions to textiles. The finishing treatments that incorporate microcapsules contain in their formulations binding agents in order to increase their permanence on the textile. In this work, different concentrations of resin are tested in order to evaluate weather its application on industrial formulations with microcapsules influences the flexural rigidity on the cotton fabric. Considering that the application of the microcapsules is carried out in the final phase of the textile proces, it can modify the fabric appearance. The possible color modification that is generated on three colors, red, yellow and blue at 2% on fiber weight has also been evaluated. The study shows that not only the resin influences the flexural rigidity of the tissue, but the presence of microcapsules also modifies this behavior. In addition, it is proven that the color variation is not significant to detect a perceptible change in tissue coloration. Flexural rigidity modification can be observed previously to observe changes in color.
- **Keywords:** Fabric, cotton, microcapsules, rigidity, colour.

RESUMEN

Los tejidos de algodón se emplean en múltiples aplicaciones, y como tal son susceptibles de tratamientos para su funcionalización. Las microcápsulas son productos que han captado el interés de la industria por permitir incorporar múltiples funciones a los textiles. Los tratamientos de acabado que incorporan microcápsulas contienen en sus formulaciones agentes de ligado (resinas) con el fin de incrementar su permanencia sobre el textil. En este trabajo se ensayan diferentes concentraciones de resina con el fin de evaluar si la aplicación de ésta en las concentraciones utilizadas en formulaciones industriales con microcápsulas influye en la rigidez a la flexión del tejido de algodón.

Dado que la aplicación de las microcápsulas se realiza en la fase final del procesado, también se ha evaluado la posible modificación de color que se genera sobre tres colores, rojo, amarillo y azul al 2% sobre peso de fibra.

El estudio pone de manifiesto que no sólo la resina influye en la rigidez a la flexión del tejido sino que la presencia de microcápsulas también modifica el comportamiento. Además, queda

probado que la variación de color no es significativa para detectar un cambio perceptible en la coloración del tejido. Los cambios en la rigidez a la flexión se manifiestan con anterioridad a que la variación de color sea perceptible.

Palabras clave: Tejido, algodón, microcápsulas, rigidez, color.

1. INTRODUCCIÓN

Como metamaterial se entiende aquel material estructurado artificialmente utilizado para controlar diversos fenómenos físicos como consecuencia a su estructura a pequeña escala sin necesidad de que sean materiales electromagnéticos (1). En los últimos años se están desarrollando nuevas fibras con el fin de mejorar las propiedades de las fibras convencionales (2). Una de las principales líneas de investigación es la aplicación de microcápsulas a las fibras para así mejorar los acabados o modificar las propiedades de los tejidos. Las microcápsulas se pueden considerar como metamateriales que controlan el estado de la materia. Permiten aplicar principios activos en estado líquido sobre las fibras sin que se vierta el líquido sobre éstas hasta que se den unas circunstancias concretas. Estas investigaciones ya están mostrando interés a nivel industrial (3-4).

Las microcápsulas, son partículas de tamaño micrométrico que contienen un núcleo activo, sólido líquido o gaseoso, protegido por un polímero externo. La composición de las microcápsulas puede ser muy variada ya que pueden tener diferentes membranas (5-7) y diversos materiales de principio activo. Aunque generalmente es el núcleo el que define la propiedad que se desea añadir al tejido, pueden diseñarse microcápsulas con polímeros de membrana que también incluyan principios activos como es el caso del quitosano. Son muchas las aplicaciones que encontramos actualmente de microcápsulas, por ejemplo: cosmética (8), insecticida (9-10), electrónica en forma de cristales líquidos (11), alimentarias (12-13), farmacéuticas (10, 14-15), médicas (16), etc. Dentro de la industria textil encontramos diferentes principios activos que están siendo de interés como: aromas (3,17), repelentes de insectos (18,19), antimicrobianos (7,16, 20,21) retardantes de fuego (22,23) materiales de cambio de fase (24,25), tintes (26,27) etc.

Cuando las microcápsulas se aplican en los textiles, la membrana es no reactiva, por lo tanto, éstas no presentan afinidad por la fibra dificultando su adhesión a las fibras. Esta falta de afinidad entre las microcápsulas y las fibras, hace necesaria la incorporación de un producto auxiliar que permita la unión entre el tejido y las microcápsulas y garantice una cierta durabilidad. Este produc-

to conocido como agente de ligado o resina, suele estar basado en compuestos acrílicos, poliuretano o resina de silicona (9, 28,29).

El principal objetivo de la encapsulación de principios activos es aumentar la durabilidad del principio activo sobre el tejido, por lo tanto, para no dañar las cápsulas es lógico pensar que éstas se deben aplicar como proceso final (9), dado que previamente se somete a múltiples operaciones y su conveniente manipulación. Esto conlleva que la aplicación de las microcápsulas en el tejido no debe disminuir el confort ni modificar aquellas propiedades que no sean objeto de mejora. Diversos estudios recurren a diferentes concentraciones de agente de ligado, en algunas de ellas (30-32) se emplean concentraciones de 50 g/L, sin embargo, dichas concentraciones no son capaces de alcanzar los 20 lavados (32) cuando otros estudios (2, 33) determinan que la concentración de resina 10 g/L de resina acrílica permiten asegurar la presencia de microcápsulas tras 15 ciclos de lavado. Así pues, un incremento sustancial de resina no implica un mayor presencia de microcápsulas tras el lavado, cuando un mayor consumo de agente de ligado supone modificaciones en el tacto del tejido (33) e incrementos en el coste del producto final. Sin embargo, las variaciones generadas, como consecuencia de la aplicación de la resina, en el comportamiento y aspecto del tejido no se han estudiado de forma objetiva.

La aplicación de microcápsulas en artículos textiles puede destinarse tanto a los textiles para el hogar como a prendas de indumentaria o destinarse a aplicaciones más técnicas como son la ropa deportiva o textiles con fines cosméticos, terapéuticos, agrotiles, etc. El objetivo de este trabajo es evaluar la influencia que tiene la aplicación de microcápsulas sobre el acabado del tejido, centrándose en dos propiedades: tacto y el color. Para el estudio del tacto, se va a estudiar la variación de la rigidez a la flexión sobre un tejido de algodón según la cantidad de resina aplicada, así como de las microcápsulas. Para determinar la diferencia de color se realizará un estudio cromático después de realizar la tintura en diferentes concentraciones y otro estudio después de aplicar las microcápsulas sobre dichos tejidos para evaluar las diferencias. En ambos estudios, las microcápsulas se van a aplicar sobre el tejido por sistemas habitualmente empleados en los procesos de ennoblecimiento textil industrial: impregnación y pulverización.

Dado que se trata de emplear procesos habituales para la industria, aplicando un producto, las microcápsulas, cada vez más demandado por su potencial y versatilidad en la funcionalización de textiles, el interés a nivel industrial radica en evaluar, de forma objetiva, si las cantidades tanto de microcápsulas como de ligante habitualmente empleadas permiten una funcionalización correcta sin inducir determinados efectos secundarios no deseados como son, la modificación del color o la rigidez del tejido.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. MATERIALES

Las microcápsulas (Esencial Algas Marinas 24497) se suministraron por InnovaTec Sensorización y Comunicación S.L. (Alcoy, Spain). La membrana era melamina formaldehído y el agente activo era fragancia marina. Como resina acrílica se utiliza STK-100 de Color Center (España).

Los colorantes empleados fueron Direct Yellow 28 (Cl. 19555), Direct Red 80 (Cl. 35780), Direct Blue 106 (Cl. 51300). La sal añadida en el proceso de tintura fue sulfato sódico anhidro.

El tejido empleado es una sarga de 210 g/m², y 100% algodón. El tejido ha sido blanqueado químicamente con peróxido en un proceso industrial.

2.2. MÉTODOS

2.2.1. TRATAMIENTO DEL TEJIDO

En referencia a la tintura de los tejidos, se realizó mediante la técnica de agotamiento. La relación de baño fue de 1/40, las concentraciones de colorante 2% s.p.f. y las concentraciones de sulfato sódico anhidro de 17 g/L. Se introducen las muestras en el Tin Control a temperatura ambiente y una vez alcanzada la temperatura de 60-70° C se añade el 50 % de la sal, el resto se introduce 10 minutos después de que haya alcanzado 100° C. Se mantiene la temperatura durante 60 minutos, posteriormente se sacan, se lavan en frío con abundante agua y se dejan secar.

La aplicación de microcápsulas se ha realizado por dos de los métodos aplicados en la industria textil, impregnación y pulverizado. Para realizar la impregnación en el tejido se ha utilizado un baño con diferentes concentraciones de resina, según el ensayo realizado, y 60 g/L de microcápsulas. El tejido se introduce en el baño y seguidamente se hace pasar por un foulard 2608 TEPA de 1 kW a 2 m/min para eliminar el baño sobrante del tejido. Este proceso se repite dos veces con el objetivo de obtener valores de pick-up elevados, que son calculados tras el proceso mediante la siguiente ecuación:

$$Pick - Up = \frac{P_s - P_h}{P_s} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

P_s = peso seco del tejido sin tratar, y

P_h = peso del tejido húmedo

En la pulverización se ha utilizado un pulverizador que aplique la disolución deseada por una cara del tejido. Con tal de controlar la cantidad de disolución depositada sobre el tejido, éste es pesado antes y después del proceso de pulverización, logrando aplicar la misma cantidad de disolución que en el tratamiento por impregnación y con ello poder comparar ambos procesos.

Las concentraciones de resina estudiadas son: 0, 5, 10, 15, 25, 50, 75 y 100 g/L. Estas concentraciones exceden los valores habituales empleados en la industria con el fin de determinar los valores que modificarían el comportamiento. Las microcápsulas se añaden con una concentración de resina de 60 g/L, ya que estudios previos (33) avalan esta concentración como apropiada para asegurar la presencia de microcápsulas sobre el tejido durante 15 lavados cuando se emplean concentraciones de 10 g/L de resina.

Las muestras se sometieron a un tratamiento térmico en forma de aire seco a 110°C para curar la resina (33).

2.2.2. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)

Sobre las muestras tratadas por pulverización y por impregnación se ha procedido a realizar la observación de las muestras mediante microscopía electrónica (Scanning Electron Microscopy, SEM) con un microscopio Phenom Microscope (FEI Company, Hillsboro, OR, USA). Cada muestra se coloca en una superficie y se recubre con una capa de oro y paladio con la finalidad de transformarlas en conductoras utilizando el Sputter Coater EMITECH mod. SC7620 (Quorum Technologies Ltd., EastSussex, UK). Se han analizado las muestras con los aumentos convenientes y con una tensión de aceleración de 10 kV.

2.2.3. RIGIDEZ A LA FLEXIÓN

Con el objetivo de determinar si el tejido tratado con la resina experimenta una modificación en el comportamiento del tejido se

ha procedido a evaluar si existe un cambio en la rigidez a la flexión. Este ensayo indica si la mayor concentración de resina implica un apelmazamiento del tejido y por tanto una disminución en la capacidad de deformarse ante un esfuerzo externo. La realización de este ensayo se ha seguido según la norma española "Determinación de la rigidez a la flexión de un tejido" UNE 40-392-79.

2.2.4. DIFERENCIAS DE COLOR

Con el objetivo de comparar mediciones de diferencia de color de forma objetiva se han obtenido las coordenadas cromáticas (CIE L^* , a^* , b^*) del espacio de color CIELAB de las muestras tintada empleando un espectrofotómetro de reflexión MINOLITA CM-3600d. La energía de UV estaba incluida. Las medidas se realizaron con el observador patrón CIE-Lab 10° y el iluminante estándar D65.

Por otro lado, la diferencia de color de las muestras fue obtenido de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Diferencia de color } (\Delta E^*) = ((\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2)^{1/2}$$

Donde $\Delta L^* = L^*$ con microcápsulas - L^* sin microcápsulas; $\Delta a^* = a^*$ con microcápsulas - a^* sin microcápsulas; $\Delta b^* = b^*$ con microcápsulas - b^* sin microcápsulas; " L^* " describe la luminosidad, " a^* " medida de matices rojo-verde, " b^* " medida de matices azul-amarillo. Cabe destacar que se realizaron tres mediciones de cada muestra y se calculó el valor medio.



Figura 1: Fibras de algodón sin tratar

3. RESULTADOS

3.1. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)

La caracterización de las muestras por microscopía permite observar tanto la presencia de la resina como de las microcápsulas. Las imágenes que se muestran en las Figuras 1-3 obtenidas por microscopía electrónica evidencia los cambios que se producen sobre las fibras como consecuencia del tratamiento.

Al comparar la Figura 1 con la Figura 2 se puede apreciar como existen ciertas hebras de polímero entre las fibras como consecuencia de la aplicación de la resina acrílica. En el caso de la Figura 2b, se puede apreciar no sólo las hebras sino que la resina actúa como un recubrimiento de las fibras, y se prolonga en forma de capa fina entre fibras observándose un incremento en el efecto de apelmazamiento entre fibras que no se detecta en la Figura 1.

Cuando se aplican las microcápsulas junto con el agente de ligado, se puede observar la presencia de ambos componentes en las fibras, sin embargo, el proceso de pulverización aparentemente deposita más cantidad de producto. No obstante, este aspecto no es real y se debe a que el proceso de impregnación incluye la acción mecánica que facilita la penetración de los productos a las capas internas del tejido.

3.2. RIGIDEZ A LA FLEXIÓN

La aplicación de la resina, implica la incorporación de un polímero que actúa como ligante o adhesivo entre las fibras y las microcápsulas. En el caso de que el tejido se encuentre apretado o se haya adicionado una cantidad de agentes externos elevada, se puede dar el caso de que el tejido presente una mayor resistencia a la deformación ante presiones o fuerzas externas y consecuentemente un aumento en la rigidez supone una pérdida del confort. Se ha estudiado la rigidez a la flexión que presenta un tejido según la concentración de resina que se le aplica. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

El ensayo se ha efectuado para los dos procedimientos de aplicación, de microcápsulas estudiados, impregnación y agotamiento. Como se puede observar en la

, a medida que aumenta la concentración de resina, el tejido muestra una mayor rigidez a la flexión. Este comportamiento se

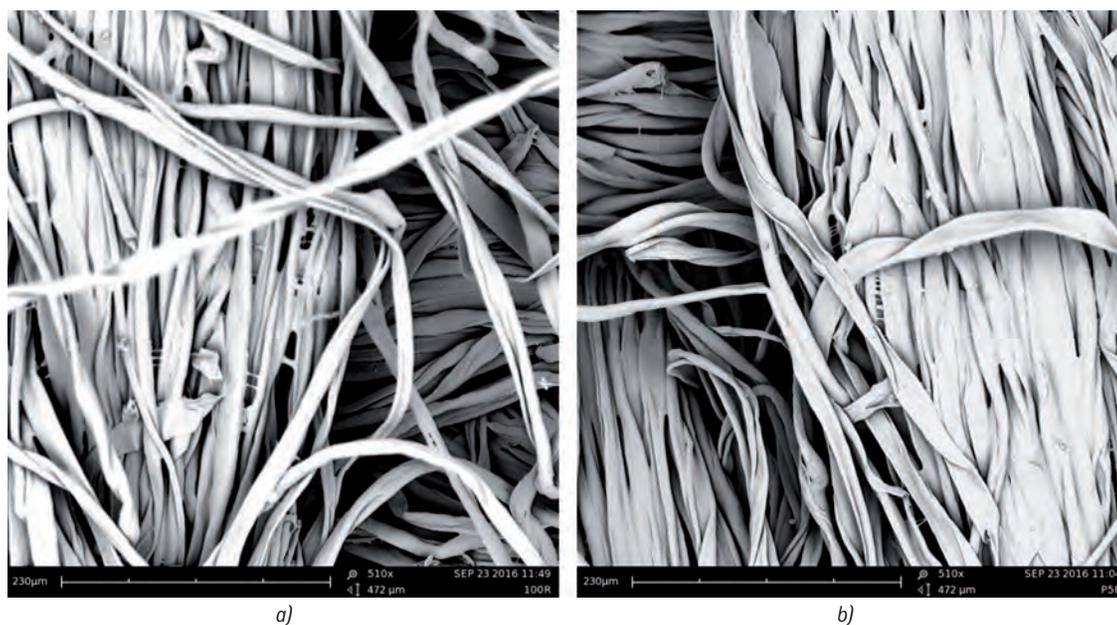


Figura 2: Fibras de algodón tratadas con resina (100 g/L) a) impregnación, b) pulverizado



Figura 3. Fibras de algodón tratadas con microcápsulas (60 g/L) y resina (10 g/L). a) impregnación y b) pulverización

Concentración (g/L)	Muestras	Rigidez impregnación (mg-cm)	Rigidez pulverización (mg-cm)
0	B	512,15	
5	5R	480,64	594,85
10	10R	532,41	678,06
15	15R	557,04	861,39
25	25R	730,34	1056,87
50	50R	874,26	1207,47
75	75R	1091,48	1523,42
100	100R	1187,42	1625,82

Tabla 1: Valores de la rigidez a la flexión a diferentes concentraciones de resina aplicada por impregnación y pulverización sobre el tejido

observa tanto para la muestra impregnada como pulverizada. La representación de estos datos se muestra en la Figura 4.

La Figura 4 compara la rigidez obtenida según el método de aplicación de la resina. Se puede observar que, para todas las concentraciones estudiadas, la rigidez es mayor para la técnica de pulverización. Este hecho se puede explicar en que el método de pulverización aplica la resina en una cara del tejido, y la penetración se produce por la acción de la gravedad, ello provoca una mayor concentración de producto en la cara de aplicación del tejido y por tanto se traduce en una mayor rigidez.

Los valores de impregnación muestran que, para concentraciones menores a 25 g/L, la rigidez se mantiene constante alrededor

de 500 mg-cm. Esto se puede explicar porque a concentraciones inferiores, el polímero no se ha distribuido entre la totalidad de las fibras y por tanto la rigidez no se ve limitada y es a partir de esa concentración cuando las fibras ya están sujetas por el polímero limitando la libertad de movimiento y los incrementos en la concentración de resina implican un incremento en el grado de fijación de las fibras. En cambio, en los datos de pulverización, la rigidez aumenta progresivamente ya que el aumento de la concentración es localizado en las fibras superficiales y se hace patente antes, aunque a partir de 25 g/L, el aumento es considerable.

A continuación, se muestran los resultados del estudio de la rigidez en muestras con microcápsulas y resina. Se va a aplicar sobre el tejido una disolución de microcápsulas a 60 g/L y resina a 10 g/L y se van a comparar los resultados de rigidez con los datos de la muestra con una concentración de resina de 10 g/L.

En la Figura 5 se representan los valores obtenidos tras el ensayo de rigidez a la flexión comparando el tratamiento por pulverizado y el de impregnación para las muestras con sólo resina (10R) y con el agente de ligado y las microcápsulas (60M10R) respecto del comportamiento que presenta el tejido sin tratar (B). Se observa el incremento en la rigidez tanto en la muestra con resina, como la que tiene resina y microcápsulas. Es destacable, que se ha aplicado microcápsulas con 10 g/L de resina, no habiendo alcanzado los valores límite de 25 g/L (observados en la Figura 4), donde se produce un incremento significativo de rigidez del tejido y aun así, las muestras con microcápsulas ofrecen valores de rigidez que doblan el valor del tejido sin ningún tipo de tratamiento. En este

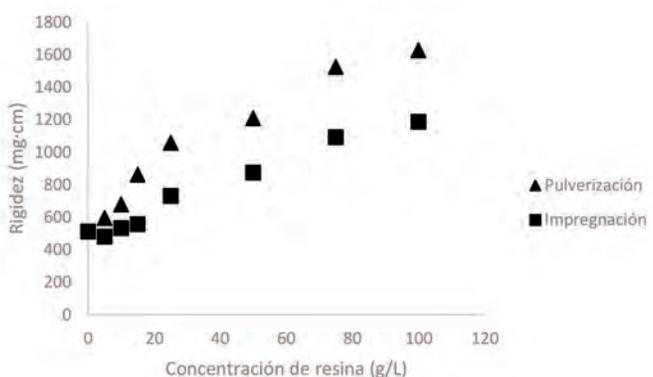


Figura 4: Gráfica de la rigidez a la flexión a diferentes concentraciones de resina en el tejido

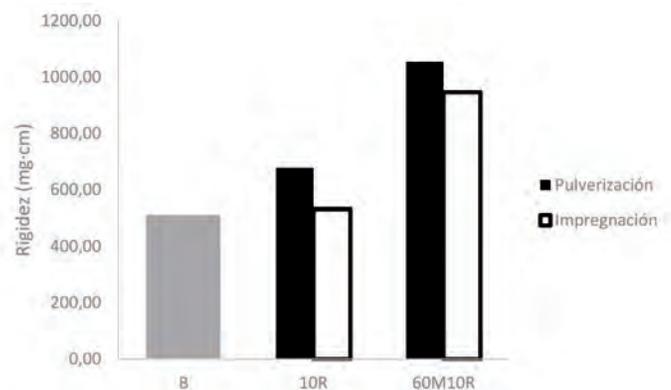


Figura 5: Representación de la rigidez obtenida en las muestras de 10 g/L de resina con y sin microcápsulas a 60 g/L de concentración aplicadas por impregnación y pulverización

caso se obtienen valores alrededor de los 1000 mg-cm, similares a los obtenidos para muestras de 25 g/L de resina sin microcápsulas. El proceso de pulverización, al ser un tratamiento superficial, ofrece mayor resistencia que el proceso de impregnación. Paralelamente, como se puede observar, los valores de rigidez en las muestras que tienen resina y microcápsulas son mayores que en las muestras que tiene solo resina. Este hecho se debe a que las microcápsulas, a pesar de su tamaño microscópico son partículas añadidas a la superficie de las fibras y este incremento de superficie sólida se traduce en un incremento en la rigidez del tejido.

3.2. DIFERENCIAS DE COLOR

Al aplicar las microcápsulas en la fase final de la confección de un tejido, se evalúa la posibilidad de que exista un cambio de color como consecuencia de la aplicación de este tratamiento sobre los tejidos tintados tras la aplicación de microcápsulas.

La evaluación colorimétrica se realiza basándose en los tres ejes de las coordenadas cromáticas donde L indica la luminosidad y va de valores comprendidos entre $L^* = 0$ (negro) y $L^* = 100$ (blanco). Además para una misma luminosidad (L^*) se define un plano colorimétrico forado por las coordenadas a^* ($a^* > 0$ rojo; $a^* < 0$ verde) y b^* ($b^* > 0$ amarillo; $b^* < 0$ azul). A continuación, en la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos. Para poder determinar la influencia del color, se ha procedido a realizar tinturas a intensidades de color fuertes (2 % spf).

En la Tabla 2 se observa que, la aplicación de las microcápsulas ocasiona una diferencia de color que es apreciable mediante la medición por métodos objetivos como la espectroscopia. En la tabla siguiente (Tabla 2) se aporta información detallada de las variaciones que se han generado en función de cada una de las diferentes coordenadas cromáticas.

En todos los casos la diferencia se ha obtenido tomando como referencia la muestra tintada con el mismo color e idéntica intensidad de color. Al analizar la luminosidad (L^*) se puede observar que en todos los casos los valores son negativos, lo cual indica que la luminosidad de la muestra tratada con microcápsulas es mayor que la de la muestra de referencia. Ello es debido a que el tratamiento de aplicación de las microcápsulas ha derivado en un cambio en el color de la muestra hacia tonos más blanquecinos. Cuando el estudio se centra en las coordenadas a^* y b^* , se puede observar que las muestras parecen ser más amarillas y con menos contenido azul sin apreciarse una clara tendencia para los rojos. No obstante, los valores obtenidos apenas alcanzan un valor de 0,5 lo que implica que los colores son muy próximos.

Cuando se realiza el estudio mediante la evaluación global del cambio en el espacio de color, y se observan los valores de diferencia de color (ΔE^*), al comparar los métodos de aplicación de las microcápsulas, se puede observar que las muestras tratadas por impregnación ofrecen menor variación en el color que las muestras donde se ha recurrido como técnica de aplicación al proceso de pulverización. Sin embargo, cuando se analizan los valores de ΔE , se puede observar que en ningún caso se alcanzan diferencias

de color superiores a un valor de 2 ($\Delta E^* \leq 1$). Esto significa que, aunque la diferencia de color existe y el espectrofotómetro es capaz de detectarla, dicha variación no será perceptible por el ojo humano. Da ahí que las diferencias a nivel de coordenadas sean pequeñas y no han quedado claramente definidas.

4. DISCUSIÓN

En este trabajo ha quedado demostrado como la apariencia lechosa de la preparación acuosa de la resina y las microcápsulas modifica el color de las muestras tintadas. Sin embargo, los ensayos descritos y el análisis de los resultados ponen de manifiesto que es más importante la modificación del comportamiento del tejido frente a la flexión ya que se ve incrementada la rigidez a la flexión no sólo por la concentración de la resina sino por la presencia de las microcápsulas.

Además, se corrobora que la deposición del producto en el tejido difiere considerablemente en función de que se aplique por impregnación o por pulverizado. En el caso del pulverizado el producto se deposita en la superficie de una de las caras del tejido y penetra hacia el interior por la acción de la gravedad. En el caso de la aplicación por impregnación, son los cilindros exprimidores los que permiten una mejor difusión del producto hacia el interior del tejido.

Es destacable que, en el caso de la aplicación por pulverización se coloca una mayor concentración de producto en la superficie del tejido. La reticulación del agente de ligado en la superficie hace que la resistencia a la flexión se vea afectada y no se puede vencer por las fibras de la zona inferior no ligada. Cuando el tejido es tratado por impregnación, la mejor distribución de la resina permite que el bloqueo o rigidez no sea tan acusado.

5. CONCLUSIONES

La aplicación de microcápsulas sobre tejidos permite aportar nuevas propiedades y por tanto el desarrollo de textiles de aplicación en sectores muy diversos. La industria textil muestra un gran interés en este tipo de acabados por la versatilidad que le ofrece a sus productos. Se puede concluir que a pesar que las concentraciones habituales de aplicación de microcápsulas ofrecen un aspecto lechoso y que al aplicarse sobre los textiles coloreados puede cambiar ligeramente la percepción de color del textil tratado, se ha demostrado que en las concentraciones ensayadas y que se encuentran entre las habitualmente empleadas en la industria, la percepción de color de forma objetiva (espectrofotómetro) varía ligeramente, variaciones que no son apreciables por el ojo humano. Además, se ha puesto de manifiesto que cuando se incrementa la concentración del ligante las variaciones en la rigidez a la flexión se manifiestan previamente a la modificación del color.

Con este trabajo se pone de manifiesto que la aplicación de microcápsulas de esencia marina sobre textiles a concentraciones habituales en la industria textil (60 g/L con 10 g/L de ligante), es

REFERENCIA	impregnación				pulverización			
	$\Delta E^* a^*b^*$	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	$\Delta E^* a^*b^*$	ΔL^*	Δa^*	Δb^*
Rojo 2%	0,86	-1,72	-1,67	-2,74	1,90	-1,57	-0,78	0,73
Azul 2%	0,72	-1,16	0,65	0,22	1,40	-1,32	0,43	0,14
Amarillo 2%	0,65	-0,94	0,44	-0,448	0,85	-0,66	0,40	-0,36

Tabla 2: Valores de coordenadas colorimétricas y diferencia de color obtenidas entre la muestra tintada y después de aplicar las microcápsulas por impregnación y pulverización

viable por cualquiera de los dos procesos de aplicación estudiados, pulverización o impregnación y que en caso de incrementar las concentraciones de producto, la rigidez a la flexión es más sensible que las variaciones de color, debiendo considerarse sobre todo cuando el proceso de aplicación es por pulverización. El umbral de sensibilidad de estas modificaciones vendrá definido por el sector de aplicación, ya que por ejemplo la rigidez a la flexión es más importante para el sector de indumentaria que para aplicaciones como la agricultura.

La aplicación por impregnación minimiza el impacto del agente de ligado empleado en el tacto si se compara con la aplicación por pulverización. De este modo, se puede concluir que los procesos de pulverizado se deberán aplicar siempre y cuando el tejido no permita a aplicación por procesos de impregnación, como podría ser el caso de tejidos de elevada vellosidad como terciopelos. Este trabajo se ha fundamentado en un determinado tipo de microcápsulas (esencia marina) y para un agente de ligado específico (resina acrílica). En investigaciones futuras se ampliará el estudio a otro tipo de productos para poder establecer el comportamiento como general.

BIBLIOGRAFÍA

[1] S. Hector. "Una Revisión Sobre Los Metamateriales." DYNA New Technologies. 2017. vol.4-1. <http://dx.doi.org/10.6036/NT8331>

[2] M. Bonet - Aracil, P. Monllor, L. Capablanca, J. Gisbert, P. Díaz, and I. Montava, "A comparison between padding and bath exhaustion to apply microcapsules onto cotton," *Cellulose*. 2015. vol. 22- 3, p. 2117-2127, 2015. (<https://doi.org/10.1007/s10570-015-0600-8>)

[3] G. Nelson, "Application of microencapsulation in textiles," *Int. J. Pharm.* 2002. vol. 242. 1-2, p. 55-62. ([https://doi.org/10.1016/S0378-5173\(02\)00141-2](https://doi.org/10.1016/S0378-5173(02)00141-2))

[4] P. Monllor, M. Bonet, F.J. Cases. "Characterization of the behaviour of flavour microcapsules in cotton fabrics," *J. Chem. Inf. Model.* 2013. vol. 53- 9, p. 1689-1699. (<https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2007.04.004>)

[5] A. Madene, M. Jacquot, J. Scher, et al. "Flavour encapsulation and controlled release - A review," *Int. J. Food Sci. Technol.* 2006. vol. 41 - 1, p. 1-21. (doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.00980.x>)

[6] Y. Long, D. York, Z. Zhang, et al. "Microcapsules with low content of formaldehyde: preparation and characterization," *J. Mater. Chem.*, .2009. vol. 19-37. p. 6882-6887.([10.1039/B902832C](https://doi.org/10.1039/B902832C))

[7] J. Gisbert, F. Ibañez, M. Bonet, et al. "Increase in Hydration of the Epidermis by Microcapsules in Sterilized Products," *Journal Appl. Polym. Sci.* 2009. vol. 113. p. 2282-2286. (doi: <https://doi.org/10.1002/app.30210>)

[8] J. Berger, M. Reist, J. M. Mayer, et al. "Structure and interactions in covalently and ionically crosslinked chitosan hydrogels for biomedical applications," *Eur. J. Pharm. Biopharm.* 2004. vol. 57 - 1. p. 19-34.([doi.org/10.1016/S0939-6411\(03\)00161-9](https://doi.org/10.1016/S0939-6411(03)00161-9))

[9] G. Nelson, "Microencapsulation in textile finishing," *Rev. Prog. Color.* 2008. vol. 31 - 1. p. 57-64. (doi: <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.2001.tb00138.x>)

[10] K. B. De Roos, "Effect of texture and microstructure on flavour retention and release," *Int. Dairy J.* 2003. vol. 13 - 8. p. 593-605. ([https://doi.org/10.1016/S0958-6946\(03\)00108-0](https://doi.org/10.1016/S0958-6946(03)00108-0))

[11] H. K. Ju, J. W. Kim, S. H. Han, et al. "Thermotropic liquid-crystal/polymer microcapsules prepared by in situ suspension polymerization," *Colloid Polym. Sci.* 2002. vol. 280 - 10. p. 879-885. (<https://doi.org/10.1007/s00396-002-0696-x>)

[12] K. Heinzelmann and K. Franke, "Using freezing and drying techniques of emulsions for the microencapsulation of fish oil to improve oxidation stability," *Colloids Surfaces B Biointerfaces*. 1999, vol. 12- 3-6. p. 223-229.([https://doi.org/10.1016/S0927-7765\(98\)00077-0](https://doi.org/10.1016/S0927-7765(98)00077-0))

[13] K. Dewettinck and A. Huyghebaert, "Fluidized bed coating in food technology," *Trends Food Sci. Technol.* 1999. vol. 10 - 4-5, pp. 163-168.([https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(99\)00041-2](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(99)00041-2))

[14] M. N. Ravi Kumar, "Nano and microparticles as controlled drug delivery devices," *J. Pharm. Pharm. Sci.* 2000. vol. 3-2. p. 234-258.

[15] C. J. Kirkpatrick, V. Krump-Konvalinkova, R. E. Unger, et al. "Tissue response and biomaterial integration: The efficacy of in vitro methods," 2002. *Biomol. Eng.*, vol. 19 - 2-6. p. 211-217.([https://doi.org/10.1016/S1389-0344\(02\)00019-9](https://doi.org/10.1016/S1389-0344(02)00019-9))

[16] C. Muzzarelli, V. Stanic, L. Gobbi, et al. "Spray-drying of solutions containing chitosan together with polyuronans and characterisation of the microspheres," 2004. *Carbohydr. Polym.*, vol. 57- 1. p. 73-82.(<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2004.04.002>)

[17] K. Hong and S. Park, "Melamine resin microcapsules containing fragrant oil: Synthesis and characterization," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 58-2. p. 128-131. ([https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(98\)00263-6](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(98)00263-6))

[18] K. Hirech, S. Payan, G. Carnelle, et al. "Microencapsulation of an insecticide by interfacial polymerisation," *Powder Technol.* 2003. vol. 130. p. 324-330.(DOI: [10.1016/S0032-5910\(02\)00211-5](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(02)00211-5))

[19] J. Gisbert; M. Bonet; P. Riobo; P. Monllor; "Insect Repellent Textile". Patent US 2010/0183690. 22.07.2010.

[20] Asma Sharkawy, et al, "Aroma-loaded microcapsules with antibacterial activity for eco-friendly textile application: synthesis, characterization, release and green grafting" *Ind Eng Chem Res.* 2017. vol 56. p. 5516-5526.

[21] Asma Sharkawy, et al "Aroma-loaded microcapsules with antibacterial activity for eco-friendly textile application", US provisional patent application 62/476821 filed 3/26/2017

[22] Q. Wu, J. Lü, and B. Qu, "Preparation and characterization of microcapsulated red phosphorus and its flame-retardant mechanism in halogen-free flame retardant polyolefins," *Polym. Int.* 2003. vol. 52- 8. p. 1326-1331. (DOI: <https://doi.org/10.1002/pi.1115>).

[23] S. Giraud, S. Bourbigot, M. Rochery, et al. "Flame retarded polyurea with microencapsulated ammonium phosphate for textile coating," 2005. *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 88-1. p. 106-113.

[24] Y. F. Fan, X. X. Zhang, X. C. Wang, et al. "Super-cooling prevention of microencapsulated phase change material," *Thermochim. Acta*, 2004. vol. 413 -1-2, p. 1-6.

[25] L. F. Cabeza, C. Castellón, M. Nogus, et al. "Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings," *Energy Build.* 2007. vol. 39-2. p. 113-119.

[26] C. P. Chang, T. Yamamoto, M. Kimura, et al. "Release characteristics of an azo dye from poly(ureaurethane) microcapsules," *J. Control. Release.* 2003. vol. 86-2-3. p. 207-211.([https://doi.org/10.1016/S0168-3659\(02\)00366-8](https://doi.org/10.1016/S0168-3659(02)00366-8)).

[27] K. Sawada and H. Urakawa, "Preparation of photosensitive color-producing microcapsules utilizing in situ polymerization method," *Dyes & Pigment.* 2005. vol. 65-1. p. 45-49. (<https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2004.06.021>).

[28] S. Li, J. E. Lewis, N. M. Stewart, et al. "Effect of finishing methods on washing durability of microencapsulated aroma finishing," *J. Text. Inst.* 2008. vol. 99-2. p. 177-183. (<http://dx.doi.org/10.1080/00405000701489701>).

[29] P. Monllor, L. Sanchez, F. Cases, et al. "Thermal Behavior of Microencapsulated Fragrances on Cotton Fabrics," *Text. Res. J.* 2009. vol. 79-4. p. 365-380. (DOI: [10.1177/0040517508097520](https://doi.org/10.1177/0040517508097520)).

[30] S.N. Rodrigues, et al , "Scentfashion: microencapsulated perfumes for textile application", *The Chemical Engineering Journal.* 2009. vol.149. p.463-477.

[31] M. Teixeira, et al, "A case study of Product Engineering: Performance of microencapsulated perfumes on textile applications", *AIChE J.* 2012. vol.58-6. p. 1939-1950.

[32] S. Rodrigues, et al, "Characterization and evaluation of commercial fragrance microcapsules for textile applications", *Journal of the Textile Institute.* 2012. vol. 103-3 3. p. 269-282

[33] P. Monllor, L. Capablanca, J. Gisbert, et al "Improvement of Microcapsule Adhesion to Fabrics," *Text. Res. J.* 2010. vol. 80-7. p. 631-635. (DOI: [10.1177/0040517509346444](https://doi.org/10.1177/0040517509346444)).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al IVACE (Institut Valencià de Competitivitat Empresarial, Spain) and FEDER (Fondo Europeo de Desarrollo Regional, Europe) por el soporte financiero aportado mediante el proyecto MICROTECH I y II así como por el proyecto AGROBIOTEX I y II.

- Los artículos deberán ser originales e inéditos y no deben de haber sido enviados simultáneamente a otros medios de comunicación.
- Tendrán siempre preferencia los que versen sobre temas relacionados con el objetivo, cobertura temática y/o lectores a los que se dirige la revista.
- Todos los trabajos serán redactados en castellano o inglés y deberán cumplir los siguientes requisitos:
 - Título en castellano e inglés de 150 caracteres máximo
 - Un breve resumen (Abstract), de unas 300 palabras, en castellano e inglés.
 - Entre tres y cinco palabras clave (Key words) en castellano e inglés, que permitan identificar la temática del artículo
 - No deberían de tener más de aproximadamente 5.500 palabras, o 17 páginas formato A4 en fuente Arial 10 con interlineado simple (Consultar con DYNA extensiones superiores).
 - Bibliografía relacionada o referencias según normas DYNA en www.revistadyna.com
- Con el objeto de facilitar la "revisión entre pares", el autor deberá asignar el código DYNA de 6 dígitos correspondiente a la temática del artículo, seleccionándolo de entre los códigos disponibles en la dirección de Internet: www.revistadyna.com
- Los originales se remitirán mediante nuestra página web (envío artículos), en formatos .DOC (msword), .RTF, o .TXT. Se recomienda una calidad mínima de 300ppp para las fotografías que se adjunten con el artículo. Se harán constar: título del artículo, nombre del autor, título académico, empresa o institución a la que pertenece, dirección electrónica, dirección postal y teléfono.
- Se someterán al Consejo de Redacción cuantos artículos se reciban, realizándose la "revisión entre pares" por los expertos del Consejo o los que éste decida. El resultado de la evaluación será comunicado directamente a los autores. En caso de discrepancia, el editor someterá el trabajo a un revisor externo a la revista cuya decisión será trasladada nuevamente al autor.
- Los autores aceptan la corrección de textos y la revisión de estilo para mantener criterios de uniformidad de la revista.
- La revista se reserva el derecho de no acusar recibo de los trabajos que no se ajusten a estas normas.
- Para mayor detalle sobre estas normas, por favor visite nuestra web <http://www.revistadyna.com> (en el apartado de "autores y evaluadores").
- Paper will be original and unpublished and it must not be concurrently submitted for publication elsewhere.
- Preference will be given to articles on the main subject areas of the Journal.
- Papers should be written in Spanish or English and should fulfil the following requirements:
 - Title in both English and Spanish with a maximum length of 150 characters.
 - Brief Summary or Abstract, about 300 words, in Spanish and English.
 - Between three and five keywords in English and Spanish, that identify the paper theme.
 - Written text should not exceed 5.500 words, or 17 A4 format pages in 10 size arial font single-spaced (For longer lengths consult with DYNA)
 - Bibliographical references according to DYNA norms at www.revistadyna.com
- To facilitate the "peer review" process, the author will assign the six digits DYNA code corresponding to the paper thematic, selecting it between the codes available at the Internet address: www.revistadyna.com
- Papers should be sent by our web page (envío artículos), in .DOC (MSWord), .RTF, or .TXT format. It is recommended a minimum quality of 3000 ppp for the pictures enclosed in the article. These papers will include: Article title, author name, academic title, company or institution, email, correspondence address and telephone.
- All papers must pass the Editorial Board (EB) evaluation process. The "peer review" will be made by the Editorial experts or those that the EB decides. The evaluation result will be directly communicated to the author. In case of discrepancy, the publisher will refer the work to an external reviewer whose decision will again be transferred to the author.
- The authors accept the text correction and the style revision to maintain uniformity criteria for the magazine.
- The journal reserves the right not to accept articles which do not comply with said instructions.
- To find more details about these instructions, please visit our web page <http://www.revistadyna.com> (authors and referees section).

DYNA

Ingeniería e Industria

PROMOCIÓN: Suscripción a DYNA por 29,85 €/año

Reciba la revista dyna impresa en su domicilio por solo 29,85 €/año

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

Promoción válida para los Ingenieros Industriales colegiados en: Araba, Bizkaia y Galicia.

Si está interesado, envíe un email a dyna@revistadyna.com mencionando que se acoge a la promoción e indicando su nº de colegiado y el nombre de su Colegio de Ingenieros Industriales.

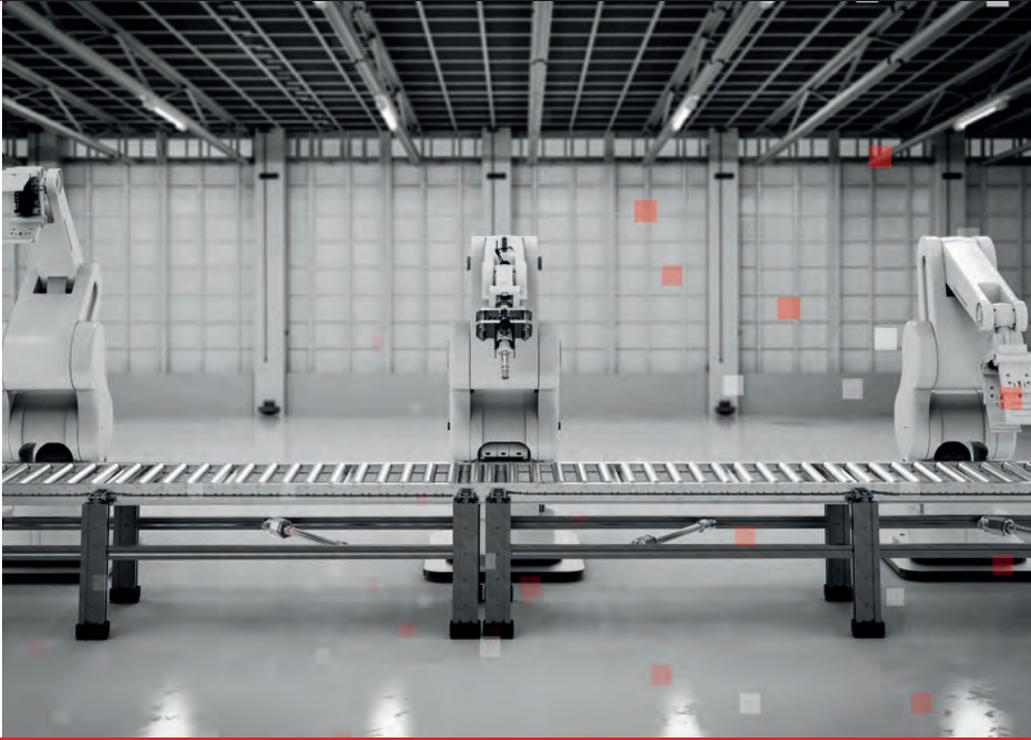




metalmadrid

'18

www.metalmadrid.com



26 - 27
SEPTIEMBRE

IFEMA

LA FERIA DE LA INNOVACIÓN INDUSTRIAL EN ESPAÑA



+500
EXPOSITORES



INNOVATION
AREA



ACREDITACIÓN
DIGITAL

REGÍSTRATE
ONLINE

CÓDIGO DE REGISTRO: 226

*Entrada gratuita sólo con registro online. Taquilla: 15€



CONGRESO: Descubre las transformación de los sectores tradicionales de la mano de 6 bloques sectoriales y numerosos casos de éxito en industria 4.0



CONNECTED
MANUFACTURING



COMPOSITES
ENGINEERING



AERO
ENGINEERING



AUTOMOTIVE
ENGINEERING



ENERGY
ENGINEERING



AGRIFOOD
ENGINEERING

Encuentra todo lo que necesitas en una única visita

Máquina-Herramienta | Automatización | Robótica | Industria 4.0 | Composites | Soldadura | Subcontratación | Tratamiento de superficies | Medida, inspección, calidad y testing | Componentes paraquinaria | Equipos de protección individual | Fabricación aditiva

Celebrado junto con:

ROBOMATICA

COMPOSITE

SPAIN



Patrocinadores oficiales del evento:



Colaboran:



+34 91 541 24 88

metalmadrid@easyfairs.com



by **EASYFAIRS**