

Universidad de

Cádiz

Escuela Superior de Ingeniería

VI Jornadas Predoctorales de la ESI

24 y 25 Noviembre 2015



Libro de Actas



**VI Jornadas Predoctorales de la
Escuela Superior de Ingeniería**

Libro de Actas



Cádiz, 24 al 25 de Noviembre de 2015

COMITÉ CIENTÍFICO Y EDITORIAL

Moisés Batista Ponce
Fco. Javier Botana Pedemonte
Juan Manuel Dodero Beardo
Juan José Domínguez Jiménez
Pedro Luis Galindo Riaño
Antonio Juan Gámez López
Elisa Guerrero Vázquez
Ricardo Hernández Molina
Manuel Jesús López Sánchez
Mariano Marcos Bárcena

Enrique J. Martínez de la Ossa Fernández
Inmaculada Medina Bulo
Arturo Morgado Estévez
Andrés Pastor Fernández
Joaquín Pizarro Junquera
Mercedes Ruiz Carreira
Jorge Salguero Gómez
Higinio Sánchez Sainz
José Miguel Sánchez Sola

EDICIÓN TÉCNICA

Alejandro Javier Sánchez Sotano
Alejandro Sambruno Ladrón de Guevara

Fermín Bañón García
Ana Pilar Valerga Puerta

ORGANIZA



**Escuela Superior de Ingeniería
Universidad de Cádiz**



**Programa de Doctorado en Fabricación,
Materiales e Ingeniería Ambiental**

ÍNDICE

INGENIERÍA INDUSTRIAL E INFORMÁTICA

Aerogeneradores con Sistemas de Almacenamiento de Energía <i>Raúl Sarrias Mena, Luis M. Fernández Ramírez, Francisco Jurado Melguizo</i>	III.1
CFD deposition modeling of fly ash particles on olive waste fired boiler <i>Miguel Díaz Troyano, Dr. Antonio Juan Gámez López, Dr. Chungen Yin</i>	III.5
Estudio de lesiones por daños corporales de origen físico, en actividades profesionales de riesgo, y de la prevención de los mismos. Desarrollo de sistemas monitorizados integral portátiles <i>José Carlos Vera Jiménez, Jesús Ayuso Vilacides, Francisco Fernández Zacarías</i>	III.9
Estudios preliminares sobre los efectos del suspense narrativo e interactivo <i>P. Delatorre, P. Gervás, M. Palomo-Duarte</i>	III.11
Experimental and computational analysis of olive residues biomassfired grates <i>P.J. Leal Forero, A.J. Gámez, C. Yin</i>	III. 15
Factores Críticos de la Gestión del Alcance en el Éxito de los Proyectos de Edificación Industrial <i>A. Cerezo-Narváez, A. Pastor-Fernández, M. Otero-Mateo</i>	III. 19
Using Population Injection in Evolutionary Computation for improving Genetic Variability in Multimodal Optimization Problems <i>Robin Mueller-Bady, Martin Kappes, and Inmaculada Medina-Bulo</i>	III. 23

INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL

Caracterización de nuevas membranas basadas en Grafeno y estado actual de la tecnología <i>David Amaya Vías, Juan Antonio López Ramírez</i>	IQA. 1
Caracterización del funcionamiento de una nueva membrana cerámica de nanofiltración modificada en su capa activa <i>Mihaela-Elena Dascalu, Valentin Nedeff, Juan Antonio López Ramírez</i>	IQA. 5
Detección y Priorización de Puntos de Conflicto por Afección Acústica en Carreteras <i>Ricardo Gey Flores, Ricardo Hernández Molina, José Luis Cueto Ancela</i>	IQA. 9
Tratamiento de Residuos de Biomasa mediante Oxidación y Gasificación en Agua Supercrítica <i>P. Casademont Lantat, J. Sánchez Oneto, J.R. Portela Miguélez</i>	IQA. 13

INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS DE MATERIALES Y FABRICACIÓN

Análisis de la variación cromática y de rugosidad en superficies de la aleación Ti6Al4V texturizadas por láser <i>J. M. Vázquez, F.J. Botana, M. Marcos</i>	ITMF. 1
Desarrollo, optimización y estudio de un proceso de fabricación de estructuras de materiales compuestos de fibra de carbono mediante moldeo por compresión asistido por membranas <i>M. Salvado Manzorro, M. Marcos Bárcena, F.J. Botana Pedemonte</i>	ITMF. 5
Estandarización de ensayos para el estudio de procesos SPF/DB de elementos aeronáuticos <i>Luis García Barrachina, Mariano Marcos Bárcena</i>	ITMF. 9
Estudio Preliminar de la Influencia de los Parámetros de Fabricación en Piezas obtenidas mediante Técnicas FDM <i>A.P. Valerga, M. Batista, M. Marcos</i>	ITMF.13
Fabricación Fractal: Complejidad y variedad requerida en el mecanizado sostenible <i>María Estela Peralta Álvarez, Mariano Marcos Bárcena, Francisco Aguayo González</i>	ITMF.17
Investigación de enfoques bioinspirados en los sistemas de fabricación Ecológica <i>María Jesús Ávila Gutiérrez, Francisco Aguayo González, Mariano Marcos Bárcena</i>	ITMF.21
Metabolismo Industrial Inteligente basado en Sistema Multi-Agente <i>Alejandro Manuel Martín Gómez, Mariano Marcos Bárcena, Francisco Aguayo González</i>	ITMF.25
Metodología para diseño, ensayo mecánico y análisis de probetas monocapas realizadas con fabricación aditiva <i>C. Wendt, M. Marcos</i>	ITMF.29
Metodología para el estudio de la integridad superficial de piezas de la aleación UNS R56400 torneadas en seco <i>Antonio Calvino Fernández-Trujillo, Mariano Marcos Bárcena</i>	ITMF.33
Metodología para la evaluación metrológica de taladros en estructuras híbridas de CFRP/UNS A97075 <i>R. Cabeza Puertas, M. Marcos Bárcena, M. Batista Ponce</i>	ITMF.37
Modelo de Evaluación Integrada de la Sostenibilidad de Productos y Procesos de Fabricación <i>Ana de las Heras García de Vinuesa, Francisco Aguayo González, Mariano Marcos Bárcena</i>	ITMF.41
Optimización e implantación de la cadena de suministro utilizando lean en el sector sub-contratas aeronáuticas <i>K. Aoulad Azzouz, M. Marcos Bárcena, J. Salguero Gómez</i>	ITMF.45
Propuesta experimental para el dimensionamiento del Espacio Semántico en la aplicación de la Ingeniería Kansei-Chisei en entornos de fabricación Lean <i>Antonio Córdoba Roldán, Mariano Marcos Bárcena, Francisco Aguayo González</i>	ITMF.47

Propuesta metodológica para el estudio de procesos OSD. Aplicación a estructuras híbridas CFRP-Al A.J. Sánchez Sotano, J. Salguero Gómez	ITMF.51
Propuesta metodológica para el estudio de mecanizado de pieles metálicas <i>I. Del Sol, M. Marcos, A. Rivero</i>	ITMF.55
Propuesta metodológica para la monitorización on-line de la formación de rebabas en el taladrado en seco de la aleación UNS R56400 (Ti6Al4V) <i>Francisco Javier Puerta Morales, Mariano Marcos Bárcena, Jorge Salguero Gómez</i>	ITMF.59
Tratamiento láser como método de activación superficial de fibra de carbono <i>M. Botana Galvin, J. Botana</i>	ITMF.63



**VI Jornadas Predoctorales de la
Escuela Superior de Ingeniería**

Ingeniería Industrial e Informática

Aerogeneradores con Sistemas de Almacenamiento de Energía

Raúl Sarrias Mena⁽¹⁾, Luis M. Fernández Ramírez⁽¹⁾, Francisco Jurado Melguizo⁽²⁾

⁽¹⁾ Departamento de Ingeniería Eléctrica, Escuela Politécnica Superior de Algeciras, Universidad de Cádiz, Avda. Ramón Puyol s/n, 11202 Algeciras (Cádiz), [raul.sarrias; luis.fernandez]@uca.es

⁽²⁾ Departamento de Ingeniería Eléctrica, Escuela Politécnica Superior de Linares, Universidad de Jaén, C/Alfonso X Nº 28, 23700 Linares (Jaén), fjurado@ujaen.es

Resumen

Los sistemas de almacenamiento de energía permiten mejorar la integración a red de la energía eléctrica. En este estudio se evalúan distintos tipos de acumuladores, así como diferentes configuraciones y estrategias de control para estos sistemas híbridos.

1. Introducción

La intermitencia y fluctuación son características inherentes a la producción eólica. A medida que la aportación de los sistemas eólicos crece, estas características pueden afectar negativamente al funcionamiento del sistema eléctrico al que se conectan. La fluctuación de la frecuencia o los niveles de tensión, así como el intercambio de potencia activa y reactiva entre generadores y consumidores, son algunos de los parámetros que pueden verse afectados. A este respecto, los sistemas de almacenamiento de energía (ESSs por sus siglas en inglés) a gran escala pueden aportar soluciones a esta problemática.

En la actualidad existen distintos dispositivos de almacenamiento capaces de prestar apoyo a grandes sistemas de generación eólica. Todos se encuentran en distintas etapas de desarrollo, algunos funcionando ya en aplicaciones reales y disponibles comercialmente, mientras otros se encuentran en estados tempranos de desarrollo.

Como objetivo principal de esta tesis se plantea el estudio dinámico de sistemas híbridos compuestos por aerogeneradores y ESS para evaluar su respuesta mediante simulación bajo distintas condiciones de funcionamiento. Se desarrollarán modelos de distintas configuraciones, atendiendo a diversas opciones de conexión. Además, se implementarán y evaluarán distintas estrategias de control de las potencias activa y reactiva, y los niveles de tensión. Asimismo, será necesario disponer de un sistema de control supervisor (SCS), que sea capaz de gestionar los flujos de potencia entre los dispositivos que componen el sistema híbrido, en función de distintas variables de control, como pueden ser la demanda de la red, la producción instantánea en los aerogeneradores, o el estado de carga de los sistemas de almacenamiento. Los modelos desarrollados se someterán a simulación ante diversas condiciones de funcionamiento.

2. Configuraciones consideradas

Uno de los tipos de aerogeneradores más extendidos hoy en día es el denominado Tipo 3, equipado con generador asíncrono doblemente alimentado (DFIG por sus siglas en inglés). El DFIG posee un devanado en el estator de la máquina por el que circula corriente alterna (AC por sus siglas en inglés) de la misma frecuencia que la de la red eléctrica a la que se conecta, mientras que el devanado situado en el rotor de la máquina puede funcionar a una frecuencia variable, lo que posibilita la variación de la velocidad de giro del aerogenerador. Este funcionamiento a frecuencia variable se consigue gracias a un convertidor de potencia en el devanado del rotor. Este convertidor se compone de dos puentes de interruptores electrónicos unidos por un bus de corriente continua (DC).

Dado que muchos ESSs presentan un funcionamiento en DC, la existencia de un bus DC en el propio generador eléctrico ofrece una posibilidad idónea como lugar de conexión de un ESS. De esta forma se consigue evitar la necesidad de un convertidor AC/DC adicional. Por el contrario, en otras circunstancias puede resultar interesante conectar el ESS a la salida del DFIG, esto es, en sus terminales AC. Esto da lugar a dos posibles emplazamientos de los ESS, véase conexión interna y externa.

3. Modelado y control del aerogenerador

El aerogenerador se ha modelado a través de su modelo de quinto orden, empleando el sistema de referencia $d-q$ con los ejes girando a la velocidad de sincronismo del generador eléctrico. Así, las componentes d y q de la tensión en el estator (u_{dqs}) vienen dadas por (1), donde R_s es la resistencia del devanado, i_{dqs} es la intensidad, y φ_{dqs} es el flujo magnético, todo ello referido al estator; mientras que ω es la velocidad de sincronismo del generador.

$$u_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega \cdot \phi_{qs} \quad (1)$$

$$u_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega \cdot \phi_{ds}$$

La tensión en el rotor se define según (2):

$$u_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega - \omega_r) \cdot \phi_{qr} \quad (2)$$

$$u_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + (\omega - \omega_r) \cdot \phi_{dr}$$

Finalmente, el par electromagnético del generador (T_e) se determina según (3), donde p indica el número de pares de polos del generador:

$$T_e = 1.5 \cdot p \cdot (\phi_{ds} \cdot i_{qs} - \phi_{qs} \cdot i_{ds}) \quad (3)$$

El controlador del ángulo de las palas del aerogenerador permite reducir la potencia aerodinámica extraída del viento en la turbina cuando la velocidad de giro aumenta por encima del valor de referencia. En definitiva, actúa como un limitador de la velocidad de giro.

La estrategia de control implementada en el convertidor del lado rotor (RSC) del DFIG permite el control independiente de potencia activa y reactiva a través de las componentes d y q de la tensión en el rotor. Empleando dos lazos de control con controladores proporcional-integral (PI), el RSC se controla para hacer funcionar el generador en el punto óptimo de potencia activa generada, a la vez que se satisface la referencia de potencia reactiva establecida por el SCS para el estator.

Por otro lado, el convertidor del lado red (GSC) del DFIG se encarga de mantener la tensión del bus DC en su referencia, a través de la componente d de la tensión, mientras que la componente q se emplea para el control de la potencia reactiva intercambiada a través de este convertidor. Al igual que en el caso del RSC, la referencia de potencia reactiva del GSC viene establecida por el SCS.

4. Modelado y control de los ESSs

Para estos trabajos se han empleado tres tipos de ESSs, que responden de diferente manera ante distintas exigencias de funcionamiento.

Batería electroquímica de Plomo-Ácido:

Se modela como una fuente de tensión variable (E_{bat}) en serie con una resistencia, que representa las pérdidas internas del dispositivo. La tensión en bornes de la batería (U_{bat}) queda definida por:

$$U_{bat} = E_{bat} - R_i \cdot i_{bat} \quad (4)$$

i_{bat} es la intensidad que circula por el dispositivo, mientras que E_{bat} es la tensión en vacío, que es

distinta para los procesos de carga y de descarga, y se determina en función de la capacidad, de la intensidad y de otros parámetros de diseño.

Ultracondensador:

Entre la variedad de modelos existentes en la literatura, se ha optado por un modelo reducido formado por un condensador y una resistencia en serie. En consecuencia, la tensión instantánea del dispositivo (U_{UC}) viene dada por (5):

$$U_{UC} = U_{UC_0} - \frac{I_{UC}}{C_{UC}} \cdot t - R_{UC} \cdot I_{UC} \quad (5)$$

U_{UC_0} es la tensión inicial del UC, R_{UC} y C_{UC} la resistencia y capacidad características, e I_{UC} la intensidad por esta rama.

Electrolizador:

Con respecto a los electrolizadores (EZs), se han evaluado cuatro modelos de distinto grado de complejidad. En los de menor detalle se evalúan parámetros básicos de funcionamiento, como la tensión e intensidad en el EZ y su producción de hidrógeno. En los más detallados, además se consideran presiones parciales, temperaturas y concentración de especies en ánodo y cátodo. La elección del modelo de EZ dependerá principalmente del grado de detalle necesario en el estudio. En casos en los que el interés se centre en su comportamiento eléctrico, los modelos más simplificados resultan de mayor utilidad.

El comportamiento de todos los modelos de ESSs se ha validado mediante comparación con dispositivos reales disponibles comercialmente.

Baterías, UCs y EZs proporcionan una tensión DC variable a su salida. En consecuencia, se hace necesario disponer de convertidores DC/DC que permitan conectar estos ESSs con el resto del sistema. Este convertidor debe ser bidireccional para permitir el flujo de potencia activa tanto de salida como de entrada a los ESSs, excepto en el caso de los EZs, que no son capaces de entregar potencia activa. En todos los casos se ha empleado un modelo promediado de convertidor buck-boost. El control sobre este convertidor puede realizarse con dos propósitos. Cuando es necesario, el ESS se encarga de apoyar el control de la tensión en el bus DC al que se conecta a través de este convertidor. En otras situaciones, el convertidor gestiona el flujo de potencia activa intercambiada con el ESS. Esta referencia de potencia activa viene determinada por el SCS para compensar el déficit entre la demanda y la generación del sistema eólico.

5. Sistemas de Control Supervisor

En todos los sistemas híbridos implementados aparece la necesidad de disponer de un SCS que establezca las referencias de potencia activa y reactiva para los distintos controladores.

SCS: Control de potencia activa

El SCS para control de potencia activa se destina principalmente al cálculo de la referencia para la potencia activa a almacenar o a extraer del ESS. Para ello es necesario tener en cuenta el estado de carga (SoC) del ESS en cada instante. Se han implementado dos estrategias distintas para este SCS. En primer lugar, se diseña un sistema de control por estados, en el que se definen tres niveles de SoC: alto, normal y bajo. Para cada nivel se establecen limitaciones específicas. Siempre que el SoC sea normal, el ESS compensa la diferencia entre la demanda de potencia y la generación. Por el contrario, el SCS establece limitaciones en la carga/descarga del ESS si su SoC es alto/bajo.

Un segundo SCS implementado hace uso de lógica difusa para gestionar el intercambio de potencia activa y controlar el SoC de un sistema híbrido compuesto por baterías y UCs como ESSs acompañando a un generador eólico. El UC se destina a las fluctuaciones rápidas de potencia, mientras que la batería cubre mayores períodos de carga/descarga. Un conjunto de funciones de pertenencia y reglas difusas realiza una corrección sobre estas referencias preliminares para evitar alcanzar los SoC límite en los ESSs.

SCS: Control de potencia reactiva

Para la gestión de potencia reactiva también se han propuesto dos estrategias alternativas. La primera se trata de un sencillo esquema jerárquico. En este SCS se establece un nivel de prioridad para cada uno de los elementos disponibles para el intercambio de potencia reactiva. Las referencias se fijan de manera que un elemento en un nivel inferior no será requerido para intercambiar potencia reactiva hasta que el elemento que se encuentra en el nivel superior haya alcanzado su límite máximo. De esta forma, los elementos en los niveles más altos se saturan antes que los inferiores.

Como opción alternativa se ha implementado un SCS con reparto proporcional de la potencia reactiva. En este reparto proporcional se determina la disponibilidad de cada elemento para intercambiar potencia reactiva antes de alcanzar su límite máximo de potencia, teniendo en cuenta también el estado de generación de potencia activa en el que se encuentra. Conocidos los límites, el total de la consigna de potencia reactiva establecida por la red se reparte entre todos los elementos de forma proporcional a su capacidad disponible. De esta manera se evita en gran medida la saturación de los equipos.

6. Simulaciones y Resultados

A continuación, se muestran algunos de los resultados obtenidos mediante simulación de los sistemas descritos previamente.

Caso de estudio 1: Validación de los modelos

En la Figura 1 se muestra una comparativa entre los resultados obtenidos para los modelos de EZs (modelos A a D en orden creciente de complejidad) y un dispositivo real disponible comercialmente (indicado como *ref*) [1]. Como se aprecia, todos los modelos se asemejan a la curva de funcionamiento del equipo real. Comprobaciones análogas se han realizado para los modelos de batería y UC.

Caso de estudio 2: ESS interno vs. externo

En la Figura 2a se comprueba cómo el ESS permite desvincular parcialmente la potencia activa proporcionada por el sistema híbrido (localización externa *Ext* o interna *Int*) de la generada por el aerogenerador (P_m). Asimismo, se observa que la localización del ESS no afecta a este parámetro. Sí aparece diferencia en cuanto a la potencia reactiva, donde la conexión externa permite un mayor intercambio (Figura 2b) [2].

Caso de estudio 3: Sistemas de control

La capacidad de adaptación a la demanda adquirida con el uso del ESS vuelve a demostrarse en la Figura 3a [3]. La línea azul, o control *C1*, muestra la potencia activa generada por un aerogenerador sin ESS, mientras que la roja y la verde se corresponden con sistemas híbridos de aerogenerador con conexión interna del ESS. En la estrategia de control *C2* se controla la tensión del bus DC a través del convertidor del ESS; mientras que en *C3* este parámetro se controla desde el GSC. Como se aprecia en la Figura 3b, la estrategia de control de la tensión del bus DC a través del GSC proporciona mayor estabilidad a este parámetro.

Caso de estudio 4: SCS basado en lógica difusa

El SCS basado en lógica difusa propuesto en [4] supone una mejora con respecto a la máquina de estados para el caso de gestión de potencia activa en un sistema compuesto por aerogenerador, baterías y UCs. En la Figura 4a se presenta la potencia activa total de salida. Como se puede apreciar, la estrategia de control con lógica difusa es la única capaz de satisfacer la demanda establecida a lo largo de la simulación completa. No obstante, no aparecen diferencias en cuanto a la gestión en la potencia reactiva en la Figura 4b.

7. Conclusiones

El uso de ESSs permite adaptar la generación de potencia activa de origen eólico para satisfacer una demanda variable. Los sistemas de control implementados para el aerogenerador y los ESSs responden correctamente a las referencias establecidas, y los SCS determinan de manera satisfactoria las distintas referencias para los controladores de bajo nivel, realizando la gestión de potencia activa y reactiva para satisfacer la demanda, y controlando el SoC de los ESSs.

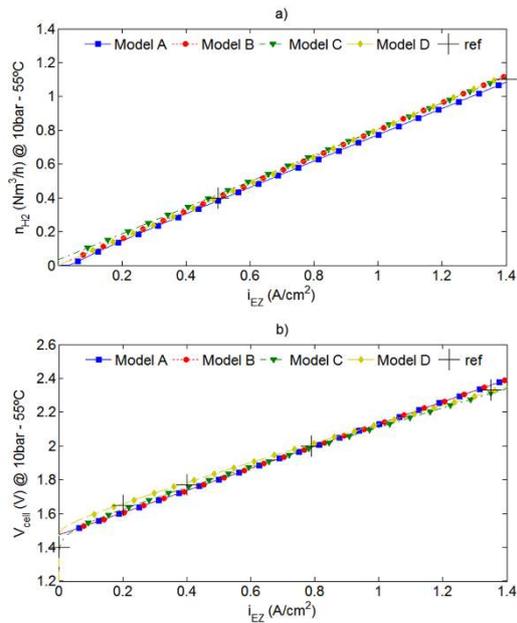


Figura 1. Validación de los modelos de EZ.

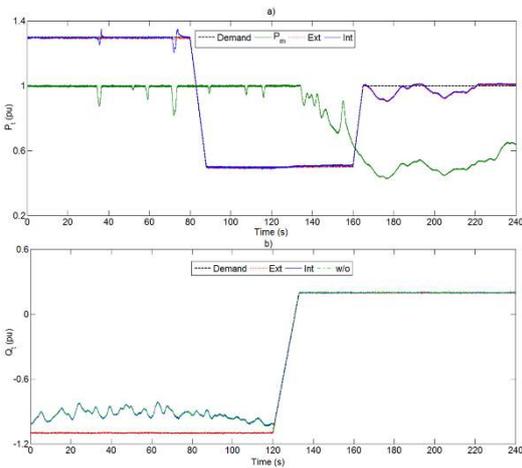


Figura 2. ESS interno vs. externo.

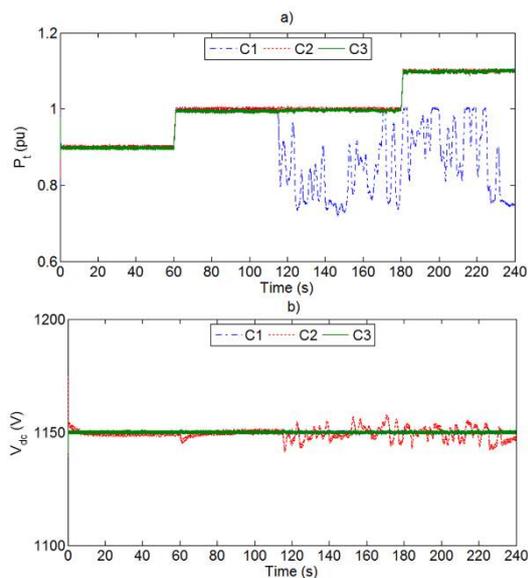


Figura 3. Sistemas de control del ESS y DFIG.

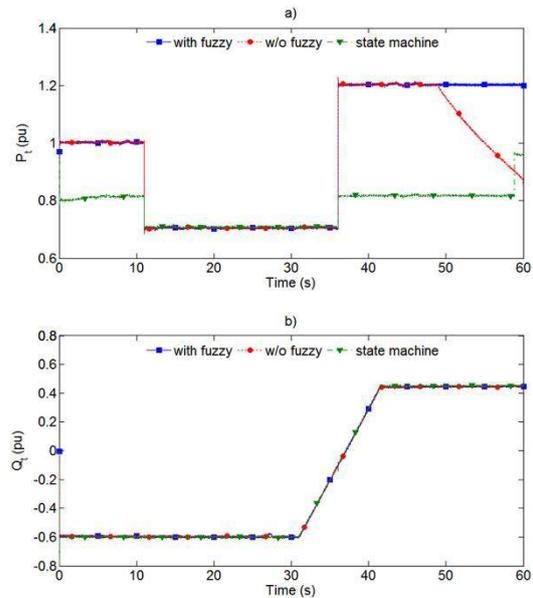


Figura 4. SCS basado en lógica difusa.

El estudio indica que el uso de ESSs permite mejorar la integración a red de grandes cantidades de energía eólica, reduciendo la incertidumbre e intermitencia inherentes a esta fuente, lo que repercute en una mayor estabilidad y fiabilidad del suministro.

8. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado en parte por la Fundación Campus Tecnológico de Algeciras, y por la Universidad de Cádiz a través de la Beca/Contrato de referencia PU2012-036-FPI.

9. Referencias

- [1] R. Sarrias-Mena, L. M. Fernández-Ramírez, C. A. García-Vázquez y F. Jurado, Electrolyzer models for hydrogen production from wind energy systems, *Int. J. of Hydrogen Energy* 40 (2015), 2927-2938.
- [2] R. Sarrias-Mena, L. M. Fernández-Ramírez, C. A. García-Vázquez y F. Jurado, Dynamic evaluation of two configurations for a hybrid DFIG-based wind turbine integrating battery energy storage system, *Wind Energy* 18 (2015), 1561-1577.
- [3] R. Sarrias-Mena, L. M. Fernández-Ramírez, C. A. García-Vázquez y F. Jurado, Improving grid integration of wind turbines by using secondary batteries, *Renew. & Sustain. Energy Rev.* 34 (2014), 194-207.
- [4] R. Sarrias-Mena, L. M. Fernández-Ramírez, C. A. García-Vázquez y F. Jurado, Fuzzy logic based power management strategy of a multi-MW doubly-fed induction generator wind turbine with battery and ultracapacitor, *Energy* 70 (2014), 561-576.

CFD deposition modeling of fly ash particles on olive waste fired boiler

Miguel Díaz Troyano⁽¹⁾, Dr. Antonio Juan Gámez López⁽²⁾, Dr. Chungeng Yin⁽³⁾

^(1,2)University of Cádiz, Dept. of Mech. Eng. and Industrial Design. Avda de la Universidad de Cádiz, nº 10- Puerto Real, 11519 Cádiz- Spain. +34 600 560 751 migueldiaztroya@gmail.com

⁽³⁾ Institute for Energiteknik, University of Aalborg. Pontoppidanstaede 101, Aalborg East 9220-Denmark.

Abstract

This work in progress is part of the ongoing PhD research at the University of Cadiz (Spain) in collaboration with Aalborg University (Denmark). The final aim of this work is to find a useful, accurate and reliable tool for boiler design engineers who need to predict fouling problems in boilers that fire troublesome biomass.

Keywords: Biomass; orujillo; slagging; fouling; clogging; fly ash particle; ash melt temperature; alkalis.

1. Introducción

Although orujillo has been used in Spain as a biomass fuel in small utility boilers since years, its use as biofuel in electrical generation power units began in 1995. The first plants had big troubles with fouling and clogging in fluegas path (grate fired boilers) and with bed agglomeration in BFB (bubbling fluidized bed) boilers, due mainly to the lack of knowledge and experience about orujillo ash behaviour. A big advance was reached when the knowledge of coal ash was applied to the new biofuels. Thanks to these first installations, their owners, technicians and boiler makers, was possible to study deeply the fouling problem caused by orujillo and improvements in boiler design taking into considerations parameters not before foreseen.

The aim of this work is to develop a practical engineering tool to predict such problems and avoid them from the initial stages of the boiler design. In the past, was necessary to stop a power plant every 20-40 days, due to fouling issues in boiler. The duration of the outage for cleaning was around 3-4 days. It represented a lack of availability of more than 10 % annually, and consequently a lack of profits which could reach to default. Therefore, in some cases it was not only a technical, maintenance or repair issue, it was a matter of pure money and continuity of the activity of the company.

Slagging and fouling.

Slagging and fouling represent two forms of deposit problems and they are found in different parts of the boiler. Slagging stands for the deposition of fly ash on heat transfer surfaces in

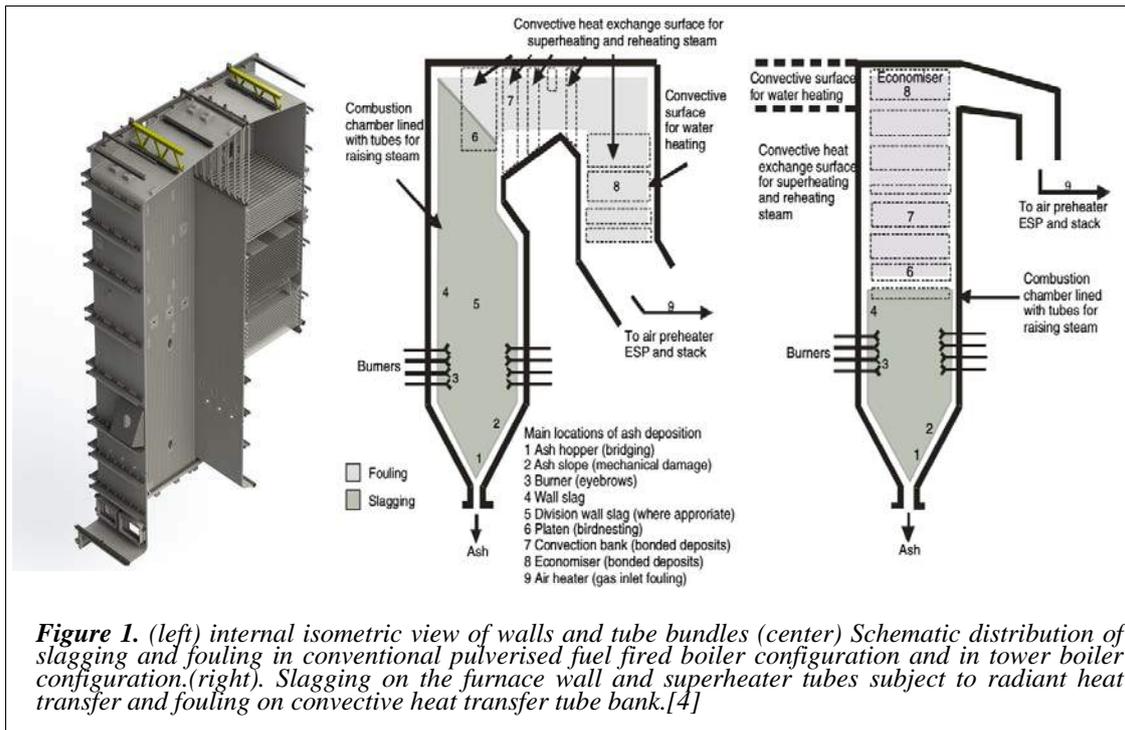
the furnace primarily subject to radiant heat transfer. Due to their high temperatures, slagging deposits can be partially or completely molten, and they are chemically active. The original chemical and physical structures of ash particles undergo substantial changes during slagging. Slagging deposits are often hard, and thus are difficult to clean by soot blowing. Fouling consists of deposit formation in the heat recovery section of a boiler subject to convective heat transfer.

At this location, the fly ash is quenched to a temperature below its melting range and the ash vapors are condensed. The deposits created by fouling may vary from light sintering to complete fusion.

Typically, the original chemical and physical structures of ash particles are retained in the impacted particles. Figure 1 shows a schematic of the locations where slagging and fouling occur in a typical steam boiler.

Slagging formation.

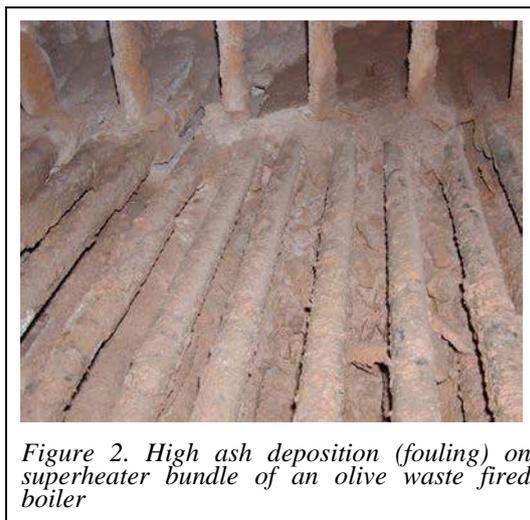
[5] Slagging is defined as the formation of fused or sintered deposits on heat transfer surface or refractory in the furnace cavity subject to radiant heat exchange. Agglomeration in fluid beds or clinkering on stokers are special cases of slagging in the absence of heat exchanger surface. Designers try to avoid slagging by selecting a furnace exit temperature below the initial deformation temperature of the ash. The furnace is sized to accommodate the moisture level of the fuel and local absorption rates are empirically adjusted to account for expected fouling factors based on the elemental fuel composition.



Deposition (slagging and fouling Figure 2 and 3) and corrosion problems are one of the major issues that play an important role in the design and operation of a combustion system. In solid fuel combustion, the particulate matter formed during combustion may be deposited on furnace walls and tubes bundles, which will reduce the heat transfer and could also give rise to corrosion problems. Olive oil byproduct, here in after called “orujillo”, causes very often severe deposition and corrosion problems compared to conventional coal-fired boilers and woody biomass.

These phenomena can be compared with troubleshoots of straw biomass in terms of high fouling over heat transfer surfaces of tubes and corrosion. Regarding to working availability of the plant, this wear component can be scheduled in time and replaced without a lack of profit during programmed outages of the plant. The other main issue, the fouling, is not so foreseen, and may cause sudden outages of the plant due to clogging of flue gas path.

Biomass-fired furnaces, in particular those burning a high Cl and alkali content (Na+K) in fuel (e.g. olive waste fired furnaces), are often reported to suffer from severe deposition and corrosion problems, compared to conventional coal-fired boilers.



2. Physical modeling

Mathematical modeling is implemented on a CFD software. An Open Source software has been selected mainly for two reasons: 1) The astronomic high prices of commercial softwares available currently in the market and 2) the availability for inserting and modifying the internal architecture of the program.

The software is called Code_Saturne, developed by Electricité de France. The geometric design modeling and meshing is made by Salome. ParaView is used for post processing.



Figure 3. Heavy ash deposition (slagging) on radiant furnace walls.

Saturne has a called standard Langevin model plus a Guingo-Minier submodel [1] implemented in the current deposition model for Code_Saturne. It is based on near wall treatment model. The particle tracking model of Saturne is used for the analysis of the particle approaching to the boundary surface cells. From here in after, the fouling model of Aalborg University [2] will be used as the mechanism of adhesion of Fly Ash Particles (FAPs) on surfaces. This model includes two types of particles:

- FAPs, by inertial, turbulent and thermophoretic mechanisms (2-250 μm) in a bimodal distribution of size (0.2 and 10 μm).
- KCl vapor particles, by diffusion, turbulent and thermophoretic mechanisms (submicron particles of constant size of 0.5 μm).

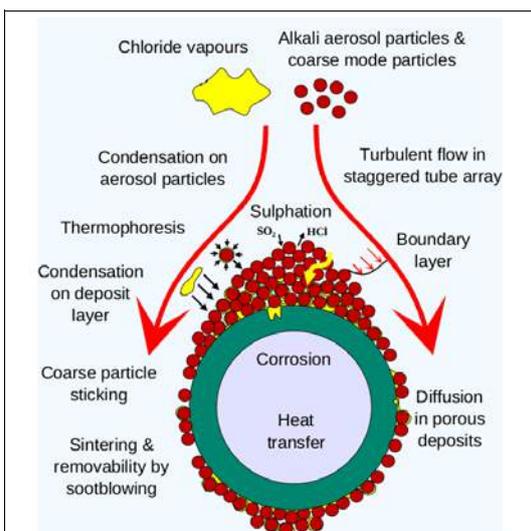


Figure 4. Principal sketch of deposits formed on top of the tube

So, totally 4 different deposition mechanisms are involved. [2]:

1. Condensation of alkali salts on surfaces.

2. Thermophoresis (associated to small particles, low inertia).
3. Diffusion (mechanical deposition associated to small particles).
4. Impaction (mechanical deposition associated to big particles, high inertia).

The model will be based on a Turbulent, Eulerian-Lagrangian model of the flow with one way coupling. Deposition and fouling should be a standalone choice, independent from the existing pulverized coal firing mode on Code_Saturne selection.

Once the particle reaches to the near wall boundary layer ($y^+ < 100$), the model initiates a stochastic transportation that predicts if the particle enters (injection), maintains certain residence time (diffusion) or changes trajectory leaving the nearest layer ($y^+ < 10$). Up to here, this model (Guingo-Minier) is used. Afterwards, a new set of programs in C+ and fortran is implemented with the deposition criteria of [2], in such a way that the Code of the existing CFD is not altered. The sequence of iteration on each near wall particle is shown in Figure 5.

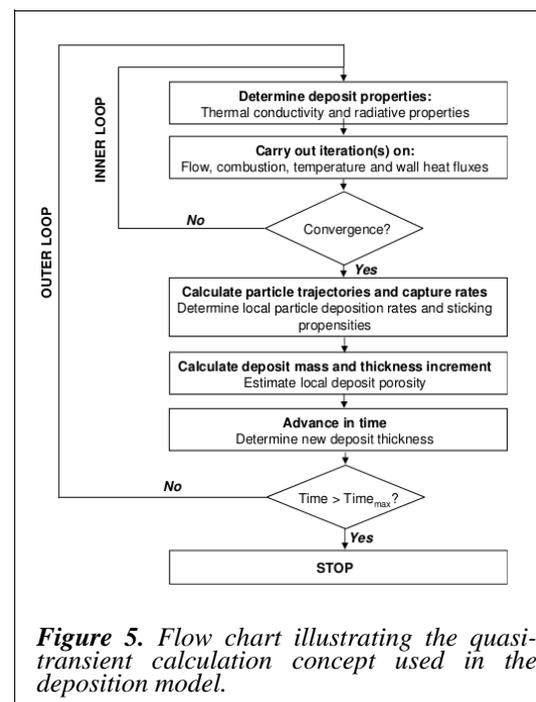


Figure 5. Flow chart illustrating the quasi-transient calculation concept used in the deposition model.

Deposit shedding (process of deposit removal from the heat transfer surface) will be also included in the model. Only natural shedding (erosion and gravity) will be considered, excluding external or artificial ones (e.g. soot blowing and thermal shocks).

Condensation of salts

Condensation of low melting point salts (KCl and sulphates) is the major source of fouling on the clean surfaces of tubes. Salts vapor condensation and submicron FAPs by diffusion

and thermophoresis are the initial mechanisms of fouling (see Figure 6). It creates the first layer of fouling over which further FAPs will be deposited.



Figure 6. High Deposit on superheater tube. Note the first white layer composed of sub micron particles and alkali vapor condensation.

Critical viscosity.

A User Subroutine is used for calculating the Critical Viscosity C_v as a function of the chemical composition of FAPs. [3]. The critical temperature T_{cv} is also determined and will be the limit below which the probability of adherence will be $\eta_{stick}=1$. This will always determine that a FAP touching the tube surface will be deposited and not rebounded off.

3. Results and discussion.

Experimental validation of the model will be tested with data acquisition at site, in existing power station boilers (8-15 MWe) burning olive oil waste. Deposition probes with (air-water) controlled metal temperature will be used (Figure 6).

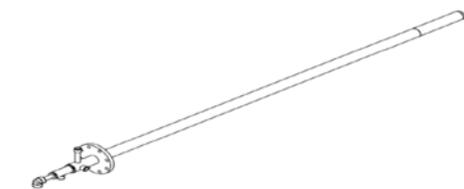


Figure 7. Water and air cooled deposition probe.

Results will be presented for a small set of 3 or 4 tubes (Figure 8) with a high mesh density. After that, an industrial model will be

constructed and tested, with simplified geometries for computational resources saving. Results will be compared to real deposits obtained by the test probe at a controlled tube metal temperature for reproducing the actual temperature of superheater tubes.

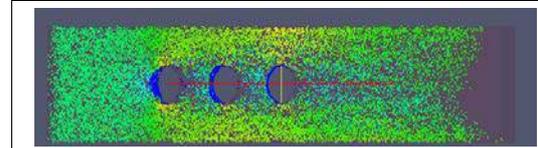


Figure 8. Simplified model of three tubes for testing the behaviour of the new deposition model.

4. Conclusions.

So far, main theoretical chapters of the thesis have been concluded. Analysis of the Open Source is being very long and tedious, although the advanced work is estimated in a 80-90%.

The probe is already designed and will be under construction in two months. So field works could begin in four months approximately.

Depending on the field advances, the presentation of the final work would be finished in 18-24 months.

5. Greetings.

Thanks to Gestamp Biomass company, that offers the possibility to carry out the field work in its biomass power plants.

6. References

- [1] Mathieu Guingo and Jean-Pierre Minier, A stochastic model of coherent structures for particle deposition in turbulent flows. *Physics of Fluids*, 20:053303 (2008).
- [2] Chungen Yin, L. A. Rosendhal, S. K. Kaer, Dedicated models for grate-firing biomass. Technical report, Aalborg University (2007).
- [3] M. Seggiani, G. Panonchia, "Prediction of Coal ash thermal properties using partial least-squares regression" , *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol:42, pag: 4919-4926 (2003).
- [4] Roman Weber et al., "On predicting the ash behaviour using Computational Fluid Dynamics", *Fuel Process Technol.*, Vol: doi: 10.1016, pag: /j.fuproc.2011.09.008, (2011).
- [5] Thomas R. Miles, "Alkali deposits found in biomass power plants" , Sandia-NREL,(1996)

Estudio de lesiones por daños corporales de origen físico, en actividades profesionales de riesgo, y de la prevención de los mismos. Desarrollo de sistemas monitorizados integral portátiles

José Carlos Vera Jiménez⁽¹⁾, Jesús Ayuso Vilacides, Francisco Fernández Zacarías ^(2,3)

^(1,3)Departamento de Ingeniería en Automática, Electrónica, Arquitectura y Redes de Computadores, Teléfono: 600441064 y Correo Electrónico: josecarlover@gmail.com

⁽²⁾ Química Física, Facultad de Ciencias, Campus Universitario de Puerto Real, 11510 Puerto Real, Cádiz

⁽³⁾Dept. Ingeniería Industrial e Ingeniería Civil, Escuela Politécnica Superior de Algeciras, Universidad de Cádiz, Avda. Ramón Puyol s/n 11202 Algeciras, Cádiz

Resumen

Aunque la Tesis está dirigida a la Prevención de Riesgos Laborales, la idea central es el "Desarrollo de sistemas monitorizados integrales portátiles" que permitan estudiar los orígenes y los tipos de lesiones, por daños corporales de origen físico, centrándonos fundamentalmente en las actividades profesionales de riesgo. Como sistema portátil, me refiero en principio a un artefacto tipo traje, construido con múltiples microsensores, con autonomía eléctrica y conectividad inalámbrica a dispositivos de procesamiento de señales, con los que monitorear movimientos y otros tipos de propiedades biomecánicas y biomédicas. El objetivo general de esta investigación va encaminada a reducir la siniestralidad laboral, así como prevenir las lesiones y otros tipos de daños, en determinados ámbitos profesionales como policías y otros cuerpos de seguridad, bomberos, deportes de riesgos, de lucha y de contacto, especialmente artes marciales, mediante un sistema tecnológico de monitoreo integral portátil.

1. Introducción

En el TFG de Criminología y Seguridad, "LA INTERVENCION POLICIAL Y LA PREVENCIÓN DE RIESGOS", realizado por el doctorando en el año 2014 sobre un número de 162 policías y mandos, que prestaban su servicio en primera actividad, pertenecientes a la Policía Local de Cádiz, en edades entre 24 y 55 años, donde todos ellos habían realizado formación en técnicas físicas de intervención entre los años 2005 y 2013, se determinó que en el año 2005 se produjeron 15 bajas derivado de intervenciones físicas, en 2006 se produjeron 8 bajas. Estas bajas estaban relacionada con agresiones y lesiones en antebrazo, contractura espalda y lesiones en dedo de la mano al reducir al detenido, entre otras. En el año 2007, se producen también 8 bajas provocadas por intervenciones físicas con manifestaciones en el mismo sentido comentado anteriormente. Estas bajas fueron descendiendo drásticamente a consecuencia de los cambios efectuados en las técnicas físicas de intervención policial.

Por otro lado, en el "Estudio I+D+i jurídico-criminológico, médico-legal y químico-industrial de los instrumentos de defensa policial y de las técnicas físicas de intervención para la prevención de riesgos laborales y la protección de los ciudadanos" (DER2012-35997-C03), el cual finaliza en diciembre de 2015, se demuestra que las defensas de uso policial y las técnicas físicas de intervención deben ser modificadas, fundamentalmente por

las lesiones físicas que pueden llegar a generar, no solo al policía que la emplea sino a los ciudadanos sobre los que se intervienen.

En el "I Congreso Internacional de Evaluación Técnica y Jurídica de la Operativa Policial" celebrado en abril de 2015, en el Campus Universitario de Jerez de la Frontera, se puso de manifiesto la situación de dificultad a la que se enfrenta los miembros de fuerzas y cuerpos de seguridad en el día a día, así como el impacto en la sociedad desde el punto de vista médico-legal, químico-industrial y jurídico-criminológico contra los cuerpos y fuerzas de seguridad. Así, desde el punto de vista jurídico quedó en evidencia la multitud de denuncias que se producen por los ciudadanos contra los cuerpos y fuerzas de seguridad, consecuencia del uso poco acertado de los instrumentos que tiene el policía a su disposición o por técnicas poco depuradas empleadas para detener al agresor. Desde el punto de vista médico, estas denuncias tienen sus raíces en las lesiones que se producen en los propios ciudadanos, llegando incluso, en algunos casos, a causar la muerte. Sin embargo, desde el punto de vista químico-industrial se demostró que las defensas policiales, en todas las variedades analizadas, no son todo lo adecuadas que debieran ser, provocando no sólo lesiones a los ciudadanos sino también al propio policía lo que influye directamente en la Prevención de riesgos Laborales de estos.

El TFM de Prevención de Riesgos Laborales, elaborado por doctorando en octubre de 2015 “PROYECTO DE REGLAMENTO Y PLAN DE PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES EN LA POLICÍA LOCAL DE CÁDIZ”. Ha quedado latente la necesidad de trabajar en la Prevención de Riesgos Laborales, desde un aporte innovador, con carácter multidisciplinar y científico.

Así, la propuesta de mi Tesis nace no sólo de la necesidad de seguir avanzando para erradicar las bajas laborales derivada de la intervención policial sino del deseo de mejorar los métodos de intervención policial, bajo el prisma de la Prevención de Riesgos Laborales y aunque es cierto que se ha logrado reducir las bajas laborales derivada de la intervención policial, sobre todo gracias proyectos como el “Estudio de los materiales de defensas policiales y posibles mejoras” (DER2012-35997-C03) y patentes como Inhibidor de vibraciones en objetos alargados sometidos a impactos, golpes y cualquier tipo de empuje. P201500365, también es cierto que la tecnología actual y las investigaciones en biomecánica y biomedicina dan muchas posibilidades para seguir mejorando la protección y salud de los trabajadores que desempeñan sus funciones en trabajos de riesgos.

2. Metodología o Metodología Experimental

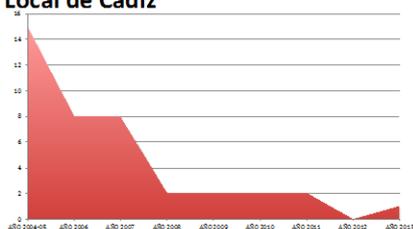
Entre diversas posibilidades, una de ellas es utilizar un Sistema portátil, me refiero en principio a un artefacto tipo traje, construido con múltiples microsensores, con autonomía eléctrica y conectividad inalámbrica a dispositivos de procesamiento de señales, con los que monitorear movimientos y otros tipos de propiedades biomecánicas y biomédicas.

3. Resultados y Discusión

En las investigaciones que he ido desarrollando en la línea que estoy proponiendo en mi tesis doctoral, he obtenidos datos muy significativos en cuanto a la prevención de riesgos laborales, como por ejemplo los que detallo:

Tabla I. Bajas laborales

Datos sobre bajas laborales en Intervenciones Policiales de la Policía Local de Cádiz



Estos datos, donde podemos ver la reducción de bajas laborales de los policías, nos hacen ver la necesidad de cambiar la formación que ha venido recibiendo los miembros de la policía.

4. Conclusiones

A la vista de los resultados tanto del TFG como del TFM del doctorando, propone una investigación que permita combinar sus conocimientos en el ejercicio de las funciones policiales, con la tecnología actual y las investigaciones en biomecánica y biomedicina en aras de mejorar la protección y salud de los trabajadores que desempeñan sus funciones en trabajos de riesgos, como pueden ser los policías.

5. Referencias

- [1] J.C. Vera, Estudio Criminológico sobre Prevención De Riesgos en La Policía Local de Cádiz (2003-2011)
- [2] Documento DER2012-35997-C03. "Estudio multidisciplinar I+D+i de las defensas y las técnicas de intervención policial, dirigido a la prevención de riesgos profesionales y la mejor protección de los ciudadanos". (2012-2015), Cádiz, 2015
- [3] J.C. Vera, “La intervención policial y la prevención de riesgos”, Trabajo Fin de Grado (2014)
- [4] J.C. Vera, “Proyecto de reglamento y plan de prevención de riesgos laborales en la policía local de Cádiz”, Trabajo Fin de Máster (2015)

Estudios preliminares sobre los efectos del suspense narrativo e interactivo

P. Delatorre⁽¹⁾, P. Gervás⁽²⁾, M. Palomo-Duarte⁽³⁾

⁽¹⁾Departamento de Ingeniería Informática, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Cádiz, 956 483 200, pablo.delatorre@uca.es

⁽²⁾Departamento de Ingeniería del Software e Inteligencia Artificial, Facultad de Informática, Universidad Complutense de Madrid, 913 947 501, pgervas@sip.ucm.es

⁽³⁾Departamento de Ingeniería Informática, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Cádiz, 956 483 200, manuel.palomo@uca.es

Resumen

Dentro del contexto de los sistemas de generación automática de historias, uno de los desafíos actuales se basa en la selección de tramas que provoquen emociones en el lector, donde la tensión narrativa representa un recurso fundamental para transmitir las. Actualmente, sin embargo, las propuestas que modelan el suspense narrativo se circunscriben localmente a algunos generadores, sin que exista un criterio común que comprenda un estudio sobre el efecto del suspense en los espectadores. El trabajo descrito tiene como objetivo presentar un nuevo modelo de suspense que tenga en cuenta la revisión de sus elementos constituyentes y su repercusión emocional.

1. Introducción

Se presenta en este artículo un resumen descriptivo del estado actual de la tesis titulada: “Un modelo computacional del suspense en entornos narrativos e interactivos”, cuyo objetivo es la obtención de un modelo computacional para predecir el suspense que experimenta un espectador al verse expuesto a una discurso narrativo [1], independientemente de la tecnología de presentación de dicho discurso.

Como ámbito inicial de aplicación, el modelo pretende cubrir, por una parte, la dificultad de los sistemas de narración automática (*automatic storytellings* [2]) para generar curvas de tensión [3]; por otro lado, el efecto del suspense en sistemas de *e-learning*, dado que se ha probado que la inclusión de aspectos emocionales facilita el aprendizaje [4]. Esto último se emplea, actualmente y a su vez, como entorno de prueba de la validez del modelo. Ambos ámbitos corresponden a las líneas principales de investigación de los directores de esta tesis Dr. Pablo Gervás y Dr. Manuel Palomo, respectivamente.

Consecuentemente al propósito principal, se requiere para ello la revisión del trabajo previo existente, lo que implica cubrir trabajos sobre el suspense y su complejidad, tanto desde el punto

de vista psicológico y narratológico [5] (incluyendo ámbitos como la literatura y el cine [6]) como desde el punto de vista computacional [7]; la elaboración de una teoría computacional sobre el suspense en un contexto en que un espectador consume un discurso narrativo; el desarrollo de varias aplicaciones informáticas que permitan emular el proceso de exposición de un espectador a un discurso narrativo en un entorno controlado, así como explorar los efectos de la exposición a distintos contenidos en distintos órdenes y recabar información sobre la percepción del suspense que experimenta; la realización de una valoración empírica con usuarios de la teoría elaborada mediante las aplicaciones informáticas desarrolladas; y la publicación de las contribuciones conseguidas en congresos y revistas del área.

2. Metodología o Metodología Experimental

La metodología general de trabajo de revisión y publicación se basa en las directrices SLR/SMS, en sus fases de planificación de la revisión, ejecución de la revisión y difusión de los resultados.

En cuanto a la primera directriz, se ha desarrollado la justificación de la necesidad del estudio, derivada de la obtención de carencias en el campo de la tesis y que han sido evaluadas

como positivas por el director de la misma. Asimismo, quedan acordados aspectos procedimentales como el almacenamiento bibliográfico, la extracción de metadatos y la normalización léxico / sintáctica.

Respecto a la ejecución, se ha localizado literatura relacionada en repositorios como Google Scholar y grupos de la temática en Mendeley, siendo seleccionados aquéllos con mayor índice de referencias e impacto en la temática directamente relacionada. La extracción de datos se ha realizado en dos fases: lectura y selección manual, y localización de los términos específicos del suspense. El objetivo de esta fase es la adquisición de conocimientos y el desarrollo del estado del arte.

Para la publicación se localizan congresos y revistas de los sectores de la creatividad computacional, la narración automática y la psicología, con la colaboración de la Dra. Barbara Arfè, investigadora y psicóloga de la Universidad de Padua especializada en comprensión narrativa.

La metodología seguida para el desarrollo de las aplicaciones experimentales se ha realizado sobre la base de un ciclo de vida iterativo basado en prototipos, donde el análisis de la información previa y la obtención de resultados son fundamentales para el éxito del estudio. Se estudian los perfiles de interés previamente a la publicación y difusión de la aplicación, así como la información demográfica de los participantes.

Para cada experimento es necesario el avance en el modelo que finalmente se propondrá en la tesis doctoral, y que se apoya en todo el material adicional mencionado previamente. Dicho modelo computacional, en su vertiente teórica, recoge los diferentes atributos que la literatura científica asocia al concepto del estudio, cada uno de los cuales con una serie de sub-atributos. Posteriormente, es necesario identificar la dependencia causal entre ellos, debido a la hipótesis de la existencia de atributos derivados, lo cual genera paradojas documentadas y estudiadas, pero de las que aún no hay consenso científico. De esta forma, el marco teórico pretende, por una parte, resolver estas dependencias y, por otra, obviar aquellos atributos innecesarios para desarrollar un modelo experimental válido.

4. Recursos y Medios

Los recursos necesarios se reparten actualmente entre aquéllos proporcionados por la Universidad Complutense de Madrid, la Universidad de Cádiz y la Universidad de Padua (Italia), y constan básicamente de una biblioteca física y virtual de los diferentes campus, para el

trabajo previo; un ordenador personal para el desarrollo de experimentos individuales, y un aula de equipos para la puesta en marcha de experimentos conjuntos; un servidor web con base de datos para el entorno de explotación, que se solicitará al Grupo de investigación NIL, de la Universidad Complutense de Madrid; un sistema de medición de respuestas fisiológicas como respiración, pulso y respuesta ocular; herramientas informáticas para la medición, el desarrollo documental y programación: ShareLaTeX, MikTeX, paquete estadístico R, hoja de cálculo, entornos de desarrollo, etcétera.

5. Experimentos en Desarrollo

Actualmente se trabaja sobre cinco experimentos en diferentes fases de desarrollo.

En primer lugar, con el Departamento de Psicología del Desarrollo y la Socialización de la Universidad de Padua, se diseñó una actividad cuyo objetivo consistió en estudiar la intensidad emocional y la memoria de un conjunto de participantes sometidos a la lectura de dos sucesos diferentes, uno de carácter neutro y, el otro, supuesto generador de tensión narrativa. Dicho experimento se llevó a cabo poco antes del verano de 2015, coincidiendo con la estancia del doctorando en la Universidad referida. La hipótesis de trabajo parte de la suposición de que el suspense influye en la forma de procesar la información, lo cual parece constatarse en un primer análisis de los datos. Actualmente se está finalizando el estudio de los resultados, cuyas conclusiones se prevén para finales de 2015. Una aproximación a dicho experimento fue presentado en septiembre en el *XXVIII Congresso Nazionale Sezione di Psicologia dello sviluppo e dell'educazione* [8].

En segundo lugar y más relacionado con la disciplina del *e-learning*, se desarrolló un videojuego en la Universidad de Cádiz destinado al aprendizaje de idiomas, donde la hipótesis se basa en la influencia del suspense en el aprendizaje y se emplea una primera base del modelo teórico para incrementar o disminuir dicho suspense [9]. El videojuego, llamado *House of Crimes*, se encuentra finalizado. A fecha de elaboración de este artículo, se están diseñando los test *pre* y *post* para los participantes sobre la hipótesis de la afección de las emociones en la memoria. El experimento se llevará a cabo en el segundo cuatrimestre del presente curso escolar, contando tanto en su concepción como en su puesta en marcha con la colaboración de la Dra. Anke Berns, del Departamento de Filología Francesa e Inglesa de la Universidad de Cádiz, y el alumno Francisco Madueño, programador principal del juego.

Continuando en el campo de los juegos serios, se encuentra en desarrollo otro juego en 3D, para comprobar cuánto influye en el suspense los aspectos de indefensión, proximidad al desenlace y simpatía [10]. El juego se encuentra todavía en fase alfa, y se estima su finalización al terminar el curso escolar 2015/16.

Asimismo, un lenguaje orientado al desarrollo de aventuras conversacionales que incluye una interfaz con el modelo de suspense está actualmente en fase de análisis.

Por último, se está diseñando un experimento similar al realizado con el Departamento de Psicología del Desarrollo y la Socialización de la Universidad de Padua, añadiendo elementos al mismo que no fueron probados entonces.

6. Resultados y Discusión

En estos momentos no hay resultados publicables, sino que están todos en fase de análisis. Se prevé que para final de año estarán disponibles los datos y las conclusiones del primer experimento, emplazándose los del segundo a finales de año.

7. Agradecimientos

Se agradece el soporte personal y económico aportado por el Departamento de Ingeniería Informática de la Universidad de Cádiz y el grupo de investigación NIL de la Universidad Complutense de Madrid.

8. Referencias

- [1] F. Peinado & P. Gervás, *Evaluation of automatic generation of basic stories*, New Generation Computing 24(3) (2006) 289-302
- [2] W. F. Brewer, *The nature of narrative suspense and the problem of rereading*, Suspense: Conceptualizations, theoretical analyses, and empirical explorations (1996) 107-127
- [3] P. Delatorre & P. Gervás, *Un modelo para la evaluación de la narrativa basada en partidas de ajedrez*, 1.º Congreso de la Sociedad Española para las Ciencias del Videojuego, CEUR Workshop Proceedings (2014) 137-146
- [4] E. A. Kensinger & D. L. Schacter, *Memory and emotion*, Handbook of emotions 3 (2008) 601-617
- [5] N. Carroll, *The paradox of suspense*, Suspense: Conceptualizations, theoretical analyses, and empirical explorations (1996) 71-91
- [6] R. Allen, *Hitchcock's Romantic Irony*, Film and culture, Columbia University Press (2007)
- [7] N. Szilas, *IDtension: a narrative engine for interactive drama*, Proceedings of the Technologies for Interactive Digital Storytelling and Entertainment (TIDSE) Conference, volume 3 (2003) 187-203
- [8] P. Delatorre & B. Arfè, *Modulare la suspense del lettore attraverso un modello computazionale*, XXVIII Congresso Nazionale Sezione di Psicologia dello sviluppo e dell'educazione (2015)
- [9] P. Delatorre, A. Berns, M. Palomo-Duarte, P. Gervas & F. Madueño, *Diseño de un juego serio basado en el suspense*, 2.º Congreso de la Sociedad Española para las Ciencias del Videojuego, CEUR Workshop Proceedings (2015) 102-111
- [10] A. Smuts, *The desire-frustration theory of suspense*, The Journal of Aesthetics and Art Criticism 66 (2008) 281-290

Experimental and computational analysis of olive residues biomass-fired grates

P.J. Leal Forero⁽¹⁾, A.J. Gámez⁽²⁾, C. Yin⁽³⁾

^(1,2) University of Cádiz, Dept. of Mechanical Engineering and Industrial Design, 10th Avenida de la Universidad, Puerto Real, Cádiz(Spain), (+34) 653 535 022, pablolealforero@gmail.com

⁽³⁾ Institute of Energy Technology, Aalborg University, 9220 Aalborg East (Denmark)

Abstract

This work in progress is part of the ongoing PhD research at the University of Cádiz (Spain) in collaboration with Aalborg University (Denmark).

The objective of this work is the develop and validation of a feasible olive residue combustion model for industrial grates and its routines for Open-Source CFD software *Code Saturne*, thus allowing biomass boiler design optimization in engineering stages according to the olive waste nature and particularities and the boiler performance prediction considering the combustion products and particles in order to maximize dispatchability.

Keywords: Computational Fluid Dynamics, numerical modelling, grate combustion, biomass, olive waste, packed-bed model, open source, Code Saturne.

1. Introduction

Nowadays, Biomass boilers are an alternative energy source because their diverse fuels sources and dispatchability allows remarkable profits with a reduced environmental and social impact so that these facilities are in vigorous growth.

Both biomass boiler designs and tools for performing their characterization and optimization are highly demanded.

On the other hand, Spain is the biggest olive oil producer in the world, and this industry generates diverse oil residues (mainly called "orujillo"), which use in biomass boilers to its valorization through the steam production for electricity generation (power ranges from **2 MWe** to **25 MWe**) is highly extended. In Spain, olive residues fired biomass plants generate more than **126 MWe** with a biomass consumption of more than 800 tons per year.

Due to the fuel characteristics, these boilers must stop for maintenance operations (such as cleaning operations of fouling deposits on tube banks or biomass vaults on the grate), reducing the dispatchability. This can be avoided by means of conservative design values in heat exchanging surfaces and boiler geometry according to flying ashes composition derived from the biomass fuel characterization, grate operation, internal flow distribution, exchanged heat and foreseen fuel nature variation, but at the end, these conservative considerations impact on the facility thermal performance.

CFD tools (both commercial and open-source) can provide cost-effective analyses for real-life systems involving combustion phenomena through heat and mass balances together with their chemical reactions. These analyses during design stages in engineering are quite interesting as they allows a flow distribution pattern observation, temperature distribution, species concentration or operation modes impact on the existing designs.

These models for a specific fuel as it determines designs but for olive wastes boiler, with or without spreader-type feeding systems, this modelization is poorly developed despite the aroused interest.

The developing of a numerical model for this fuel would allow not only a direct application on the equipment objective of this work, with an adequate set of parameters it could be extended to other fuels as grate-type stokers is a widely used technology both for biomass fuels and MSW thermal valorization, either with spreader-type feeding systems or not.

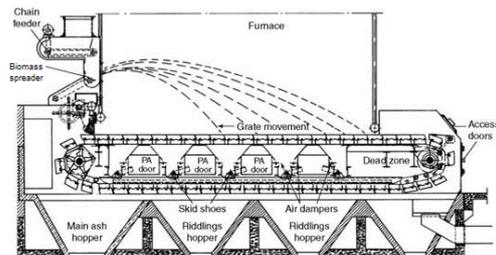


Figure 1. Spreader-type fuel feeding system.

Background

CFD has become a standard for design and optimization combustion systems of any kind, from small to large-scale facilities, sometimes involving complex mechanisms such as gasification processes, fluidized beds or transported particles media. These simulations allows identifying and controlling process parameters, especially in those cases where the turbulence plays an important role such as certain chemical reactions (i.e. unburnts carbon in fly ashes is mainly caused by a poor mixing in the furnace freeboard). Other effects like those related with slagging and fouling troubles in the heat transfer surfaces are also modelled by using CFD techniques and these effects are some of the main operating troubles that engineering companies faces in its boiler designs. So, these effects are the main focuses of many efforts in CFD modelling considering they are related with the combustion system behavior.

However, CFD packages does not directly support several specific models such as grate models, so, in order to be able to develop a whole grate-firing boiler model is often required to enhance its basic capabilities with user-defined routines. Some of the characteristics of these routines (e.g. their integration or their accuracy) depend on the own software integration capabilities. From this point of view, the Open-source software philosophy allows a deeper integration capability and that is the reason of the software *Code Saturne* election.

Concerning grate models, the existing models are related with the degree of approximation to the processes in the fuel layer, considering grate firing has a strong coupling between processes inside the fuel bed and over-bed regions. As combustion proceeds, several products leave the bed entering the freeboard together with an energy supply, and the processes which rule these parameters behavior are highly dependent on the supplied boundary conditions. So, in the literature can be found at least three different approaches to the treatment of the boundary conditions at the grate:

- 1) The **empirical approach** set the boundary conditions according to the empirical experience and design of real furnaces, so that the grate is divided into a certain number of sections for each of which profiles of temperature, mass flux and concentration of species are prescribed as they are measured in a real unit. This approach is used in many works ^[4] with satisfactory results but it is incapable to predict combustion in boiler design stages.
- 2) The **porous-zone approach** is an approach based on a tool (the porous media) provided

by many CFD softwares (such as *Code Saturne*) where a fluid is subjected to a pressure loss. Due to a fuel bed behaves like this, it can be approximated by using this approach whenever various source terms arisen as a consequence of the drying, devolatilization and char oxidation processes and are needed to be included together with additional governing equations for solid fuel variables to fully describe the whole process in the bed. This approach has been successfully proved ^[5], but requires longer computational times. In the other hand, it is capable to predict both combustion and processes inside the bed.

- 3) The **stand-alone numerical approach** describes and predict all the process in the bed in detail^{[6][7]} and it is based in the same principles than the porous zone bed model, with some differences as independence from the code, extensibility from the code capabilities and analysis capability. Additionally this model requires an effort on conservativeness so that laws on mass and energy conservation can be fulfilled otherwise freeboard combustion may lead to inaccuracy errors.

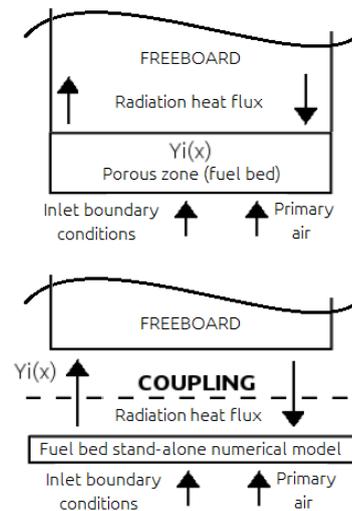


Figure 1. Modelling approaches, porous-zone (up) and stand-alone numerical approach (down)

None of the three aforementioned approaches scopes spreader-type feeding systems commonly used in biomass boilers, whether with olive-residues or not. This feeding system involves several differences with the existent freeboard-bed model coupling and it has not been developed up to now to the author's knowledge. Therefore, this work would also contribute to a better modelization of grate fired-boiler with spreader-type feeding systems.

2. Methodology

A grate model-furnace coupled modeling strategy will be used as it is commonly used for these studies^{[1][2]}, based on the *Code Saturne* turbulence equations solver, thermal model, combustion and lagrangian particle tracking modules.

The work will be focused on a numerical modelling of grate combustion as a stand-alone packed bed numerical model with integration with both combustion and lagrangian particle transport modules in the freeboard.

Two different zones will be considered:

- Olive-waste grate model (OWG model), where physical/chemical reactions related with the olive-waste fuel and its composition are defined and modeled in order to ease gas-phase reactions and flying ashes particles resulting compositions.
- Furnace (freeboard), where either the gas-phase reactions or the gas flow equations are solved together with the included thermal mechanisms and particle transport.

These two zones correspond to two different processes which are strongly coupled and then sequentially solved, as follows:

- 1) Based on biomass data, a primary air injection and an initial radiative flux, the OWG model routine is initially solved so initial temperature, velocity, fuel gas and particles composition profiles are obtained.
- 2) According to the OWM model output values treated as part of the furnace domain overall inlet conditions, CFD modeling of gas mixing and a heterogeneous/homogeneous combustion and particle transport are performed so that a radiative and a biomass mass flux onto grate is obtained.
- 3) Furnace domain CFD results are used recursively in steps 1 and 2 until no significant changes between outgoing radiative heat flux from OWG model and incoming from the furnace CFD model are observed.

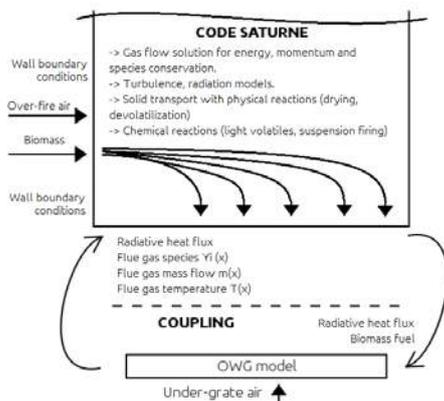


Figure 2. OWG modeling strategy scheme

The combustion process which takes place in the bed is governed by basic principles known as *conservation laws* of mass, momentum and energy. In a general form these laws are mathematically described by a system of transient partial differential equations called *governing equations* in the form of the general transport equation:

$$\underbrace{\frac{\partial(\epsilon\rho\Phi)}{\partial t}}_{\text{unsteady term}} + \underbrace{\nabla \cdot (\epsilon\rho\mathbf{v})}_{\text{convection term}} = \underbrace{\nabla \cdot (\Gamma\nabla\Phi)}_{\text{diffusion term}} + \underbrace{S_\Phi}_{\text{source term}} \quad (1)$$

ϵ = porosity [-]

ρ = density [kg/m³]

Φ = transported quantity (scalar)

Γ = diffusion coefficient

\mathbf{v} = vector of interstitial velocity [m/s]

S_Φ = term including all the source terms

Depending on the variables Φ , Γ and S_Φ physical meaning, equation (1) becomes a governing equation for heat, mass or momentum transfer.

For the heat equation, source term includes rates of generation/consumption of all components included either in gas/solid phase, ruled by continuity equations of the form:

$$\frac{\partial(\epsilon_b\rho_b Y_{g,i})}{\partial t} + \frac{\partial(\epsilon_b\rho_b v_g Y_{g,i})}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_b\rho_b D_{g,i} \frac{\partial Y_{g,i}}{\partial y} \right) + r_i + \epsilon_b \sum_j r_{i,j} \quad (2)$$

Equation (2) contains mass source terms both from heterogeneous reactions and j homogeneous reactions.

The OWG model will be validated in existing and operating Gestamp Renewables' biomass power plants burning olive residues (8-15MW_e) by means of on-site measurement (H₂O, CO₂, CO and particles) and model species prediction at measured points.

A temperature-controlled measurement probe will be specifically designed for model validation purposes. It will be able to extract flue gases in boiler existing nozzles and control surface temperature for ashes deposition.

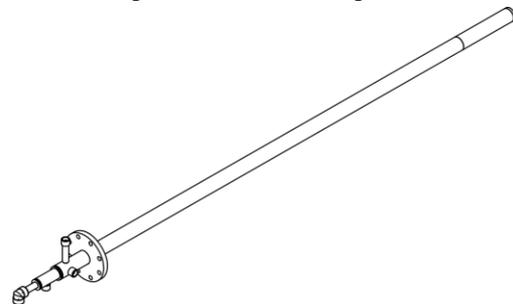


Figure 3. Probe model

3. Preliminary results

Progresses have been performed programming and integrating Fortran/C++ custom routines in eulerian-lagrangian simulations with the selected open source software. It also has been developed approximated boiler models based on the available pulverized coal combustion models with approximation to biomass firing and particle transport and slagging mechanisms. These freeboard approximated simulations have been developed with modified inlet boundary conditions for a stratified combustion mechanism to replicate a wood chips biomass grate behavior and modifications in the Kobayashi devolatilization model^[3] parameters according to the first approach of existing bed models.

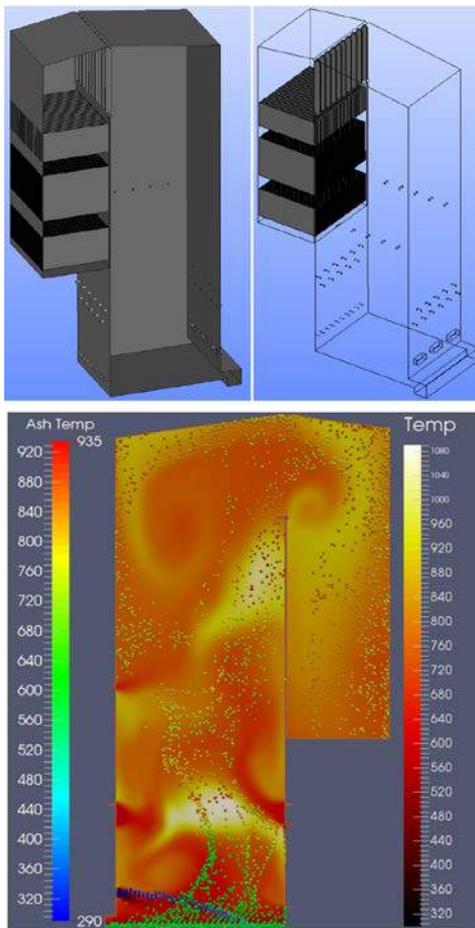


Figure 4. Preliminary biomass boiler freeboard simulation, geometry (up), results (down)

Preliminary freeboard results yields an adequate behavior according to existing facilities performances, and achieved results in custom routines integrated with *Code Saturne* kernel foretell promising results both for the present and future works.

4. Conclusions

In the context of grate boiler models, either burning olive residues or with spreader feeding systems, this work will provide a feasible tool for simulations and optimization processes in engineering stages of boiler design industry.

According to the consulted bibliography neither of the aforementioned cases have been performed, so this work will be a starting point for other future models related with other complex fuels or with similar burning technologies.

Up to now, the developed work show promising results in terms of integration of customized models with the open-source software *Code Saturne*. In the other hand, the software has also shown an adequate behavior with simplified bed model approach models according to the observed reality.

5. Acknowledgments

The author would like to acknowledge to *Gestamp Biomass* company the possibility to carry out the field work in its existing facilities.

6. References

- [1] Yin, C.; Rosendahl, L.; Kær, S.; Clausen, S.; Hille, T., “*Mathematical modelling and experimental study of biomass combustion in a 108MW thermal boiler*” - Energy and fuels, 22, 1380-1390, 2008
- [2] Kær, S., “*Numerical modelling of straw-fired grate boiler*” - Fuel, 83, 1183-1190, 2004
- [3] Kobayashi, H., “*Devolatilization of pulverized coal at high temperatures*” – PhD thesis, Massachusetts institute of technology, 1976
- [4] Scharler, R. and Obernberger, I., “*Numerical modelling of biomass grate furnaces. Proceedings of the 5th European conference on Industrial Furnace and Boilers*”, 17, ISBN 972-8034-04-0
- [5] Collazo, J.; Porteiro, J.; Patiño, D.; Granada, E., “*Numerical modelling of the combustion of densified Wood under fixed-bed conditions*” - Fuel, 93, 149-159, 2012
- [6] Yang, W.; Ryu, C.; Choi, S.; “*Unsteady one-dimensional model for a bed combustion of solid fuels*” – Proceedings of the institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 218, 589-598, 2004
- [7] Zhou, H.; Jensen A.D.; Glarborg, P.; Jensen, P.A.; Kavaliauskas, A.; “*Numerical modelling of straw combustion in fixed bed*” - Fuel, 85, 705-716, 2006

Factores Críticos de la Gestión del Alcance en el Éxito de los Proyectos de Edificación Industrial

A. Cerezo-Narváez, A. Pastor-Fernández, M. Otero-Mateo

Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, Avda. Universidad de Cádiz 10, 11519-Puerto Real, Cádiz, +34 956015142, e-mail: alberto.cerezonarvaez@mail.uca.es

Resumen

La presente comunicación contribuye a la mejora de los resultados de los proyectos en general y edificatorios en particular, logrando la satisfacción de sus interesados e incidiendo en la eficiencia de su gestión y eficacia de sus resultados; mediante la determinación de los factores críticos de éxito (FCE) para la gestión del alcance de los mismos; con el objeto de modelizar, en la tesis doctoral a la que pertenece, un sistema de gestión orientado al éxito en los proyectos de edificación, ofreciendo una visión expandida de la profesión de arquitectos e ingenieros, aplicable a profesionales liberales y PYMEs.

1. Introducción

El estado de crisis que vive en la actualidad (2008-2015) el sector de la edificación, obliga a un replanteamiento en las estrategias de las organizaciones, para la supervivencia actual y posterior desarrollo futuro de sus actividades. En este contexto, surge como solución la dirección de proyectos, participando de forma eficiente en los intereses y necesidades del cliente y demás actores interesados. En España, en el sector de la edificación, para el período 2011-2015, la producción baja un 45.95%, según el Consejo Superior de Arquitectos [1]; el nº de trabajadores decrece un 25.78%, según la Secretaría de Estudios Económicos y Estadísticas [2,3]; la contribución al PIB se reduce un 51.30%, pasando del 11.5% al 5.6%, según el INE [4] y el volumen de negocio disminuye un 38.95%, según la Secretaría de Apoyo a la PYME [5,6].

Como expone el autor Concepción [7], la sociedad plantea nuevos retos a los profesionales de manera ininterrumpida, exigiéndoles una mejora continua en el desempeño de sus competencias y atribuciones. En el ámbito de la edificación, el autor Fernández [8] sostiene que, mediante su gestión, control y coordinación; el director del proyecto, en representación del promotor, ejerce de asesor en el diseño, de supervisor en calidad, de inspector, de consultor en las contrataciones y de decisor vinculante ante el resto de agentes.

El primer paso, consiste en gestionar el alcance del proyecto, estableciendo sus límites, concretando sus entregables y asegurando el entendimiento de los roles de los implicados en el proceso y la comprensión de las acciones derivadas del ejercicio de sus atribuciones.

La gestión del alcance del proyecto es, para los autores Fageha & Aibinu [9], el proceso por el que un proyecto se define y se prepara para su ejecución, ayudando a decidir sobre si debe o no continuar. De igual manera, como exponen los autores Heywood & Smith [10], la gestión del alcance del proyecto resulta fundamental para la implementación exitosa del proyecto de construcción, así como también para mejorar la satisfacción del cliente y demás interesados.

Asimismo, el éxito del proyecto está influenciado por factores adicionales, que si se descuidan, perjudican sus resultados, como afirman los autores Shenhar et al [11]. Sobre esta base, la investigación y desarrollo de los FCE en la industria de la edificación supone, para los autores Kulatunga et al [12], una estrategia general de la organización para hacer frente a sus desafíos, mejorando la eficiencia y eficacia de sus procesos, con el objeto de mantener e incrementar su competitividad en el mercado, asegurando que las expectativas del cliente y de otros involucrados en sus actividades están debidamente satisfechas y que las futuras demandas se tratan adecuadamente.

2. Metodología

La investigación trata de demostrar que la gestión del alcance de un proyecto de edificación se relaciona con su éxito, definiendo y controlando lo que está incluido y excluido del mismo, comprobando la compleción total del trabajo y evitando la agregación de trabajo no acordado, mediante el control de cambios, a partir de la identificación de interesados, determinación de necesidades, definición de objetivos y recopilación de requisitos.

La metodología utilizada es la observación mediante cuestionario, para la recogida y posterior tratamiento estadístico de datos, a partir de la investigación de las respuestas recibidas; cuantificando tales respuestas, discretas e individuales para caracterizar el conocimiento objeto de estudio y contrastar estadísticamente las relaciones entre las variables de interés.

Para el estudio, se adopta una escala específica, tipo Likert de cinco ítems, que permite conocer el grado de conformidad del encuestado con las afirmaciones propuestas; siendo su utilización especialmente adecuada en situaciones en las que se requiere que el encuestado matice su opinión, al ayudar a capturar su intensidad hacia dicha afirmación.

En la selección de las preguntas, se sigue un proceso estructurado en tres pasos:

1º. Extracción de características y criterios, desde la literatura y conclusiones:

- Características de la gestión del alcance
- Criterios para el éxito sostenido

2º. Extracción de factores de éxito, desde la literatura y conclusiones:

- Factores de éxito en la gestión del alcance
- Factores de éxito sostenido

3º. Preselección de preguntas, desde una serie de cuestionarios de referencia, que se toman como base debido a su:

- Similitud en contenido (gestión del alcance, éxito sostenido)
- Estructuración según una escala Likert

El desarrollo del bloque de gestión del alcance, tiene por objeto determinar la importancia de una serie de FCE relacionados, mediante la evitación de la corrupción del alcance, el enfoque al producto y al cliente y la innovación y competitividad; identificando las necesidades de los interesados en el proyecto, procurando asegurar el trabajo requerido para completar el proyecto, administrando tareas, determinando los entregables, supervisando el desarrollo del proyecto hasta su validación y aceptación, solicitando los cambios pertinentes.

El desarrollo del bloque de éxito sostenido, tiene como objetivo establecer la importancia del éxito del proyecto en la competitividad de la organización, valorar su impacto en la misma y en la preparación de su futuro, extendiendo su aplicación más allá de su propio ciclo de vida; comenzando por la gestión del alcance como primera de sus dimensiones, por su naturaleza globalizadora y significancia predictiva.

Tras el análisis de las fuentes de información y documentación, para la elaboración del cuestionario, las preguntas resultantes se resumen en las Tablas I-II:

Tabla I. FCE para la gestión del alcance

A	Identificación del alcance:
A.1	Información de los interesados
A.2	Estudio de las necesidades y expectativas
A.3	Recopilación de requisitos
A.4	Análisis y priorización de requisitos
A.5	Aceptación del cliente
A.6	Descripción del trabajo a realizar
A.7	Análisis de restricciones y suposiciones
A.8	Definición de entregables e hitos
B	Administración del alcance:
B.1	Dimensionamiento del proyecto
B.2	División estructurada del trabajo
B.3	Coordinación de actividades
B.4	Integridad de la planificación
C	Supervisión del alcance:
C.1	Uso de un sistema de control del alcance
C.2	Implicación del cliente
C.3	Medición del rendimiento del proyecto
C.4	Evaluación periódica del alcance
C.5	Rendimiento acorde a las capacidades
C.6	Calidad de los entregables
C.7	Uso de un sistema de control de cambios
C.8	Gestión de conflictos

Tabla II. FCE para el éxito sostenido

D	Éxito del proyecto:
	<i>Producto y/o servicio:</i>
D.1	Cumplimiento de los requisitos acordados
D.2	Prosperidad del cliente
	<i>Dirección y gestión del proyecto:</i>
D.3	Integridad de las líneas base del proyecto
D.4	Rentabilidad del proyecto
E	Éxito de la organización:
	<i>Impacto:</i>
E.1	Satisfacción de la organización
E.2	Satisfacción del director del proyecto
E.3	Satisfacción del equipo de ejecución
E.4	Satisfacción del cliente
E.5	Satisfacción de usuarios finales
E.6	Satisfacción de otras partes interesadas
	<i>Preparación del futuro:</i>
E.7	Contribución a nuevos proyectos
E.8	Continuidad del negocio

La población está constituida por arquitectos e ingenieros del sector de la edificación, proyectistas y directores facultativos; para que, en base a su experiencia, contribuyan a la modelización de un sistema para la gestión del alcance que proporcione una mejor comprensión de la industria de la construcción y de la dirección de proyectos como disciplina.

3. Resultados y Discusión

Una vez finalizado el período de exposición del cuestionario, se procede al estudio de la muestra obtenida. Se reciben 380 respuestas válidas, con las características recogidas en la Tabla III:

Tabla III. Datos generales de la muestra

Tamaño	n	380
Media	\bar{X} (%)	78.50%
Varianza	σ^2 (%)	17.75%
Confianza	1- α (%)	95.45%
Error	e	3.92%
Test de Cronbach	α	0.96

Para empezar el análisis estadístico, es necesario garantizar la fiabilidad y precisión del instrumento de medición para su validación, determinando la importancia de cada factor. A continuación, se realiza un análisis factorial de componentes principales, en busca de una solución para la gestión del alcance y el éxito sostenido, como muestran las Tablas IV-V:

Tabla IV. Análisis factorial para A, B, C, D y E

A.1	0.77	A.2	0.77	A.3	0.76	A.4	0.80
A.5	0.75	A.6	0.73	A.7	0.72	A.8	0.66
α	Test de Cronbach						0.88
KMO	Test K-M-O						0.90
Significación							0.000
B.1	0.81	B.2	0.84	B.3	0.84	B.4	0.74
A	Test de Cronbach						0.82
KMO	Test K-M-O						0.72
Significación							0.000
C.1	0.78	C.2	0.63	C.3	0.73	C.4	0.78
C.5	0.75	C.6	0.70	C.7	0.78	C.8	0.61
α	Test de Cronbach						0.87
KMO	Test K-M-O						0.87
Significación							0.000
D.1	0.71	D.2	0.75	D.3	0.77	D.4	0.73
A	Test de Cronbach						0.72
KMO	Test K-M-O						0.70
E.1	0.79	E.2	0.77	E.3	0.73	E.4	0.67
E.5	0.65	E.6	0.59	E.7	0.75	E.8	0.74
α	Test de Cronbach *						0.86
KMO	Test K-M-O						0.85
Significación							0.000

Tabla V. Análisis factorial para ABC y DE

A	0.91	B	0.90	C	0.91
α	Test de Cronbach				0.89
KMO	Test K-M-O				0.75
Significación					0.000
D	0.92	E	0.92		
α	Test de Cronbach				0.83
KMO	Test K-M-O				0.50
Significación					0.000

Seguidamente, una vez agrupadas las preguntas (dimensiones) relacionadas con el éxito en apartados (variables), y éstos en bloques (constructos), se realiza un estudio del grado de relación entre las variables y constructo ABC (gestión del alcance) con las variables y constructo DE (éxito sostenido), mediante regresión lineal, tal y como indica la Figura 1.

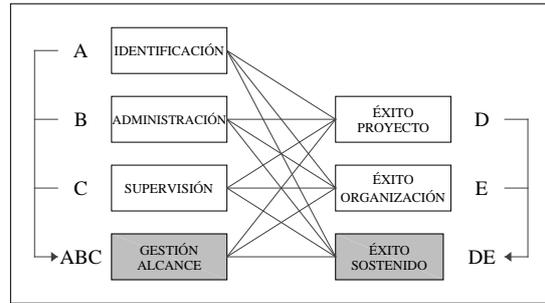


Figura 1. Relación entre variables y constructos

En la Tabla VI, se indican el coeficiente de regresión lineal estandarizado (β) y los datos acerca de la bondad del modelo, que incluyen el cambio de R^2 (C R^2), el cambio en F (C en F) y el índice de Durbin-Watson (IDW):

Tabla VI. Regresión lineal del modelo

Códigos	β	C R^2	C en F	IDW
A D	0.67	0.45	319.26	2.11
A E	0.61	0.37	216.12	2.03
A DE	0.69	0.48	349.51	2.05
B D	0.69	0.48	256.99	2.10
B E	0.62	0.38	153.98	2.12
B DE	0.71	0.51	256.65	2.12
C D	0.61	0.37	181.37	2.20
C E	0.61	0.38	129.07	2.06
C DE	0.66	0.44	193.26	2.14
ABC D	0.73	0.53	371.74	2.15
ABC E	0.68	0.46	230.46	2.08
ABC DE	0.77	0.59	394.62	2.12

Asimismo, la Figura 2 muestra el grado de relación ($\beta^2=0,593$) entre la gestión del alcance del proyecto y el éxito sostenido en la organización.

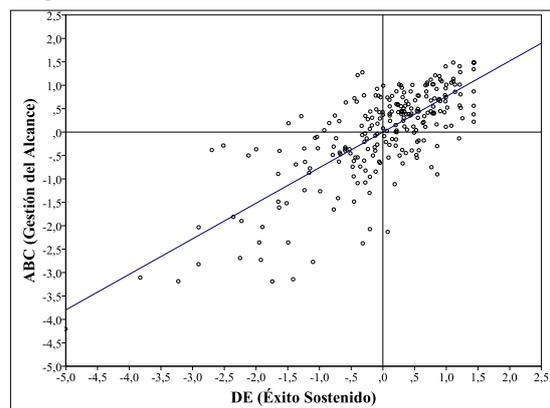


Figura 2. Regresión lineal entre constructos

Por otro lado, con objeto de discriminar los FCE relacionados con la gestión del alcance, éstos pueden priorizarse agrupándose en cuatro niveles, según su nivel de criticidad, de acuerdo al cumplimiento de una o varias de las siguientes condiciones:

- Grado de importancia $\geq 75\%$ ($\bar{x} \geq 4$, según la escala Likert 1-5)
- Coeficiente estandarizado de las regresiones lineales simples de los FCE del alcance con el éxito sostenido $\geq 50\%$ ($\beta - RLS \geq 0.5$)
- Significación de las regresiones lineales múltiples de los FCE del alcance, agrupados por etapas, con el éxito sostenido $\leq 5\%$ ($Sg - RLM \leq 0.05$)

Finalmente, en la Tabla VII se muestran los resultados de los FCE para la gestión del alcance en relación a las 3 condiciones indicadas, con objeto de establecer su priorización:

Tabla VII. Discriminación de FCE

Códigos	\bar{x} (1-5)	$\beta - RLS$	Sg - RLM
A.1-DE	4.464	0.563	0.005
A.2-DE	4.384	0.535	0.033
A.3-DE	4.060	0.487	0.566
A.4-DE	3.892	0.543	0.033
A.5-DE	4.340	0.515	0.167
A.6-DE	4.348	0.561	0.001
A.7-DE	3.956	0.544	0.039
A.8-DE	4.264	0.461	0.203
B.1-DE	4.108	0.584	0.000
B.2-DE	4.244	0.564	0.006
B.3-DE	4.316	0.557	0.022
B.4-DE	3.916	0.597	0.000
C.1-DE	4.048	0.486	0.133
C.2-DE	4.124	0.471	0.006
C.3-DE	3.740	0.439	0.132
C.4-DE	3.924	0.509	0.050
C.5-DE	3.792	0.517	0.048
C.6-DE	4.228	0.527	0.001
C.7-DE	3.996	0.427	0.188
C.8-DE	4.032	0.501	0.000
Cumplimiento de condiciones (de 0 a 3)			
0	1	2	3

4. Conclusiones

Los resultados apoyan y confirman los criterios y factores planteados en la investigación, tanto entre apartados (variables) y bloques (constructos) como entre bloques, para las hipótesis planteadas, así como entre los FCE (dimensiones) para la gestión del alcance y éxito sostenido; proporcionando evidencia estadística que confirman tales relaciones conceptuales, por lo que puede afirmarse que hay implicaciones significativas con los resultados obtenidos:

- En relación a las medias obtenidas, la gestión del alcance y éxito sostenido obtienen para los encuestados, entre un 75% y un 85% de importancia en los proyectos.

- En relación al análisis factorial de componentes principales, los FCE estudiados explican las relaciones dadas con el menor número de dimensiones.
- En relación al grado de vinculación entre variables y/o constructos, mediante regresión lineal directa, se concluye significativamente que la gestión del alcance de los proyectos tiene una correlación del 77% (β) con el éxito sostenido de la organización, justificando el 59% de su variabilidad (β^2).

5. Bibliografía

- [1] Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España. *Estadística de la Edificación. 2º Trimestre 2014*. Madrid, 2015.
- [2] Subdirección de Estudios Económicos y Estadísticas. *Estructura de la Construcción 2011*. Madrid, 2013.
- [3] Subdirección de Estudios Económicos y Estadísticas. *Estructura de la Construcción 2013*. Madrid, 2015.
- [4] Instituto Nacional de Estadística (INE). *Contabilidad Nacional Trimestral de España (CNTR)*. Madrid, 2015.
- [5] Subdirección de Apoyo a la PYME. *Retrato de las PYME 2013*. Madrid, 2013. Disponible en: www.ipyme.org
- [6] Subdirección de Apoyo a la PYME. *Retrato de las PYME 2015*. Madrid, 2015. Disponible en: www.ipyme.org
- [7] R.Concepción. *Metodología de gestión de proyectos en las administraciones públicas según ISO 10.006*, Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, 2007.
- [8] F.J. Fernández. *La figura del project manager en el contrato de obra*, Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla, 2010.
- [9] M.K.Fageha y A.A.Aibinu, Managing project scope definition to improve stakeholders' participation and enhance project outcome. *Procedia Social and Behavioral Sciences*. 74 (2013) 154-164.
- [10] C.Heywood y J.Smith, Integrating stakeholders during FM's early project phases. *Facilities*. 24-7/8 (2006) 300-313.
- [11] A.Shenhar, A.Tishler, D.Dvir, y T. Lechler, Refining the search for project success factors: a multivariate approach. *R&D Management*. 2002. 32-2 (2002) 111-126.
- [12] U.Kulatunga, D.Amaratunga y R.Haigh, Implementation of CSF in construction research and development process. *International Journal of Engineering, Science and Technology*. 2-9 (2010) 96-106.

Using Population Injection in Evolutionary Computation for improving Genetic Variability in Multimodal Optimization Problems

Robin Mueller-Bady⁽¹⁾, Martin Kappes⁽¹⁾, and Inmaculada Medina-Bulo⁽²⁾

⁽¹⁾ Frankfurt University of Applied Sciences, Nibelungenplatz 1, 60318 Frankfurt, Germany
{mueller-bady, kappes}@fb2.fra-uas.de.

⁽²⁾ Universidad de Cádiz, C/Chile 1, CP 11002, Spain
inmaculada.medina@uca.es.

Abstract

In this paper we propose an efficient method for maintaining an appropriate amount of genetic variability when using evolutionary algorithms. As opposed to common methods like island- or diffusion model EAs, population injection does not require maintenance effort during the runtime. By adding an adequate amount of random individuals, it is possible to counter a genetic drift and premature convergence in multimodal search spaces. Our results show, that the proposed population injection method increases the run of the exemplary evolutionary algorithm by 2013.017% compared to a run without using population injection while having only a slightly increased number of evaluations.

1. Introduction

Evolutionary Computation (EC) is a meta-heuristic search method which aims to optimize problems where efficiently finding an exact optimal solution is either not (yet) possible, e.g. NP-complete problems, or fast results with a sufficient quality are required. EC is known as meta-heuristic, providing a toolset for building problem-specific optimization algorithms, i.e. evolutionary algorithms (EAs). Depending on the underlying problems, operations, and data structures used, the algorithm is called differently, e.g. evolution strategies for continuous and genetic algorithms for discrete optimization problems.

One problem that arises from EC techniques is the premature convergence of the population due to a genetic drift. In case of multimodal problem landscapes, i.e. problems which have multiple local optima with multiple basins of attractions, the evolutionary process is likely to converge early at an arbitrary local optimum, which might or might not be the global optimum.

In this paper, we propose an efficient way of maintaining an appropriate amount of genetic variability which counteracts premature convergence while leading to continuously improved results. The advantage of this method compared to other techniques is the ease of implementation and use while being efficient and beneficial as global optimization technique.

2. Related Work

Since the development of evolutionary computation in the late 1950s and early 1960s by Lawrence J. Fogel, John H. Holland, I. Rechenberg, and H.-P. Schwefel, the evolutionary computation field has been studied successfully as heuristic problem solving technique for computational complex problems. Since the problem of premature convergence discussed in this paper is known since the beginning of the development of this area, techniques for avoiding it developed also in an early stage [1,2].

One of the first ideas was to repeat the run of the evolutionary algorithm several times and keep the best results. This approach works fine for a sufficient high number of repetitions while having a low number of local optima with appropriately large basins of attraction. While this method requires a high computational power, there is also high chance for EAs, having non-optimal conditions, to always return non-optimal solutions.

Another method is based on the punctuated equilibria theory, which runs several parallel EAs having periodically transfer of genes, i.e. individuals. This method, also known as island model EA, has its major disadvantage that, obviously, there might be multiple EAs exploring the same area in the search space [3].

A deviation of the island model EA is the diffusion model EA, which implements the same concept of the island model, but has a

different communication structure [4,5]. Having one EA with an overlapping and distributed population, i.e. “demes”, global search can only occur between individuals within a certain distance. This is achieved by distributing the population on a grid with each individual having a defined euclidean distance to each other. The disadvantage of this method is the cost for maintaining distances and constraints for the global search operation, which increases in significance for EAs having a larger number of evaluations.

There are further techniques like crowding [6], or fitness sharing [7], which all require effort for maintenance of (meta) information of the current evolutionary process and/or population.

3. Population Injection Method

The proposed population injection method is used in order to inject new individuals into a population which might already be in the state of premature convergence.

Assuming an evolutionary algorithm where the population already converges around the individual with the currently highest fitness value, injecting random individuals might extend the search space to unexplored areas which might result in better local or even global optimum.

Detection of convergence is done using the average standard deviation of the fitness of the population. In case the standard deviation falls below a predefined threshold, population injection is triggered. This is done before the recombination phase of the current generation, such that the new individuals will already participate in the upcoming iteration.

The injection of new individuals is not guaranteed to explore new areas of the search space, but in case it was not successful, e.g. all new individuals will fail the selection phase and therefore do not appear in the next generation, the injection can be triggered again at very low computational cost. There is no need for maintaining additional information, e.g. positions in diffusion model EAs.

4. Experimental Setup

In this section the experimental setup is introduced. First, the problem statement is given. Afterwards, the evolutionary algorithm is described. Finally, the problem instance used for the experiments is shown.

4.1 Problem

As exemplary problem, we use the evolutionary algorithm described by Mueller-Bady et al. [8].

Here, the researched problem is the selection of the optimal number and positions of monitors in a computer network, which can be mapped to the vertex cover problem.

We assume a Graph $G = (V, E, w)$ with V being the set of vertices, $E \subseteq V^2$ being the set of edges which are symmetric tuples of vertices and $w: E \rightarrow \mathbb{N}^+$ being a non-negative weighting for the edges representing a configurable priority for edges to be monitored.

As the goal is to minimize the number of monitors while covering all edges, the underlying problem is a minimization problem.

4.2 Evolutionary Algorithm

As opposed to [8], a $(\mu + \lambda)$ evolutionary algorithm $((\mu + \lambda)EA)$ is used for generating the experimental results [9].

As the individuals phenotype is a mathematical graph, the genotype used for the representation of individuals of the population is a binary vector, $\vec{x} \in \{0,1\}^{|\mathcal{V}|}$, such that each gene, $(x_1, \dots, x_n) \in \vec{x}$ represents a vertex in the graph with the property that x_i is 1 in case v_i is selected as a monitor or 0 otherwise.

Evaluation of the fitness of individuals is done by summing up the number of monitors,

$$\text{monitors}(\vec{x}) = \sum_{i=1}^{|\mathcal{V}|} x_i$$

where \vec{x} is an individuals genotype and i its position in the vector. The fitness of each individual is penalized in case edges are not covered using the a penalty function according to the edge weighting w and a constant c :

$$\text{penalty}(\vec{x}) = \sum_{(v_i, v_j) \in E} c \cdot w(v_i, v_j)$$

where $\{(v_i, v_j) \in E \mid x_i + x_j = 0\}$

As this problem is a minimization problem, the complete fitness evaluation is done using a summation of the fitness and penalty:

$$\text{fitness}(\vec{x}) = \text{monitors}(\vec{x}) + \text{penalty}(\vec{x})$$

Operations for the EA are chosen according to the proposed monitor selection EA, such that a partially mapped crossover (PMX) is used as recombination operation with probability $p_{cx} = 0.9$, bit shuffle is used as mutation operation using a mutation probability of $p_{mut} = 0.05$ and tournament selection is used for parent- and survivor selection with a tournament size of $\mu/10$. The population parameters are chosen as $\mu = 200$ and $\lambda = 2 \cdot \mu$.

The parameters for the population injection are chosen in relation to the population parameters. The number of individuals injected per injection

is $\lambda = 2 \cdot \mu = 400$ having an injection threshold of 0.0, i.e., in case all individuals converged into one local optimum, the population injection gets triggered. The termination condition of the experiment is the number of generation, which is the predefined value 2,000.

As evolutionary algorithms are based on probabilistics, all experiments are repeated 30 times in order to gain statistical significance. The resulting values for the plots and experimental result (minimum, maximum, average and median of the fitness) are averaged over all 30 runs of the EA.

4.3 Problem Instance

As problem instance, the graph of the European National Research and Education Network (NREN) [10] is used. It consists of all mayor routers and interconnections of the European Research Network with $|V| = 1157$ vertices and $|E| = 1465$ edges. The weighting for the edges was randomly generated using an interval of $[0,10]$. The graph is sparse, i.e. the number of edges is significantly less than the maximum number of edges assuming a regular undirected graph. For illustration purposes, the graph is depicted in Figure 1.

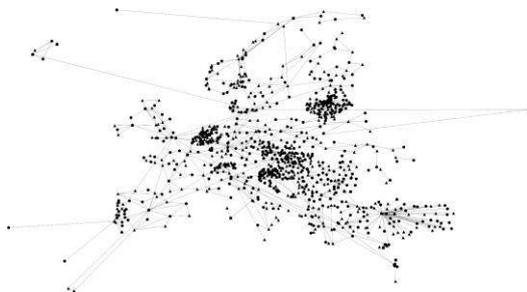


Figure 1: Graph for the European National Research and Education Network (NREN)

5. Results

The results of the EA are shown in Figure 2 without using population injection and Figure 3 using population injection.

In both experiments, the process started having an unfavourable fitness value of $\sim 1,400,000$ which means that a high number of edges within the graph are not covered. In both cases, the results improved significantly within the first 50 generations.

As the graph for the regular EA, i.e. the EA not using population injection, shows, the process converged very fast to a local optimum with value 260,725.64 in generation 43. There is no noteworthy deviation of minimum, maximum, average and median during the whole runtime of the EA. Some minor peaks of the maximum value occur during the runtime. During the rest

of the runtime, the EA introduced only minor changes and converged at the final optimum of 258,323.83 in generation 763. As the EA did not improve the result for 1,237 generations, it can be assumed that no further significant improvement will occur, even in case of a longer runtime. The EA required 380,099 evaluations for reaching the the final optimum.

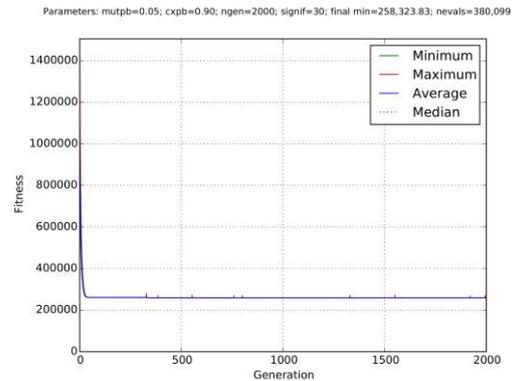


Figure 2: Experimental Results without using Population Injection

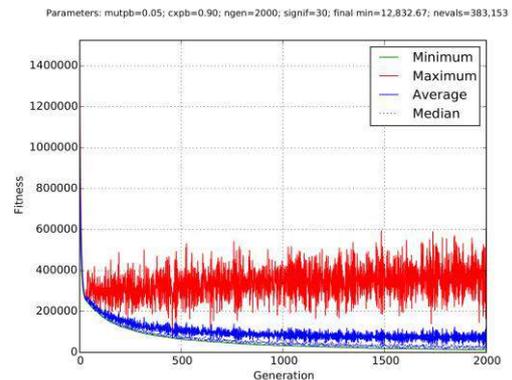


Figure 3: Experimental Results using Population Injection

As opposed to the experiment without using population injection, the experiment using population injection shows a continuous improvement of the current optimum. The final optimum is found in generation 1,999 with a value of 12,832.67, which leads to the assumption that the optimization process would still be able to improve the fitness value using a longer runtime. As can be seen in the experimental result, the evolutionary optimization process maintains a high genetic variability within the population, which leads to a high deviation in the maximal fitness values. The average fitness has a lower deviation compared to the maximum values and relates to the trend of the minimum. The median and minimum are closely related to each other. Both are a continuously improving smooth line.

Comparing both experiments, using population injection leads to considerably better results compared to regular evolutionary algorithms. While the regular EA has a final optimum of 258,323.83, the EA using population injection has a final optimum of 12,832.67 which is an improvement of 2013.017%.

Contrary to expectation, the number of evaluations using population injection is with a value of 383,153 just 3,054 (0.803%) higher compared to the experiment without using population injection, which means that the proposed method for maintaining a high genetic variability significantly improves results at very low computational cost.

6. Conclusion and Outlook

The goal of the proposed population injection method was to provide an efficient and easy solution to handle premature convergence in simple evolutionary algorithms. As opposed to other methods having the same goal, this method does not require additional computational cost of maintenance of information about the EA or population itself.

As the results show, the proposed method achieved significantly improved results compared to an EA not using the population injection method. In our experiments using the described monitor selection EA, the improvement factor was 20.13 while having additional computational cost of 0.803% in terms of number of evaluations.

In the future, it is planned to extend the research in this topic and improve the method by finding an appropriate amount of individuals being injected. Furthermore, the threshold at which individuals are injected is also relevant for the results of the EA, as the more variability is left in the population, the more genetic variation can be used to find new, promising areas in the search space. However, adding individuals too early might also prevent an appropriate local search. Parameters for this method are therefore subject to research in the future.

7. Acknowledgement

This work was supported in the framework of Hessen ModellProjekte, financed with funds of the European Union (European Regional Development Fund - ERDF) and the State of Hessen in the context of the research project "Reactive network Optimization by Using SDN-Technology" (ROBUST) (HA project no. 123/14).

Responsible for the content are the authors.

6. References

- [1] K. A. De Jong, "Analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems," 1975.
- [2] G. Luque and E. Alba, *Parallel genetic algorithms: theory and real world applications*. 2011.
- [3] J. P. Cohoon, S. U. Hegde, W. N. Martin, and D. Richards, "Punctuated equilibria: a parallel genetic algorithm," in *Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms on Genetic algorithms and their application*, 1987, pp. 148–154.
- [4] M. Gorges-Schleuter, "ASPARAGOS An Asynchronous Parallel Genetic Optimization Strategy," pp. 422–427, Jun. 1989.
- [5] P. White and C. Pettey, "Double Selection vs. Single Selection in Diffusion Model GAs.," *ICGA*, 1997.
- [6] S. Mahfoud, "Crowding and preselection revisited," *Urbana*, 1992.
- [7] W. Spears, "Simple subpopulation schemes," *Proc. Evol. Program. ...*, 1994.
- [8] R. Mueller-Bady, M. Kappes, R. Gad, and I. Medina-Bulo, "Using Genetic Algorithms for Deadline-Constrained Monitor Selection in Dynamic Computer Networks," in *GECCO Comp '15: Proceedings of the 2015 conference companion on genetic and evolutionary computation companion*, 2015.
- [9] H.-G. Beyer and H.-P. Schwefel, "Evolution strategies – A comprehensive introduction," *Nat. Comput.*, vol. 1, no. 1, pp. 3–52.
- [10] S. Knight, N. Falkner, H. X. Nguyen, P. Tune, and M. Roughan, "I can see for miles: Re-visualizing the internet," *IEEE Netw.*, vol. 26, no. December, pp. 26–32, 2012.



**VI Jornadas Predoctorales de la
Escuela Superior de Ingeniería**

Ingeniería Química y Ambiental

CARACTERIZACIÓN DE NUEVAS MEMBRANAS BASADAS EN GRAFENO Y ESTADO ACTUAL DE LA TECNOLOGÍA

David Amaya Vías⁽¹⁾, Juan Antonio López Ramírez^(2,3)

⁽¹⁾ ^(2,3) Departamento de Tecnologías del Medio Ambiente, Universidad de Cádiz CASEM. Polig. Río San Pedro s/n 11510 Puerto Real, Cádiz. España. Tel 956 016 157 david.amayavias@alum.uca.es.

Resumen

Este trabajo se encuadra dentro de un proyecto nacional, denominado MEDEA, en el que participan varios socios y tiene como fundamento el uso del grafeno como material para el desarrollo de nuevas membranas para el tratamiento del agua. Las líneas de trabajo se centran en la búsqueda y desarrollo de todos los recursos e infraestructuras necesarias para la fase experimental (diseño y prototipado de células de flujo mediante impresión 3D) y la fabricación de nuevas membranas de poliamida aromática dopadas con óxido de grafeno, siendo éstas las primeras creadas en la Universidad de Cádiz.

1. Introducción

Este trabajo forma parte de un proyecto nacional, titulado: Membranas nanoEstructuradas Disruptivas para el tratamiento Eficiente del Agua, en adelante, MEDEA; en el cual, se va a emplear grafeno puro y nanografito para estudiar la viabilidad de la creación de membranas de nanofiltración absolutamente novedosas, y que de ser viables, podrían revolucionar la fabricación de este tipo de materiales.

Dicho proyecto, dirigido por el Prof. Dr. Juan Antonio López Ramírez, pertenece al Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2013-2016, y a su vez, al Subprograma Estatal de Generación de Conocimiento (proyectos Explora Ciencia y Explora Tecnología). Para la realización del proyecto MEDEA se ha formado un consorcio multidisciplinar en el que se encuentran cuatro grupos de investigación universitarios, tres de los cuales son de la Universidad de Cádiz (Tecnologías del Medio Ambiente, TEP-181; Materiales y Nanotecnología para la Innovación, TEP-946, y Sistemas Inteligentes de Computación, TIC145) y el cuarto, de la Universidad Autónoma de Madrid (Nanomateriales de Baja Dimensionalidad). Asimismo, participa el Centro Tecnológico del Plástico (ANDALTEC), así como dos empresas de base tecnológica: Graphenea y Nanoinnova.

Una de las principales dificultades a las que se enfrenta la sociedad actual es el poder ofrecer un acceso al agua potable y una depuración de las aguas residuales, ambas de manera eficiente y con la mejor calidad posible, a una población con un crecimiento cada vez más acusado,

sumado a la escasez de agua y a los costes crecientes de la energía. Una de las herramientas más usadas para paliar este problema es la desalinización mediante tecnologías de membranas, pero como ya se puntualizó en líneas anteriores, los costes de la energía son cada vez mayores, siendo éste uno de los motores en la búsqueda de tecnologías cada vez más eficientes. Actualmente, aunque evolucionadas, la tecnología de producción convencional se basa en aquellas de los años setenta y ochenta, con unas membranas que tienen un limitado flujo y problemas de ensuciamiento (fouling), lo que a su vez exige sistemas de pretratamiento robustos y fiables y, por tanto, con un mayor consumo energético y con un encarecimiento del proceso. Se sabe que cuanto más fina es una membrana, mayor es el flujo que produce, al existir menores pérdidas de presión, lo que conduce en última instancia a un menor consumo energético. Por ello, la búsqueda de materiales para la fabricación de membranas más finas, supone un reto interesante. El grafeno, con una estructura bidimensional y la capacidad de formar monocapas con el espesor de un átomo (el menor espesor posible), se perfila como un material ideal para estos fines.

En este trabajo, que se enmarca dentro del proyecto MEDEA, se han desarrollado varios prototipos de células de flujo, inexistentes en el mercado, que se adaptarán a las membranas fabricadas en la UCA o a las suministradas por los socios, cuyas dimensiones están condicionadas a su vez, por los equipos de los que disponen. Ha sido preciso diseñar varios tipos de células de flujo, desarrollar sus prototipos, usar distintos tipos de materiales

constructivos y probar y evaluar sus características mecánicas y funcionales hasta que han satisfecho nuestras necesidades. Además, se realizan ensayos con membranas comerciales de poliamida aromática para determinar sus características principales y se fabrican, desde cero, membranas de poliamida aromática, dopándolas con óxido de grafeno, para estudiar algunas características. También, se ensaya con unas membranas de óxido de grafeno proporcionadas por Graphenea. Por último, todos los ensayos se realizan en dos células de flujo donde se aplican distintos caudales y presiones.

Los prototipos de células de flujo se han diseñado y fabricado con distintos materiales de impresión 3D (ABS y resina fotopolimérica) empleando la tecnología FDM (Modelado por Deposición Fundida) y SLA (estereolitografía), respectivamente; y mediante el mecanizado convencional CNC (Control Numérico por Computadora) en acero inoxidable. Asimismo, se han realizado toda una serie de pruebas para comprobar la resistencia mecánica de estos materiales en condiciones reales de operación.

El objetivo principal de este trabajo es caracterizar las membranas fabricadas en el proyecto y desarrollar y evaluar las células de flujo necesarias para la caracterización de las membranas. Para conseguir esto, es preciso alcanzar los siguientes objetivos secundarios:

- 1) Diseñar y fabricar prototipos de células de flujo mediante tecnologías de impresión 3D. Estas células serán tanto de filtración tangencial como directa, y servirán para realizar las pruebas de las distintas membranas.
- 2) Evaluar las distintas células de flujo, mediante pruebas de presión y conducción de agua, determinando la aptitud de los distintos materiales.
- 3) Caracterizar dos membranas de nanoplaquetas de óxido de grafeno. Se analiza la permeabilidad y resistencia a la presión de estas láminas en un prototipo de célula de flujo con filtración directa.
- 4) Implantar un método de fabricación de membranas de poliamida aromática, dopadas con grafeno para incrementar la capacidad anti-ensuciamiento. Se caracterizarán las membranas resultantes y se las compararán con membranas convencionales.

2. Metodología Experimental

El diseño y fabricación de los prototipos de las células de flujo se ha llevado a cabo en colaboración con el grupo de investigación TEP-946, de la Universidad de Cádiz. Se han empleado dos técnicas de impresión 3D, FDM, que emplea un material llamado ABS, y SLA,

que usa una resina fotopolimérica. Por otra parte, se ha encargado un prototipo en acero inoxidable, fabricado por la empresa Bahiamec S.L mediante CNC. Todos los diseños son propios, y responden a las limitaciones en el tamaño de las láminas de grafeno que se fabricarán por los socios en el proyecto MEDEA. En primer lugar, se ha empleado una impresora 3D FDM comercial (MakerBot Replicator 2X) para construir dos probetas de ABS que se han sometido a pruebas de presión con agua para evaluar su resistencia mecánica como material para la célula de flujo que albergará las membranas de estudio. En segundo lugar, se ha empleado una impresora 3D SLA comercial (Formlabs) para fabricar una probeta a la que se le aplican las mismas pruebas de presión que a la anterior y un prototipo de célula de flujo que será usada para los ensayos con las membranas de grafeno proporcionadas por la empresa Graphenea, fabricadas mediante filtración al vacío. Las membranas de GO-PA, creadas desde cero, se fabrican sobre soportes de nuestra elección. En este caso, se ha decidido emplear dos soportes distintos, el primero es el denominado carrier o transportador (malla fina utilizada en las membranas comerciales para conducir el flujo de permeado); y el segundo es una membrana de policarbonato (PCTE o Polycarbonate Track Etched) comercial (GVS), con un tamaño de poro de 0,05 μm . En ambos casos son materiales porosos. Por otra parte, se dispone de una membrana convencional (poliamida aromática) de OI para agua salobre, modelo: DOW FILMTEC Reverse Osmosis Element TW30-1812-50. Así, para poder tener datos comparativos, se realizan ensayos con las membranas TW30 y PCTE. A estas últimas se les aplica el método de fabricación de GO-PA (además de los carrier) y se le vuelven a realizar ensayos para evaluar cambios. Las dos muestras de membranas de GO proporcionadas por la empresa Graphenea se someten a los mismos ensayos descritos a continuación.

Los ensayos se realizan en un circuito cerrado con dos derivaciones, una que sale de la bomba y va directa a un depósito, y otra que conduce el agua bombeada a la célula de flujo de acero inoxidable. La derivación directa al depósito sirve para regular el caudal entrante en la célula. En la célula de flujo se colocan las membranas con un espaciador o malla en su parte inferior y el carrier en su parte superior. Así, el agua de red entra por la conducción de alimentación, y se dirige transversalmente hacia la conducción del rechazo. El agua que consigue atravesar los poros de la membrana se guía a través del carrier y es recogida en la conducción del permeado, en la mitad superior de la célula. Se trabaja a distintas presiones que se controla y

regula con un manómetro y una válvula, respectivamente, instaladas en la salida del rechazo (ver figura 1).

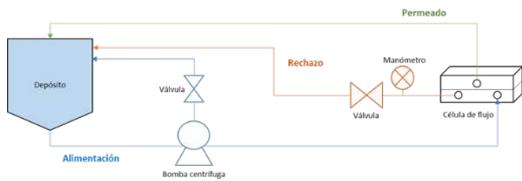


Figura 1. Esquema del sistema montado para el estudio de las distintas membranas, donde se observan las distintas líneas de flujo y elementos principales.

Para la fabricación de membranas de GO-PA, se ha utilizado el método propuesto por François Perreault, Menachem Elimelech et al [1,2]. Este trabajo se centra en dos fases de este método, en la primera se crean las membranas de poliamida aromática (PA) y en la segunda se dopan con óxido de grafeno (GO) (figuras 2 y 3).



Figura 2. Primera fase de todo el proceso, la disolución de la polisulfona, elemento que se transforma en poliamida aromática, base de las membranas.

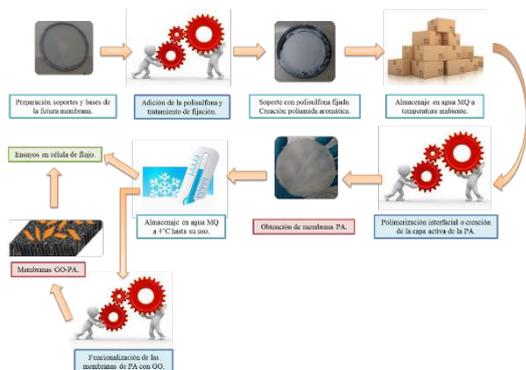


Figura 3. Esquema ilustrativo del proceso de creación tanto de las membranas de PA, como las de GO-PA. En azul los procesos complejos que se aconseja consultar en la bibliografía citada para mayor comprensión. En rojo, los productos obtenidos. En verde, el objetivo final. Nótese que las membranas de PA se pueden usar como producto final o se pueden funcionalizar con el GO.

3. Resultados y Discusión

En primer lugar, se muestran los resultados referentes a los distintos materiales empleados en las células de flujo mediante impresión 3D. Respecto al ABS se puede establecer que no es apto para la fabricación de células de flujo, ya que no cumple las expectativas de resistencia ni estanqueidad precisas. Sin embargo, aunque aún no se ha fabricado ningún prototipo, se está

barajando la mejora de este material, mediante el recocido de las piezas en un horno, con la idea de refundir el ABS y disminuir su porosidad y fragilidad. Los resultados obtenidos con la resina fotopolimérica fueron muy buenos, ya que la pieza soportó la presión máxima ejercida por la bomba y además, mostró una impermeabilidad total al agua. Así, se fabricó un prototipo de célula de flujo en este material, que se usó en los ensayos con las membranas de GO de Graphenea, superando con éxito las condiciones reales de operación. En cuanto a la célula de flujo de acero inoxidable, ésta proporcionó excelentes resultados en condiciones reales de operación. Se realizaron todos los ensayos pertinentes con éxito. Como se comentó en metodología experimental, se ha dispuesto de dos muestras de membranas de GO fabricadas mediante filtración al vacío. Ambas sufrieron daños graves e irreversibles al entrar en contacto con el agua, observándose áreas destruidas, plegadas o separadas del soporte. Para observar con mayor detalle estos defectos, se observaron las muestras en un microscopio electrónico de barrido o SEM (FEI Quanta 200 3D) y en un microscopio óptico 3D (Zeta Instruments) localizados en la Facultad de Ciencias de la UC (figura 4 y 5).

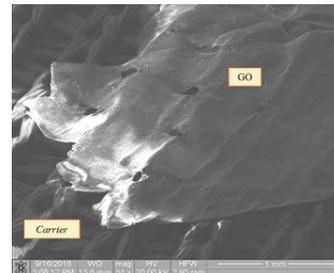


Figura 4. Imagen por SEM de la superficie de las membranas de GO de Graphenea. Se observan distintos defectos estructurales como agujeros, pliegues, grietas y roturas. Nótese el espesor de la lámina de GO, que se encuentra en el orden de unas pocas micras.

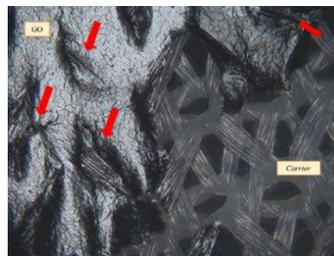


Figura 5. Imagen SOM de la superficie de las membranas de GO de Graphenea. Estructura trenzada del "carrier", y sobre ella la lámina de grafeno con numerosos desperfectos y ondulaciones (incluso quedan al descubierto fibras del soporte a través de la membrana de GO).

No obstante, a partir de estos resultados, se están abriendo nuevas líneas de investigación en

colaboración con los socios del proyecto MEDEA, que buscan la integridad de la membrana de GO mediante cierres de tipo mecánico y procesos químicos.

En segundo lugar, se usan dos soportes (PCTE y carrier) para la fabricación, primero, de membranas de PA, y luego, de GO-PA. En este sentido, se consiguen fabricar tres membranas de PA con el soporte carrier y otras tres con el soporte de PCTE (las primeras membranas de poliamida aromáticas fabricadas en la Universidad de Cádiz).

A partir de imágenes de microscopía óptica y electrónica (figuras 6 y 7), se observa, que aunque el proceso químico de creación y activación de la poliamida aromática se ha llevado a cabo con éxito, se han generado algunos defectos estructurales en las membranas (en ambos tipos), descartándolas para su uso en filtración. Probablemente sea debido a las condiciones de fabricación que deben ser mejoradas. Otro de los posibles elementos que dañan las membranas, podría ser el propio soporte.

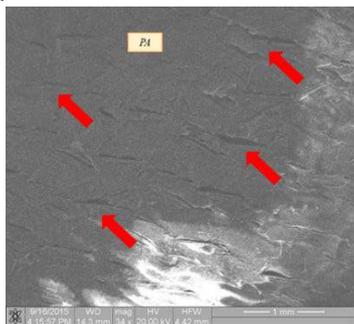


Figura 6. Imagen de SEM de la superficie de la membrana fabricada sobre carrier.

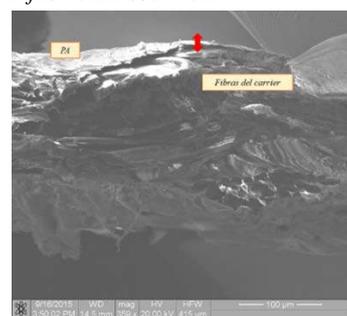


Figura 7. Imagen de SEM del perfil de las membranas de PA sobre carrier.

Es por esto, que se hace necesario realizar una búsqueda de otros materiales de soporte, como pueden ser tejidos poliméricos de otra naturaleza, como por ejemplo, basados en poliéster. En cuanto a las membranas de PA con soporte de PCTE, se advierte una degeneración del policarbonato. Por otra parte, se ha comprobado que con el diseño experimental ejecutado, no se ha conseguido una homogeneidad perfecta de la lámina de PA, por lo que hay que optimizar éste. Aunque los resultados obtenidos no suponen un éxito

rotundo, son útiles, y permiten mejorar el proceso global, abrir nuevas vías de investigación, optimizar equipos y diseños experimentales, buscar nuevos materiales con mejores características, y en definitiva, evolucionar para cumplir con los objetivos propuestos en el proyecto de acuerdo a los fundamentos de la convocatoria EXPLORA.

4. Conclusiones

Las principales conclusiones que se obtienen de este TFM son:

- El grafeno es un nuevo material que posee propiedades muy interesantes y un potencial enorme para el desarrollo de membranas en el tratamiento del agua.
- Las tecnologías de impresión 3D se muestran como una alternativa muy potente frente a otras técnicas de prototipado convencionales. Con la impresión 3D se consigue una gran rapidez en el diseño, corrección y fabricación de prototipos, además de la posibilidad de reproducir elementos de estructuras complejas. El ABS es un material no apto para los objetivos del proyecto MEDEA, mientras que la resina polimérica sí lo es. Las células de flujo desarrolladas mediante las técnicas 3D han demostrado su utilidad y su rapidez de fabricación.
- La metodología y condiciones de fabricación de las primeras membranas de PA desarrolladas, necesitan ser puestas a punto. Se ha demostrado que pueden ser fabricadas, pero los resultados obtenidos no han sido todo lo buenos que se esperaba.
- En la actualidad y dentro del marco del proyecto MEDEA, se están desarrollando dos líneas de actuación que podrían ser prometedoras. No obstante, es preciso recordar el alto riesgo de no conseguir el éxito, ya que las propuestas, además de innovadoras, podrían clasificarse como radicales.

5. Referencias

- [1] F. Perreault, M. E. Tousley, and M. Elimelech, "Thin-Film Composite Polyamide Membranes Functionalized with Biocidal Graphene Oxide Nanosheets," *Environ. Sci. Technol. Lett.*, vol. 1, no. 1, pp. 71–76, 2014.
- [2] F. Perreault, M. E. Tousley, and M. Elimelech, "Thin-Film Composite Polyamide Membranes Functionalized with Biocidal Graphene Oxide Nanosheets (Supporting Information)," *Environ. Sci. Technol. Lett.*, vol. 1, no. 1, pp. 71–76, 2014.

Caracterización del funcionamiento de una nueva membrana cerámica de nanofiltración modificada en su capa activa

Mihaela-Elena Dascalu⁽¹⁾, Valentin Nedeff⁽¹⁾, Juan Antonio López Ramírez⁽²⁾

⁽¹⁾ Departamento de Ingeniería Ambiental, Universidad "Vasile Alecsandri" Bacau, Calea Marasesti 156, Bacau 600115, Rumanía, Tel +34642669430, mihaelaelena_dascalu@yahoo.com

⁽²⁾ Departamento de Tecnologías del Medio Ambiente, Universidad de Cádiz, CASEM, Polig. Río San Pedro s/n 11510 Puerto Real, Cádiz. España. Spain, Tel + 34 956 016 157.

Resumen

La desalación del agua se ha convertido en una operación unitaria fundamental en la sociedad e industria de hoy en día. En este trabajo se presenta la caracterización de una nueva membrana cerámica de nanofiltración modificada en su superficie activa, que debe hacerla más resistente frente al ensuciamiento; el principal inconveniente de esta tecnología. Para ello, se han probado diferentes condiciones de operación modificando las concentraciones de diversos contaminantes, el pH y la velocidad tangencial. Los resultados obtenidos demuestran que esta membrana es más resistente al ensuciamiento que aquellas membranas que no han sido modificadas químicamente.

1. Introducción

El agua es un recurso natural indispensable para la sociedad actual. Habitualmente, el agua que se encuentra en la naturaleza, rara vez, es adecuada para los fines a los que está destinada. Disponer de un agua de buena calidad es un aspecto crítico para la salud de la población afectada.

Los tratamientos del agua han avanzado enormemente pero todavía, aun hoy en día, existen limitaciones en la calidad obtenida por algunos de ellos. Una técnica cada vez más implantada en el tratamiento del agua es la filtración por membranas. De todos los tipos de filtración por membranas existentes los que consiguen la máxima calidad son la nanofiltración y la ósmosis inversa. Estas dos tecnologías permiten, gracias a su acción barrera, que se puedan eliminar del agua iones, impurezas, materia orgánica, sabor, color, etc.

La nanofiltración se emplea, principalmente, para la eliminación de los iones calcio y magnesio, sulfatos, materia orgánica y microcontaminantes.

El ensuciamiento es un problema muy importante en la ósmosis inversa y la nanofiltración; procesos que pueden sufrir de limitaciones graves y que perjudican el rendimiento de las instalaciones [1].

Las membranas cerámicas porosas tienen un alto potencial de aplicación por su estabilidad química, mecánica y térmica. Los poros de las membranas cerámicas de NF están formados por los nanoagujeros existentes entre las

partículas de dióxido de titanio que las conforman.

En este trabajo se han empleado unas membranas nanoporosas de TiO₂, con un tamaño de corte menor de 1,000 g/mol mediante una técnica de sol-gel sin agentes quelantes. Se pueden encontrar más detalles sobre el procedimiento en la bibliografía [2].

El alcance de este trabajo consiste en estudiar el ensuciamiento y flujo obtenidos por esta membrana ante diversas condiciones de operación; para ello se van a alterar estas últimas y se van a añadir contaminantes que pongan a prueba dicha membrana.

2. Metodología Experimental

Los experimentos se han realizado con una membrana cerámica de nanofiltración (NF) de TiO₂ modificada, usando reactivos de Grignard (GR). El procedimiento para la modificación de la membrana cerámica implica la unión covalente directa de los grupos funcionales orgánicos con reactivos organometálicos en presencia de un disolvente adecuado. Más detalles sobre el procedimiento para esta tipo de membrana modificada se pueden encontrar en [3].

El elemento de membrana tiene una longitud de 1,2 m, 163 canales, una superficie de 1,25 m² y su tamaño de poro es de 0,9 nm.

La planta piloto empleada está ubicada en el laboratorio del Dpto. de Tecnologías del Medio Ambiente de la Universidad de Cádiz. Está dotada de depósito de 100 litros, una bomba de alta presión (Grundfos modelo CR3-17) y dos

caudalímetros para medir los caudales del permeado y rechazo.

3. Resultados y Discusión

A continuación se muestran los resultados experimentales obtenidos.

En la Figura 1, se representa la permeabilidad de la membrana respecto de la presión. Como era de esperar, al aumentar esta última aumenta el flujo de la membrana. Conviene destacar que la permeabilidad de esta membrana es elevada si se la compara con las membranas poliméricas.

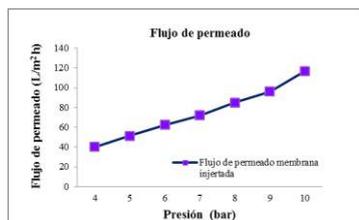


Figura 1. Representación gráfica de la influencia de la presión sobre el flujo de la membrana.

En la figura 2 se ha utilizado la peptona (extracto de carne) como un agente ensuciante, que simula la materia orgánica natural que puede aparecer en aguas naturales y contaminadas. Para ello se ha añadido una concentración de peptona de 100 mg/l. Como se puede apreciar hay una cierta influencia negativa sobre el caudal por la presencia de la peptona, reduciendo el flujo. La peptona se deposita sobre los poros de la membrana y reducen por ello el paso del agua.

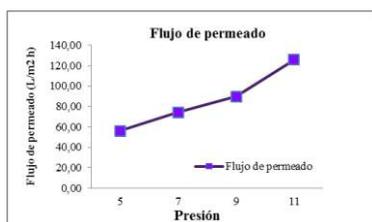


Figura 2. Representación gráfica de la influencia de la presión sobre el flujo con una concentración de peptona de 100 mg/l.

En la figura 3, aparece representada la evolución del flujo a diferentes velocidades tangenciales. La velocidad tangencial (crossflow velocity o CFV) es la velocidad del fluido sobre la superficie de las membranas; altas velocidades implican flujos turbulentos y por ello un mayor arrastre de los contaminantes depositados sobre la superficie de la membrana durante el proceso de filtración.

Desafortunadamente altos valores de CFV implican un mayor gasto energético.

En este experimento también se ha empleado 100 mg/l de peptona como agente ensuciante. La presión se ha mantenido constante durante todo el experimento (7 bares). La mayor CFV aplicada consigue el mayor flujo, eso es debido a que el flujo turbulento reduce la concentración de polarización disminuyendo la presencia de los contaminantes sobre los poros de la membrana que producen atascamientos en estos.

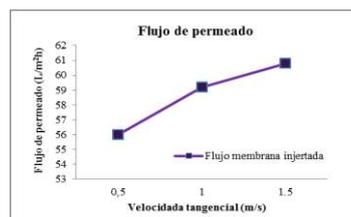


Figura 3. Evolución del flujo de permeado a diferentes CFV para una concentración constante de peptona (100 mg/l) y una presión fija de 7 bares.

En la figura 4, se muestran los resultados del rechazo de peptona durante el ensayo anterior. Los rechazos obtenidos con esta membrana son elevados y muestran una resistencia mayor a ser ensuciadas cuando se comparan con aquellas membranas que no han sido modificadas y estudiadas durante el Proyecto Europeo Cerawater (FP7).

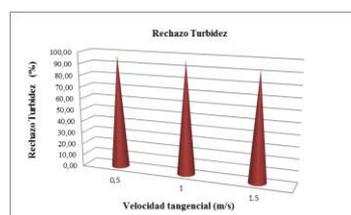


Figura 4. Representación gráfica de la evolución de rechazo de la peptona (%) frente a diferentes CFV para una concentración de 100 mg/l de peptona y una presión de 7 bares.

En la Figura 5, se muestra la variación del flujo de membrana con la presencia de ácidos húmicos (10 mg/l) a diferentes pH. Los ácidos húmicos son contaminantes siempre presentes en las aguas naturales. Cuando el pH se modifica, el ácido húmico sufre cambios en la superficie que modifican su estructura y carga eléctrica, pudiendo cambiar su interacción con la superficie de la membrana, aumentando incluso su capacidad de ensuciamiento. En este

caso se observa que al aumentar el pH el flujo de la membrana aumenta ligeramente.

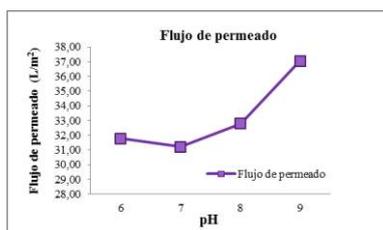


Figura 5. Gráfico de la evolución del flujo de permeado con la variación del pH para una concentración constante de 10 mg/l de ácidos húmicos.

En Figura 6 se representa el flujo de permeado cuando aumenta la concentración de calcio en presencia de ácidos húmicos. Al aumentar la concentración de calcio se altera la carga eléctrica sobre la superficie de la membrana y de los ácidos húmicos modificando el flujo de la membrana.

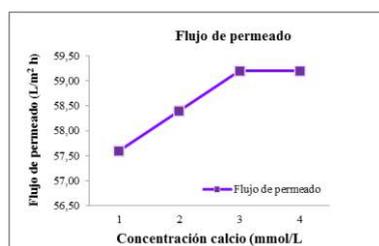


Figura 6. Efecto sobre el flujo del aumento de la concentración de calcio para una concentración de ácidos húmicos de 10 mg/l.

En la Figura 7 (temperatura de 22°C, presión 7 y velocidad tangencial de 0.7 m/s) se muestra el rechazo de los ácidos húmicos, medidos en forma de UV (254 nm), cuando aumenta la concentración de ácidos húmicos. La membrana demuestra una elevada capacidad de rechazo frente a las no modificadas.

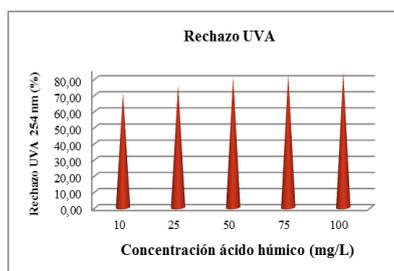


Figura 7. Gráfico del efecto del aumento de la concentración de ácidos húmicos sobre el rechazo de los ácidos húmicos.

4. Conclusiones

En este estudio experimental, se ha demostrado que esta nueva membrana cerámica de nanofiltración, modificada en su superficie activa, posee características que la hacen muy útiles para tratar aguas contaminadas y en presencia de diversos tipos de contaminantes. Los caudales son elevados y su capacidad de separación está aumentada frente a las que no han sido tratadas químicamente.

5. Agradecimientos

Los autores desean agradecer a Anita Boekhoudt de VITO, Belgium, por la cesión de la membrana modificada desarrollada en el marco del proyecto Cerawater del Séptimo Programa Marco (Grant no. 180909).

6. Referencias

- [1] Ch. Tzotzi, T. Pahiadaki, S.G. Yiantsios, A.J. Karabelas, N. Andritsos, A study of CaCO₃ scale formation and inhibition in RO and NF membrane processes, *Journal of Membrane Science* 296 (2007) 171–184.
- [2] P. Puhlfürß, A. Voigt, R. Weber, M. Morbé, Microporous TiO₂ membranes with a cut off <500 Da, *Journal of Membrane Science* 174 (2000), 123–133.
- [3] G. Mustafa, K. Wyns, P. Vandezande, A. Buekenhoudt, V. Meynen, Novel grafting method efficiently decreases irreversible fouling of ceramic nanofiltration membranes, *Journal of Membrane Science*, 470 (2014), 369–377.

Detección y Priorización de Puntos de Conflicto por Afección Acústica en Carreteras

Ricardo Gey Flores⁽¹⁾, Ricardo Hernández Molina⁽¹⁾, José Luis Cueto Ancela⁽¹⁾

⁽¹⁾Laboratorio de Ingeniería Acústica (MMT), Edificio C.A.S.E.M. Campus Río San Pedro 11510 Puerto Real (Cádiz), 956 016 051, ricardo.vey@uca.es

Resumen

Una vez elaborados los Mapas Estratégicos de Ruido de la Red de Carreteras de Andalucía en su 2ª Fase, se empleó la herramienta GARITA (Gestión Ambiental del Ruido de Infraestructuras de Transporte de Andalucía) para la detección y priorización de zonas acústicamente conflictivas. La herramienta, implementada en el Sistema de Información Geográfica ArcGIS 10.0, se ejecutó sobre los más de 1300 km de carreteras estudiados. En esta comunicación se revisan los principios de diseño de GARITA y se presentan los principales resultados y conclusiones tras la implementación de la herramienta.

1. Introducción

La adopción de la Directiva 2002/49/CE (END) [1] genera en la Junta de Andalucía (JA) como en tantos otros gobiernos europeos la responsabilidad de actuar contra el ruido ambiental. El primer paso de esta tarea implica el diagnóstico de la situación acústica ambiental. Esto se lleva a cabo mediante los Mapas Estratégicos de Ruido. Una de las variables más importantes que generan estos mapas es la estimación de la población expuesta a los diferentes niveles de ruido. La propia Junta tiene desarrollado un marco legislativo dentro del cual se establecen los objetivos de calidad para las distintas zonas acústicas. Una vez llevado a cabo el diagnóstico se debe actuar contra el ruido ambiental mediante los llamados, Planes de Acción.

La Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía consciente de su responsabilidad sobre los ciudadanos y con el afán de garantizar la calidad ambiental en el entorno de sus infraestructuras de carreteras pone en marcha y financia el proyecto GARITA [2] [3]. Su intención es la de sistematizar las tareas que deben llevarse a cabo entre los mapas estratégicos de ruido que se elaboren y la ejecución de las obras públicas que se definan en los proyectos que formen parte de los planes de acción. Los criterios que debían prevalecer son los relacionados con eficiencia y el coste económico. Para ello se diseñó una herramienta informática que permitiría que los expertos de la consejería pudieran auscultar la situación acústica de las distintas carreteras y definir las actuaciones contestando a fáciles preguntas como: ¿Dónde actuar? ¿Cuándo (con qué

urgencia y en qué orden) actuar? ¿Cómo actuar? ¿Qué efectos (positivos/negativos) tendrá la actuación? ¿Cuánto dinero implica la actuación?

Esta herramienta es lo que llamaríamos un Sistema de Soporte a la toma de Decisiones, en otras palabras, para ayudar a los responsables a tomar decisiones usando datos relevantes, así como para clasificar los problemas (emisor-receptor). Para llevar a cabo la tarea, se diseñó como un sistema basado en Sistemas de Información Geográfica (SIG) ya que los SIG ofrecen una plataforma adecuada para el tratamiento de problemas espaciales como el ruido [4] [5] [6] y los técnicos de la JA ya están familiarizados con éstos. Otra ventaja es que aúna herramientas de geo-procesamiento, algoritmos que soportan la lógica de las decisiones y gestión de base de datos geográficos; todo ello se conoce como Sistemas de Soporte a la Decisión o DSS [7] [8] [9].

Los pasos que deben estar implicados en este proceso son:

- Identificación de todos los puntos calientes (“hot spots” o puntos de conflicto) en relación a la normativa vigente.
- Clasificación de la gravedad de unos problemas respecto a otros mediante la incorporación de un indicador.
- Analizar las posibles alternativas para la minimización de dicho ruido valorando su eficacia y coste, y sus posibles efectos secundarios.
- Proponer la solución, y proporcionar los datos e informes que avalan dicha solución.
- Comparativa antes y después de la implantación de las medidas.

Pero nada es tan sencillo, puesto que:

- No hay un indicador (de salud ambiental, de justicia ambiental) aceptado que normalice la casuística (edificios sensibles, residenciales, etc.).
- La siguiente es una cuestión controvertida: nosotros creemos que la identificación, clasificación y análisis de las zonas de conflicto y la propuesta de medidas contra el ruido no son pasos independientes entre sí.
- Además, existe una dependencia entre la calidad de las estimaciones y calidad del mapa de ruido elaborado.
- Los aspectos micro no están contemplados en la mayoría de los mapas estratégicos de ruido.
- Hay aspectos que no se pueden resolver con la herramienta, y deben ser abordados externamente, como la eficacia de las medidas mediante el uso de software de propagación de ruido y la evaluación de la calidad del conjunto de información mediante visitas in situ, etc.

Con todo ello, los técnicos se encargarán de plantear las medidas correctivas y preventivas contra el ruido a corto, medio y largo plazo.

Objetivos

Esta comunicación tiene por objeto dos aspectos complementarios:

1. Describir los fundamentos metodológicos en los que se ha fundado la herramienta GARITA y cuál ha sido su evolución a lo largo del proyecto en relación a las necesidades de los técnicos de la Dirección General de Infraestructuras de la Consejería de Fomento y Vivienda y cuáles serán las futuras líneas que orienten su estructura.
2. Mostrar los resultados de su aplicación en los Mapas Estratégicos de Euido de la Red de Carreteras de Andalucía en su segunda fase.

2. Principios de diseño de GARITA v.1

Principios generales

- Las soluciones técnicas contra el ruido que contempla la herramienta se limitan a:
 - a. Pantallas acústicas.
 - b. Renovación de asfalto. Asfalto poroso.
 - c. La reducción de la velocidad durante la noche (vehículos pesados).
 - d. Y, como última solución el aislamiento.
- Se utilizan solo los mapas Lnoche.
- Las zonas de conflicto (hot spots) son seleccionadas siguiendo los criterios de densidad de población expuesta (actualmente mediante la determinación de los edificios expuestos según el método

END) por longitud de carreteras (clústeres donde se incorporan los edificios).

- Para analizar los clústeres se utiliza un indicador que normaliza la gravedad de las situaciones acústicas (niveles de ruido y personas expuestas) y las hace comparables. Se ha empleado un indicador ad hoc: el SVRA (Sistema de Valoración del Ruido Ambiental).
 - El indicador se calcula a partir de la población que se encuentra por encima de los objetivos de calidad acústica [10]. Todos los que están por debajo solo se consideran a efectos de estimar la mejora global de la situación antes/después.

Datos de entrada en formato SHAPEFILE

- Eje central de la carretera (definición en X,Y). Polilínea con atributos: matrícula carretera a estudio, tipología (convencional, doble calzada, autovía), PK inicio, PK fin y longitud.
- Edificaciones. Polígonos con atributos: ID edificio, uso de edificio y zonificación acústica y número de plantas.
- Evaluación de edificios. Puntos que representan los centroides de los edificios con los datos asociados de personas y ruido (a 4 metros de altura sobre la fachada más expuesta).

Datos de salida

- Salida numérica. Hoja Excel con la lista de zonas (sectores de la carretera) con información del indicador acústico (SVRA), población afectada, nº de edificios afectados, identificador inequívoco de la zona (sector) y distancia a origen (DO) de su emplazamiento. El indicador, empleado para ordenar las zonas problemáticas, es sólo calculado cuando se supera el objetivo de calidad del tipo de edificación a estudio (residencial) [10].
 - a. La población se contabiliza de 2 maneras:
 - i. Teniendo en cuenta la población que supera los objetivos de calidad acústica.
 - ii. Toda la población (para calcular la eficacia que también incluye a gente por debajo de los objetivos de calidad)
 - b. Histograma (absoluto) por población y ruido real (no solo se provee indicador).
- Mapa de coropleta. Muestra los polígonos que representan los sectores en que se ha dividido la zona de influencia de la carretera. (Figura 1) La información contenida en este Shapefile de salida es la misma de la hoja Excel. Existe la posibilidad de visualizar este mapa de coropleta sobre Google-Earth (exportándolo como archivo “.kml”).

- Edificios afectados. Identificación de los edificios, nº residentes, ruido a 4 m en la fachada más expuesta y referencia catastral; éste nos permite acceder a la dirección del edificio (calle, número y municipio).

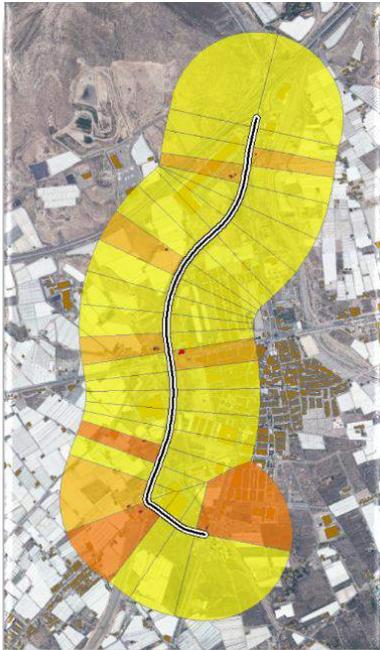


Figura 1. Mapa de coropleta y edificios afectados por ruido nocturno.

La salida numérica de la herramienta nos permite priorizar los puntos de conflicto detectados a partir del índice acústico. Así mismo, nos permite calcular de manera indirecta los costes económicos de las soluciones de tipo barrera o asfalto fonoabsorbente, ya que sabemos los metros de la carretera que generan afección (en tramos de 100 en 100 m) y el emplazamiento de la población afectada.

Externamente se calcula la eficacia y posibles efectos secundarios. Las soluciones de tipo barrera, asfalto poroso o reducción de velocidad (si fuera una solución técnica viable) pueden simularse mediante software predictivo.

Finalmente, una vez que contamos con información de costes y eficacia, se determinan y reordenan los casos por orden de prioridad. Este orden puede variar si tras la visita in situ a los puntos conflictivos se comprueba que la afección estimada es mayor a la real.

Aspectos que serán mejorados en la v.2 de la herramienta

- ✓ DSS puede proporcionar decisiones fiables para estas situaciones repetitivas, pero no puede responder de forma creativa a escenarios complejos (Ej: aglomeraciones).
- ✓ No analiza problemas relacionados con los mapas. No chequea la calidad del mapa.
- ✓ El análisis de edificios residenciales y sensibles se lleva a cabo por separado.

- ✓ Cuando se aplica a segmentos de carretera en curvas cerradas puede dar problemas ya que 100 m lineales de carretera no están relacionados siempre con la misma superficie de análisis.
- ✓ La eficacia de las medidas se realiza externamente.
- ✓ Las posibles medidas contra el ruido y el método de análisis por clústeres están vinculados; de tal manera que no es lo mismo la solución barrera, asfalto, velocidad y aislamiento.

3. Resultados y Discusión

Se ha aplicado la herramienta GARITA sobre un total de 96 UMEs (Unidades de Mapa Estratégico), que representan algo más de 1333 km de la Red de Carreteras de Andalucía (RCA). En la Tabla I se muestran los datos más relevantes obtenidos tras la ejecución de esta herramienta.

Tabla I

PROVINCIA	UMEs	KM	SVRA TOTAL	POBLACIÓN AFECTADA	SECTORES ESTUDIADOS	SECTORES AFECTADOS
ALMERÍA	11	185,0	6946	3936	3775	6,3%
CÁDIZ	11	219,1	2435	1619	4436	3,6%
CÓRDOBA	4	21,7	12378	5248	440	11,1%
GRANADA	8	253,8	11737	4294	5238	5,2%
HUELVA	11	110,0	6830	4027	2182	7,3%
JAÉN	2	43,5	43	32	802	1,5%
MÁLAGA	16	192,1	17044	9533	3820	9,5%
SEVILLA	33	308,0	64842	25706	6282	13,4%
TOTALES	96	1333,2	122255	54395	26975	7,7%

En la Figura 2 se muestran los resultados globales de la herramienta GARITA para cada provincia andaluza. La suma del índice acústico SVRA de las carreteras a estudio por provincia es mayor en la de Sevilla, donde también encontramos el mayor número de población afectada por ruido nocturno. Del mismo modo, es en esta provincia donde se da el mayor porcentaje de sectores (fracciones en que se ha dividido el área de influencia de las carreteras) con afección acústica según el indicador Lnoche.



Figura 2. Resultados globales de la herramienta GARITA por provincia.

Resultados por provincia evaluando la solución de tipo barrera acústica

Se han analizado los diez sectores de carretera más afectados por ruido según el indicador L_{noche} para cada provincia; cada sentido de la marcha de manera independiente.

En la Figura 2 se aprecia que los máximos valores de SVRA se encuentran en sectores de las carreteras de la provincia de Sevilla, seguida de la provincia de Córdoba, al estudiar el kilómetro más afectado por ruido nocturno.

Sin embargo, se observa que la población afectada en este kilómetro es similar en las provincias de Sevilla, Córdoba y Málaga.

Para poblaciones similares afectadas, como es el caso de las tres provincias mencionadas, un mayor valor del índice acústico SVRA evidencia la existencia de mayores niveles de exposición a ruido nocturno.

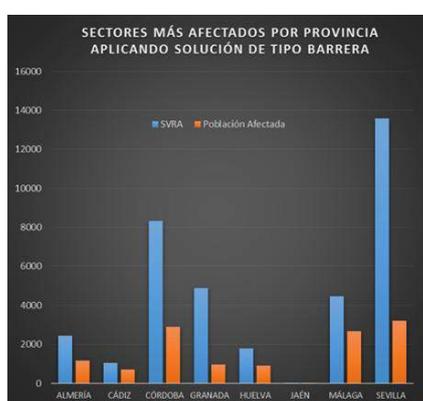


Figura 3. Sectores más afectados por provincia.

4. Conclusiones

- Los Mapas Estratégicos de Ruido de la RCA en la 2ª Fase, revelan un promedio de 41 personas afectadas por ruido nocturno y por km de carretera. La máxima concentración de población expuesta está en Córdoba con 242 personas por km y la mínima en Jaén con 1 persona por km. Sin embargo, se aprecia que los mayores valores del indicador acústico por persona se dan en Granada.

- La herramienta GARITA va a evolucionar en la versión 2 en capacitarla para hacer análisis en 3 dimensiones, lo que nos permitirá dar resultados más ajustados a la realidad.

- Con la herramienta GARITA podemos evaluar medidas de mitigación como el asfalto, la velocidad, o incluso la barrera, que requieren una continuidad. Tenemos así un indicador general para todos los sectores de las carreteras con lo que podremos evaluar la eficacia antes/después y el coste de dicha medida. De esta manera podremos seleccionar la mejor solución de las propuestas.

5. Agradecimientos

El proyecto de investigación en el que se enmarca la herramienta GARITA se encuentra cofinanciado por la Unión Europea, con cargo al Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER). Queremos mostrar nuestro agradecimiento a la Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía, encargada de la gestión de los Proyectos de I+D+i relativos al ámbito competencial de la Consejería de Obras Públicas y Vivienda para los años 2011 a 2013 por su confianza y apoyo en el desarrollo del mismo.

6. Referencias

- [1] Directive 2002/49/EC of the European parliament and of the council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise.
- [2] Cueto, J.L.; et al. Sistema de Gestión Ambiental del Ruido de las Infraestructuras de Transporte en Andalucía. Tecnicústica. Évora. 2012.
- [3] Cueto, J.L.; et al. Herramienta SIG para la toma de decisiones en la lucha contra el ruido de grandes infraestructuras de tráfico en Andalucía: proyecto GARITA. Tecnicústica. Valladolid. 2013.
- [4] SILENCE (Sustainable Development Global Change and Ecosystems). Practitioner Handbook for Local Noise Action Plans. 2008 <http://www.silence-ip.org/>
- [5] SMILE (Sustainable Mobility Initiatives for Local Environment), Guidelines for Road Traffic Noise Abatement. 2004
- [6] Desanghere, G. QCITY Quiet City Transport DELIVERABLE 6.2 Part 1 - General measures for noise mitigation January 31, 2007 <http://www.qcity.org/>
- [7] Polinder, H.; et al. QCITY Quiet City Transport DELIVERABLE 6.3 Decision support tool December, 2008 <http://www.qcity.org/>
- [8] Heich H., SILENCE (Sustainable Development Global Change and Ecosystems) WP I.4 Existing approaches and tools and possibilities for upgrade. January 2008 <http://www.silence-ip.org/>
- [9] Heich H., SILENCE (Sustainable Development Global Change and Ecosystems) WP I.4 Upgrade of Decision Support System. February 2008 <http://www.silence-ip.org/>
- [10] REAL DECRETO 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas.

Tratamiento de Residuos de Biomasa mediante Oxidación y Gasificación en Agua Supercrítica

P. Casademont Lanzat⁽¹⁾, J. Sánchez Oneto, J.R. Portela Miguélez

Departamento de Ingeniería Química y Tecnología de los Alimentos, Av. Saharaui s/n 11510, Puerto Real.
⁽¹⁾ Teléfono: 607547018, Correo: pau.casademont@uca.es

Resumen

El objetivo principal de este trabajo es el tratamiento de residuos de biomasa húmeda, con alta carga orgánica, mediante dos procesos hidrotérmicos de alta presión: Oxidación en Agua Supercrítica (OASC) y Gasificación en Agua Supercrítica (GASC). En estos procesos es posible una recuperación energética, obteniendo una valorización de dichos residuos. Los dos procesos no se encuentran en el mismo estado de desarrollo tecnológico, por lo que es necesario trabajar a diferentes escalas (laboratorio, planta piloto y semi-industrial). Además, se llevará a cabo la combinación de ambos procesos, para mejorar su aplicabilidad.

1. Introducción

Los procesos hidrotérmicos objeto de estudio, la Oxidación en Agua Supercrítica (OASC) y la Gasificación en Agua Supercrítica (GASC), tienen en común el aprovechamiento de las propiedades físico-químicas peculiares que presenta el agua a alta temperatura y presión, con grandes expectativas para la destrucción de residuos industriales y la producción de bioenergías. Estos procesos en agua supercrítica se caracterizan por operar en condiciones de presión y temperatura superiores a las que definen el punto crítico del agua (221 bar y 374 °C, respectivamente) [1].

1.1 Oxidación en Agua Supercrítica (OASC)

En estas condiciones de presión y temperatura, es posible obtener una única fase homogénea de reacción en la que los compuestos orgánicos y el oxígeno están en contacto sin limitaciones de transferencia de materia, siendo así los tiempos de reacción del orden de segundos. Como el proceso se realiza a temperaturas inferiores a las del proceso de incineración, se producen principalmente CO₂ y H₂O, pero no se producen compuestos altamente contaminantes como dioxinas u óxidos de nitrógeno (NO_x) [2].

A nivel experimental, la tecnología OASC ha demostrado una inmensa capacidad para transformar los residuos en efluentes no contaminantes.

En los últimos años se han esfuerzos en los diseños de nuevos reactores y en las mejoras de los existentes [3,4], para llegar a un escalamiento industrial y comercialización del

proceso OASC. En este sentido, es necesario enfocar el proceso OASC, no sólo como un proceso donde se eliminan los residuos sino también como una posible fuente de producción de energía. Por tanto en los últimos años, la optimización energética del proceso [5] y la recuperación energética [6] han adquirido gran relevancia, con el objetivo de mejorar la viabilidad de las plantas OASC. En este trabajo se estudiarán estrategias para el tratamiento y valorización de residuos de biomasa húmeda generados en Andalucía.

1.2 Gasificación en Agua Supercrítica (GASC)

La tecnología GASC de sustancias orgánicas ha recibido gran atención por el posible aprovechamiento energético de los residuos acuosos mediante la transformación de los mismos en gas combustible con alto contenido en hidrógeno e hidrocarburos ligeros [7]. Los métodos convencionales a baja y media presión, como pirólisis, combustión o gasificación térmica no son útiles cuando la sustancia a gasificar presenta un alto contenido en agua debido a los requerimientos energéticos necesarios para su secado previo. Esta tecnología presenta una serie de ventajas frente a procesos convencionales de producción de hidrógeno a partir de hidrocarburos:

- El agua supercrítica actúa como disolvente de compuestos orgánicos.
- Las reacciones de polimerización que generan alquitrans están inhibidas.
- Alta eficacia térmica, ya que las temperaturas de operación son inferiores a

las llevadas a cabo en un proceso de gasificación convencional.

- El gas producido es rico en hidrógeno y pobre en CO.
- El CO₂ puede ser fácilmente separado a alta presión por su alta solubilidad en agua.

Como se ha mencionado anteriormente, el proceso GASC ofrece grandes expectativas debido al posible aprovechamiento energético de los residuos, incrementándose así los estudios de gasificación en agua supercrítica en los últimos años. En 1993, Yu y col. [8] realizaron uno de los primeros estudios de GASC con el objetivo de producir hidrógeno a partir de biomasa húmeda. Más tarde, Kruse [9] reveló que los catalizadores homogéneos como el KOH mejoraban el rendimiento de la reacción y por consiguiente de la gasificación en agua supercrítica. Posteriormente, se realizaron estudios de gasificación en agua supercrítica con compuestos orgánicos más complejos como biomasa real (celulosa, hemicelulosa, lignina, etc), lodos de depuradoras y residuos aceitosos entre otros [10].

En 2005, Calzavara y col. [11] llevaron a cabo una evaluación de la eficacia energética del proceso GASC. Se emplearon datos experimentales y estimaciones de recuperación de calor, obteniendo un 76% de eficacia energética. Sin embargo, la gasificación es un proceso endotérmico, por lo que son necesarias altas temperaturas para la gasificación completa de la biomasa implicando un alto coste energético inicial, y mucha pérdida de calor disminuyendo la eficiencia energética del sistema.

Kıpçak y col. [12] realizó un estudio de gasificación del alpechín con agua supercrítica a diferentes temperaturas y tiempo de reacción, llegando a la conclusión que la cantidad de gas producto aumenta con el aumento de temperatura del sistema. Pero que a tiempos largos de reacción provocan una disminución en los compuestos combustibles del gas, ya que estos materiales se transforman en dióxido de carbono. A diferencia de las investigaciones que vamos a realizar, Kıpçak y col, realizan un filtrado previo al residuo eliminando gran parte de la materia orgánica, la cual es susceptible de ser eliminada produciendo biogás. Por tanto, una de las novedades de este trabajo es utilizar el alpechín sin un tratado previo, es decir, sin retirar materia orgánica del residuo, ya que esta materia orgánica sería un residuo en sí. Además, para el tratamiento del alperujo, es necesario facilitar su bombeo a alta presión, diluir su

contenido en materia orgánica y aumentar su humedad, para lo cual se mezclará con alpechín.

Los residuos de biomasa tienen una composición más compleja que los compuestos modelo. Por tanto, al aplicar el proceso GASC se pueden producir interacciones entre sus componentes, lo cual podría dar lugar a eficacias mayores o menores de las esperadas en su gasificación [13]. Por esta razón, aunque para algunos de los residuos seleccionados ya existe algún estudio previo, dada la complejidad de estos residuos y su variabilidad de una zona de generación a otra, es necesario abordar el estudio de los residuos generados en nuestra región, y continuar investigando mezclas complejas para entender mejor la gasificación de residuos complejos y los mecanismos de conversión de la biomasa en gases combustibles.

1.3 Residuos de biomasa húmeda

En este trabajo se propone analizar estos procesos empleando diversos residuos problemáticos en nuestra zona geográfica, como son:

- Alpechines y alperujos: la producción anual de alpechines en los países del Mediterráneo se estima entre 7 y 30 millones de m³. Las diferencias tan grandes que existen en la producción de aceituna de un año para otro se debe a las variaciones de las condiciones ambientales y a las plagas [14]. El alperujo presenta una elevada concentración de materia orgánica, lo que le confiere un alto poder contaminante. Esta elevada concentración de materia orgánica puede ser un problema para el proceso GASC. Por tanto, otra de las novedades de este trabajo, es estudiar la combinación del alperujo y alpechín en el proceso GASC para obtener un residuo con una concentración de materia orgánica y de porcentaje de humedad adecuado para el proceso.

- Lodos secundarios de depuradora: en Andalucía se generan 302.500 t MS/año, siendo el total en España del orden de 1.415.120 t MS/año, lo que ocasiona grandes problemas medioambientales [15], por lo que se ha seleccionado este residuo para analizar su capacidad de tratamiento y aprovechamiento energético mediante el proceso de gasificación.

- Pañales infantiles: en España, se estima que se generan anualmente 315.000 toneladas de residuos de pañales, es decir, alrededor de un 1,6% en peso del total de residuos municipales. El reciclaje de los pañales de un solo uso es técnica y económicamente inviable debido a su

composición, sumada a los restos orgánicos que incorporan al ser usados [16]. No obstante, para el proceso GASC, el pañal puede ser una novedosa materia prima, por su gran contenido en celulosa, aumentando su humedad e incorporando materia orgánica adicional cuando ha sido utilizado y desechado.

1.4 Objetivos

El principal objetivo del proyecto de tesis es el tratamiento de residuos de biomasa húmeda mediante la mejora de los procesos de oxidación y gasificación en condiciones supercríticas y/o la combinación de ambos procesos intentando aprovechar y cuantificar la energía que se produce. Para ello se establecen una serie de objetivos específicos:

- Determinar la carga del contaminante y del potencial energético de los residuos a tratar mediante los procesos hidrotérmicos a alta presión.
- Determinar, a escala laboratorio, las condiciones óptimas de operación del proceso de gasificación hidrotérmica.
- Estudiar y desarrollar un sistema de hibridación de los procesos OASC y GASC a escala de planta piloto y semi-industrial.

2. Metodología o Metodología Experimental

Para cumplir con los objetivos propuestos, será necesario llevar a cabo la experimentación a escala de laboratorio, planta piloto y semi-industrial (tabla I).

Tabla I. Resumen de los estudios del proyecto a diferentes escalas

Proceso	Laboratorio	Planta Piloto	Planta Semi-industrial
OASC		Hibridación OASC/GASC en un mismo reactor	
GASC	Estudio en reactor discontinuo de residuos de biomasa húmeda	Aplicación a la eliminación de alpechines.	

2.1 Métodos analíticos

2.1.1 Caracterización de los residuos

La carga contaminante se determinará en base a las medidas de DQO, COT, contenido en sales y grasas y aceites. Para la determinación del carbono orgánico total (COT) se empleará un analizador de COT Shimadzu TOC-5050A, de acuerdo con el método normalizado de combustión-infrarrojos (5310B, métodos normalizados de la APHA-AWWA-WPCF, 1990).

El potencial energético se determinará a partir del análisis elemental (C, N, S, H, O), el cálculo del calor de combustión y la medida experimental del poder calorífico de cada uno de los residuos.

2.1.2 Análisis de los efluentes

Para los efluentes líquidos se analizará: DQO, COT, intermedios de reacción (ácidos volátiles), pH y componentes volátiles. En el caso, de efluentes gaseosos se puede analizar los gases de salida del proceso, bien con un cromatógrafo de gases (Hewlett Packard HP 6890 PLUS) o con un analizador de gases (modelo 7900P-5), que permiten la cuantificación de: CO₂, CO, CH₄, H₂, N₂ y O₂.

2.2 Estudios a escala de laboratorio

2.2.1 Procesos de gasificación hidrotérmica

Las pruebas contemplaran las temperaturas de operación (400-600°C), presión (220-300 bar), coeficiente de oxígeno (n=0-0.25), tiempo de reacción, uso de catalizadores y concentración de materia orgánica. Para ello, se empleará un reactor discontinuo de 1l de volumen que alcanza temperaturas de 525°C y 240 bar de presión de forma simultánea. Además, se utilizará un reactor de pequeño volumen que alcanza temperaturas de hasta 600°C mediante un baño de arena (modelo Techne SBL-2D de 4000 W de potencia).

2.3 Hibridación OASC-GASC planta piloto

Se utilizará la planta piloto que el grupo de investigación posee, para integrar ambos procesos de forma que se aproveche y se controle el carácter exotérmico del primer proceso (OASC) para precalentar y llevar a cabo el segundo proceso (GASC). Tal y como se puede ver en la Figura 1, el proceso OASC en solitario puede exceder las temperaturas límite (600°C) si los residuos tratados son de alta concentración. Por otro lado, el proceso GASC en solitario requiere calentar externamente el residuo hasta 600°C y aun así la temperatura del medio de reacción disminuiría a lo largo del reactor. Sin embargo, se plantea la posibilidad de combinar ambos, desarrollando el proceso OASC de un residuo muy concentrado en la parte inicial del reactor, de modo que la temperatura se incremente rápidamente, pero impidiendo que la temperatura supere los 600°C mediante la incorporación de una corriente a menor temperatura de residuo a gasificar, de modo que se lleve a cabo el proceso GASC en la segunda parte del reactor.

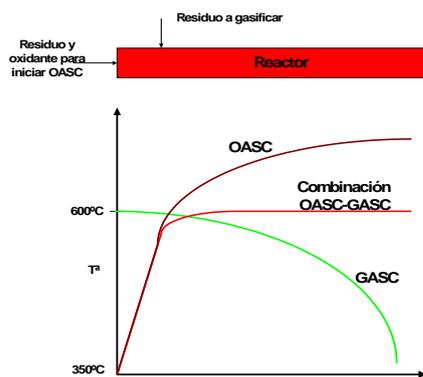


Figura 1. Perfiles del proceso OASC, GASC y de la hibridación de ambos procesos.

2.4 Comprobación de resultados a escala semi-industrial

Se va a emplear la planta piloto de OASC de 100 kg/h, propiedad de Abengoa y EMASESA, actualmente ubicada en la EDAR “El Copero”. De forma similar al estudio en planta piloto, la metodología que se desarrollará será el montaje de las modificaciones necesarias para la hibridación del proceso OASC-GASC; Puesta a punto del nuevo procedimiento de operación necesario para llevar a cabo el proceso combinado OASC-GASC; Y estudios experimentales del proceso combinado OASC-GASC en los rangos de operación más favorables encontrados a escala de planta piloto.

3. Planificación temporal

Según los objetivos principales y la metodología propuesta de acuerdo a esos objetivos, se ha realizado un plan de trabajo que se establece en este cronograma trimestral:

Tabla II. Planificación del proyecto

Estudios	Actividades	Año 1°	Año 2°	Año 3°
Métodos analíticos	Caracterización de residuos			
	Análisis efluentes pruebas			
GASC de residuos	GASC lab alpechin/alperujo			
	GASC lab residuos celulósicos			
	GASC lab lodos EDAR			
Hibridación OASC-GASC	Modificaciones P.piloto para OASC-GASC			
	Puesta a punto del proceso			
Optimizar eficiencia energética de residuos	Estudios			
	Puesta a punto OASC Semi-industrial			
Otras actividades	Estudios OASC semi-industrial			
	Actualización bibliográfica			
	Análisis de los datos			
Síntesis	Elaboración de resultados			
	Divulgación de resultados			
	Reuniones coordinación			
	Escritura de tesis			

5. Agradecimientos

Este trabajo será realizado gracias a la financiación de la Junta de Andalucía a través del Proyecto de Excelencia P11-RNM-7048.

6. Referencias

- [1] P. Kritzer, E. Dinjus, An assessment of supercritical water oxidation (SCWO). Existing problems, possible solutions and new reactor concepts, *Chem. Eng. J.* 83 (2001) 207-214.
- [2] M.D. Bermejo, M.J. Cocero, Supercritical water oxidation: a technical review. *AIChE J.*, 52(11) (2006) 3933-3951.
- [3] M.B. García-Jarana, V. Vadiello, J.R. Portela, J. Sánchez-Oneto, E.J. Martínez de la Ossa, B. Al-Duri, Oxidant multi-injection in supercritical water oxidation of wastewaters. *Procedia Eng.* 42 (2012) 1326-1334.
- [4] M.B. García-Jarana, I. Kings, J. Sánchez-Oneto, J.R. Portela, B. Al-Duri, Supercritical water oxidation of nitrogen compounds with multi-injection of oxygen. *J. Supercrit. Fluids*, 80 (2013) 23-29.
- [5] F. Marias, F. Mancini, F. Cansell, J. Mercadier, Energy recovery in supercritical water oxidation process. *Environ. Eng. Sci.*, 25 (1) (2008) 123-130.
- [6] F. Zhang, S. Chen, C. Xu, G. Chen, C. Ma, Energy consumption analysis of a supercritical water oxidation pilot plant with a transpiring wall reactor based on energy recovery. *Desalination Water Treat.* 51 (2013) 7341-7352.
- [7] Y. Guo, S.Z. Wang, D.H. Xu, Y.M. Gong, H.M. Ma, X.Y. Tang, Review of catalytic supercritical water gasification for hydrogen production from biomass. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14 (2010) 334-343.
- [8] D. Yu, M. Aihara, M.J. Antal, Hydrogen production by steam reforming glucose in supercritical water. *Energy Fuels*, 7 (1993) 574-577.
- [9] A. Kruse, D. Meier, P. Rimbrecht, M. Schacht, Gasification of Pyrocatechol in Supercritical Water in the Presence of Potassium Hydroxide. *Ind. Eng. Chem. Res.* 39 (2000) 4842-4848.
- [10] T. Yoshida, Y. Oshima, Y. Matsumura, Gasification of biomass model compounds and real biomass in Supercritical Water. *Biomass and Bioenergy*, 26 (2004) 71-78.
- [11] Y. Calzavara, C. Jousset-Dubien, G. Boissonnet, S. Sarrade, Evaluation of biomass gasification in supercritical water process for hydrogen production. *Energy Convers. Manage.* 46 (2005) 615-631.
- [12] E. Kırçak, O.Ö. Söğüt, O., M. Akgün, Hydrothermal gasification of olive mill wastewater as a biomass source in supercritical water. *J. Supercrit. Fluids*, 57 (2011) 50-57.
- [13] T. Yoshida, Y. Oshima, Partial Oxidative and Catalytic Biomass Gasification in Supercritical Water: A Promising Flow Reactor System. *Ind. Eng. Chem. Res.* 43 (2004) 4097-4104.
- [14] M. Niaounakis, C.P. Halvadakis, “Olive-Mill Waste Management: Literature review and Patent Survey”. Typothito – George Dardanos Publications, Athens (Greece), 2004.
- [15] X. Elias, “Reciclaje de residuos industriales: residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora”. Capítulo 12. Vías de tratamiento y valorización de fangos de depuradora. Ed., Díaz de Santos, 909-996, 2009.
- [16] I. Puig Ventosa, M. Calaf Forn, Pañales reutilizables como estrategia de prevención de residuos. *Residuos*, 103 (2008) 26-36.



**VI Jornadas Predoctorales de la
Escuela Superior de Ingeniería**

Ingeniería y Tecnologías de Materiales y Fabricación

Análisis de la variación cromática y de rugosidad en superficies de la aleación Ti6Al4V texturizadas por láser.

J. M. Vázquez⁽¹⁾, F.J. Botana⁽²⁾, M. Marcos⁽¹⁾

⁽¹⁾Dpto. Ing. Mecánica y Diseño Industrial, Universidad de Cádiz, Avda de la Universidad de Cádiz Nº10, 11519, Puerto Real (Cádiz)
e-mail: juanmanuel.vazquez@uca.es.

⁽²⁾ Dpto. CC Materiales y Química Inorgánica, Universidad de Cádiz, CASEM Avd Rep. Saharaui s/n, 11510, Puerto Real (Cádiz).

Resumen

El empleo de tratamientos de modificación superficial para la obtención de propiedades y características específicas ha mostrado un importante auge en las últimas décadas. La modificación de textura, composición y microestructura a través de procedimientos de radiación láser, favorece el desarrollo de superficies para aplicaciones específicas. El uso de aleaciones de titanio en aplicaciones de tipo estético, se acompaña habitualmente de tratamientos superficiales para la mejora de resistencia y/o acondicionamiento visual y táctil. El presente trabajo tiene como objetivo la obtención de una gama cromática y de acabado de muestras de Ti6Al4V mediante el diseño y desarrollo de procesos de oxidación térmica por láser.

1. Introducción

En los últimos años, se ha desarrollado un importante incremento en el uso de las aleaciones de titanio en diversos ámbitos tecnológicos, que pueden abarcar la fabricación de componentes para la industria aeronáutica y aeroespacial, aplicaciones de tipo biomédico, y su utilización en elementos de carácter estético en arquitectura o joyería. Este hecho se debe, principalmente, a las excelentes propiedades y características presentadas por este tipo de aleaciones [1-6].

Los procesos de oxidación térmica, unidos a la nitruración y carburización constituyen los tratamientos más empleados para la mejora superficial de aleaciones de titanio. Aunque la oxidación superficial se ha considerado generalmente como un fenómeno de corrosión y existen procedimientos de protección de materiales ante este fenómeno, en algunos casos como las aleaciones de titanio y aluminio, la generación de una delgada capa de óxidos puede proporcionar una notable mejoras.

Cuando las aleaciones de titanio son sometidas a temperatura elevada, bajo ambientes en los que se encuentre presente el oxígeno, pueden dar lugar a procesos oxidativos, favoreciendo el desarrollo de capas superficiales de diferentes tipos de óxidos con multitud de propiedades y características muy diferentes del material base [7-14].

Una de las características fácilmente detectables en el desarrollo de óxidos, mediante técnicas de

radiación láser en capas externas de aleaciones de titanio, es la variación de la tonalidad inicial del material. Esta variabilidad suele atribuirse generalmente a fenómenos de interferencia del haz de láser en el interior de la capa tratada. El acabado cromático resultante puede variar desde tonalidades dorado claro a tonalidades de mayor intensidad de verdes y morado. Este rango de tonalidades se debe principalmente al espesor de la capa de óxidos de titanio [15-18].

La presente contribución tiene como objetivo el diseño y desarrollo de una gama cromática y de acabado superficial de muestras de aleación de titanio Grado 5 ASTM (Ti6Al4V), modificadas superficialmente mediante radiación láser bajo diferentes condiciones de procesado.

2. Metodología Experimental

Se ha realizado el diseño, desarrollo y puesta a punto de una metodología en la que se parte de la exposición de la sistemática básica para la obtención de las muestras de estudio y su posterior tratamiento mediante radiación láser. Las muestras tratadas han sido sometidas a procesado superficial láser bajo condiciones de frecuencia (f) y velocidad de barrido (V_s) variables, con objeto de evaluar la variación de tonalidad en función de los parámetros de radiación fijados. Así mismo, se ha evaluado la variabilidad en el acabado superficial, provocado por la incidencia del haz láser sobre la superficie de las muestras de aleación (Figura 1).

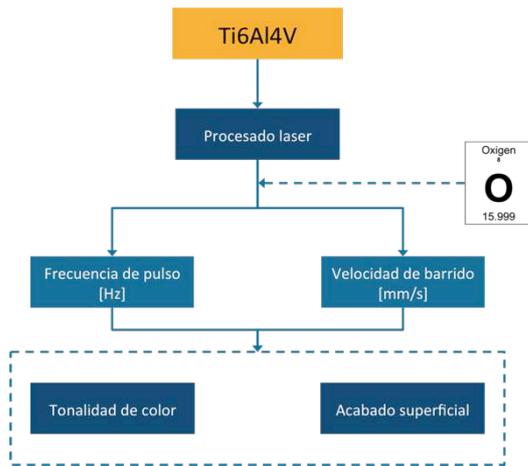


Figura 1. Metodología experimental

2.1 Material

El presente estudio se llevó a cabo a través de muestras de aleación de titanio Ti6Al4V de amplio uso aeronáutico, biomédico, arquitectónico y estético, con la composición que se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Composición nominal en peso (%wt) de la aleación Ti6Al4V

Elem.	Al	V	Fe	Ti
% wt	5,5-6,5	3,5-4,5	0,25	Resto

2.2 Tratamiento superficial de muestras

Tras el acondicionamiento inicial de las muestras a un acabado superficial adecuado, se ha llevado a cabo la aplicación del tratamiento de radiación inducida, mediante un sistema laser de marcado *Rofin Easymark F20*, de tipo pulsado, con unas condiciones de procesado que se indican en la tabla 2. Con objeto de disponer de un rango de muestras con características variables, se ha seleccionado una serie de combinaciones de frecuencia de pulsado láser y velocidad de barrido, dando lugar a un total de cuarenta muestras de distinta naturaleza respecto a tonalidad de color y acabado superficial resultante del proceso de texturizado.

Tabla 2. Parámetros de procesado láser

P [W]	f [kHz]	Vs [mm/s]	λ [nm]
10	20-80	10 - 250	1062
Atmósfera		D. Focal	ØSpot
Aire		185 mm	60 μ m

Bajo una atmósfera de aire, la radiación superficial mediante sistema láser, provoca un proceso de oxidación del material, generando una fina película compuesta principalmente de

óxido de titanio, ó rutilo (TiO_2), con una tonalidad que puede variar en función del espesor de dicha capa [4].

La oxidación del material da lugar no solo a modificaciones de la composición y textura de la capa exterior del material, sino a modificaciones microestructurales de la misma, modificando así la tonalidad inicial de la aleación de titanio.

2.3 Variación cromática de muestras

La incidencia del haz láser sobre la superficie de la probeta de aleación Ti6Al4V a través de combinaciones de parámetros de procesado, tiene como resultado la obtención de una amplia variedad de muestras caracterizadas por un rango de tonalidades de color que pueden ir desde azul claro, hasta dorado intenso.



Figura 2. Probeta de Ti6Al4V tratadas con láser en atmósfera oxidativa

Tras analizar la modificación de la tonalidad inicial, puede observarse que existe una clara influencia de los parámetros de frecuencia de pulso y velocidad de barrido del tratamiento de texturizado.

2.4. Acabado superficial de muestras

Con objeto de evaluar la capacidad del proceso de texturizado para la generación de estructuras y texturas sobre el acabado superficial de las muestras, se ha llevado a cabo la medición de rugosidad de las probetas de forma previa y posterior al tratamiento superficial. No obstante, las probetas han sido acondicionadas mediante procedimientos de esmerilado y pulido hasta valores de rugosidad inferiores a $0,1\mu$ m . Este acondicionamiento inicial disminuye los defectos por reflexión en secciones de la superficie que no se encuentran en un plano perpendicular al haz láser.

La medición de acabado superficial ha sido realizada mediante un rugosímetro de palpador MAHR PERTHOMETER CONCEPT PGK120, analizando los perfiles de diez secciones de la

muestra en sentido perpendicular a la dirección de las huellas de texturizado. Se ha seleccionado el parámetro de rugosidad Ra UNE-EN ISO 4287:1999 [19] para la evaluación del acabado superficial de las muestras texturizadas. El parámetro de rugosidad media aritmética Ra se determina como la media de los valores de desviaciones de las alturas de pico Z(x) contenidas en una longitud de muestreo (Ecuación 1). Este parámetro se utiliza generalmente para la evaluación de superficies con surcos definidos y orientados, como el caso de torneado y en este caso de texturizado bidireccional. El parámetro Ra se obtiene a partir de la sustracción de las áreas de la sección superior comprendidas por los picos y las áreas de la sección inferior descritas por los valles del perfil de rugosidad evaluado

$$Ra = \frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z(x)| dx \quad (1)$$

3. Resultados y Discusión

La medición de rugosidad de las muestras texturizadas permite observar que existe una notable vinculación entre los parámetros de procesado láser y la rugosidad resultante. En este aspecto, pueden apreciarse variaciones de importancia en la morfología y escala de los perfiles obtenidos en la medición de acabado superficial de diferentes muestras de estudio (Figura 3).

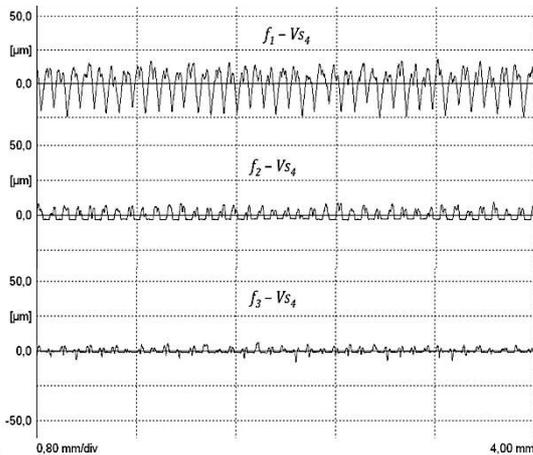


Figura 3. Perfiles de rugosidad bajo diferentes condiciones de procesado.

Debido a la influencia de la intensidad de los tratamientos de procesado, resultantes de la variación de los principales parámetros del proceso de texturizado superficial, se pueden observar variaciones de importancia en el comportamiento de las capas más externas de material (Figuras 4 y 5)

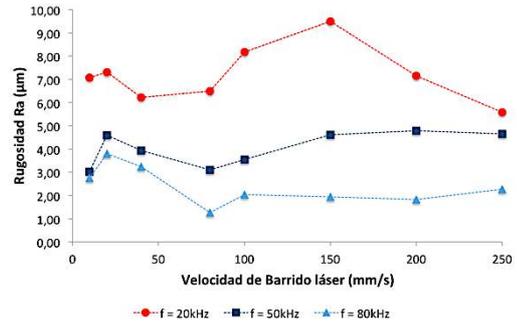


Figura 4. Influencia de Vs sobre el acabado.

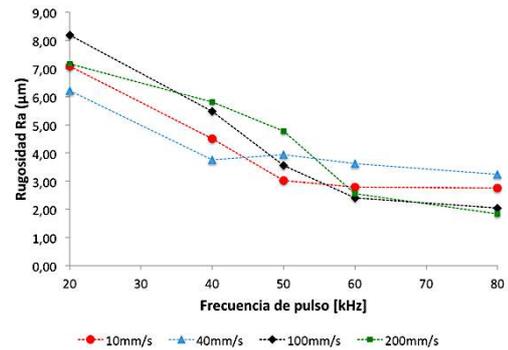


Figura 5. Influencia de f sobre el acabado

4. Conclusiones

A través de variaciones en los valores de frecuencia de pulso y velocidad de barrido láser, se puede obtener un amplio rango de tratamientos de intensidad variable. Estas variaciones de intensidad resultan en la generación de superficies con tonalidades de color y acabados específicos, fácilmente aplicables a aplicaciones de tipo estético gracias a la precisión de marcado permanente en este tipo de materiales.

La rugosidad inducida por los procedimientos de texturizado láser, muestran una mayor dependencia de la frecuencia de pulso, presentando valores mas elevados para frecuencias bajas, indicando que mayor número de pulsos por segundo sobre una sección de la aleación tiene como resultado la fusión de un volumen mayor de material, suavizando las crestas y asperezas provocadas por la incidencia del haz.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha recibido apoyo financiero del Gobierno Español (Proyecto DPI2011-29019), la Unión Europea (FEDER/FSE), y la Junta de Andalucía. Los autores agradecen al Laboratorio de Corrosión y Protección de Materiales, y al Centro de Metrología Industrial por su apoyo durante la fase experimental.

6. Referencias

- [1] M. Niinomi, Mechanical properties of biomedical titanium alloys, *Materials Science and Engineering*, A243 (1998) 231-236.
- [2] M.G.Pérez, J.Fernández, Revisión sobre nitruraciones láser de aleaciones de titanio, *Revista de metalurgia* 46 (2010) ISSN: 0034-8570 y 1988-4222.
- [3] A. Zhecheva, et al., Enhancing the microstructure and properties of titanium alloys through nitriding and other surface engineering methods, *Surface & Coatings Technology* 200 (2005) 2192-2297.
- [4] F. Variola, et al., Tailoring the surface properties of Ti6Al4V by controlled chemical oxidation, *Biomaterials* 29 (2008) 1285-1298.
- [5] Rack H.J., Qazi J.I., Titanium alloys for biomedical applications, *Materials science and engineering C* 26 (2006) 1269-1277.
- [6] UNE-EN ISO 5832-3:2012, Implantes de tipo quirúrgico. Materiales metálicos. Parte 3: Aleación forjada a base de titanio, aluminio 6 y vanadio 4, AENOR (2012).
- [7] Laakso P., Ruotsalainen S., Pantsar H., Penttilä R., Relation of laser parameters in color marking of stainless steel, Proceedings of the 12th NOLAMP Conference in Laser Processing of Materials, ATV, SEMAPP, Copenhagen (2009).
- [8] Tagliaferri F., Leopardi G., Semmler U., Kuhl M., Palumbo B., Study of the influence of laser parameters on laser assisted machining processes, *Procedia CIRP* 8 (2013) 170-175.
- [9] Antończak A., Kocoń D., Nowak M., Koziol P., Abramski K.M., Laser-induced color marking-Sensitivity scaling for a stainless steel, *Applied surface science* 264 (2013) 229-236.
- [10] Antończak A.J., Skowroński L., Trzcinski M., Kinzhybalov V.V., Lazarek L.K., Abramski K.M., Laser-induced oxidation of titanium substrate: Analysis of the physicochemical structure of the surface and sub-surface layers, *Applied Surface Science* 325 (2015) 217-226
- [11] Adams D.P., Murphy R.D., Saiz D.J., Hirschfield D.A., Rodríguez M.A., Kotula P.G., Jared B.H, Nanosecond pulsed laser irradiation of titanium: Oxide growth and effects on underlying metal, *Surface & Coatings Technology* 248 (2014) 38-45.
- [12] Wen M., Wen C., Hodgson P., Li Y., Thermal oxidation behaviour of bulk titanium with nanocrystalline surface layer, *Corrosion Science* 59 (2012) 352-359.
- [13] Fusi M., Maccallini E., Caruso T., Casari C.S., Bassi A.L., Bottani C.E., Rudolf P., Surface electronic and structural properties of nanostructured titanium oxide grown by pulsed laser deposition, *Surface Science* 605 (2011) 333-340.
- [14] Fusi M., Russo V., Casari C.S., Bassi A.L., Bottani C.E., Titanium oxide nanostructured films by reactive pulsed laser deposition, *Applied Surface Science* 255 (2009) 5334-5337.
- [15] Chung-Wey Ch., Cen-Ying L., High precision patterning of ITO using femtosecond laser annealing process, *Applied surface science* 314 (2014) 215-220.
- [16] Dubey A.K., Yamada V., Laser beam machining - A review, *International journal of machine tools & manufacture* 48 (2008) 609-628.
- [17] Mittal K.L., Bahners T., Laser surface modification and adhesion, Wiley (2015).
- [18] Renk K.F., Basics of laser physics for students of science and engineering, Springer (2012).
- [19] UNE-EN ISO 4287:1999, Especificación geométrica de productos (GPS). Calidad superficial: Método del perfil. Términos, definiciones y parámetros del estado superficial, AENOR (1999).

Desarrollo, optimización y estudio de un proceso de fabricación de estructuras de materiales compuestos de fibra de carbono mediante moldeo por compresión asistido por membranas

M. Salvado Manzorro⁽¹⁾, M. Marcos Bárcena⁽²⁾, F.J. Botana Pedemonte⁽³⁾

⁽¹⁾ Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, E.S.I., Avda. Universidad de Cádiz, 10, 11519 Puerto Real, Cádiz, 628753584, manolo.salvadamanzorro@alum.uca.es

⁽³⁾ Departamento de Ciencias de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química Inorgánica

Resumen

Este trabajo corresponde a la Tesis Doctoral elaborada por M. Salvado dentro del Programa de doctorado en Ingeniería de Fabricación, Materiales e Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cádiz. En primer lugar se analizan los antecedentes y el estado actual de los procesos de fabricación utilizados en materiales compuestos y de los procesos de recateado, seguidamente se propone un nuevo proceso de fabricación mediante moldeo por compresión asistido por membranas a través de un modelo tanto teórico como experimental para poder obtener unos resultados y finalizar con unas conclusiones.

1. Introducción

Los polímeros reforzados con fibra de carbono (o CFRP por su nombre en inglés) se usan, fundamentalmente, en aplicaciones estructurales guiadas por la reducción de peso, como es el caso de la industria aeronáutica o la aeroespacial. Estos materiales se caracterizan por poseer muy buenas propiedades mecánicas específicas (propiedades por unidad de peso), en comparación con las aleaciones metálicas tradicionales, como pueden ser las derivadas del aluminio. Durante las últimas décadas se ha producido un aumento exponencial del empleo de materiales compuestos en el sector aeronáutico, dado que ahorrar peso significa reducir consumo de combustible, reducir costes de operación y mejorar la protección medioambiental. Por otro lado, la UE establece como objetivo para el año 2020 una reducción progresiva hasta un 50% del consumo de combustible por pasajero-kilómetro, siendo un 20% responsabilidad del desarrollo de nuevos motores cada vez más eficientes. El 30% restante correspondería a la utilización masiva de estructuras de carbono (CFRP) más ligeras y aerodinámicas que las actuales. Todas estas razones constituyen una excelente fuerza motriz para desarrollar futuros materiales compuestos y procesos de fabricación. La mayor parte de los composites utilizados en la industria aeronáutica se fabrican apilando un conjunto de telas de fibra de carbono embebidas en una resina epoxy. Cuando el curado se lleva a cabo en autoclave se usan telas preimpregnadas en la resina (preimpregnados o prepreg). Las resinas utilizadas en la fabricación de prepregs son de

tipo epoxídicas termoestables, cuyo curado depende, fundamentalmente, de la naturaleza química de la resina. Las resinas termoestables son aquellas que se curan durante el proceso de fabricación de la pieza final, ya que cambian irreversiblemente bajo la influencia del calor, de la luz, de agentes fotoquímicos y/o de agentes químicos.

A continuación se lleva a cabo un análisis cuantitativo de los procesos de fabricación de los CFRP a través de las bases de datos científicas Scopus y Web of Science (WOS), filtrando la búsqueda por años desde 1990 a 2015. Se utiliza para la búsqueda diferentes palabras claves: curing out of autoclave, CFRP, manufacturing process, RTM. Se puede observar en la Figura 1, una gráfica que resume la tendencia de investigación en los últimos quince años de los procesos de fabricación de los materiales compuestos. Se analizan los cinco procesos principales utilizados en CFRP como son: autoclave, resin transfer moulding (RTM), prensa de platos calientes, hand lay-up y out of autoclave (OOA).

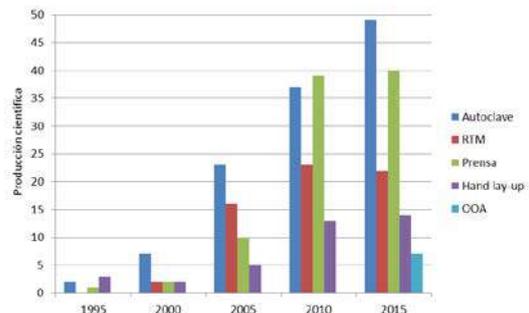


Figura 1. Análisis cuantitativos de los procesos de fabricación.

Se puede observar que entre los diferentes procesos de curado, el método de autoclave es el más estudiado mientras que los métodos fuera de autoclave son los que tienen menor producción científica.

Por otro lado, la primera y obligada operación de mecanizado es el recantado de los bordes de la pieza de material compuesto llevada a cabo después del desmoldeo del material. Esta operación puede realizarse utilizando cualquier mecanizado convencional, corte por láser o en algunos casos, corte por chorro de agua abrasivo. Sin embargo, encontramos que la heterogeneidad y la anisotropía del material compuesto hacen difícil el mecanizado. La operación de recantado da como resultado muchos defectos y estos defectos se encuentran en los bordes libres del laminado (fibras arrancadas y/o delaminación) o a través de su espesor (fibras arrancadas y degradación de resina).

Se lleva a cabo un análisis cuantitativo de los procesos de recantado de los CFRP a través de las bases de datos científicas Scopus y Web of Science (WOS), filtrando la búsqueda por años desde 1990 a 2015. Se utiliza para la búsqueda diferentes palabras claves: laser cutting, water jet, CFRP, manufacturing process CNC. Se puede observar en la Figura 2, una gráfica que resume la tendencia de investigación en los últimos quince años de los procesos de mecanizado de los materiales compuestos. Se analizan los tres procesos de recantado principales utilizados en CFRP como son: recantado mediante CNC, corte por láser y chorro de agua (AWJ).

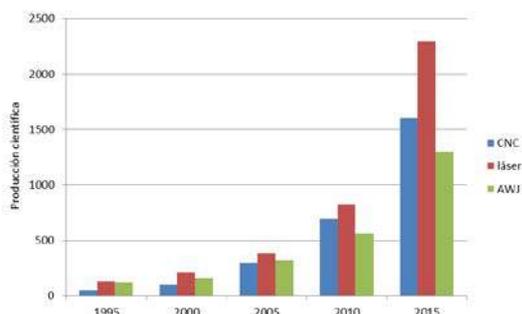


Figura 2. Análisis cuantitativo de los procesos de recantado.

Se puede observar que entre los diferentes procesos de recantado, el método de láser es el más estudiado mientras que los métodos de AWJ son los que tienen menor producción científica.

Los principales objetivos que se persiguen con este trabajo son buscar nuevas vías de reducción de costes de fabricación de materiales compuestos, automatizar los procesos y mejorar la eficiencia energética buscando alternativas al

uso de autoclave, siempre cumpliendo los requisitos de calidad. Para ello se propone diseñar y construir un nuevo proceso alternativo al autoclave que optimice los tiempos de operación y aplicar la presión mediante una membrana de silicona reutilizable y moldeable, lo que permitirá ampliar el campo de estudio a elementos complejos salvando la limitación actual de las prensas de platos calientes sin la necesidad de colocar contraútil. Por otro lado, se desarrollarán mejoras en el proceso de recantado. Se pretende mantener la calidad de corte incrementando la velocidad de alimentación, buscando al mismo tiempo aumentar la vida útil de la herramienta, ya que actualmente este proceso presenta inconvenientes como la durabilidad, tipos de herramienta y velocidad.

Las principales hipótesis de partida para este trabajo de investigación son:

1. Se espera diseñar un prototipo alternativo al autoclave con las mismas prestaciones que influya positivamente reduciendo los costes y tiempos de operario.
2. La membrana de silicona tiene una relación directa con la disminución considerable de materiales auxiliares utilizados en el proceso de fabricación.
3. Se espera que la optimización de las rampas de calentamiento y enfriamiento en los ciclos de curado reduzca considerablemente los tiempos de curado.

En definitiva, los objetivos generales que se persiguen son tratar de optimizar el curado de elementos de materiales compuestos en el proceso de fabricación actual y proponer mejoras del proceso de recantado en los CFRP. Se pretende contribuir al avance en el conocimiento sobre el curado de materiales compuestos y el proceso de recantado, reduciendo tiempos, costes y aumentar la eficiencia energética utilizando nuevos métodos de procesado. Los objetivos específicos de este trabajo de investigación son:

1. Análisis de técnica novedosa de aportación de presión mediante membrana de silicona reutilizable y moldeable, para elementos planos y complejos.
2. Estudio de la posibilidad de mejorar nuevos procesos de curado con objeto de simplificar dichos procesos actuales y los materiales auxiliares empleados.
3. Validación y verificación de procesos de curado aeronáuticos alternativos en el prototipo "out of autoclave" según normativa vigente IPS 05-01-008-04 (Mat.2).
4. Análisis e interpretación de resultados experimentales obtenidos en probetas curadas

en autoclave y en el prototipo “out of autoclave”.

5. Estudio para mejorar el proceso de recateado de elementos de fibra de carbono, teniendo en cuenta diferentes tipos de herramientas y parámetros de máquina. En definitiva, se trata de aumentar la vida útil de la herramienta, mejorar las condiciones de mecanizado y aumentar el avance o la velocidad.

6. Estudio de la velocidad de herramienta, parámetro crítico para uno de los mayores defectos que se producen en el mecanizado de fibra de carbono, como es la delaminación.

7. Estudio y diseño de la sujeción de la pieza para mecanizar en máquina.

2. Metodología Propuesta

Se trata de conseguir aportar la información empírica necesaria para alcanzar los objetivos, mediante técnicas de observación y medición de la realidad. De esta forma se obtiene la capacidad de optimizar el proceso de curado y técnicas de mejora de recateado desde la perspectiva previamente determinada. En la Figura 3, se observa un organigrama de tareas a desarrollar durante este trabajo de investigación.

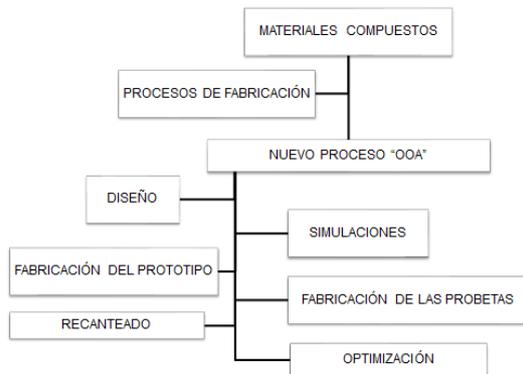


Figura 3. Organigrama del trabajo previsto.

A continuación se describen los puntos principales propuestos para desarrollar:

1. Análisis sobre el estado del arte y las tendencias actuales sobre los procesos de fabricación y los procesos de recateado en los materiales compuestos.

2. Diseño de un sistema alternativo para el curado de preimpregnados de fibra de carbono “out of autoclave” cumpliendo los requisitos aeronáuticos vigentes y que consiga ampliar el campo de aplicación y su productividad mejorando su eficiencia energética y reduciendo costes.

3. Simulación mecánica y térmica del modelo diseñado anteriormente mediante elementos finitos, seleccionando el método de cálculo más adecuado para su configuración y solicitaciones.

4. Análisis e interpretación de los resultados teóricos obtenidos en la simulación.

5. Construcción de un prototipo basado en el modelo teórico para proporcionar un desarrollo experimental, obtener datos y realizar un análisis comparativo. Este punto es clave para poder realizar un estudio comparativo y poder validar el modelo teórico mediante datos experimentales. Se tienen en cuenta una serie de requisitos previos para diseñar y se define el prototipo “out of autoclave” como un procedimiento para el curado automático y rápido de composite mediante sistemas innovadores, para los sectores: aeronáutico, automoción y construcción. El procedimiento permite el curado de preimpregnados de cualquier tipo de composite en elementos con cualquier geometría. El proceso incluye aporte de temperatura, presión y vacío regulables. Las principales características son el aporte de presión a la pieza a través de una membrana de silicona reutilizable y moldeable, así como el aporte de calor a través de un doble circuito térmico y por último vacío en la zona de curado. El sistema mejora la eficiencia energética, disminuye costes y optimiza los tiempos.

Para el caso del recateado se estudian tanto las variaciones en parámetro de máquina como los tipos de herramientas empleadas. Se propone definir las variables de estudio, su tipo y los cálculos a realizar para obtener sus valores.

6. Desarrollo experimental empleando para ello como material de estudio preimpregnados de fibra de carbono “Z-19.740” empleados en aeronáutica. La temperatura de curado para dicho material es $120^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Inicialmente se aplicarán los valores de presión y vacío que se recomiendan en la ficha técnica para el curado en autoclave. Estos valores son: 3.5 bares de presión y 0.65 – 0.75 bares de presión de vacío.

7. Fabricar probetas de dimensiones $500 \times 500 \times 2$ mm y $500 \times 500 \times 6$ mm, con unas creces de 20 mm para su análisis y su posterior recateado.

8. Realizar pruebas experimentales con el prototipo diseñado y fabricado para verificar y validar nuevos procesos y materiales.

9. Técnicas de recateado en máquina de CNC modelo Kondia FIVE-400.

10. Caracterización fisicoquímica (DMA, DSC y contenido de fibra, resina y huecos) y mecánica (Tracción y Cortadura interlaminar) de las probetas de fibra de carbono curado mediante autoclave y en el prototipo “out of autoclave”, mediante normativa aeronáutica vigente IPS 05-01-008-04 (Mat.2). Las características técnicas de los materiales analizados o empleados se comprobarán mediante ensayos correspondientes en laboratorios certificados.

3. Resultados

Tal y como se define anteriormente en la metodología se espera una serie de resultados tanto teóricos en las simulaciones mecánicas y térmicas del modelo como datos experimentales del prototipo. Algunos de los resultados previstos durante este trabajo pueden ser:

Reducir considerablemente los materiales auxiliares utilizados en el proceso de curado dentro de autoclave comparándolos con el proceso de curado fuera de autoclave.

Conseguir ampliar el proceso de curado para piezas complejas a través de la membrana reutilizable y moldeable a la pieza.

Conocer la vida útil de la membrana, que se estima entre 35 y 100 moldeos, en función de la complejidad de las formas de la pieza y las elongaciones a que esté sometida la membrana. Según la empresa INP 96 S.L. si se usan las membranas TYGAVAC se asegura un cierre de vacío efectivo hasta los 205 °C en continuo, con presiones de 9 bares.

El ciclo de curado del prototipo diseñado “out of autoclave” debe cumplir la normativa vigente del material correspondiente, por ejemplo, si se utiliza el preimpregnado de fibra de carbono con denominación aeronáutica Z-19.740, los parámetros de curado, Tabla I, se rige por la normativa IPS 05-01-008-04.

Tabla I. Ciclo de curado

Presión	3.5 bar
Vacío	0.65 - 0.75 bar
Rampa de calentamiento	0.2 - 3.5 °C/min.
Temperatura de curado	120 ± 5°C
Tiempo de curado	120 - 150 min.
Rampa de enfriamiento	0.2 - 3.5 °C/min.

Los valores de máquina de temperatura, presión y vacío del ciclo de curado, deben permanecer durante todo el ciclo dentro del rango de valores y estar registrados para que se pueda validar y certificar dicho proceso de fabricación aeronáutico por parte del departamento de calidad.

4. Conclusiones

Se concluye, dadas las limitaciones actuales en los procesos de fabricación y el interés mostrado por este tipo de materiales en la industria aeronáutica, aeroespacial y de automoción, centrar la línea de investigación en procesos de curados alternativos al autoclave y optimizar la velocidad de recantado manteniendo la calidad de corte dichos materiales. Dicho proceso es totalmente novedoso y de vital importancia para el desarrollo competitivo de los elementos de

fibra de carbono frente a otros materiales más consolidados en la industria.

Se trata de investigar el desarrollo de procesos innovadores que optimicen el ciclo de curado como alternativa al autoclave, fundamentalmente a través de la reducción del consumo energético. Además se conseguirán ahorros económicos adicionales minimizando los tiempos de personal y reduciendo el uso de materiales auxiliares (bolsas de vacío, film separador, manta de absorción, retenedor de borde y desmoldeante líquido) utilizados actualmente en autoclave. Por último, se alcanzará una reducción de casi el 80% de la inversión inicial en los equipos necesarios para llevar a cabo el proceso al ser más económicos.

De esta manera, se conseguirá mayor rentabilidad a escala industrial frente a otros procesos.

5. Agradecimientos

Quiero mostrar mi agradecimiento a la Fundación Andaluza para la Investigación de Materiales y Nanoestructuras por su aporte decidido en la investigación, desarrollo e innovación de materiales compuestos que me permite desarrollar la Tesis.

6. Referencias

- [1] J.E. Shigley, Charles Mischke, R.G. Budynas, *Mechanical Engineering Design*, 9º Ed., McGraw-Hill,
- [2] E. Torrecilla Insagurbe. *El gran libro de Catia*. 2010.
- [3] F. Salas, T. Álamo, F. Cuesta, D. Limón y C. Vivas. *Control automático*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla.
- [4] P. Ariza Moreno, Andrés Sáez Pérez. *Métodos de los elementos finitos. Introducción al ANSYS*. Universidad de Sevilla.
- [5] Quickstep Technologies y Dale Brosius, “An Out-of-Autoclave Innovation for Advanced Composites Fabrication” Quickstep Technologies 2008.
- [6] Airbus S.L. *I+D-P-233_D3. Fabricación de estructuras con materiales compuestos de fibra de carbono (laminados y “sándwich”)*. 01/02/2007.
- [7] Airbus S.L. *AING-508. Ciclos de curado y conformado de materiales compuestos*. 06/01/2013.
- [8] F. C. Campbell. *Manufacturing processes for advanced composites*. New York: Elsevier, 2004.

Estandarización de ensayos para el estudio de procesos SPF/DB de elementos aeronáuticos

Luis García Barrachina⁽¹⁾, Mariano Marcos Bárcena⁽²⁾

⁽¹⁾Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, Avda. Universidad de Cádiz nº 10 11519, Ext. 3489, luis.barrachina@uca.es.

⁽²⁾Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, Avda. Universidad de Cádiz nº 10 11519, Ext. 3415, mariano.marcos@uca.es.

Resumen

En la actualidad, algunos de los Procesos Avanzados de Fabricación Aeronáuticos carecen de un control estandarizado de producto/proceso para llevar a cabo un seguimiento del rendimiento funcional de los mismos. En este contexto, con en el siguiente Plan de Investigación se ponen las bases para desarrollar una probeta experimental que sirva para estandarizar desde el punto de vista del producto, el rendimiento funcional del conformado superplástico (SPF) de elementos aeronáuticos. Para ello, se analizarán, paralelamente, las principales características asociadas al proceso, englobando sus ventajas e inconvenientes, y las principales tipologías estructurales de las aeronaves factibles de ser fabricadas mediante SPF.

1. Introducción

El conformado superplástico (o SPF por sus siglas en inglés Superplastic Forming) es un método de fabricación basado en la propiedad de superplasticidad que presentan determinados materiales a partir de una cierta temperatura, menor que la temperatura de fusión. La superplasticidad permite conseguir elongaciones del orden de 1000 % sin que el material llegue a romperse.

Este fenómeno fue observado por primera vez en 1934 por Pearson [1] en una aleación Bi-Sn, la cual experimentaba deformaciones de hasta 1950%.

Sin embargo, no fue hasta la década de los sesenta cuando dicho fenómeno empieza a ser estudiado y empleado como método de fabricación.

La superplasticidad está en buena parte influenciada por la estructura interna del material y en concreto, con las fases presentes en éste y el tamaño de los granos que lo componen. Así, un mismo material que presente internamente dos tamaños de grano diferentes se comportará de manera distinta, variando de uno a otro la tasa de deformación máxima que se le puede imponer al material sin que llegue a sufrir daños o la tensión de fluencia requerida para deformar el material.

La estructura interna del material no puede ser considerada como estática durante el proceso. La propia característica de éste hará que el tamaño de los granos tienda a aumentar

conforme avanza el tiempo. Este aumento está fundamentalmente relacionado con dos causas independientes, la deformación del material y la elevada temperatura que requiere el proceso. Al primero se le conoce como crecimiento dinámico, y al segundo crecimiento estático. Tanto una u otra causa, por el hecho de aumentar de forma general el tamaño de grano del material, perjudican las propiedades del mismo. Una forma de ralentizar el crecimiento de los granos consiste en utilizar materiales con dos fases; de hecho la superplasticidad no se suele dar en materiales puros [2].

El proceso básico de un SPF parte de una placa plana y un molde que contiene el negativo de la pieza a realizar. Una vez situada la placa sobre el molde, y previamente calentada hasta la temperatura adecuada, en el rango de 50% y 80% la temperatura de fusión del material, se aplica presión a través de un gas inerte, generalmente Argón, en una de sus caras. Dicha presión comienza a expandir el material hasta que alcanza las paredes del molde y la placa toma su forma.

De forma esquemática, se puede dividir un proceso SPF en cuatro fases:

En la primera se encuentra la placa sobre el molde. Tal placa suele estar restringida en sus bordes para impedir el movimiento, y permitir únicamente la deformación debida a la presión que ejerce el gas.

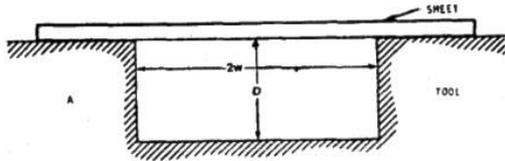


Figura 1. Primera etapa.

En la segunda fase, la placa va adquiriendo forma de bóveda debido a la presión del gas. Se encuentra justo antes de que el primer punto tome contacto con el molde.



Figura 2. Segunda etapa.

En la tercera fase, la placa comienza a entrar en contacto con el molde en su parte más central.



Figura 3. Tercera etapa.

De ahí, la placa comienza a adaptarse al resto del molde hasta las partes más críticas con mayor curvatura, como son las esquinas.

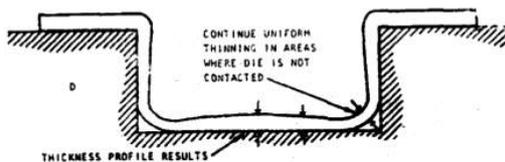


Figura 4. Cuarta etapa.

De entre todos los materiales que se comprobaron poseer propiedades de superplasticidad sólo algunas aleaciones de aluminio, titanio o níquel han encontrado realmente una aplicación práctica.

Dentro de la industria aeronáutica, el titanio se mantiene como material de principal uso en la fabricación mediante conformado superplástico. Su reducida densidad y alta resistencia específica, su elevada resistencia a fatiga y su libre afección de la corrosión, lo hacen idóneo para determinadas aplicaciones como álabes en ciertas etapas del compresor en el motor de reacción o para bordes de ataque.

Junto con el titanio como material base, se desarrollan muchas aleaciones combinándolo

con determinados elementos. La aleación de principal uso en la industria aeronáutica es la Ti-6Al-4V. Para este material con tamaño de grano entre 4 y 8 μm , se suelen usar temperaturas de entre 870° y 927° C, para conseguir el estado de superplasticidad [3].

Dado que este rango coincide con el propio para el proceso de soldadura por difusión, ambas técnicas se suelen combinar para dar lugar a ensamblajes más complejos en el que no es necesario el uso de remaches u otros elementos de unión para combinar diferentes partes.

Para obtener la soldadura por difusión, además de una temperatura específica, se necesita que ambas piezas estén fuertemente unidas, lo cual facilita dicho proceso, aumentando la superficie de contacto y evitando la formación de microhuecos.

A lo largo de la breve historia del SPF, diferentes grupos de investigación han desarrollado sus propios especímenes. Dichos especímenes están enfocados en pruebas simples capaces de poder ser comparados con códigos de elementos finitos a fin de testear sus propios modelos.

Los modelos más simples a la hora de realizar un ensayo de SPF, y los primeros en desarrollarse, consistieron en cáscaras esféricas. Con las cuales, es relativamente sencillo hacer un estudio de la evolución del conformado y obtener buenos resultados, así como su comprobación posterior mediante métodos numéricos. Así, J.H. Lee [4] propuso en 1998 un espécimen en forma de bóveda comenzando por un tramo recto, de forma que se realizaba una transición suave entre la parte con curvatura de la bóveda y el borde exterior plano.



Figura 5. Modelo propuesto por J.H. Lee [4].

K.S. Lee, en 1999, [5], propuso como modelo una cáscara cilíndrica cerrada. De esta forma, se tenían dos radios de curvaturas diferentes de órdenes de magnitud distintos, esto es, el radio de curvatura del cilindro de 50 mm de radio, y un radio de curvatura de transición entre el

cilindro y la tapa, un orden de magnitud inferior.

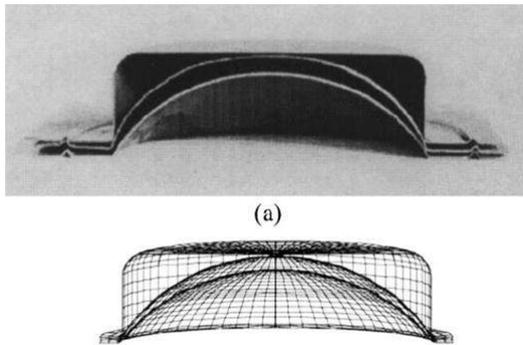


Figura 6. Modelo propuesto por K.S. Lee [5].

Los últimos modelos más recientes de especímenes creados para el estudio del SPF avanzan en complejidad, tratando de representar diferentes etapas a la vez que se consiguen una diversidad de radios de curvatura a los que se debe de adaptar una lámina de material superplástico. Así, modelos como el de Jun Liu [6], en 2013, divide el conformado en tres etapas en un modelo con dos escalones. Con ello se relaciona la presión aplicada con el grado de adaptación al molde del material, así como la distribución de espesores a lo largo de un corte, o la microestructura del propio material.



Figura 7. Modelo propuesto por Jun Liu [6].

De esta recopilación de algunos de los especímenes usados en la última década para el estudio del SPF y de sus parámetros fundamentales, se puede desprender la falta de un modelo común que permita la comparación de los resultados obtenidos por mano de diferentes actores.

En este contexto, se propone desarrollar una probeta experimental que sirva para estandarizar desde el punto de vista del producto, el rendimiento funcional del conformado superplástico (SPF), principalmente enfocado a elementos aeronáuticos.

2. Metodología Propuesta

La metodología se va a desarrollar de manera que se consiga, en primer término, el diseño estandarizado de una probeta apropiada para el estudio de aplicaciones aeroespaciales; y por otra parte, la estandarización de los ensayos que se ejecutan.

Así, de forma secuencial se detallan las diferentes etapas que se acometerán. Estas etapas las podemos dividir en cuatro bloques según se muestran en el siguiente diagrama y que se detallarán a continuación.

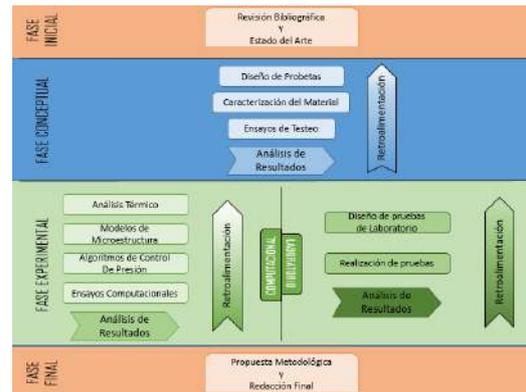


Figura 8. Diagrama de procesos.

Tras un bloque inicial, donde se hace una revisión completa de la evolución histórica y la situación actual de la técnica, se pasa a un segundo bloque de fase conceptual del trabajo.

Este segundo bloque se enfoca hacia un estudio analítico de las necesidades tanto de la industria aeronáutica como de los grupos de investigación en vistas a proponer soluciones de posibles probetas de ensayos.

El tercer bloque, el cual se puede considerar como el núcleo de todo el trabajo de investigación, trata de realizar una serie de análisis computacionales sobre las probetas seleccionadas de forma más minuciosa y detallada. De esta manera se pretende obtener una visión global de las características que definen el proceso de SPF y comprender la importancia de que detalle en el mismo. Como procedimiento general, se usará el programa comercial de elementos finitos ABAQUS, el cual permite un alto grado de adaptabilidad a los requerimientos de cada problema mediante el uso de subrutinas en FORTRAN que pueden interactuar directamente con el mismo software. Con este código de elementos finitos se realizarán una serie de ensayos computacionales en vistas a definir de forma precisa las características del ensayo estandarizado.

En un cuarto bloque se plantea abordar de manera experimental, haciendo uso de la infraestructura disponible en los laboratorios de

Ingeniería de Fabricación situados en la Escuela Superior de Ingeniería de la Universidad de Cádiz, los mismos ensayos realizados de forma computacional.

Por último, un quinto bloque estará dirigido a concretar el conjunto de resultados obtenidos en una metodología y probeta estandarizadas y plasmar todo el trabajo desarrollado en un texto final.

3. Objetivos

Siguiendo la metodología anteriormente descrita, se pretende lograr los siguientes objetivos:

- O1. Establecer las bases del conocimiento relativo a los procesos de conformado superplástico y de soldadura por difusión.
- O2. Establecer los requerimientos necesarios que se han de cumplir para caracterizar el material y los equipos implicados en el SPF.
- O3. Establecer las características geométricas que deben de prevalecer en el diseño de la probeta.
- O4. Establecer las características funcionales que debe cumplir la probeta con objetivo de conseguir su estandarización.
- O5. Desarrollar una serie de probetas que engloben dichas características geométricas y funcionales.
- O6. Comprobar la idoneidad de estas probetas ante ensayos simples.
- O7. Conocer la energía necesaria para mantener la temperatura de placa en el rango necesario, así como el ciclo energético a lo largo del proceso.
- O8. Estudiar los ciclos de presión que se aplican y su efecto sobre la muestra: geometría, tamaño de granos, etc...
- O9. Evaluar los ciclos de presión, a nivel de tiempo y costes energéticos requeridos.

4. Conclusiones

La Universidad de Cádiz, y en particular la Escuela Superior de Ingeniería, han desarrollado en los últimos años una importante labor investigadora. La proximidad de la industria aeronáutica y naval, hace que la Ingeniería de Fabricación sea uno de los pilares fundamentales de la investigación aplicada a la industria cercana.

El conformado superplástico es una técnica que se ha venido implementado en las últimas décadas, por parte de AIRBUS GROUP, en el Centro Bahía de Cádiz. Concretamente para la fabricación de bordes de ataque del Eurofighter Typhoon o el A-340, en configuración

monolítica. Su profundo conocimiento por parte de la comunidad universitaria investigadora puede suponer un gran respaldo a esta técnica de fabricación y a las empresas que la empleen, aportando un flujo de conocimiento entre ambas entidades que tenderá a enriquecerlas.

5. Referencias

- [1] C.E. Pearson. Viscous properties of extruded eutectic alloys of lead-tin and bismuth-tin. *J. Inst. Metals*, 54:111, 1934.
- [2] James F. Shackelford Joanna R. Groza. *Materials Processing Handbook*. Taylor and Francis Group, 2007.
- [3] Ghosh A.K. and Hamilton C.H. Superplastic forming and diffusion bonding of titanium alloys. *Defence Science Journal*, 36(2): 153-177, 1986.
- [4] J.H Lee, Y.J Song, D.H Shin, and C.S Lee. Microstructural evolution during superplastic bulge forming of Ti-6Al-4V alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 243(1-2):119 - 125, 1998.
- [5] K.S. Lee and H. Huh. Simulation of superplastic forming/diffusion bonding with finite-element analysis using the convective coordinate system. *Journal of Materials Processing Technology*, 89-90(0): 92-98, 1999.
- [6] Jun Liu, Ming-Jen Tan, Yingyot Aue-u lan, Meiling Guo, Sylvie Castagne, and Beng-Wah Chua. Superplastic-like forming of Ti-6Al-4V alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(5-8): 1097-1104, 2013.

Estudio Preliminar de la Influencia de los Parámetros de Fabricación en Piezas obtenidas mediante Técnicas FDM

A.P. Valerga⁽¹⁾, M. Batista⁽¹⁾, M. Marcos⁽¹⁾

⁽¹⁾Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, Universidad de Cádiz, C.P. 11519, Puerto Real, Cádiz, España, 696397303, anapilar.valergapuerta@alum.uca.es

Resumen

Un aspecto limitante de uno de los principales procesos de Fabricación Aditiva, el Modelado por Deposición Fundida (FDM), es la calidad superficial de las piezas producidas.

Se ha planteado la realización de probetas mediante esta tecnología modificando dos parámetros importantes en la fabricación: velocidad de avance y temperatura de extrusión. Se pretende analizar la repercusión de dichos parámetros en la calidad superficial y las desviaciones dimensionales que generan.

Estas desviaciones macro y microgeométricas se determinan como una función de los parámetros de proceso estudiados. Las ecuaciones que se presentan otorgan la tendencia de los resultados incluso fuera del rango de parámetros analizados.

1. Introducción

Las técnicas de Fabricación Aditiva (AM) han experimentado una gran expansión en los últimos años para satisfacer necesidades en gran variedad de campos, incluyendo algunos que están lejos de los puramente industriales. Esto significa que en muchos casos no se estudian estas técnicas tanto como sería deseable, especialmente cuando se utilizan para la producción de prototipos funcionales con especificaciones bien definidas [1-2].

En Fabricación Aditiva hay numerosos aspectos o condiciones que pueden afectar a la calidad de las piezas fabricadas [3-6]. En este sentido, además de la tecnología, máquina y material, se considera que hay otras condiciones que afectan a los resultados.

Por lo tanto, es necesario el estudio sobre los diferentes parámetros de fabricación y su influencia en las características finales de las piezas obtenidas, ya que estos afectan directamente a los resultados [7].

En este caso se ha seleccionado una técnica ampliamente extendida y de bajo coste como es el Modelado por Deposición Fundida o FDM, por ser una de las más utilizadas actualmente. FDM es una tecnología de prototipado rápido (RP) que surgió como una posibilidad de realización de productos a partir de modelos conceptuales o digitales, destinado a disminuir el tiempo de comercialización, un fuerte factor de competitividad. Produce formas complejas directamente a partir de modelo digitales, con

poco o ningún desperdicio de material y sin grandes limitaciones geométricas [8].

Un aspecto limitante del FDM es la calidad superficial de las piezas producidas [9-10]. Cabe destacar que en contadas investigaciones ha sido estudiada la repercusión de algún parámetro en la calidad final de las piezas obtenidas mediante esta técnica FDM. De esta manera, se encuentra la necesidad de ampliar las investigaciones referentes al tema, ya que actualmente no está destinada únicamente a la realización de prototipos, sino que cada vez más se utiliza para obtener piezas finales [3]. A pesar de ello, la calidad superficial o rugosidad ha sido estudiada principalmente atendiendo a la dirección de los filamentos depositados o la orientación o posición de la pieza en la plataforma [4, 9-12], así como, lógicamente, al espesor de capa utilizado.

En dicho trabajo se quiere conocer la influencia de algunos de los parámetros de fabricación en los resultados. Los parámetros evaluados o estudiados son la temperatura de extrusión, por ser el parámetro de mayor relevancia en dicha tecnología [7, 13]; y la velocidad de avance del cabezal, ya que es la que determina la tasa de fabricación o la productividad. Este último parámetro no es apenas mencionado en este tipo de proceso, y sin embargo se considera de gran relevancia [14].

En definitiva, este trabajo tiene como objetivo predecir la rugosidad de la superficie y las desviaciones dimensionales de piezas fabricadas mediante Modelado por Deposición Fundida

dependiendo de la temperatura y velocidad utilizadas. Los resultados obtenidos son exclusivos para el equipo y material utilizados. Sin embargo, la influencia de los parámetros en los resultados se estima que se mantiene. A pesar de ello, se plantea y se quiere realizar un estudio similar para otros materiales y máquinas similares.

2. Metodología Experimental

Se propone la fabricación de probetas para el estudio de la influencia de los parámetros mencionados en los resultados. Para ello, ya que no existen probetas normalizadas en estas tecnologías, se escoge una geometría sencilla: un cubo de 30 mm de arista. Las paredes planas permiten analizar con mayor facilidad la rugosidad, así como la dimensión entre las mismas.

Se propone la construcción de diferentes cubos, manteniendo todos los parámetros de fabricación constantes (Tabla I) a excepción de los anteriormente mencionados, la temperatura de extrusión y la velocidad de avance del cabezal o de fabricación. De esta manera, se utilizan los intervalos de velocidad recomendados por el fabricante de la máquina (3d Systems®) y la temperatura mínima de extrusión 5 grados superior a la de fusión del material. Los valores de estos intervalos se muestran en la Tabla II, y para la fabricación de las probetas se utiliza la combinación de todos ellos, obteniéndose 30 ensayos.

Tabla I. Parámetros constantes

Modelo máquina	CubeX
Material	PLA 1,7 mm
Temperatura ambiente	≈ 298 K
Densidad interna	16 %
Espesor de capa	0,25 mm
Diámetro extrusor	0,5 mm
Ventiladores	50 %
Velocidad de extrusión	15 mm/s

Tabla II. Parámetros variables

Temperatura de extrusión (K)	Velocidad del cabezal (mm/s)
458	20
473	22,5
488	25
503	27,5
518	30
533	-

Una vez fabricadas las piezas, se realiza un análisis preliminar de la calidad superficial obtenida y se caracterizan los errores o defectos típicos propios de esta tecnología mediante microscopía estereoscópica (SOM).

También se realizan mediciones dimensionales para analizar las posibles desviaciones en función de los parámetros propuestos.

Posteriormente, y con el empleo de un rugosímetro, se procede a obtener 3 mediciones por cada cara de la rugosidad, sin tener en cuenta la base apoyada directamente sobre la plataforma de construcción.

Además de la influencia de los parámetros estudiados como variables, con los resultados obtenidos se debe proponer los parámetros óptimos de fabricación. Se comprobará si dichos parámetros coinciden con los indicados por el fabricante de la máquina y el material escogidos

3. Resultados y Discusión

En primer lugar, se distingue la repercusión del aumento de la temperatura y la velocidad en el acabado de las piezas, tal y como se observa en alguna de las imágenes incluidas en la siguiente Figura 1.

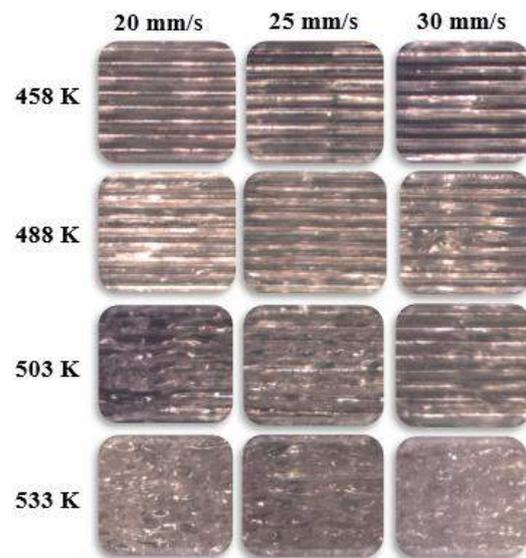


Figura 1. SOM. Repercusión de las variables en la calidad superficial aparente

En las imágenes se observa claramente como a medida que aumenta la temperatura, hay una menor distinción de los hilos depositados, quedando la superficie más fusionada o compacta.

La velocidad sin embargo, no afecta de igual modo al resultado obtenido. Mientras que para temperaturas bajas, la velocidad empeora aparentemente el acabado superficial, o al menos provoca la aparición de mayor cantidad de defectos, a temperaturas más elevadas (aproximadamente de 500 K en adelante), se mejora la calidad con un aumento de la velocidad. Esto puede tener la explicación de que al elevar la temperatura el filamento se encuentra más fluido y el inyector debe desplazarse más rápidamente para no

degradarlo. Otra conjetura puede ser que al mantener el cabezal a temperaturas elevadas más tiempo cercano al hilo depositado, favorece la fluidez y por tanto, la libre expansión del material.

Este comportamiento se observa en todas las caras, aunque se observa una mayor repercusión de la velocidad en la base superior que en las laterales debido a la proximidad en el tiempo de deposición de filamentos contiguos.

Una vez caracterizados los errores palpables a primera vista, se procede a obtener las longitudes entre superficies paralelas de cada cubo para comprobar las tolerancias dimensionales alcanzadas y como varían con la modificación de dichos parámetros.

En la siguiente Figura 2 se observan los planos de regresión de las medidas obtenidas para el ancho en X (amarillo), el ancho en Y (naranja) y la altura (azul). Estos representan la tendencia que tienen a tomar los valores dimensionales (D, en mm) dependiendo de la temperatura y velocidad escogidas.

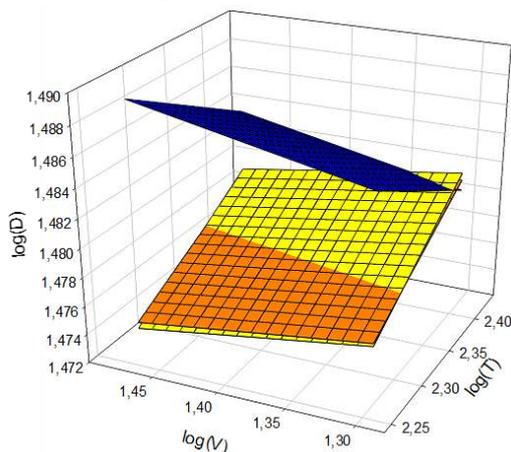


Figura 2. Representación de la tendencia de las desviaciones dimensionales en función de las variables utilizadas

Los valores correspondientes a la altura son considerablemente mayores que la anchura de la pieza, y siempre igual o superiores al valor nominal indicado en el modelo.

Por otro lado, en las siguientes Ecuaciones 1 y 2, se comprueba que un aumento en la temperatura incrementa el valor dimensional en XY (ancho pieza), mientras que disminuye el valor en Z (altura pieza), sin embargo un aumento en la velocidad provoca lo opuesto en cada caso.

$$D(T, V) = x^{0,035} \cdot y^{-0,013} \cdot 10^{1,405} \quad (1)$$

$$D(T, V) = x^{-0,036} \cdot y^{0,018} \cdot 10^{1,545} \quad (2)$$

De estos resultados puede interpretarse que al elevar la temperatura se incrementa la fluidez del material, lo cual provoca que en cada capa

este se expanda en mayor medida. Esto origina un aumento de las dimensiones correspondientes al ancho y a su vez la reducción del espesor de cada capa y por tanto de la altura final de la pieza. Por el contrario, una reducción de la velocidad provoca que el cabezal tarde más tiempo en desplazarse, lo cual induce a que el calor tarde más tiempo en disiparse, y por tanto el material tarde más tiempo en solidificar.

Cuando se procede a analizar la calidad superficial en términos de Ra en las caras, se comprueba la similitud de los resultados en las paredes laterales, tal y como se preveía mediante SOM. En la siguiente Figura 3 se observan los planos de regresión que definen el valor de Ra en función de los parámetros utilizados.

En dicha gráfica quedan representadas la tendencia de las medidas de rugosidad en términos de Ra (μm) obtenidas en función de las distintas temperaturas y velocidades utilizadas. La figura abarca los 5 planos de regresión correspondientes a las 4 caras laterales y la base superior del cubo (verde).

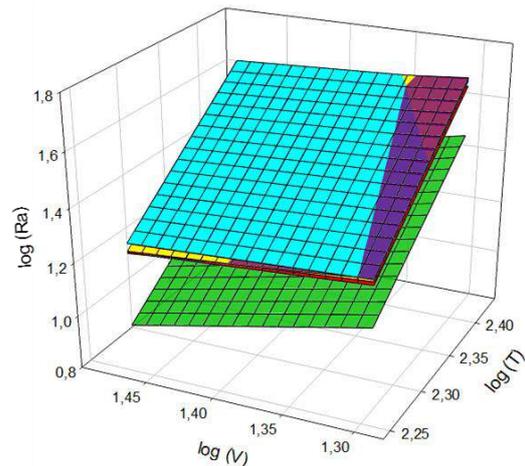


Figura 3. Representación de la tendencia de Ra en función de las variables utilizadas

La ecuación que define los 4 planos de regresión correspondiente a los laterales del cubo aproximadamente coincide con la Ecuación (3). La Ecuación (4) corresponde con el plano o base superior del cubo.

$$Ra(T, V) = x^{2,83} \cdot y^{-0,39} \cdot 10^{-4,65} \quad (3)$$

$$Ra(T, V) = x^{2,58} \cdot y^{-1,05} \cdot 10^{-3,38} \quad (4)$$

Estas ecuaciones predicen la rugosidad de una superficie plana ya sea paralela o perpendicular a la dirección del desplazamiento del cabezal. A pesar de que no predice la calidad superficial de cualquier orientación, otorgan una idea preliminar de la influencia de los parámetros usados en los resultados. De esta manera, se

observa que para un aumento de la temperatura se obtienen un incremento en el valor de rugosidad. Sin embargo, para un aumento de la velocidad, se observa una disminución de Ra.

4. Conclusiones

Se ha desarrollado una metodología para el estudio de la influencia de ciertas variables en el proceso FDM. Con dicha metodología se propone un modelo que permite conocer la rugosidad alcanzable y la tendencia de la aparición de desviaciones dimensionales dependiendo de algunas variables del proceso. De esta manera, según las restricciones que presente el objeto deberán seleccionarse unos parámetros u otros.

En la fase de desarrollo del producto, este modelo es útil para cumplir con las especificaciones de diseño. Además, en la planificación del proceso se puede aplicar un aumento de la velocidad de fabricación como una buena estrategia de fabricación. Este es un aspecto no considerado en publicaciones anteriores y de gran importancia en la productividad.

En el caso de las desviaciones dimensionales, hay muchas condiciones que intervienen en los resultados, sin reducirse a los parámetros y los errores del control numérico. De este modo, hay que realizar controles más exhaustivos de la planitud de la mesa, de los posibles cambios o interferencias ambientales, etc, ya que afectan de manera más significativa que los propios parámetros.

El modelo predictivo deberá ser comprobado en otras máquinas y materiales ya que, además de los parámetros del proceso, la máquina y las propiedades del material son muy diferentes. Por lo tanto, puede confirmarse la influencia de los parámetros estudiados en fabricación mediante FDM, pero no se mantendrán los resultados en otros materiales y máquinas.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha contado con el apoyo financiero de la Unión Europea (FEDER / FSE) y por la Junta de Andalucía (Proyecto COSSTA). Los autores quieren dar las gracias a la Universidad de Cádiz (España) por el apoyo y las facilidades dadas en la fase experimental de este trabajo.

6. Referencias

[1] S. M. Peltola, F. P. W. Melchels, D. W. Grijpma, A review of rapid prototyping techniques for tissue engineering purposes, *Annals of Medicine* 40 (4) (2008) 268 - 280.

- [2] B. N. Turner, R. Strong, S. A. Gold, A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling, *Rapid Prototyping Journal*, 20 (3) (2014) 192 - 204.
- [3] H. Singh, F. Rayegani. Cost Optimization of FDM Additive Manufactured parts. *Proceedings ASME 2014, Quebec, Canada*, 2014.
- [4] D. Ahna, J-H. Kweona, S. Kwonb, J. Songb, S. Lee, Representation of surface roughness in fused deposition modeling, *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (2009) 5593 – 5600.
- [5] Q. Sun, G. M. Rizvi, C. T. Bellehumeur, Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments, *Rapid Prototyping Journal*, 14 (2) (2008) 72 - 80.
- [6] A. Armillotta, Assessment of surface quality on textured FDM prototypes, *Rapid Prototyping Journal*, 12 (1) (2006) 35 - 41.
- [7] R. Y. Jiang, Y. H. Gu, Controlling parameters for polymer melting and extrusion in FDM, *12th Grinding and Machining Conference, Kunming, China*, 2003.
- [8] C. W. Ziemian, P. M. Crown, Computer aided decision support for fused deposition modeling, *Rapid Prototyping Journal*, 7 (3) (2001) 138 - 147.
- [9] A. Boschetto, V. Giordano, F. Veniali, 3D roughness profile model in fused deposition modelling, *Rapid Prototyping Journal*, 19/4 (2013) 240 - 252.
- [10] A. Cupar, V. Pogačar, Z. Stjepanović, Shape Verification of Fused Deposition Modelling 3D Prints, *International Journal of Information and Computer Science*, 4 (2015) 1-8.
- [11] J. Zaragoza, H. Medellín, Design for Rapid Prototyping, *Manufacturing and tooling: Guidelines. Proceedings ASME 2014, Quebec, Canada*, 2014.
- [12] R. D. Farahani, K. Chizari, D. Therriault, Three-dimensional printing of freeform helical microstructures: a review, *Nanoscale*, 6 (2014) 10470 – 10485.
- [13] A. Boschetto, L. Bottini, Triangular mesh offset aiming to enhance Fused Deposition Modeling accuracy, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80 (2015) 99 - 111.
- [14] G. P. Kumar, S. P. Regalla, Optimization of Support Material and Build Time in Fused Deposition Modeling (FDM), *Mechanical and Aerospace Engineering*, 110 (2012) 2245 – 2251.

Fabricación Fractal: Complejidad y variedad requerida en el mecanizado sostenible

María Estela Peralta Álvarez ⁽¹⁾, Mariano Marcos Bárcena⁽²⁾, Francisco Aguayo González⁽³⁾
^(1,3) Departamento de Ingeniería del Diseño, Universidad de Sevilla, Escuela Politécnica Superior, C/Virgen de África, 7 14011 Sevilla.

⁽²⁾ Dpto de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, Escuela Superior de Ingeniería, Avda. de la Universidad de Cádiz, 10. E-11519 Puerto Real, Cádiz.

Resumen

Integrar el conocimiento de fabricación convencional con los nuevos enfoques de la sostenibilidad integral desde la perspectiva de la Triple Bottom Line supone un gran reto para las organizaciones. Existen avances en esta línea de investigación, aunque los mismos resultan muy generales (propuesta de estrategias, objetivos y metodologías cualitativas) y si son detallados la mayoría introducen complejas relaciones bidimensionales de la sostenibilidad siendo todavía el eje central de desarrollo la dimensión económica. Este trabajo presenta los diferentes avances realizados sobre un modelo de FABRICACIÓN FRACTAL SOSTENIBLE como estrategia para la reducción de la complejidad y la búsqueda de la sostenibilidad requerida en los procesos de mecanizado.

1. Introducción

Las actividades industriales han sido concebidas bajo un sistema abierto en materia y energía de flujo lineal, lo que en el último siglo ha provocado un elevado impacto ambiental, social y económico (gasto de recursos energéticos y materiales, degradación ambiental, pérdida de biodiversidad, reducción de la salud de la población, minimización de bienestar y calidad de vida). Las actuaciones que se han llevado a cabo hasta el momento para mitigar la situación, han determinado un incremento en la complejidad de diseño y gestión de los procesos de fabricación y una falta de integración desde la perspectiva del ciclo de vida. Es necesario crear nuevos modelos que reduzcan esta complejidad y permitan organizar los procesos de fabricación para fomentar la sostenibilidad, manteniendo la viabilidad técnica, económica y de calidad alcanzada hasta el momento.

El paradigma de fabricación fractal [1]–[3] en atención a la gestión de variedad por recursividad constrictiva y expansiva, es el más adecuado para dar respuesta al conjunto de aspectos que podrían permitir el alcance de la variedad requerida bajo mínima complejidad en atención a la fabricación sostenible. El objetivo es utilizar la fabricación fractal [4] como marco para la **planificación, diseño, modelado, simulación, optimización, análisis y gestión de procesos de fabricación** en analogía con las diferentes formas de organización fractal, que a través del ajuste de la granularidad de las funciones, características o principios que las

forman, consiguen una condición evolutivamente estable ante la presión del contexto o medio en que operan las empresas que soportan estos sistemas de fabricación, convirtiendo su interacción neutra con el ambiente, es decir, en una triple cuenta de resultados sostenibles en lo económico, social y ambiental.

2. Estado del arte de la fabricación fractal

Los sistemas inteligentes integran la siguiente generación de sistemas de fabricación (SGSF) para Industria 4.0 en la que se establecen las bases teóricas para concebir sistemas de fabricación distribuidos (lógica o geográficamente), virtuales y extendidos, formados por unidades autónomas, autorreguladas e integradas, todo lo cual constituye el paradigma de la fabricación distribuida. Es en esta última donde emerge y se asienta el paradigma inteligente de la fabricación fractal.

Los primeros sistemas de fabricación fractal surgen como solución de la complejidad de organización de los sistemas de fabricación inteligentes en las organizaciones, que deben incorporar un conjunto de información muy elevada y gestionar gran número de unidades para poder ser desarrollados con éxito adaptándose a la dimensión caótica del mercado. Son considerados sistemas de fabricación inteligentes, y permiten obtener una mayor eficiencia en la incorporación de valor a los productos bajo mínima variedad y gestión de

la complejidad. La primera aportación fue realizada por Warnecke, 1993 [3], con el desarrollo de “The Fractal Company”, donde describe la configuración de las nuevas concepciones para las empresas de fabricación del futuro a partir de la analogía de su organización con un sistema fractal. Warnecke establece una inspiración analógica de las formas fractales de objetos formales y naturales al resultar las mismas evolutivamente estables a la presión del medio o ecosistema al que pertenecen siendo los elementos de la analogía los siguientes: objeto fractal = organización, empresa, planta de fabricación; ecosistema = mercado; competencia = globalización) [4], [5]. En el presente trabajo, la metodología propuesta partirá de las ideas de Warnecke y otras investigaciones desarrolladas desde 1993 [3] con el objetivo de mejorar las aportaciones y llevarlas al ámbito de conocimiento de la sostenibilidad.

2.1. Propiedades de los objetos fractales

El concepto de fractal fue desarrollado por el matemático Benoit Mandelbrot en los años 70 y lo describió como punto fijo de conjunto de aplicaciones contractivas. A partir de este momento, una variedad de definiciones se han propuesto, siendo la siguiente *producto final que se obtiene a través de la iteración infinita de un proceso geométrico (elemental, variedad mínima)* la que mejor define un sistema de fabricación fractal y a la que se le añaden tres dimensiones características junto con los principios que las rigen para su transposición a los procesos de fabricación fractal sostenibles: fractal como **objeto formal** (autosimilaridad con estructura patrón e invarianza escalar), **como objeto natural** (orientación a objetivo, auto-optimización y dinamismo) y **como objeto informacional** (sistemas abiertos no lineales con datos encapsulados en su estructura co-evolutiva).

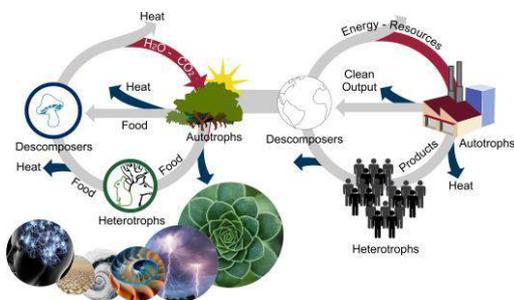


Figura 1. Analogía fractal natural-industrial

Estos niveles, características y los principios descritos servirán para establecer la analogía, el proceso de transposición y un conjunto de meta-principios que estructuran la propuesta de metodología de procesos de fabricación fractal sostenibles.

4. Modelo fractal para la fabricación sostenible

La metodología tiene el objetivo de concebir sistemas de fabricación fractales sostenibles bajo un conjunto de meta-principios de diseño, los cuales son descritos a continuación y permitirán determinar la sostenibilidad requerida de la fabricación.

I. Principio de organización de fabricación fractal: fractalidad requerida para organizar objetos y procedimientos deterministas en forma de procesos fractales que determinen la adaptación a la dinámica caótica del mercado

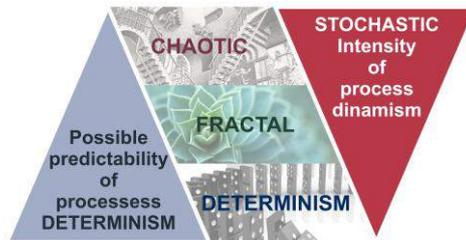


Figura 2. Fractal como interfaz

II. Principio de organización derivada de la variedad o fractalidad requerida. Incluirá las propiedades organizacionales del sistema de fabricación fractal



Figura 3. Principios de organización fractal

III. Perspectiva de la ingeniería de fractalidad del ciclo de vida de fabricación sostenible: integración de la perspectiva social, económica y ambiental en los fractales de fabricación y en la ingeniería del ciclo de vida desde la perspectiva de la variedad requerida (mínima complejidad) con filtros y amplificadores de variedad

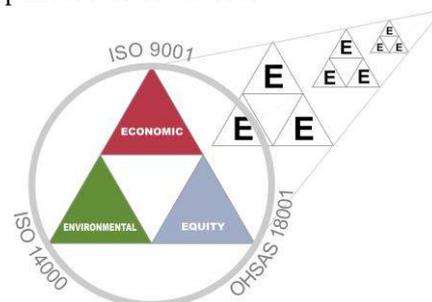


Figura 4. Fractalidad de la sostenibilidad

IV. Niveles de fabricación fractal sostenible: Estructura el sistema fractal en diferentes niveles con el objetivo de trasladar y conseguir el desarrollo sostenible de forma similar y eficiente: nivel Macro (cadena del valor integrada de proveedores y clientes); meso (planta industrial y organización del proceso de fabricación); micro y nano: proceso, máquina y estrategia de trabajo.

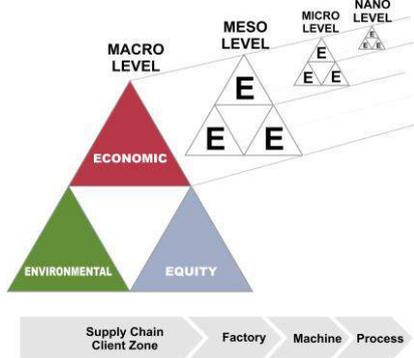


Figura 5. Principios de organización fractal

3. Caso de estudio

En este apartado se ilustra un ejemplo de mecanizado fractal sostenible. La estructura no está cerrada, representando en este caso de estudio solo el sistemas de mecanizado fractal sostenible como objeto **formal e informacional**. Se divide en tres niveles MACRONIVEL (o cadena de proveedores), MESONIVEL (organización, planta de fabricación) y MICRONIVEL (procesos de

fabricación); dicho patrón se repite para crear el principio de la autosimilaridad en la arquitectura de información del sistema.

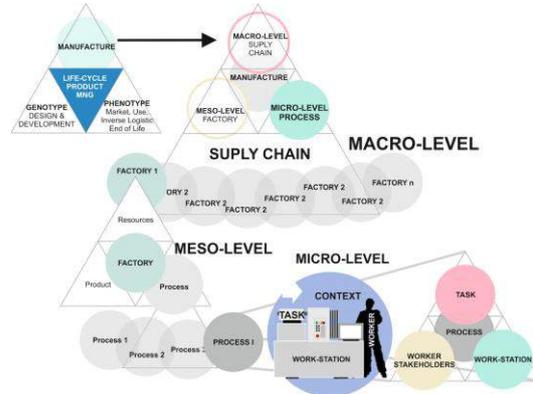


Figura 6. Macro, Meso y Micro nivel en fabricación fractal

El micronivel, donde estarán situados los procesos de mecanizado, está compuesto por tres elementos: estación de trabajo, trabajador y tarea. Su representación fractal se muestra en las figuras 6, 7 y 8. Cada uno de estos fractales, estará compuesto de otro conjunto de tres fractales que serán desplegados a su vez en nivel macro, meso y micro, cumpliendo así con el patrón de repetición definido. Finalmente, cada fractal tendrá a su vez un conjunto de resultados de eficiencia ambiental, social y económica que permitirán calcular el desempeño ambiental y optimizar la sostenibilidad requerida del proceso.

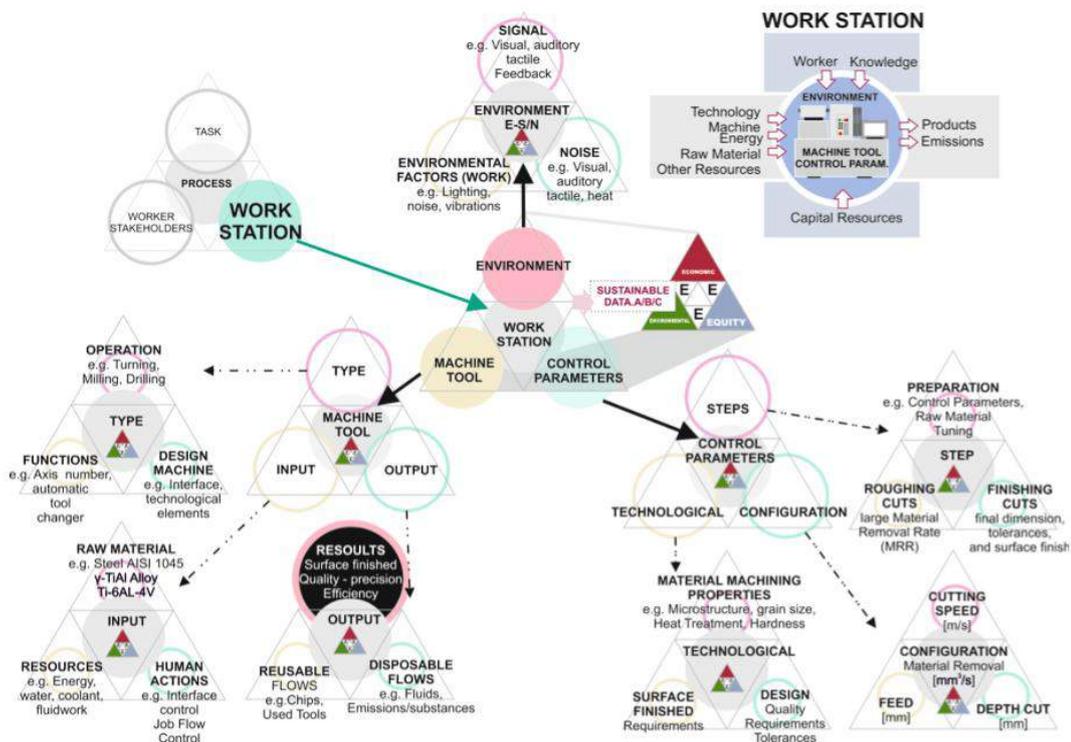


Figura 7 Arquitectura informacional de fractal de máquina

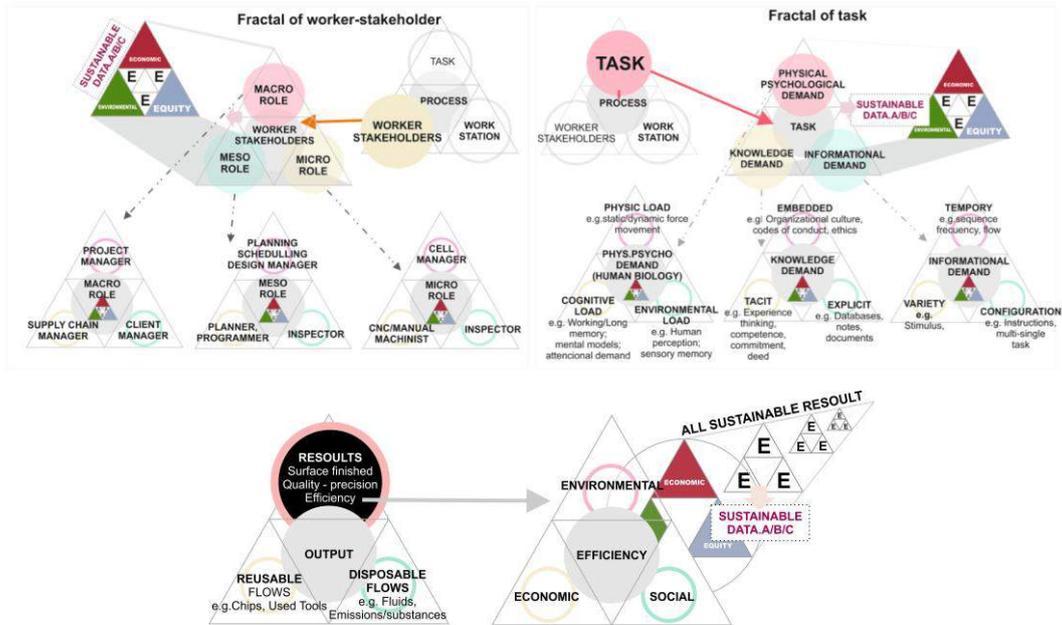


Figura 8 Arquitectura informacional de fractal de trabajadores (superior izq), fractal de tarea (superior derecha). Fractal de resultados (inferior)

Para ilustrar una de las unidades fractales se escoge el **fractal informacional de estación de trabajo** mostrado en la figura 5; se divide en tres niveles: (1) **la máquina herramienta** (toda la información relacionada con el tipo de operación, - fresado, torneado, etc.-, los flujos de entrada – materia prima, energía, fluidos de corte, etc.-, y las salidas – flujos de emisiones, residuos y el producto o pieza resultante); (2) **el contexto o ambiente** (toda la información referida factores ambientales (como ruido, iluminación, vibraciones, olores, etc), información relevante para la tarea (señales) e interferencias o información no relevante proveniente del ambiente de trabajo contiguo, de la máquina, o cualquier otra fuente); (3) **los parámetros de mecanizado**, de control del proceso, fases de la fabricación, propiedades de acabado y configuración de la máquina.

Cada unidad fractal genera la información referente al resultado sostenible 3E, es decir, los resultados estarán integrados en el fractal de la sostenibilidad que muestra la parte inferior de la figura 8

4. Conclusiones

En el momento de la planificación, gestión y ejecución de proyectos de fabricación sostenibles, es necesario integrar un conjunto de parámetros específicos que se relacionan con la fase de diseño y desarrollo de productos, la tecnología, el sistema de fabricación como las regulaciones gubernamentales, las nuevas técnicas disponibles, límites del planeta y sus ecosistemas, los patrones recientes de producción más limpia y el consumo

responsable, teniendo en cuenta al mismo tiempo las necesidades del usuario o cliente y la viabilidad técnica y soluciones económicas. Por lo tanto las tres dimensiones de sostenibilidad (ambiental, económica y equidad) deben tenerse en cuenta de manera equilibrada para lograr los resultados más eficientes, que realizan un mejor uso de los recursos y la reducción de los impactos sobre el medio ambiente y sus componentes. Esto significa una alta complejidad en la organización de la fase de fabricación, que se debe gestionar desde nuevos modelos, siendo el paradigma fractal una oportunidad para la integración de la sostenibilidad en la fabricación.

5. Referencias

- [1] A. Attar and L. Kulkarni, "Fractal Manufacturing System–Intelligent Control of Mnf Industry," *Int. J. Eng. Dev. Res.*, 2:2 (2014) 1814–1816
- [2] P. Fingar, "Fractal Enterprise Architecture and Agent-Oriented BPM," *A BPTrends*, (2010), pp. 1–6
- [3] H.J. Warnecke, *The Fractal Company: A Revolution in Corporate Culture*. 1993.
- [4] F.Aguayo-González, M. Marcos-Bárcena, et al., *Sistemas Avanzados de Fabricación Distribuida*. Ra-Ma, 2007.
- [5] ME. Peralta-Alvarez, M. Marcos-Bárcena, and F. Aguayo-González, "Sostenibilidad en la Mnf industrial: Horizonte 2020 para los sistemas de Mnf inteligente," in *V Jornadas Predoctorales*, 2013, pp. 11–14

Investigación de enfoques bioinspirados en los sistemas de fabricación Ecoholónica

María Jesús Ávila Gutiérrez⁽¹⁾, Francisco Aguayo González⁽¹⁾, Mariano Marcos Bárcena

⁽¹⁾Ingeniería del Diseño, C/ Virgen de África n.7, 41011, Sevilla, 954552826

mavila@us.es

⁽²⁾Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, Avda. Universidad de Cádiz n.10, Campus Universitario de Puerto Real, 11519, Cádiz, mariano.marcos@uca.es

Resumen

El incremento de la complejidad de los procesos de fabricación, su carácter distribuido y el uso de las TIC y tecnologías inteligentes, ha determinado que nos debamos de plantear nuevas herramientas con carácter bioinspirado que intenten reconectar los sistemas técnicos con la naturaleza. En el presente trabajo se pretende establecer el estado del arte sobre la ingeniería bioinspirada hacia el diseño de procesos de fabricación sostenibles para su proyección en la ingeniería del ciclo de vida de sistemas de fabricación y complejos de producción industrial que permita concebirlos como naturaleza.

1. Introducción

El estudio de los seres vivos, el entorno que les rodea y los ecosistemas ha sido durante mucho tiempo ejemplo y fuente de inspiración para muchos investigadores desde las formas microscópicas hasta el complejo comportamiento de individuos, grupos y comunidades. No solo ha servido de inspiración sino que las características de sus estructuras y materiales, la eficiencia de sus procesos, el aprovechamiento de sus recursos o la optimización de sus funciones, ha sido objeto de análisis para tratar de conseguir su copia y simulación, orientadas hacia el futuro de nuevas fuentes de energía, sistemas de fabricación sensibles e inteligentes, robótica avanzada y productos innovadores. La naturaleza continuamente ha evolucionado y resuelto situaciones de eliminación y nuevo paso de individuos de una manera sostenible y efectiva, durante millones de años. Las estrategias de mutación, emergencia, recombinación, derivación, simbiosis o mutualismo, dan desde la naturaleza ideas para transformar los sistemas técnicos, manifestando nuevas soluciones, combinando y reordenando las ya existentes, alterando su entorno o condiciones de uso o creando alianzas y cooperación.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo para conducir la ingeniería bioinspirada hacia el diseño de procesos de fabricación sostenibles. Para ello utilizaremos el proceso de razonamiento analógico presentado en la Figura 1, con la existencia de dos dominios: el dominio biológico y el dominio técnico. El dominio

biológico es analizado para obtener la base de conocimiento de los sistemas biológicos. Esta base nos servirá para hacer la trasposición de conocimiento hacia los sistemas técnicos que en este caso es el de los sistemas de fabricación.

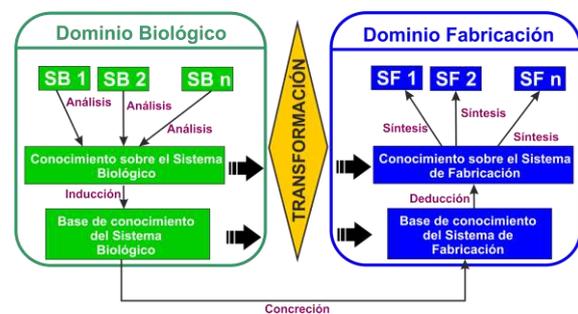


Figura 1. Modelo de diseño Bioinspirado

Para realizar la transformación entre ambos dominios necesitamos conocer el estado del arte de los enfoques bioinspirados en los sistemas de fabricación, por lo que propondremos un método de revisión para conocer en que situación se encuentra.

2. Metodología de revisión de los enfoques bioinspirados

Para la revisión sobre los enfoques bioinspirados, se va a realizar una búsqueda a través de bases de datos multidisciplinares y especializadas con el fin de identificar la producción de trabajos para un período 1990-2015 a nivel de artículos científicos relacionados con temáticas de fabricación bioinspirada desde su perspectiva conceptual en algunas disciplinas. Este proceso pretende:

- Determinar a través de una revisión conceptual sobre sistemas de fabricación bioinspirados, la evolución del tema desde la perspectiva teórica en las distintas disciplinas.
- Establecer un marco de referencia dentro del cual han sido contextualizados en los últimos años los conceptos asociados a fabricación bioinspirada, tales como Fabricación Bioinspirada en la Cadena de Valor (nivel macro), Fabricación Bioinspirada en las Empresas (nivel meso) y Fabricación Bioinspirada en los Sistemas de Fabricación (nivel micro).
- Determinar los distintos campos de aplicación en los cuales se desarrolla la investigación asociada a procesos de fabricación biológicos.

La metodología general para la revisión bibliográfica se presenta en la Figura 2. Esta investigación tiene como fuente de información las diferentes bases de datos disponibles a través del Sistema de Bibliotecas de la Universidad de Sevilla. A partir de estas bases de datos, se procedió a seleccionar aquellas acordes al objeto de estudio, teniendo en cuenta tres características básicas:

- Pertinencia temática, es decir, el contexto de los temas abordados para la investigación.
- Acceso a resultados: teniendo únicamente en cuenta las bases de datos que permiten el acceso a los documentos de manera completa (descarga de artículos) o parcial (abstract).
- Disponibilidad para tratamiento y exportación de referencias bibliográficas con el uso de Mendeley.

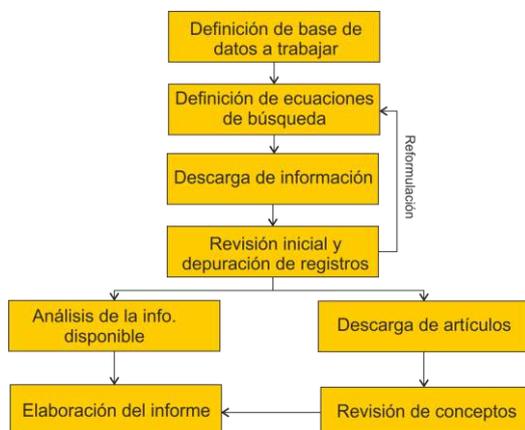


Figura 2. Metodología de revisión de enfoques bioinspirados

3. Análisis preliminar de la información

Como estudio previo al análisis de la información sobre los enfoques bioinspirados y su aplicación a los sistemas de fabricación, se ha hecho un análisis de las revistas más relevantes que contienen el tema. En la Figura 3 podemos ver una clasificación de las mismas.

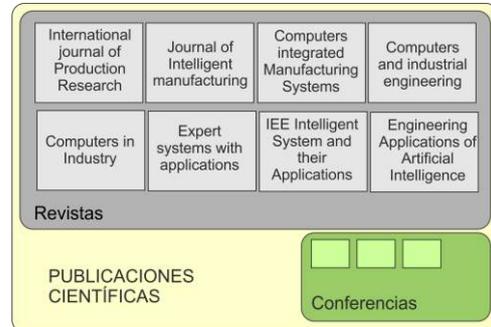


Figura 3. Clasificación de revistas relevantes que contienen información sobre enfoques bioinspirados y su aplicación a los sistemas de fabricación.

Del análisis de información disponible en las distintas fuentes consultadas, sobre los sistemas de fabricación bioinspirados, se puede observar cómo muchos de los autores citados en este documento han desarrollado conceptos tales como sistemas biológicos de fabricación, fabricación biónica y fabricación inteligente. Entre los autores más representativos, podemos encontrar:

- Ueda, Fujii, Ohkura, Vaario y Hatono con el modelado de organismos vivos para los sistemas biológicos de fabricación [1,2].
- Tharumarajah, Wells y Nemes con una comparación de los conceptos de fabricación emergentes: fractal, biónicos y holónicos [3].
- Maione y Naso con estudios sobre Agentes inteligentes autónomos, en sistemas heterárquicos de fabricación [4].
- Ren, Leitao, Cheraghi estableciendo modelos inspirados en la auto-organización para dar a los sistemas de fabricación capacidad de adaptación al ambiente [5,6,7].
- Leitao, Barbosa, y Trentesaux recopilando aplicaciones de los elementos biológicos para resolver problemas complejos de ingeniería [8].

Existen diferentes ámbitos de aplicación de los elementos biológicos y entre ellos podemos encontrar referencias de autores en el área de las redes de comunicación, control, finanza, diseño

de hardware, procesamiento de imagen, medicina, militar, energía, robótica, redes de sensores, control de tráfico y sistemas de fabricación entre otras [8].

Los sistemas de fabricación son uno de los ámbitos de aplicación de los sistemas biológicos y dentro de los sistemas de fabricación bioinspirados encontramos varias características tales como:

- **Auto-organización (Self-organization):** se refiere a sistemas que necesitan poca supervisión y control, poseen módulos independientes y autónomos que cooperan de manera inteligente para adaptarse rápidamente a las variaciones del entorno [9].
- **Agilidad** habilidad para trabajar en un ambiente impredecible. A esta característica se asocian atributos como la reactividad, adaptabilidad, robustez y la transformación del conocimiento [10].
- **Complejidad** de fabricación como un elemento característico del sistema que integra varios aspectos fundamentales del entorno [11].
- **Autoconfiguración**, la capacidad de adaptarse dinámicamente a las condiciones cambiantes mediante la adición, eliminación o modificación de entidades, sin interrumpir la producción [12].
- **Auto-sanación (Self-healing)** que permite diagnosticar desviaciones debidas a condiciones inesperadas y actuar de forma proactiva para normalizarlas estas desviaciones.
- **Flexibilidad**, la capacidad de un sistema para responder a posibles cambios internos o externos. La flexibilidad de un sistema es la facilidad con la que este responde a la incertidumbre [13].

Estas características expuestas determinan el interés de disponer de Arquitecturas de Referencia Integradas concebidas con la variedad requerida y los mecanismos de su gestión para adaptarse al medio ambiente en el que opera.

Se propone por tanto una Arquitectura de Referencia para la integración de sistemas de fabricación bajo el paradigma holónico. Esta arquitectura abierta Ecoholónica es resultado de estudios previos a este trabajo y se puede ver en la Figura 4.

El modelo propuesto está compuesto de distintas vistas holárquicas que a su vez están

formadas por holones u otras organizaciones holónicas de menor tamaño. Cada holón es una unidad organizacional autónoma que ejecuta aquellos procesos para los cuales es más competente. Los holones cooperan entre sí a fin de que se ejecuten todos los procesos que son necesarios para producir los productos y/o prestar los servicios que le han sido encomendados. A efectos de modelado, esta arquitectura Ecoholónica queda caracterizada en las siguientes dimensiones y niveles:

- Holarquía de nivel N+1:** define el DOMINIO COLABORATIVO y los requerimientos holónicos.
- Holón de nivel N:** actúa como interfaz de adaptación de la variedad holónica entre los niveles n-1 y n+1.
- Holarquía de nivel N-1:** define el DOMINIO COOPERATIVO y la competencia o capacidades holónicas.

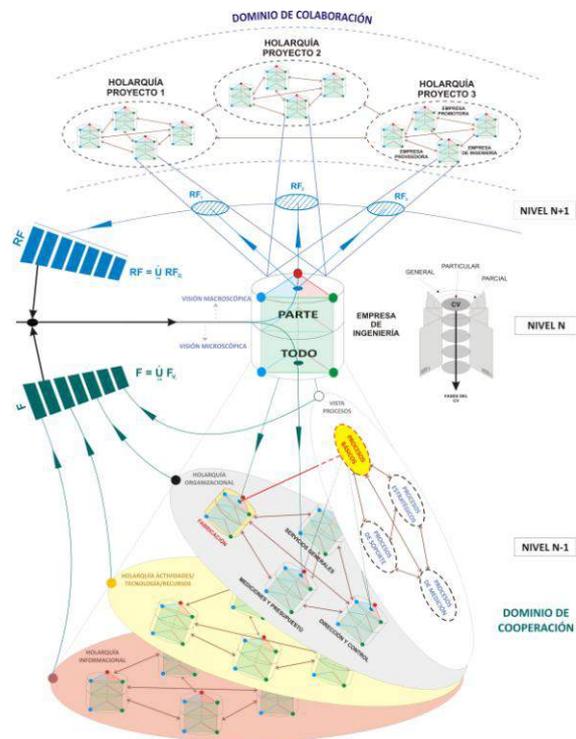


Figura 4. Arquitectura Abierta Ecoholónica

Cada una de las holarquías de la Arquitectura anterior se corresponde con un nivel diferente que será estudiado para encontrar los enfoques bioinspirados de los mismos. Estos niveles son:

- **Nivel Macro** (holarquía N+1) asociado a la Cadena de Suministro bioinspirada [14].
- **Nivel Meso** (Holarquía N) asociada a la empresa bioinspirada [15,16].
- **Nivel Micro** (Holarquía N-1) asociada a los sistemas de fabricación

bioinspirados. Podemos encontrar referencias en el ámbito del ensamblado-desensamblado [17], la distribución en planta [18], la planificación y programación [19,20] y el control de la producción entre otras [21].

4. Conclusiones

Observando el funcionamiento de un sistema natural maduro en equilibrio podemos descubrir algunos rasgos que nos pueden ayudar a comprender a los sistemas industriales. De esta forma, con este trabajo se pretende establecer una relación de analogía entre los sistemas naturales e industriales, posibilitando el diseño y gestión de sistemas de fabricación como naturaleza sin solución de continuidad.

5. Referencias

- [1] K. Ueda, J. Vaario y K. Ohkura, Modelling of biological manufacturing systems for dynamic reconfiguration, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 46 (1997) 343-372.
- [2] K. Ueda, T. Kito, y N. Fujii, Modeling Biological Manufacturing Systems with Bounded-Rational Agents, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 55 (2006) 469-472.
- [3] A. Tharumarajah, A. Wells y L. Nemes, Comparison of emerging manufacturing concepts, Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 1998.
- [4] G. Maione y D. Naso, Modelling adaptive multi-agent manufacturing control with discrete event system formalism, *International Journal of Systems Science*. 35 (2004) 591-614.
- [5] S. Ren, W. Liu, Z. Liu y J. Dong, Self-organization-basic model for advanced manufacturing systems, *Journal of Tsinghua University*. 39 (1999) 87-90.
- [6] P. Leitao y F. Restivo, A holonic approach to dynamic manufacturing scheduling, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*. 24(2008) 625-634.
- [7] S.H. Cheraghi, R.R. Sheelavant y W. Liu, Adaptive process planning in discrete parts manufacturing environment, IIE Annual Conference and Exhibition, 2004.
- [8] J. Barbosa. Self-organized and evolvable holonic architecture for manufacturing control, Tesis Doctoral, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambresis, 2015.
- [9] N. Fernandez, C. Maldonado y C. Gershenson, Information Measures of Complexity, Emergence, Self-organization, Homeostasis, and Autopoiesis, *Guided Self-Organization*. (2014) 1-35.
- [10] K. Hon, Performance and Evaluation of Manufacturing Systems, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 54 (2005) 139-154.
- [11] A. Calinescu, J. Efstathiou y L. Huatucu, Classes of complexity in manufacturing, Proc. National Conf. Manufacturing. Research, UK, 2001.
- [12] P. Leitao, J. Barbosa y D. Trentesaux, Bio-inspired multi-agent systems for reconfigurable manufacturing systems, *Engineering applications of artificial intelligence*, 25(2012) 934-944.
- [13] A. Gola y A. Swic, Directions for manufacturing system's evolution from the flexibility level point of view, Doc. Internet, URL http://www.ptzp.org.pl/files/konferencje/kzz/artyk_pdf_2012/e021.pdf (última consulta: 2015/11/1)
- [14] W. Jianhua y X. Huang, A hybrid genetic algorithm for agile supply chain scheduling optimization, Proc. 2nd International Conference on Future Computer and Communication (ICFCC), 2010.
- [15] L. Montoya y O. Castellanos, Características de una aproximación biológica para el estudio de mecanismos de integración empresarial, XIV Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Administrativas-Monterrey, 2010.
- [16] L. A. Rivas, Nuevas formas de organización, *Estudios Gerenciales*, 18 (2002) 13-45.
- [17] H. Lv y L. Cong, A discrete particle swarm optimization algorithm for assembly sequence planning, Proc. 8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety, 2009.
- [18] S. Ohmori, Y. Kazuho y O. Kenshu, Solving Facility Layout Problem via Particle Swarm Optimization, Proc. 3rd International Joint Conference on Computational Science and Optimization, 2010.
- [19] N. Zbib, C. Pach, Y. Sallez, y D. Trentesaux, Heterarchical production control in manufacturing systems using the potential fields concept, *Journal of Intelligent Manufacturing*, (2010).
- [20] D. Zhao, L. Liang y Z. Kai, An improved ant colony optimization for communication network routing problem. Proc. 4th International Conference on Bio-Inspired Computing, 2009.
- [21] Y. Sallez, T. Berger, and D. Trentesaux, A Stigmergic Approach for Dynamic Routing of Active Products in FMS, *Computers in Industry*, 60 (2009) 204-216.

Metabolismo Industrial Inteligente basado en Sistema Multi-Agente

Alejandro Manuel Martín Gómez⁽¹⁾, Mariano Marcos Bárcena⁽²⁾, Francisco Aguayo González⁽³⁾

^(1,3)Ingeniería del Diseño, c/ Virgen de África n.7, 41011, Sevilla, 954552827,
⁽¹⁾ammartin@us.es, ⁽³⁾faguayo@us.es

⁽²⁾Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, Avd. Universidad de Cádiz n.10, Campus Universitario de Puerto Real, 11519, Cádiz, mariano.marcos@uca.es

Resumen

En el presente trabajo se describen los principales avances de la investigación que se viene desarrollando en relación a la tesis ingeniería del metabolismo industrial para fabricación sostenible inteligente. Se presenta un modelo de metabolismo industrial integrado en el concepto de Smart Industrial Park y Smart City, basándose en un sistema multi-agente que proporcione soporte a la gestión inteligente del metabolismo industrial. La aplicación del modelo posibilita la incorporación de procesos más flexibles, sostenibles e inteligentes en las diferentes etapas del proceso de fabricación de productos. Finalmente se exponen las principales conclusiones que se están obteniendo de esta investigación.

1. Introducción

La intensificación de la actividad humana en áreas concretas, como es el caso de las grandes ciudades y los parques industriales, bien sea desde la concepción tradicional como desde la concepción de Smart City [1] o Smart Industrial Park [2] plantea problemas desde el punto de vista ecológico y ambiental, especialmente como resultado del rápido desarrollo socioeconómico en determinadas zonas. Entre las alternativas que se están articulando para su solución se encuentra la transición de modelos productivos y de consumo basados en una economía lineal a una economía circular [3] caracterizada por ayudar a la mejora de la productividad y la eco-eficiencia, reformando la gestión medioambiental y logrando el desarrollo sostenible. Solución que es concebida tomando a la naturaleza como modelo en base a relaciones analógicas.

Una diferencia importante entre el ecosistema industrial y el natural es el hecho de que la eficiencia es un proceso espontáneo en la naturaleza fruto de la evolución, mientras que en los sistemas industriales se ha de concebir de forma artificial a través del proceso de diseño. Dicho de otro modo, para lograr la ecología industrial en los sistemas industriales y urbanos es necesario concebir y gestionar las relaciones entre las organizaciones participantes. Evidentemente el diseño y la gestión es diferente para los distintos tipos de aproximación a la ecología industrial, siendo una de ellas aquella que considera a la naturaleza como modelo, maestra y mentora y

trata de buscar soluciones en diseño y gestión bioinspiradas [4].

En base a la perspectiva anteriormente expuesta de una economía circular, se hace presente la necesidad en la mayoría de los contextos industriales y urbanos, de un agente que promueva una visión compartida de la red de materiales, agua y energía que fluye entre los distintos agentes productores, con el propósito de cerrar ciclos en el sistema productivo garantizando así la ecocompatibilidad y eficiencia energética e hídrica. Debiéndose para ello recopilar información local sobre los requerimientos de materiales, energía, agua, subproductos o materiales reciclados disponibles, incorporando dicha información en una plataforma en red que posibilite y agilice el acceso a los diferentes agentes interesados en ciclar flujos. Incorporando herramientas que aporten innovación y sistemas que den soporte a los procesos de toma de decisiones que permitan a las organizaciones mejorar sus funciones y comportamiento ambiental. La ecología industrial se presenta como un marco adecuado para la implementación de estrategias de optimización y eficiencia en el consumo de recursos [5], posibilitando la evolución de los sistemas industriales desde una actuación reactiva, basada en la incorporación de materiales recuperados a sus procesos productivos, a una actuación proactiva, que considere desde la fase de diseño las rutas metabólicas asociadas a los materiales y sustancias de los productos, propiciando la integración entre el metabolismo natural e industrial.

2. Investigaciones en el ámbito del Metabolismo Industrial basado en SMA

McDonough [6] apuesta por un cambio profundo de los sistemas industriales alejado de la concepción actual, orientando los sistemas para que sean comercialmente productivos, socialmente beneficiosos y ecológicamente inteligentes, apuntando hacia la innovación a través del metabolismo industrial.

Las crecientes investigaciones en el campo de la gestión de los ecosistemas industriales mediante el empleo de SMA [7] están propiciando el desarrollo de modelos de empresa bajo esta perspectiva y por tanto ofreciendo una mejor comprensión de las organizaciones y de las interacciones entre los diferentes niveles intra e inter-organizacionales, en lo que se refiere a la perspectiva informacional con distintas proyecciones, entre ellas la ambiental.

Trabajos recientes aportan propuestas de modelos y arquitecturas basadas en agentes inteligentes que dan soporte a los distintos aspectos de la ingeniería del metabolismo industrial [8-10]. En estos trabajos se establecen características tales como las propiedades que deben poseer los agentes, estructura del conocimiento de la comunidad de agentes, tipología de agentes y sus capacidades, así como criterios para la toma de decisiones bajo el marco de la sostenibilidad, integrándose bajo el concepto de ambiente inteligente [11]. En este trabajo de investigación, el modelo desarrollado de SMA se concibe desde la perspectiva distribuida, informacional e inteligente, para la vertiente de la sostenibilidad asociada a su metabolismo industrial y urbano.

3. Modelo de Metabolismo Industrial Distribuido Inteligente basado en SMA

En el modelo conceptual desarrollado cada empresa es considerada como un organismo vivo, que coopera en un eco-parque industrial, poniendo especial atención en los flujos de materia, y energía (ciclicidad), tipos de sustancias (toxicidad) y el modo de uso de materiales, energía y agua (eficiencia). Cada empresa tiene su propio metabolismo, entendiéndose como el conjunto de operaciones particulares dentro de una operación industrial, ya sea a nivel de célula de fabricación, a nivel de planta, a nivel de industria o de forma global en el complejo, polígono, parque o distrito industrial.

Como queda recogido en la Figura 1, en el concepto de metabolismo industrial global, con carácter general, están incluidos los diferentes sectores productivos y de servicios, identificados según la Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las actividades

económicas (CIU Rev. 4) vigente en el ámbito internacional establecido por Naciones Unidas. Cada uno de estos sectores posee a su vez un metabolismo específico que permite identificar y analizar las entradas, transformaciones, ciclos, y salidas de materiales y energía.

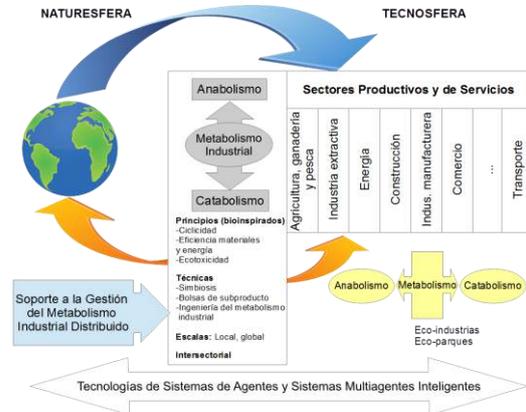


Figura 1. Modelo de integración de Metabolismo Industrial Distribuido.

El objetivo del SMA propuesto es establecer una arquitectura para soportar los sistemas de producción industriales, que incorpore lo hasta ahora expuesto relativo al metabolismo industrial, las simbiosis, y la estructuración en diferentes niveles, y que evalúe y posibilite la ciclicidad, inocuidad y eficiencia del sistema productivo.

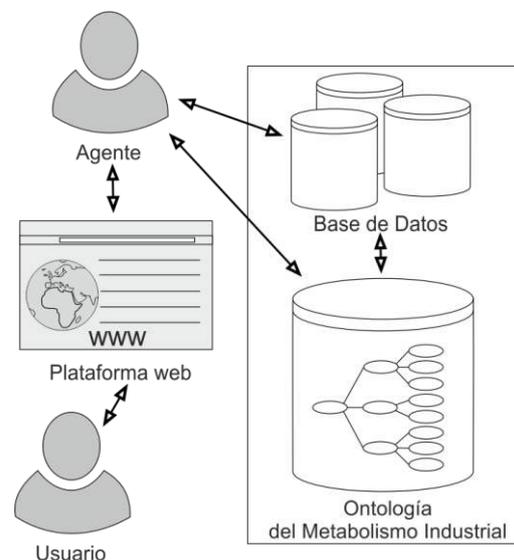


Figura 2. Modelo de integración de Metabolismo Industrial Distribuido.

El sistema propuesto es implementado como un servicio web, ver Figura 2, accesible a través de portales web. La plataforma permite compartir propiedades de los recursos bajo el uso de la estructura de información definida al objeto de

facilitar el cierre de ciclos entre organizaciones y la valoración de materiales y sustancias desde la perspectiva de la ecocompatibilidad y eficiencia.

El SMA que se presenta clasifica los agentes, pertenecientes al ecosistema industrial, en base a la operativa de uso del conocimiento de cómo se pueden cerrar ciclos de materiales y sustancias entre empresa, los modos eficientes de uso y diversificación de la energía en las rutas metabólicas, las alternativas a la sustitución de sustancias tóxicas, etc. La principal característica es el uso de un agente intermediador o bróker [12] totalmente dinámico que conecta los agentes en tiempo de ejecución.

Los agentes se clasifican en base a la operativa de papel que desempeñan en el cierre de ciclos en el ecosistema industrial y en base a los tipos de agentes existentes en un eco-parque industrial.

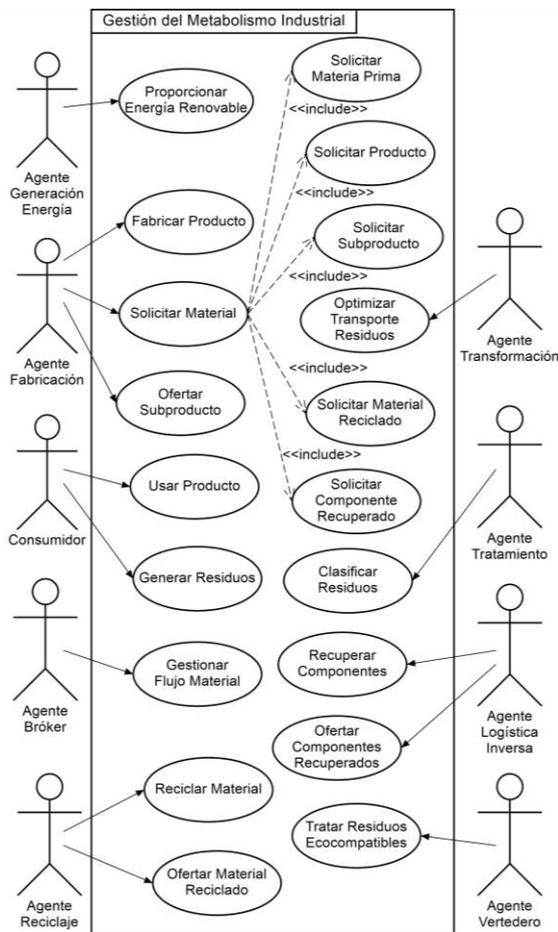


Figura 3. Diagrama de caso de uso de la gestión del Metabolismo Industrial.

La operativa de intermediación es definida mediante tres agentes:

- Agente Solicitante. Este agente inicia el proceso de gestión de las necesidades de recursos para la fabricación del producto,

identifica los recursos y realiza las solicitudes de recurso al Agente Bróker. La información que devuelve el Agente Bróker permite comprobar los objetivos e iniciar un proceso de negociación en base a la estrategia empresarial.

- Agente Proveedor. Este agente comunica al Agente Gestor el deseo de venta de sus recursos generados, indicando sus atributos y parámetros ambientales, y las condiciones que establece en la transacción, que deberán ser consideradas en el proceso de negociación.
- Agente Bróker. Este agente centraliza la gestión de recursos en su nivel correspondiente, incluyendo materias primas, productos, productos recuperados, reciclados, subproductos, residuos, etc. Gestionando el registro de recursos y solicitudes, de modo que posibilita el establecimiento de la comunicación para la negociación entre los agentes solicitantes y proveedores de recursos.

Los Agentes Solicitante y Proveedor son instanciados en cada uno de los agentes que constituyen el eco-parque industrial, siendo definidos a continuación y representados en la Figura 3. Estos agentes son a su vez clasificados en productores, consumidores y descomponedores. Si bien, dentro de los descomponedores, el vertedero es el único agente que sólo implementa el tipo agente solicitante.

Conforme a los principios de UML aplicados a la gestión del metabolismo industrial, la Figura 3 representa un diagrama de casos de uso de la plataforma de agentes, que muestra en detalle las diferentes actividades de las partes intervinientes en el sistema. El Agente Fabricación inicia el proceso de fabricación del producto y lanza la solicitud de recursos necesarios para la fabricación, pudiendo ofertar subproducto generado en el proceso productivo. El Agente Generación Energía proporciona energía renovable, necesaria para desempeñar el resto de procesos. El Consumidor utiliza el producto y genera residuos como consecuencia de su deshecho. El Agente Transformación gestiona la recogida de residuos optimizando el transporte para su posterior tratamiento. El Agente Tratamiento conduce la clasificación de los residuos para enviarlos al agente que posee la capacidad de procesarlos. El Agente Logística Inversa dirige las operaciones de recuperación de componentes y los oferta para reincorporarlos a nuevos productos. El Agente Reciclaje gestiona el proceso de reciclaje y oferta material reciclado. El Agente Vertedero acepta y coordina el proceso de tratamiento de residuos ecocompatibles. El Agente Bróker

gestiona el flujo de recursos entre los distintos agentes que forman el sistema.

4. Conclusiones

El modelo propuesto para la gestión sostenible del Metabolismo Inteligente ofrece importantes ventajas frente a la gestión actual de estos sistemas, puesto que carecen de una visión global. El uso integrado de un SMA permite disminuir los tiempos en la gestión de los flujos, garantizar el anonimato de las organizaciones que intervienen en los procesos de intercambio, a la vez que establece una estructura de información compartida e individual que facilita la identificación, análisis y cierre de ciclo de los materiales.

Se pone de manifiesto la importancia de un sistema de información inteligente que permita gestionar e integrar los procesos de información con el propósito de soportar la toma de decisiones bajo los principios de la ecología industrial. Proporcionando una información estructuralmente organizada, disponible y accesible, haciendo más fácil identificar las relaciones entre los flujos de información, y evaluar bajo los criterios ecológicos, económicos y sociales.

La integración del SMA y la ontología de la sostenibilidad propuesta se encuentran en fase de desarrollo, por lo que trabajos futuros se concentrarán en la validación del modelo propuesto. Al objeto de poder enriquecer las estrategias y negociaciones consideradas, así como ampliar la ontología a todos los agentes existentes en el ecosistema industrial y urbano bajo la triple perspectiva de la sostenibilidad: ambiental, económica y social.

5. Referencias

- [1] M. Roscia, D. Energia, P. Milano y G. Lazaroiu, (2013). *Smart City By Multi-Agent Systems*, International Conference on Renewable Energy Research and Applications, Madrid 2013.
- [2] N. Song, D.M. Wan, Q. Sun y J.F. Yue, Data Mining-Based Smart Industrial Park Energy Efficiency Management System. *Applied Mechanics and Materials*, 484-485 (2014) 585–588.
- [3] Z. Yuan, J. Bi y Y. Moriguichi, The Circular Economy. A new development strategy in China. *Journal of Industrial Ecology*, 10(1) (2006) 4–8.
- [4] D. Alejandro, Z. Cervantes, y P.I. Jurica. (2012). *Aplicación de los criterios de toxicidad, ciclicidad y eficiencia para evaluar la sustentabilidad de productos*, XVIII Congreso Internacional Anual de la SOMIM, México 2012.
- [5] T. Graedel, B.R. Allenby, “Industrial Ecology and Sustainable Engineering”. USA, Pearson, 2010.
- [6] W. McDonough, M. Braungart, P. Anastas y J.B. Zimmerman. Applying the Principles of Green Engineering to Cradle-to-Cradle Design, *Environmental Science & Technology*, 37(23) (2003) 434A–441A.
- [7] F. Bousquet y C. Le Page, Multi-agent simulations and ecosystem management: a review, *Ecological Modelling*, 176(3-4) (2004), 313–332.
- [8] N. Bichraoui, B. Guillaume y A. Halog, Agent-based Modelling Simulation for the Development of an Industrial Symbiosis Preliminary Results, *Procedia Environmental Sciences*, 17, (2013) 195–204.
- [9] B. Mert, U. Aradag y S. Uludag, *An Architecture for a Microgrid-based Eco Industrial Park using a Multi-Agent System*, 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2013.
- [10] E. Romero y M.C. Ruiz, Proposal of an agent-based analytical model to convert industrial areas in industrial eco-systems, *Science of The Total Environment*, 468 (2014) 394-405.
- [11] M.A. Pérez, L. Susperregi y I. Maurtua, *Software agents for ambient intelligence based manufacturing*, IEEE Workshop on Distributed Intelligent Systems: Collective Intelligence and its Applications, 2006.
- [12] A. Valero-gómez, P. Puente, D. Rodríguez-losada, M. Hernando y P.S. Segundo, Arquitectura de integración basada en Servicios Web para sistemas heterogéneos y distribuidos: aplicación a robots móviles interactivos, *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 10 (2013) 85–95.

Metodología para diseño, ensayo mecánico y análisis de probetas monocapas realizadas con fabricación aditiva

C. Wendt⁽¹⁾, M. Marcos⁽¹⁾

⁽¹⁾ Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial. Universidad de Cádiz, Av. de la Universidad de Cádiz 10. E-11519 Puerto Real (Cádiz), Tel. +34 956015123, christiane.wendt@alum.uca.es

Resumen

La Fabricación Aditiva se está convirtiendo en un grupo de procesos con alto interés industrial. Este trabajo avanza los esfuerzos de caracterizar y estandarizar sus procesos. Se desarrolló una metodología para el diseño, el ensayo y el análisis de probetas monocapas para ensayos mecánicos. Siguiendo esta metodología, se obtuvieron algunos diseños válidos CAD/CAM. También se creó un catálogo de defectos típicos. Probetas realizadas con Fused Layer Modeling tuvieron resistencias a la tensión que desviaron por menos de 10 % de los valores de referencia. Para ensayos de compresión la desviación fue más de 50 %.

1. Introducción

La Fabricación Aditiva (Additive Manufacturing, AM) crea geometrías capa por capa a base de un modelo digital de la geometría, Figura 1. La anisotropía que se introduce se puede comparar con la de materiales compuestos reforzados con fibras [1].

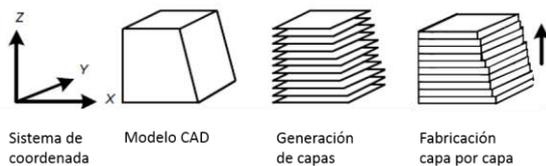


Figura 1. Proceso generalizado de AM

Los procesos han pasado de ser tecnologías de prototipado rápido a resultar en más de 28 % piezas finales [2]. Para convertir AM en un grupo de procesos competitivos y controlados hacen falta ensayos mecánicos estandarizados. Son necesarios para poder comparar, evaluar y optimizar las tecnologías. Todavía no existen estándares o normas internacionales aunque son altamente vinculados con el desarrollo futuro de la tecnología [3].

Se publicaron un número de estudios que se apoyan en ensayos mecánicos de probetas realizadas por fabricación aditiva. Aunque una publicación de hace más de diez años [4] indica que las probetas tipo hueso suelen romper en la zona de anchura variable, Figura 2, se siguen usando: La mayoría de las publicaciones sobre ensayos mecánicos en AM indexadas en el “Web of Science” usan estándares existentes para materiales compuestos, metales o polímeros sin ninguna justificación de su uso.



Figura 2. Rotura de probetas tipo hueso (Fused Layer Modeling)

Todavía no está claro si las probetas convencionales corresponden con las propiedades y el comportamiento de los nuevos procesos aditivos.

En este trabajo se desarrolló una metodología que conduce desde el diseño de probetas hasta su fabricación y ensayo, seguido por el análisis de los datos obtenidos. Es una metodología iterativa.

Como son los elementos más básicos de cada pieza multicapa de Fabricación Aditiva, la metodología se aplica a monocapas. Es decir que las piezas son de una sola capa de forma rectangular (para tensión) o circular (para compresión).

El caso de estudio de este trabajo es el proceso Fused Layer Modeling, un proceso de extrusión de polímeros termoplásticos. Es mejor conocido con el nombre Fused Deposition Modeling® que es una marca registrada de Stratasy Ltd. Fused Layer Modeling está disponible para entornos de oficina y ofrece una multitud de materiales a relativamente bajo precio, lo que lo hace muy popular.

2. Metodología o Metodología Experimental

La metodología usada se puede apreciar en Figura 3. Se compone de varias fases y es completamente iterativa. Si se encuentran problemas en una fase al principio, se puede volver a una fase anterior y adaptar los parámetros.

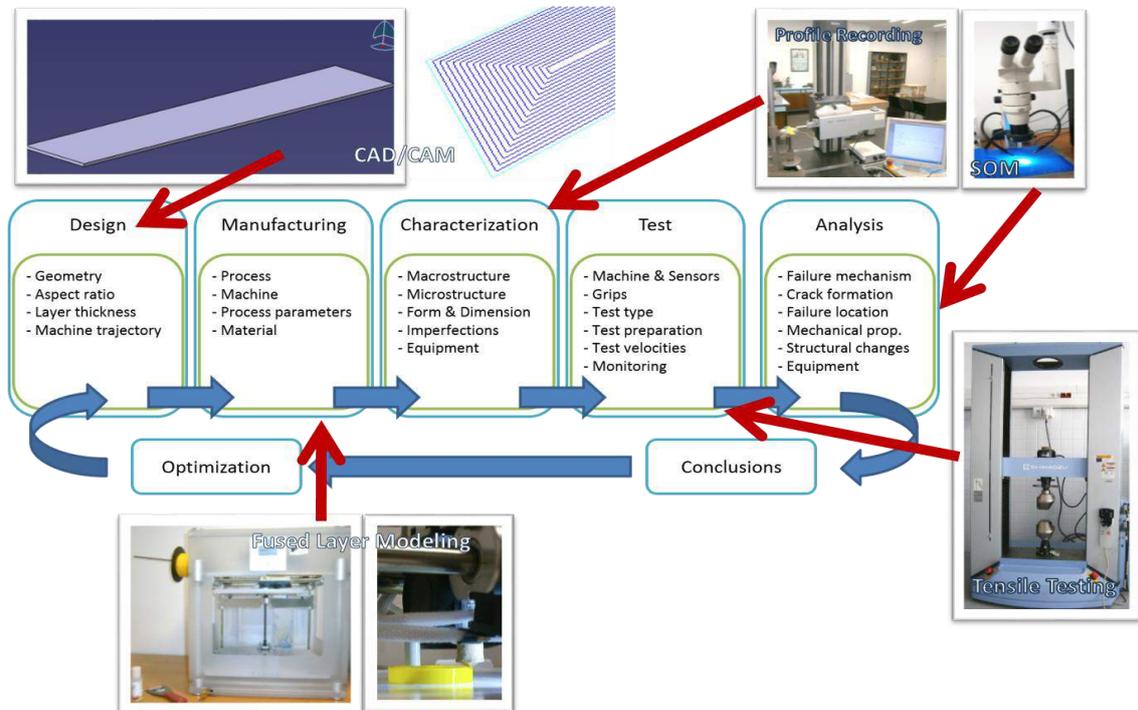


Figura 3. Metodología y equipos usados

Los diseños CAD/CAM se fabricaron usando el material ácido poliláctico (PLA). Las probetas se evaluaron usando técnicas SOM, visuales y metrología. Se prestó atención especial a las desviaciones de las dimensiones y de la forma especificada, variando unos cuantos parámetros de diseño y fabricación. Para poder evaluar y comparar las propiedades mecánicas según los ensayos de tracción y compresión, se realizaron ensayos de referencia. Para ello se usaron filamentos sin extrudir en ensayos de tracción a una velocidad de 1 mm/min.

Para encontrar la velocidad óptima para cada tipo de ensayo, se hicieron una serie de ensayos a las siguientes velocidades:

- 1 – 1,25 – 2 – 2,5 mm/min para tensión
- 1 – 2 – 5 mm/min para compresión

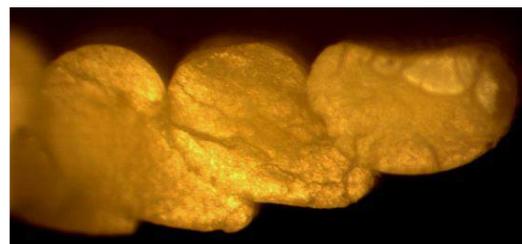
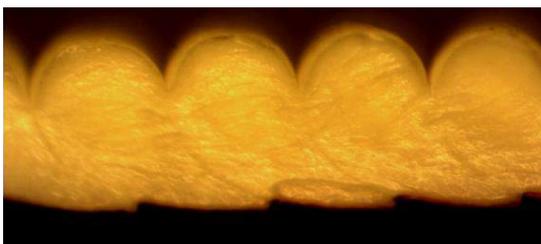


Figura 4. Imagen SOM de la rotura

Las probetas se fabricaron en la máquina CubeX™ con una sola boquilla de 0,75 mm de diámetro. Los ensayos mecánicos se realizaron con la máquina de ensayos universal Trapezium X. Si no hubiese un valor extremo en las propiedades mecánicas, se harían más ensayos a otras velocidades.

3. Resultados y Discusión

Analizando las probetas hechas con Fused Layer Modeling, se encontraron unos defectos muy frecuentemente. Para poder valorar su gravedad, se sortearon usando la dimensionalidad de los defectos como criterio:

- Microdefectos (0D), Figura 4:

- Burbujas
- Quemaduras
- Contaminación

- 2D defectos:

- Diámetro variable
- Vinculación insuficiente
- Deformación en el plano

- 3D defectos:

- Exceso de material
- Deformaciones fuera del plano
- Grietas y huecos

Comparando los resultados de la evaluación geométrica y mecánica, se determinaron las condiciones óptimas para fabricar probetas monocapas realizadas con Fused Layer Modeling:

- Una trayectoria circular empezando en el contorno externo evita dilataciones por fenómenos térmicos.
- El punto de inicio fuera de la geometría principal para evitar asimetría.
- La temperatura de extrusión debe de ser sobre 493 K para probetas circulares y 503 K para probetas planas.
- La relación entre las dimensiones principales debe de ser seis para longitud/anchura. El espesor debe de ser lo más pequeño posible en comparación con la anchura para una geometría homogénea, y un poco más grande para ser apto para ensayos mecánicos
- La nivelación de la mesa y el z-gap (distancia mesa-cabeza) influyen de manera fundamental los defectos. No hay valor absoluto óptimo, pero debe de ajustarse dentro de márgenes muy estrechos para cada máquina.

Según estos criterios, se fabricaron probetas en gran número para los ensayos mecánicos. Las dimensiones de las probetas ensayadas fueron 120 mm x 20 mm x 0,25 mm para tensión y 40 mm x 20 mm x 0,75 mm para compresión.

La precisión dimensional no era igual para los dos tipos de probetas. Había desviaciones en todas las dimensiones y todas son positivas. Significa que ajustando los parámetros de producción se pueden minimizar. Las desviaciones más grandes se encontraron en el espesor de las probetas planas rectangulares y en el diámetro de las probetas circulares. Esta diferencia puede ser debida a la naturaleza fundamentalmente distinta de las geometrías, que influye la disipación de calor.

Las propiedades mecánicas obtenidas en los ensayos de mecánicos se compararon con los ensayos de referencia realizadas en el hilo sin extrudir y con valores para PLA que se encuentran en la literatura, Tabla I.

Tabla I. Comparación de propiedades mecánicas: literatura y ensayo

Ensayo	Probeta	Rm [MPa]	E [MPa]
Tensión	PLA [5]	53	3500
	Filamento	51,4 ± 0,9	2060 ± 633
	Monocapa	47,0 ± 0,6	2180 ± 54
Compr.	PLA [6]	108	2300
	Monocapa	79,1 ± 1,5	1896 ± 45

La resistencia a la tracción fue 3,6 % más baja que en los ensayos de referencia, que desviaron de la literatura por 8,6 %. Los resultados para los módulos de elasticidad y especialmente para los ensayos de compresión tienen mayor desviación. En parte puede ser debido al bajo número de ensayos de referencia disponibles.

La velocidad óptima para ambos tipos de ensayos mecánicos (tensión y compresión) es de 2 mm/min si se quiere determinar la resistencia. Para ensayos del módulo debe de ser un poco más baja, como es común en normas vigentes sobre ensayos mecánicos de termoplásticos.

También se analizó la geometría de la rotura y el posible modo de rotura, Figura 4 y Figura 5.

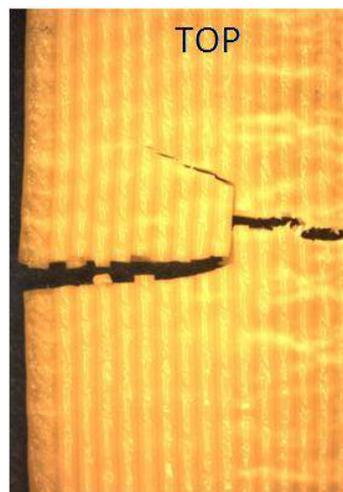


Figura 5. Geometría de la rotura

La presencia de micro-burbujas en la superficie de rotura es notable. Desde fuera no se podían apreciar usando inspección visual o un microscopio SOM o electrónico. Como la resistencia a la tracción y la geometría de la rotura dependieron altamente del número y de la localización de estos defectos pequeños, su detección es importante.

En las probetas de compresión se notó pandeo justo después de superar la resistencia a la tracción, Figura 6, dando lugar a la mejora del diseño. En las probetas ensayadas el punto de inicio de cada capa se encontró encima del otro, creando asimetría. Se puede evitar usando una trayectoria helicoidal, pero es bastante complicada de programar.

4. Conclusiones

Como primer paso en un proceso más largo de estandarizar la Fabricación Aditiva, se desarrolló una metodología para el diseño, el ensayo y el análisis de probetas monocapas para ensayos mecánicos. Se aplicó esta metodología a probetas de tensión y compresión hechas con Fused Layer Modeling.

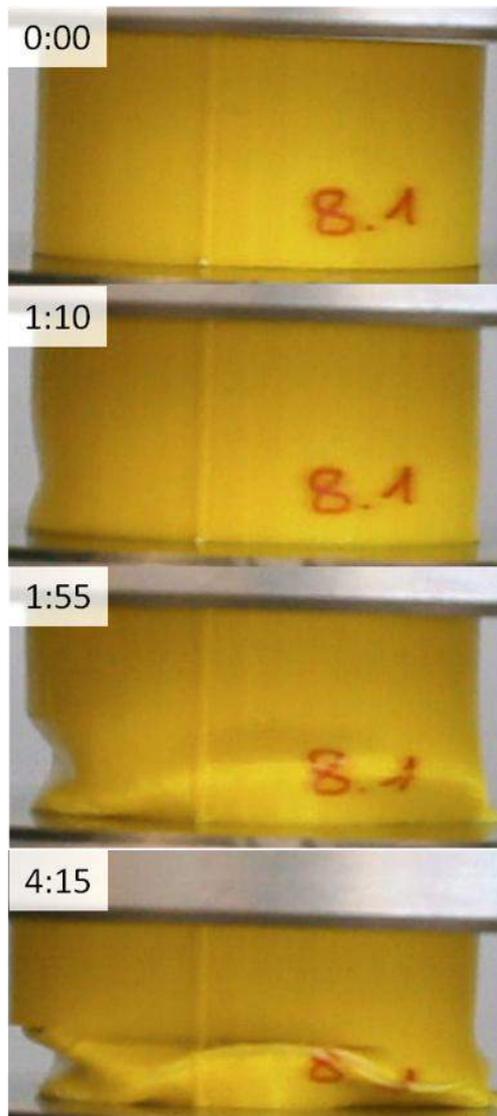


Figura 6. Ensayo de compresión con monocapa

Además se creó un catálogo de defectos típicos. Variando diversos parámetros del diseño CAD/CAM y del proceso se obtuvieron unos diseños válidos. En ensayos de tensión, Figura 7 y compresión se obtuvieron buenos resultados para las propiedades mecánicas. Especialmente para tensión el diseño seleccionado se puede considerar apto. Tras la aplicación de la metodología, se puede considerar válida.



Figura 7. Grietas y “crazing” bajo tracción

Líneas de trabajos futuros incluyen el diseño de probetas estándares para cada proceso de Fabricación Aditiva y según el ensayo mecánico que se va a hacer. Esto conduce a probetas estándares multifuncionales. Se recomienda un estudio más profundo de las propiedades de monocapas, multicapas y las relaciones entre sus propiedades, permitiendo la ampliación de la metodología para estructuras reforzadas.

5. Referencias

- [1] M. Hashmi, “Comprehensive Materials Processing”, S. Masood, Elsevier Ltd.: Oxford (Reino Unido), 2014.
- [2] Wohler's Associates, “Wohler's report 2015: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report”, Wohler's Associates, Fort Collins (E.E.U.U.), 2015.
- [3] M. Monzón et al., Standardization in additive manufacturing: activities carried out by international organizations and projects, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76 (2015), 1111-1121. doi:10.1007/s00170-014-6334-1
- [4] S. Ahn, et al. Anisotropic Material Properties of Fused Deposition Modeling ABS, *Rapid Prototyping Journal*, 8 (2002), 248–257. doi:10.1108/13552540210441166
- [5] A. Mohanty, M. Misra, L. Drzal, “Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites”, CRC Press: Boca Raton (E.E.U.U.), 2005.
- [6] T. Yamamura et al., *Evaluation of compressive properties of PLA/PBAT polymer blends*, Proceedings of the Asian Pacific Conference for Materials and Mechanics, Yokohama (Japón), 2009.

Metodología para el estudio de la integridad superficial de piezas de la aleación UNS R56400 torneadas en seco

Antonio Calvino Fernández-Trujillo⁽¹⁾, Mariano Marcos Bárcena⁽¹⁾

⁽¹⁾Departamento Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, Avenida de la Universidad, 10, 11519-Puerto Real, Cádiz, Tel. 660298358, e-mail: antonio.calvinofernandeztrujillo@alum.uca.es

Resumen

El objetivo del trabajo ha sido identificar los factores influyentes en la integridad superficial de las piezas torneadas de la aleación UNS R56400, y desarrollar un protocolo de actuación, con el que eliminar el caro proceso de rectificado al que se someten los componentes de aeronaves para cumplir los estrechos requisitos de calidad.

El Trabajo Final de Máster se divide en seis capítulos:

- En la introducción se plantea se describe el marco en el que se desarrolla la investigación, y se plantean el objetivo y alcance.
- El segundo capítulo trata del estado del arte del proceso de torneado en seco de la aleación UNS R56400.
- En el tercer capítulo se establece un procedimiento metodológico para el estudio de la integridad superficial de piezas de la aleación UNS R56400 torneadas en seco.
- Los capítulos 4, 5 y 6 tratan de los resultados obtenidos, las conclusiones, y las líneas futuras de trabajo, respectivamente.

1. Introducción

La industria aeronáutica es un sector empresarial que mueve una gran cantidad de capital, y se encuentra en un marco muy competitivo entre las empresas que se dedican a producir aeronaves. Para ser competitivo en este sector es imprescindible estar dispuesto a mejorar cada día, y por ello, las empresas de la élite hacen potentes inversiones en I+D+i, impulsando el desarrollo de materiales estratégicos que consiguen disminuir el peso del avión de manera destacable. Es destacable el gran protagonismo que toma en este sector la empresa Airbus Group, teniendo una gran presencia en el panorama Europeo (Figura 1).



Figura 1. Presencia de Airbus Group en el panorama Europeo.

El aumento en la competitividad empresarial en este sector ha fomentado el incremento de la

productividad, disminuyendo tiempos de fabricación con la mayor sostenibilidad y rentabilidad (Figura 2), sin menoscabar en la calidad de los productos.

Actualmente, el titanio y sus aleaciones se consideran materiales estratégicos por sus características especiales, teniendo especial importancia en el desarrollo de las tecnologías industriales, y usándose así en muchos sectores para diferentes aplicaciones [1].



Figura 2. Tetraedro de rendimiento global de un proceso de fabricación.

Es recomendable usar aleaciones de titanio en zonas críticas del avión, donde puedan generarse grietas por fatiga, y se alcancen elevadas temperaturas, como por ejemplo en el fuselaje del avión, o en las alas, y concretamente en la zona de unión de estas dos últimas [2].

Si se analiza la evolución en el uso de materiales en los programas de una gran empresa aeronáutica, como es Airbus Group, se

nota una clara tendencia a aligerar peso de las aeronaves, buscando un menor consumo de combustible. Para ello se ha optado por la utilización de materiales compuestos en muchos componentes estructurales del avión, y año tras año, ha ido creciendo el empleo de estos materiales compuestos sustituyendo componentes de aleaciones de aluminio en la mayoría de los casos. Sin embargo, el aumento de material compuesto en los aviones modernos ha supuesto un ascenso significativo de las aleaciones de titanio (Figura 3), debido a que las propiedades del titanio hacen que sea insustituible. Los materiales compuestos presentan densidades mucho más bajas que las aleaciones de titanio, y soportan solicitaciones importantes, pero el comportamiento a altas temperaturas es uno de sus puntos más desfavorables. Por ello, las aleaciones de titanio son un componente esencial en los elementos críticos del avión [3].



Figura 3. Evolución del uso de las aleaciones de titanio en la fabricación de aeronaves.

Actualmente, el reto de la ingeniería de fabricación en cuanto a rendimiento económico es reducir costes, sin empeorar la calidad del producto final, y para ello, este sector se encuentra en continua innovación, con la intención de optimizar los procesos productivos. El aspecto funcional de las piezas en la industria aeronáutica acota los requerimientos necesarios, a las condiciones en las que las piezas van a trabajar en servicio. Y el rendimiento medioambiental, se ve muy beneficiado cuando se trabaja en ausencia de cualquier tipo de líquido refrigerante, evitando de esta manera costes adicionales de gestión y eliminación de residuos derivados de su uso [4].

La aleación UNS R56400 es una de las aleaciones ligeras más utilizadas en la fabricación aeronáutica de piezas que comprometen la seguridad de las aeronaves, y teniendo unos requerimientos muy altos, por lo que sus procesos de fabricación tienen un alto valor añadido.

Este trabajo se ha desarrollado en la Escuela Superior de Ingeniería de Cádiz de la Universidad de Cádiz, en el marco de la Factory

of the Future (FoF) para el Horizonte 2020: fabricación de los productos del futuro y sostenibilidad económica, social y ambiental de la fabricación.

El proceso de mecanizado que se ha elegido para el estudio ha sido el torneado convencional, ya que muchas de las piezas importantes de los aviones necesitan de este proceso fabricación para alcanzar su forma (Figura 4).

Además, contribuyendo a la mejora del aspecto medioambiental y por requisitos de calidad, no se ha contemplado la utilización de cualquier tipo de fluidos refrigerantes.



Figura 4. Proceso de torneado

El caso de estudio se enmarca dentro de los procesos de mecanizado por eliminación de material, en concreto el proceso de torneado.

Los componentes que se desean obtener utilizando este proceso de fabricación deben cumplir estrechos requisitos de calidad. Sin embargo, para alcanzar estas propiedades de las piezas, estas deben someterse a un proceso de rectificado. Esta etapa provoca que la obtención de los componentes tenga una rentabilidad muy baja [5].

Por tanto, se desea hallar la manera de eliminar la etapa de rectificado en el proceso de fabricación de estos componentes. Para ello, se van a estudiar ciertos aspectos de la integridad superficial de la aleación UNS R56400 después de ser mecanizada.

Este trabajo de I+D se encuentra dentro de un proyecto mucho más amplio. El objetivo principal es proponer una metodología para el estudio de la integridad superficial de piezas de la aleación UNS R56400 torneadas en seco. Para ello, se divide el procedimiento de actuación en dos fases [6,7]:

1. Se somete la probeta a un proceso de torneado en seco, para distintos valores de la velocidad de corte y el avance.
2. Se evalúa la integridad superficial de la probeta tras el proceso de mecanizado:

- Macrogeometría.
- Microgeometría.
- Tensiones residuales (Figura 5).



Figura 5. Adquisición de datos de tensiones residuales mediante “Hole Drilling”

Para profundizar en la naturaleza del proceso de torneado en seco de la aleación en cuestión, también se aborda el estudio del desgaste de las herramientas utilizadas en los ensayos, y la viruta generada durante el corte.

2. Metodología

Para garantizar las mismas condiciones iniciales en todos los ensayos realizados, ha sido necesario trazar un protocolo de actuación que sirva de guía en la investigación (Figura 6).

Para llevar a cabo los ensayos correspondientes a la investigación, se han seleccionado los parámetros de corte que se muestran en la tabla 1.

Se dispone de una probeta cilíndrica de la aleación UNS R56400 (Figura 7, a), y una batería de 10 plaquitas de torneado de WC-Co sin recubrimiento. (Figura 7, b).

Tabla 1. Parámetros de corte utilizados en el torneado de la aleación

a (mm/rev)	0.05	0.1	0.3	
v (m/min)	25	50	75	100
n (mm)	0.5			

En la Figura 8 se observa el montaje correspondiente a los ensayos de torneado. Se dispone de un sistema de adquisición de vídeo, para su posterior análisis. En la Figura 16 se muestra una imagen de la perspectiva desde donde se filma el proceso de corte.

3. Resultados y Discusión

En la Figura 9 se muestra una gráfica de la rugosidad aritmética media frente a las velocidades de avance utilizadas en los ensayos con velocidad de corte de 75 m/min.

Se puede observar como para los avances menores de 0.05 y 0.10 mm/rev, el valor de Ra es muy parecido en todos los tramos axiales de la probeta. Sin embargo, en el avance de 0.3 mm/rev se nota como la huella que deja el paso

de la herramienta, provoca que el valor de la rugosidad superficial aumente de forma considerable.



Figura 6. Diagrama metodológico de la investigación



Figura 7. a) Probeta cilíndrica de UNS R56400; b) Plaquitas intercambiables de metal duro (WC-Co) para torneado



Figura 8. Montaje y preparación del ensayo de torneado

La influencia del tramo de mecanizado no es muy determinante en este caso. Se nota una cierta tendencia a que el valor de la rugosidad superficial disminuye en cada tramo, de manera que el tramo final es el que registra menor

rugosidad superficial. La diferencia en el valor de Ra correspondiente a la influencia del tramo de mecanizado es muy pequeña, y puede encontrarse dichas diferencias de valor dentro de la tolerancia de la medida. Sin embargo también puede interpretarse como un aumento de la estabilidad en el mecanizado, al estar la herramienta acercándose al plato de garras (donde teóricamente deberían registrarse menos vibraciones en el proceso de corte).

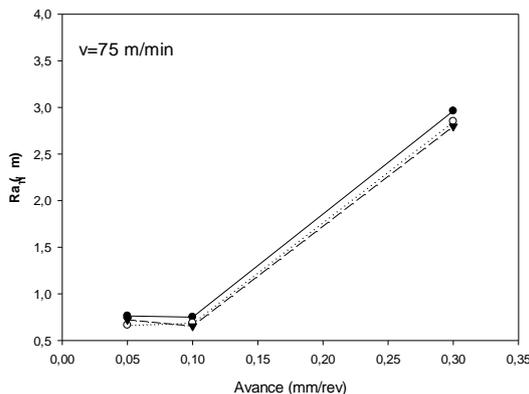


Figura 9. Gráfica de Rugosidad aritmética media (Ra) frente a la velocidad de avance utilizada en el proceso de mecanizado de la probeta ($v=75$ m/min)

4. Conclusiones

Son destacables las siguientes conclusiones extraídas de este trabajo fin de máster:

- La importancia del desarrollo de esta línea de investigación, a tenor de las potentes inversiones del sector aeronáutico en I+D+i en este campo.
- La evolución de los programas aeronáuticos de empresas como Airbus y Boeing, reflejan la creciente importancia de la optimización del proceso de fabricación de componentes de aleaciones de titanio, prestando especial atención a la Ti6Al4V.
- Para desarrollar la fabricación de componentes aeronáuticos de la aleación Ti6Al4V de manera sostenible y rentable, es necesario ampliar el conocimiento del proceso de torneado en seco.
- El difícil mecanizado de la aleación tratada en este trabajo, provoca el desgaste excesivo de la herramienta en un periodo de tiempo demasiado corto, lo que provoca importantes costes de fabricación, asociados al reemplazo de estas.
- El material más conveniente para las herramientas de corte es el metal duro, que se puede utilizar con recubrimiento, y sin recubrimiento.

• A partir de resultados experimentales, se ha determinado que los mecanismos de desgaste de las herramientas de corte son los siguientes: difusión, abrasión, y adhesión (BUL y BUE).

• El análisis mediante SOM de las herramientas ha permitido identificar los mecanismos de desgaste mencionados por distintos autores de la bibliografía consultada y se han podido identificar una serie de tendencias en los ensayos realizados.

• El análisis de las tensiones residuales inducidas en el mecanizado de la probeta se ha podido realizar en un solo caso de ensayo, debido a la limitada disponibilidad de galgas extensiométricas. No obstante, los resultados obtenidos han demostrado que el método de "Hole Drilling" en la aleación de Ti6Al4V está aún en un proceso de desarrollo, y que se necesita profundizar en su estudio con el objetivo de excluir las fuentes de error que intervienen en el taladrado del agujero ciego.

5. Referencias

- [1] Pan Ling Huang, Jian Feng Li, Jie Sun, Jun Zhou, "Study on performance in dry milling aeronautical titanium alloy thin-wall components with two types of tools", Journal of Cleaner Production, Volume 67, 15 March 2014, Pages 258-264.
- [2] Y. Kaynak, H.E. Karaca, I.S. Jawahir, "Surface Integrity Characteristics of NiTi Shape Memory Alloys Resulting from Dry and Cryogenic Machining", Procedia CIRP, Volume 13, 2014, Pages 393-398.
- [3] M. Batista, J. Salguero, A. Gomez-Parra, S. Fernández-Vidal, M. Marcos, "SOM based Methodology for Evaluating Shrinkage Parameter of the Chip Developed in Titanium Dry Turning Process".
- [4] Nabhani F., "Machining of aerospace titanium alloys", Robotics and Computer Integrated Manufacturing 17 (2001) 99-106.
- [5] Jorge Salguero, Julia Gerez, Moisés Batista, J. Enrique Garófano and Mariano Marcos, "A Study of Macrogeometrical Deviations in the Dry Turning of UNS R56400 Ti Alloy
- [6] Che-Haron C.H., Jawaid A., "The effect of machining on surface integrity of titanium alloy Ti-6Al-4V", Journal of Materials Processing Technology 166 (2005) 188-192.
- [7] J. Paulo Davim, "Surface Integrity in Machining", Springer, 2009

Metodología para la evaluación metrológica de taladros en estructuras híbridas de CFRP/UNS A97075

R. Cabeza Puertas⁽¹⁾, M. Marcos Bárcena⁽¹⁾, M. Batista Ponce⁽¹⁾

⁽¹⁾Dpto. Ing. Mecánica y Diseño Industrial, Universidad de Cádiz, Avda. de la Universidad de Cádiz, nº 10, 11519, Puerto Real, Cádiz, Tlf: 677587673, e-mail: rafa.cabezapuertas@alum.uca.es

Resumen

En la actualidad, gran parte de los estudios realizados sobre el taladrado de estructuras híbridas de aleaciones ligeras y materiales compuestos, se realizan con el fin de conseguir una mayor automatización de los procesos de taladrado, aumentando el rendimiento y la productividad dentro de las tolerancias exigibles. El presente trabajo tiene como objetivo el diseño y desarrollo de una metodología para la evaluación metrológica de taladros en estructuras híbridas de CFRP/UNS A97075 sometidas a diferentes rangos de combinaciones de velocidades de corte y avance mediante el estudio metrológico de los agujeros taladrados.

1. Introducción

En los últimos años, se ha producido un notable incremento en los estudios de los procesos de taladrado, debido a su fuerte implantación en la industria aeronáutica, a causa de la gran cantidad de uniones remachadas que se utiliza en su fabricación [1,2]. Las necesidades de la industria aeronáutica, de construir aeronaves cada vez más eficientes y sostenibles conducen al sector a desarrollar e incrementar el uso de materiales de reducido peso. Entre los materiales más utilizados para la construcción de aeronaves se encuentran las aleaciones de aluminio y los materiales compuestos (CFRP). Tal es el uso de estos materiales, que en los principales programas aeronáuticos representan más del 70% del porcentaje en peso de la aeronave [3].

La alta resistencia y baja densidad del aluminio y sus aleaciones, unida a la buena respuesta frente a la corrosión, hacen a este material situarse en las primeras posiciones de utilización para partes del fuselaje de aeronaves, como el borde de ataque de las alas [4]. Por otro lado, la excelente relación de peso y propiedades fisicoquímicas de los materiales compuestos proporcionan un menor consumo de energía y de costes de mantenimiento en comparativa con los materiales metálicos [5].

A pesar de las numerosas investigaciones sobre taladrado de aleaciones de aluminio y materiales compuestos de manera individual, las investigaciones sobre el taladrado de estos materiales apilados en forma de stacks son más reducidas. Debido a las diferentes propiedades mecánicas y mecanismos de desgaste que se

generan en el taladrado de las aleaciones de aleaciones de aluminio y CFRP apilados en forma de stacks, se hace especialmente complicado la determinación de tolerancias. La principal problemática que surge en el taladrado de stacks es la inserción de microvirutas de aluminio en la sección CFRP y viceversa. También, la generación de viruta continua de aluminio puede provocar una disminución de la calidad superficial en la sección de CFRP [6,7].

La presente contribución tiene como objetivo el diseño y desarrollo de una metodología experimental para la evaluación metrológica de taladros en estructuras híbridas de CFRP/UNS A97075.

2. Metodología Experimental

Se ha realizado el diseño y desarrollo de una metodología en la que se parte del diseño de experimento para realizar el posterior mecanizado de las probetas para finalizar con la evaluación y caracterización de los agujeros taladrados (Figura 1). La caracterización de los taladros se realiza utilizando técnicas de medición metrológicas. A continuación se detalla la Metodología propuesta.

2.1 Diseño de experimento

El presente estudio se llevó a cabo a través de probetas de aleación de aluminio Zinc UNS A97075 y CFRP de amplio uso aeronáutico. Las probetas se unen mecánicamente mediante tornillería en sus cuatro vértices y en la zona central. Ambas probetas tienen forma

cuadrangular de 210mm, difiriendo en sus espesores, 4,86mm para la probeta de aleación

de aluminio y 4,5mm para CFRP.

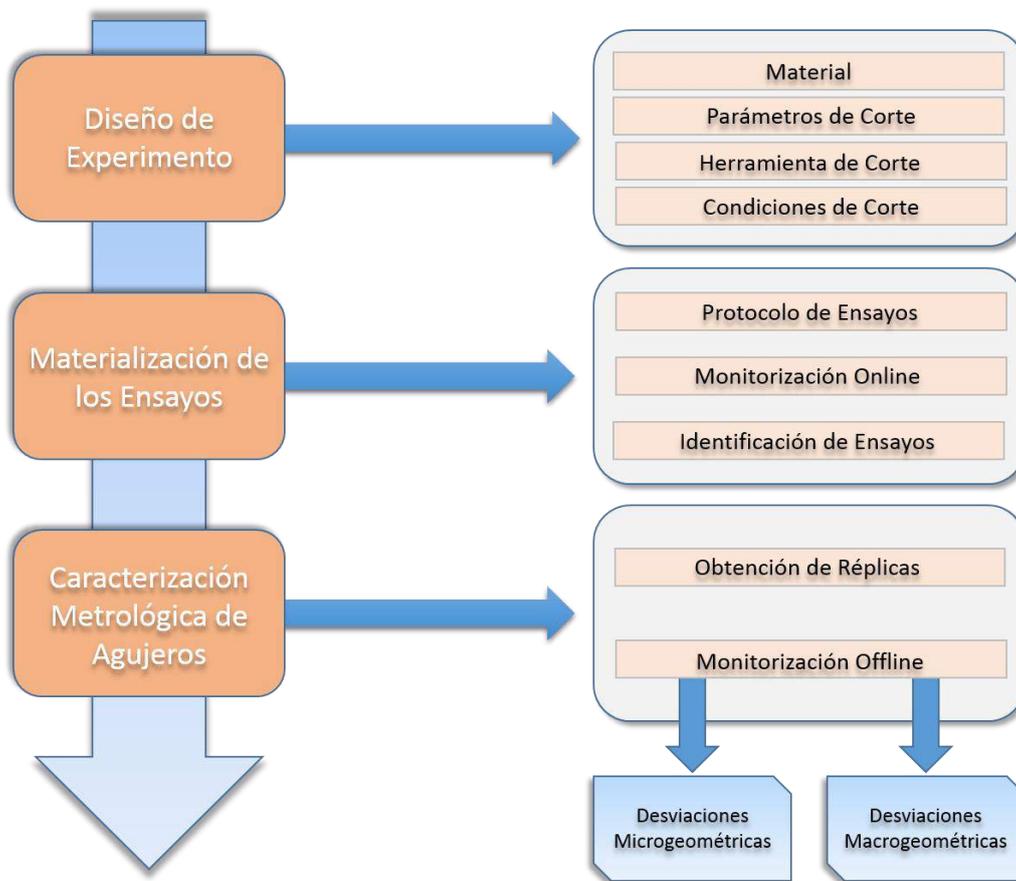


Figura 1. Esquema general de la metodología experimental

El espesor total del stacks se sitúa en 9,36mm. Se realiza un taladrado convencional en seco, debido a que el uso de lubricantes puede provocar un debilitamiento de la capacidad de transmitir esfuerzos de la matriz. La herramienta de corte que se utiliza es una herramienta de metal duro sin recubrimiento y 7,92mm de diámetro, en un centro de mecanizado de 5 ejes Kondia Five400. Se establece un total de 12 combinaciones de velocidades de corte y avances, divididas en tres velocidades de avance 250, 300 y 400mm/min y cuatro velocidades de corte 85, 105, 125 y 145m/min.

2.2 Materialización de los ensayos

Tras el diseño del experimental, se procede a la materialización de los ensayos de taladrado. Se realiza un total de 24 ensayos, alternativos de 5 y 25 taladros, manteniendo constante los parámetros de mecanizado. Se realiza el taladrado en una solo pasada (one shoot

drilling), comenzando el mecanizado por la sección de CFRP y sin uso de ningún tipo de lubricación.

Se realiza una monitorización online del proceso de taladrado en el cual mediante una mesa dinamométrica se registran las fuerzas de corte generadas en los tres ejes cartesianos X,Y,Z. También, se procede a la adquisición filmográfica del proceso de taladrado completo y a la grabación del taladro número 25 con velocidades de captura hasta 5000 frames por segundo. Para asegurar una correcta trazabilidad del proceso, se procede a la creación de una nomenclatura para la correcta identificación de los ensayos de taladrado.

2.3 Caracterización metroológica de los agujeros

Como fase final del proceso experimental, se ha llevado a cabo la caracterización metroológica de los agujeros de las probetas tras la realización de los ensayos, para ello se han empleado las

denominadas réplicas de taladro cuyo proceso

de obtención consta de varias etapas (Figura 2).



Figura 2. Esquema obtención réplicas de taladrado.

El primer paso que se debe realizar para la obtención de réplicas de taladros es la limpieza de los agujeros de los restos de viruta y partículas de fibra de carbono. Para ello, se dispone de una mezcla de éter y alcohol en proporción 1:1 y la ayuda de bastoncillos de algodón. Acto seguido, se procede a la colocación en la cara posterior de cinta adhesiva para el sellado de los agujeros. Posteriormente, se realiza la instalación temporal de casquillos de fijación metálicos, fijados mediante masilla de sujeción no grasa en los taladros a evaluar. El material utilizado para la obtención de las réplicas de taladrado es un compuesto de dos resinas de vulcanizado por adición, que mediante la mezcla de sus componentes polimeriza reproduciendo la superficie del taladro (Figura 3). La resina de polimerización que se utiliza se denomina RGX 80 y tiene una consistencia pastosa.



Figura 3. Réplica de taladrado.

El tiempo necesario para la polimerización de la resina en el interior de los agujeros es de al menos 8 minutos, los cuales transcurrido este tiempo se procede a la extracción de la réplica de taladrado y posterior identificación según nomenclatura desarrollada.

Una vez obtenidas e identificadas las réplicas de taladrado se procede a la monitorización offline del proceso de taladrado. En esta etapa, hay que diferenciar entre el estudio de las desviaciones

macrogeométricas y las desviaciones microgeométricas.

Entre las variables de mayor relevancia que se han tenido en cuenta para la valoración metrológica, se pueden destacar la variación del diámetro interior del agujero, la diferencia de geometría de los taladros (atendiendo a defectos de forma tales como rectitud, paralelismo, redondez y cilindridad) y la calidad superficial.

Para el análisis de dichos defectos ha sido imprescindible la medición mediante procedimientos y equipos de gran precisión, tales como medición de rugosidad y perfilometría con rugosímetro topográfico Marh Perthometer, medición de rectitudes y paralelismo mediante medidora de coordenadas sin contacto TesaVisio 300 y software de medición CAD PC-Dmis, medición de redondez y cilindridad con medidora de formas Marh Formtester MMQ44 y rutinas de medición mediante programación CNC.

3. Resultados y Discusión

Finalmente, con los datos obtenidos en los ensayos de taladrado, y de las mediciones llevadas a cabo durante el análisis metrológico, se ha extraído un conjunto de resultados que permiten determinar de forma clara las relaciones existentes entre las velocidades principales de mecanizado y los defectos macrogeométricos y microgeométricos.

De esta forma a través de parámetros como la variación de la rugosidad media aritmética (Ra), ha sido posible la observación de determinadas tendencias de comportamiento, en este caso, puede observarse como el mejor acabado superficial se logra en la sección de la aleación de aluminio UNS A97075 (Figura 4).

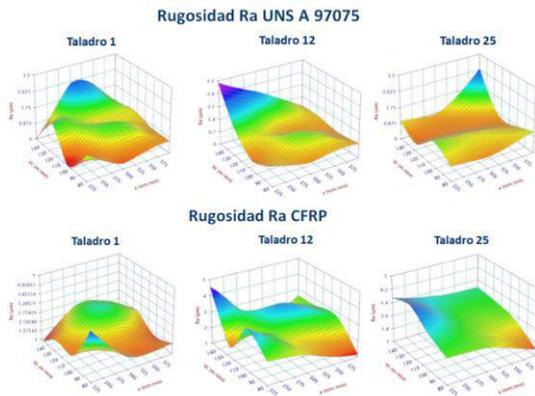


Figura 4. Superficies de relación de Ra, Vc y Va para taladros 1, 12 y 25.

También, se observa concordancia de los valores máximos de rugosidad (Ra) que se sitúan a velocidades de corte elevadas en la sección de UNS A97075. Los peores resultados de calidad superficial en la sección de UNS A97075 se dan a tiempos de mecanizado medios, bajos avances y elevadas velocidades de corte.

Se hace difícil determinar una concordancia de máximos y mínimos para la sección de CFRP aunque se observa como el mejor acabado superficial se sitúa en valores similares cuando se mecaniza a velocidades de corte bajas y elevadas velocidades de avance, independientemente del tiempo de mecanizado.

4. Conclusiones

En el presente trabajo, se ha llevado a cabo el diseño y desarrollo de una metodología experimental para el estudio del taladrado de estructuras híbridas de CFRP/UNS A97075. Para ello, en primer lugar se procede al diseño de la metodología en el cual se define el material empleado, los parámetros, condiciones y herramientas de corte. Tras el diseño de la metodología experimental, se procede a la materialización del ensayo, en la que se realiza una descripción del protocolo de taladrado de las probetas, así como la monitorización online del proceso de taladrado e identificación de los ensayos mediante la creación de una nomenclatura inequívoca.

Por último, se han comentado los principales análisis de carácter metrológico que se han efectuado con el objetivo de evaluar y cuantificar las desviaciones microgeométricas y macrogeométricas, en función del tiempo de mecanizado y las principales velocidades de mecanizado.

Es importante comentar, que las mejores calidades superficiales en el taladrado de

estructuras híbridas de CFRP/UNS A97075, se consiguen en las secciones de la aleación de aluminio. Cabe destacar que existe una concordancia de valores de rugosidad media aritmética (Ra) mínimos en taladrados realizados con elevadas velocidades de avance y bajas velocidades de corte, independientemente del tiempo de mecanizado y el material mecanizado.

5. Referencias

- [1] M. Jimenez, D. De Mingo, J.C. Del Real, V. Sandes, Taladrado y roscado de alta velocidad: Guía de mecanizado, Ediciones Técnicas IZARO, Bilbao (España), 2001.
- [2] L.N. López de Lacalle, A. Fernández, D. Olvera, Taladrado profundo para la manufactura de partes estructurales monolíticas, Asociación Española de Ingeniería Mecánica, XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, 2010.
- [3] P. Mayuet, A. Gallo, A. Portal, P. Arroyo, M. Álvarez, M. Marcos, Damaged Area based Study of the Break-IN and Break-OUT defects in the Dry Drilling of Carbon Fibre Reinforced Plastics (CFRP), Proceedings of the 5th Manufacturing Engineering Society International Conference – Zaragoza – June 2013
- [4] M. Toledano, M.A. Arenas, J.J. Galán, L. Ramirez, S.M. Borja, A. Conde, A. Monsalvete, Resistencia a fatiga de la aleación de aluminio 7075-T6 en función del tipo de ensayo y espesor del recubrimiento, XXVII Encuentro del grupo español de fractura, Anales de Mecánica de la Fractura, Oporto (Portugal), 2010.
- [5] P. F. Mayuet, M. Álvarez, A. Portal, P. Arroyo, M. Marcos, Tecnologías para el taladrado de materiales aeronáuticos avanzados, [En línea: 02/11/2015] URL :<http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/101182-Tecnologias-para-el-taladrado-de-materiales-aeronauticos-avanzados.html>.
- [6] M. Ramulu, T. Branson, D. Kim, A study on the drilling of composite and titanium stacks, Composite Structural, vol. 54, 67-77, 2001.
- [7] D. Kim, M. Ramulu, Drilling process optimization for graphite/bismaleidetitanium alloy stacks, Composite Structural, vol. 63, 101-114, 2004.

Modelo de Evaluación Integrada de la Sostenibilidad de Productos y Procesos de Fabricación

Ana de las Heras García de Vinuesa⁽¹⁾, Francisco Aguayo González⁽¹⁾, Mariano Marcos Bárcena⁽²⁾

⁽¹⁾ Departamento de Ingeniería del Diseño, Universidad de Sevilla, Escuela Politécnica Superior, C/Virgen de África nº7, 41011 Sevilla, Tel. 954552827 adelasheras@us.es

⁽²⁾ Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, Universidad de Cádiz, Escuela Superior de Ingeniería de Cádiz (ESI), Avenida de la Universidad de Cádiz, 11519, Puerto Real, Cádiz.

Resumen

El presente trabajo se enmarca dentro de la línea de investigación Sistemas de Fabricación Inteligentes, teniendo como objetivo diseñar un modelo de información e implementar un prototipo en entornos CAx para la evaluación integrada de la sostenibilidad (social, económica y ambiental) de productos y su fabricación bajo la Tripe E. El modelo propuesto se incardina dentro del estándar de datos de producto STEP 10303 y el desarrollo de APs. En dicho trabajo se describen los objetivos fundamentales para la propuesta de desarrollo metodológico basado en el ACV del producto así como sus principales antecedentes, estado del arte, hipótesis y metodología.

1. Introducción

En los procesos de desarrollo económico, la industrialización representa un fenómeno muy dinámico con un claro impacto en la calidad de vida de las poblaciones y en el deterioro del Medio Ambiente. Es evidente que los países que hoy se consideran desarrollados, han pasado por un proceso de industrialización que ha modificado sus estructuras productivas contribuyendo a la actual pérdida de valor ambiental y el deterioro de las condiciones de vida de sus ciudadanos [1]. El carácter dinámico de la industrialización y su inherente capacidad de transformación estructural, determina que los países en desarrollo vean en la industrialización la piedra angular sobre la cual asentar su desarrollo económico y social, llevando la carga ambiental planetaria muy por encima de su capacidad de acogida.

La expansión industrial y la industrialización no sólo ha determinado efectos económicos y ambientales, también ha alterado profundamente los sistemas sociales, creando nuevos bienes, dinamizando los sistemas de fabricación y las tecnologías asociadas, diversificando los patrones de consumo, introduciendo nuevas necesidades, alterando las estructuras económicas, sociales y políticas y, fundamentalmente, acelerando el proceso de expansión económica a nivel mundial [1]. Ello determina que las vertientes de análisis y evaluación de impacto de la tecnología sobre el medio ambiente contemplen aspectos económicos, ambientales y sociales.

Debido a la finitud de materias primas, la vulnerabilidad de los ecosistemas naturales y sociales, la industrialización ha determinado daños y ha aumentado el impacto sobre el ámbito no solo ambiental sino también en la esfera socioeconómica y cultural. Esto ha estimulado el nacimiento de la política ambiental [2], y el desarrollo de metodologías de evaluación ambiental, social y económica con el fin de reducir la huella ambiental de la fabricación del producto [3,4], con especial énfasis en el ACV ambiental y la huella de carbono. Este incremento de sensibilidad a los problemas ambientales ha llevado a la ingeniería de fabricación a ser proactiva en el diseño de nuevos productos sostenible, mejorar los ya existentes y desarrollar procesos de fabricación más limpios [5], incorporando Ecodiseño, ACV, fabricación limpia y otras técnicas incardinadas en el concepto de desarrollo sostenible [6].

El esfuerzo por mitigar la situación precedente se inicia con la definición de sostenibilidad, la misma data del 1987 cuando se formalizó en el Informe Brundtland [7-8]: *“La sostenibilidad o desarrollo sostenible es aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de las futuras generaciones”*. Este giro del desarrollo implica un cambio muy importante en cuanto a la idea de sostenibilidad ya que enfatiza la dimensión Ecológica, introduciendo las nuevas dos dimensiones, Economía y Equidad (social) que crearán la triada (3E) más significativa y sobre la que se formulan nuevos conceptos conocida como la triple botton line. En esta nueva concepción de

la sostenibilidad se atiende por igual a las tres dimensiones como yacimientos de valor global y holístico. La representación de este concepto tiene un carácter fractalizado, focalizando la relación entre los tres conceptos en cada uno de los ejes de forma simultánea (figura 1).

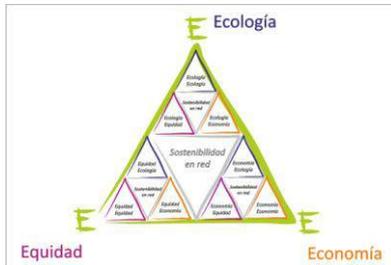


Figura 1. Gráfico de Sostenibilidad. Triple E

Con el propósito de determinar el estado de las contribuciones científicas y técnicas se ha estructurado el análisis bibliográfico de desarrollos técnicos en dos ámbitos con los que, cartografiar las oportunidades de investigación en el objeto de la Tesis y desarrollar la propuesta preliminar de trabajo. Como primer bloque se encuentra el estado del arte del ACV del producto y, como segundo bloque, se analizan las herramientas CAD/CAE/CAM (CAx) que poseen mayor implantación en el ámbito del diseño y la fabricación, bajo la perspectiva de la sostenibilidad en el contexto de la norma ISO 13030 para el intercambio de datos en entornos PLM. De este análisis se obtiene una perspectiva de las publicaciones asociadas al estado del ACV del producto [9] asociadas a los cuatro tópicos de búsqueda principales: Life Cycle Analysis, Life Cycle Analysis Environmental, Life Cycle Analysis Economic y Life Cycle Analysis Social. De aquí se desarrolla una visión de los elementos publicados y citas por año de los últimos 10 años en donde se puede ver la evolución de éstos.



Gráfico elementos publicados Gráfico citas por año



Gráfico elementos publicados Gráfico citas por año

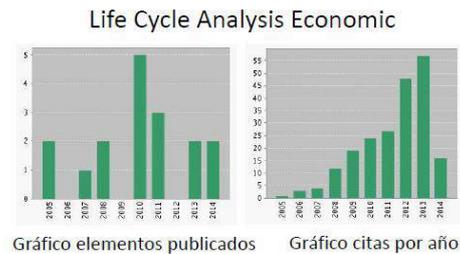


Gráfico elementos publicados Gráfico citas por año

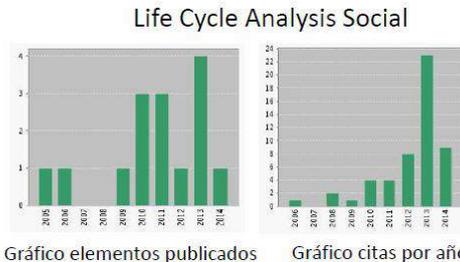


Gráfico elementos publicados Gráfico citas por año

Figura 2. Evolución citas y publicaciones de la ACV

Existe un análisis preliminar de los desarrollos de ACV Social [11] y ACV Económico [12,13] donde se observan que los trabajos desarrollados en estas dos dimensiones están evolucionando muy positivamente pero con un claro retraso en la integración de ambas.

En cuanto al análisis de la segunda parte correspondiente a las **herramientas CAx y el intercambio de datos en el ciclo de vida del producto (PLM/STEP)** se recogen los datos en la tabla 1 de forma que se puede observar la integración de PLM/PDM [14] y módulos de sostenibilidad en las diferentes herramientas CAD, sin existir una integración de ambos elementos de forma estandarizada y normalizada para todas.

Tabla I. Softwares con herramientas CAx, aplicación PLM y módulo Sostenibilidad

SOFTWARE	USO	PLM / PDM	ACV
CATIA	Sector aerospacial, transportes, diseño de piezas mecánicas, ergonomía y industria automotriz.	3DS Experience ENOVIA	EDW
SOLID WORKS	Diseño de piezas mecánicas (3D y gestión de planos).	3DS Experience Solid Works Enterprise	Sustainability
CREO	Diseño de piezas mecánicas (3D y gestión de planos).	WindChill PLM	WindChill Product Analytics
AUTODESK	Diseño arquitectónico, gestión de planos, 3D para uso de render, 3D industrial en general.	Autodesk PLM360	Autodesk Alias, Autodesk Algor Simul.
SOLID EDGE	Diseño de piezas mecánicas, instalaciones industriales, productos de consumo, mobiliario, etc.	Siemens PLM Teamcenter	-----

2. Objetivos, Hipótesis y Metodología.

Según lo analizado en el apartado anterior, el reto actual de la tesis doctoral que este plan de investigación sustenta es la óptima integración y articulación en entornos CAx y PLM del análisis del ciclo de vida bajo los tres pilares de la sostenibilidad social, ambiental y económica

de forma integrada y simultánea. Hasta el momento, no se dispone de entornos para materializar la ingeniería y fabricación de forma sostenible soportado por herramientas CAx y PLM que permitan la evaluación de la sostenibilidad, modelado datos y gestión de la información de sostenibilidad de producto desde la perspectiva del ciclo de vida, bajo normas de datos de producto y calidad de la información. Por ello, concurren el siguiente conjunto objetivos e hipótesis de esta tesis doctoral:

OBJETIVOS

El objetivo general de esta tesis se incardina en el desarrollo de un Entorno Integrado en sistemas CAx para Modelado, Simulación, Optimización y Evaluación de la Sostenibilidad de Productos y Procesos de Fabricación consistente en la formulación de un modelo informacional integrable en entornos CAx bajo el estándar STEP 10303 y su concreción en un prototipo para el desarrollo de proyectos bajo AP.

De este objetivo general se desglosan los siguientes objetivos específicos:

- O1.** Establecer un modelo de diseño y desarrollo de productos sostenibles que integre la evaluación de la sostenibilidad desde la 3E, junto a un modelo que de soporte al intercambio.
- O2.** Formular un modelo de datos unificado para la integración de información de las bases de datos existentes y las requeridas para la evaluación de la sostenibilidad desde la 3E integrada y fractalizando la información.
- O3.** Formular un modelo unificado de cálculo de impactos y daños para la evaluación integrada de la sostenibilidad bajo la triple E, a partir del modelo de base de datos unificada ambiental, social y económica, integrable en entornos CAx.
- O4.** Concretar el modelo de evaluación de la sostenibilidad integrada en un modelo informacional bajo ISO 10303 y AP empotrable en entornos TIC: CAx y PLM.
- O5.** Integrar el modelo informacional de sostenibilidad en un Protocolo de Aplicación (AP) específico asociado a la norma STEP (ISO 10303), contemplando la integración de la información sostenible de un producto a través de su ciclo de vida.
- O6.** Desarrollar un prototipo en entornos CAx, PLM y AP del modelo propuestos que permita verificar y validar el modelo formulado.

De los objetivos propuestos, se traduce la siguiente propuesta de Entorno de Modelado, Simulación y Optimización de Sostenibilidad sobre la que se articularán las hipótesis y metodología de la tesis doctoral.

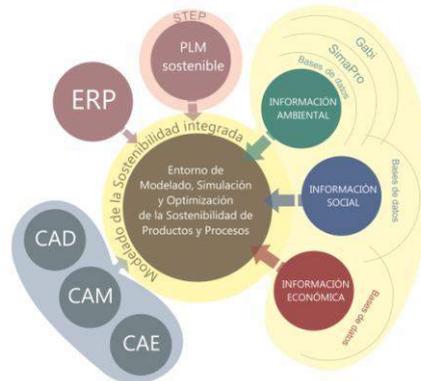


Figura 3. Entorno de Modelado, Simulación y Optimización de la Sostenibilidad

Es posible formular una hipótesis cuando se ha tenido un período exhaustivo de observación y/o documentación de un determinado hecho o fenómeno. En este caso se trata del estado, evolución e integración de datos del ACV con TICs en el ciclo de vida del producto. Las hipótesis planteadas en este Plan de Investigación derivan de los objetivos propuestos y están directamente relacionadas con los problemas que actualmente plantea la integración de la sostenibilidad bajo triple E y el ACV en entornos CAx y PLM.

HIPÓTESIS DE PARTIDA

- H1.** Es posible formular un modelo de diseño y desarrollo de producto sostenibles que soporte, de forma integrada en entornos CAx, al ecodiseño y la evaluación de la sostenibilidad bajo la 3E, integrando motores de cálculo y bases de datos unificadas.
- H2.** Es posible formular un modelo informacional para evaluación de la sostenibilidad bajo la 3E con base de datos integradas y motor de cálculo unificado de impactos y daño, integrable en entornos CAx.
- H3.** Es posible integrar un modelo de datos de sostenibilidad unificada bajo la 3E en el contexto de la norma ISO 10303, APs bajo criterios de calidad y fiabilidad de datos de producto y transferencia de la información.
- H4.** Es posible mejorar los entornos CAx existentes incorporando modelos informacionales de ecodiseño y evaluación integrada de la sostenibilidad.
- H5.** Es posible establecer estrategias de gestión de la información de sostenibilidad integrada bajo ISO 10303, de los entornos CAx, PLM, para su incorporación a los ERP, Sistemas de

Información Gerencial (MIS-SIG ERP y los requerimientos responsabilidad social corporativa.

METODOLOGÍA

La tesis doctoral tiene una amplitud monográfica, con alcance propuesto en los apartados precedentes y es de naturaleza teórico-metodológica-práctica. Su desarrollo se llevará a cabo en dos partes: teórico-metodológica en la cual se formulan los modelos que serán evaluados en la fase práctica para su validación a través de casos estudio en entornos CAx, PLM comerciales y APs.

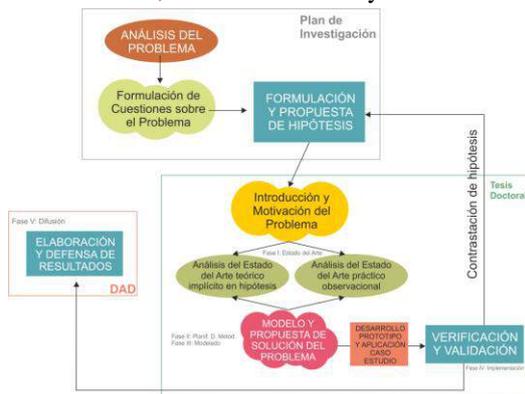


Figura 4. Fases para el desarrollo de la tesis Doctoral

La estructura para el desarrollo de la tesis sigue el método de investigación mostrado en la figura 4. En sus etapas se parte de una fase de análisis bibliográfico del Estado del Arte que persigue encontrar y analizar trabajos afines al proyecto con los objetivos y casos de estudio desarrollados e implementados semejantes. En la segunda fase de Planificación del Desarrollo Metodológico se creará un modelo genérico que integre todos los aspectos incluidos en las hipótesis de partida que servirá de soporte para la formulación de un prototipo en entornos CAx. Esta situación permite, posteriormente, trasladar a la fase de implementación y validación los datos obtenidos en la fase 2 y 3 incluyendo el último aspecto normativo en entorno de diseño y desarrollo de producto, la ISO 10303. En esta fase de validación y verificación, se obtendrán los datos necesarios para el proceso de contraste de hipótesis. Por último, se plantea la fase de Difusión de Resultados donde se contemplan contribuciones en congresos nacionales e internacionales a lo largo de la Tesis Doctoral así como publicación en revistas indexadas en JCR.

3. Conclusiones

De todo el análisis desarrollado, las conclusiones se desarrollan en torno a la oportunidad de desarrollo de un modelo que

integre las diferentes bases de datos de los ACV del producto (ambiental, social y económico) de forma que la inclusión de la evaluación de la sostenibilidad sea posible a través del proceso de fabricación del producto de manera holística y bajo el desarrollo de protocolos que permitan la transferencia y manipulación de todos los datos que se generan en un proyecto así como su intercambio y accesibilidad.

4. Referencias

- [1] J.J. Rodríguez. Hacia un uso sostenible de los recursos naturales. Universidad Internacional de Andalucía. Sevilla. 2008.
- [2] A.M. Eliceche y S. M. Corvalán. Environmental life cycle impact as a tool for process optimisation of a utility plant. *Comput. Chem. Eng.* 2007. 32. 648-656.
- [3] O. Jolliet y M. Margni. IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. *IJ. LCA.* 2003. 8. 324-330.
- [4] O. Jolliet y M. Saadé. Life Cycle Assessment: understand and perform an Eco-balance. *Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes*, 2005.
- [5] M. P Harold y B. A. Ogunnaike. Process engineering in the evolving chemical industry. *AIChE J.* 46. 2123-2127.
- [6] C. Telenko y M. E. Webber. A compilation of design for environment principles and guidelines. *Int. Design Engineering Tech. Conferences & Computers an Inf. in Engineering Conference*, New York. 2008.
- [7] T. Graedel y E. Allenby. *Industrial Ecology and Sustainable Engineering*. Pearson. New York. 2009.
- [8] R. Bermejo. *Manual para la economía sostenible*. Catarata. Madrid. 2011.
- [9] H. Baumann y A.M. Tillman. *The Hitch Hiker's Guide to LCA. An orientation in LCA methodology and application*, Lund (Sweden). 2004.
- [10] L. Dreyer y A. L. Niemann. Comparison of three different LCIA methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99 - Does it matter which one you choose? *IJ LCA* 2003. 8. 191-200.
- [11] A. Jorgesen. Analysis of the link between a definition of sustainability and the life cycle methodologies. *IJ. LCA*, 2013. 18. 1440-1449.
- [12] K. Segun y S. Kara. Analysis of the impact of technology changes on the economic and environmental influence of product life-cycle design. *IJ. CIM* 2014. 27.422-433.
- [13] B. Weidema. The Integration of Economic and Social Aspects in Life Cycle Impact Assessment. *IJ. LCA* 2006. 11. 89 – 96.
- [14] X. Ye y X. Zhang. PLM for multiple lifecycle product. Master Thesis. KTH Royal Institute of Technology, Estocolmo, 2013.

Optimización e implantación de la cadena de suministro utilizando lean en el sector sub-contratas aeronáuticas

K. Aoulad Azzouz, M. Marcos Bárcena, J. Salguero Gómez

Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial. Escuela superior de Ingeniería de Cádiz.
Avenida Universidad de Cádiz, 10. 11519. Puerto Real (Cádiz). Teléfono: +34 675 23 90 95.
karim.aouladazzouz2@alum.uca.es

Resumen

Actualmente, la situación ha desencadenado la necesidad de un cambio en el sector aeronáutico en la estrategia que consiste en aplicar la filosofía *lean* no sólo en el sector principal, sino también en sus proveedores.

De acuerdo con las investigaciones realizadas del sector o cadena de suministro externa, el método *lean* está muy lejos de su aplicación.

Nos planteamos las siguientes cuestiones:

- ¿La implantación del *lean* es dependencia o compromiso respecto a la tractora?
- ¿La zona geográfica influye en la implantación y la optimización del *lean*?
- ¿La causa socio-económica influye en la optimización y la implantación del *lean*?
- ¿La causa socio-cultural influye en la implantación y optimización del *lean*?

1. Introducción

En la industria aeronáutica, *lean production* se ha comenzado a implantar a lo largo de todos los niveles de la cadena de suministro. Esta implantación no se ha limitado exclusivamente a entornos de fabricación, sino que se ha llevado a cabo en procesos de servicios tales como postventa y en procesos de mantenimiento como son de reparación y de revisión.

Debido a la importancia de gestionar el ciclo de vida total del producto en la industria aeronáutica, el *lean* se ha extendido en otros procesos organizativos y especialmente, al diseño y desarrollo de nuevos productos que en esta industria representan una parte importante del tiempo total del ciclo de vida de dichos productos y de los costes totales.

En cuanto a su implantación en las sub-contratas de este sector se refiere, se han identificado una serie de trabajos que enfatizan el desarrollo de modelos de implantación y otros trabajos cuyo enfoque se centran en el análisis de estudios de la implantación del *lean*.

Debido a la necesidad de implantación del *lean* a nivel de empresa, algunos autores señalan que la deficiencia común en las empresas es la incapacidad para implantar los principios y las prácticas del *lean* a lo largo de la cadena de valor completa. En este sentido, la iniciativa para el avance empresarial *lean* (“LAI: Lean Advacement Initiative”) del Instituto

Tecnológico de Massachusetts, desarrolla un modelo de implantación del *lean* a lo largo de toda la empresa para evitar la creación de islas de mejora. Este modelo es un marco sistemático que abarca los principios del *lean*: métricas, prácticas globales y prácticas que permiten a las organizaciones iniciar, mantener y mejorar continuamente la transformación *lean*. Dicho modelo se centra en cuestiones estratégicas y en las relaciones internas y externas con los grupos de interés claves.

Actualmente, la implantación y la optimización de la cadena de suministro aplicando el método *lean*, ha revolucionado los métodos de organización, tanto interna como externa, en las empresas que desde hace años se vienen generalizando en el sector aeronáutico, pero que siguen muy de lejos las sub-contratas del primer y segundo nivel.

Nuestro objetivo en este trabajo es analizar el método *lean* en las empresas sub-contratas del sector aeronáutico. Para ello, se realizan entrevistas a los gerentes, directores o delgados de las empresas utilizando preguntas tipo de carácter cuantitativo y preguntas abiertas; así como preguntas a los trabajadores, visitas a plantas y charlas con los clientes de estas empresas sub-contratas. [1-7]

2. Metodología

Nuestra metodología de investigación se divide en dos partes: una teórica-metodológica y otra fase práctica. Ver **Figura 1**.

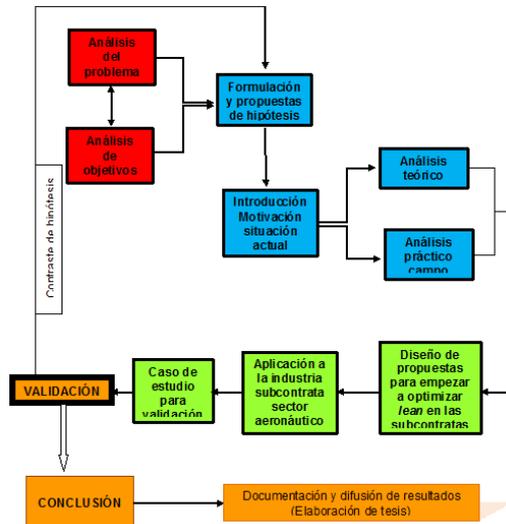


Figura 1. Metodología aplicada para la optimización e implantación del lean en la sub-contratas en el sector aeronáutico.

En el futuro, llegaremos a diseñar una propuesta para empezar a optimizar el *lean* en las sub-contratas, su aplicación y su validez.

3. Conclusiones

Las investigaciones realizadas se han llevado a cabo conforme al *lean* actual que se basa en el proceso colaborativo con interfaces organizacionales rígidas entre cliente, sub-contratas y empresa principal. Dichas investigaciones determinan que la dificultad en la implantación del *lean* en las sub-contratas no depende de la empresa tractora, sino del compromiso de la dirección y la gerencia de las sub-contratas.

En paralelo y con el objetivo de comparar los resultados obtenidos, seguiremos investigando a través del *lean emergente* que consiste en formar un equipo virtual sin separaciones entre cliente, empresa principal y sub-contratas.

5. Referencias

[1] Womack J.P., Jones, B.T. y Ross, D. (1990) "The machine that changed the world". New York, Mac Millan associates.

[2] Zayco, M.J., Broughman, D.J. y Hancock, W.M. (1997). "Lean manufacturing Yields world-class improvements for small manufacturing". IIS Solutions, vol.29, N°4, pp36-40.

[3] Murman, E.; Allen, T.; Bozdogan, K.; Cutcher-Genshenfeld, J.; Mc Manus, H.; Nightinglass, D.; Rebenitsch, E.; Shields, T.; Stahl, F.; Waltons, M.; Warmkessel, J.; Weiss, S; Windnall, S. (2002). "Lean enterprise value: insight from MIT'S lean aerospace initiative". New York.

[4] Alfa-Luque, R.; Medina Lopez, C.; Sharge, H. (2012) "A study of supply chain integration in the aeronautics sector". Production planning and control, DOI: 10.1080/09537287.2012.666868.

[5] Crute, V.; Ward, Y.; Brow, S.; Craves, A. (2003). "Implementing lean in aerospace, challenging the assumptions and understanding the challenges". Tchnovation, vol.23, N°12, pp 917-928.

[6] Martínez-Jurado, P.; Moyano-Fuentes, J. (2011). "Lean producción y gestión de la cadena de suministro en la industria aeronáutica". Investigaciones europeas de dirección y economía de la empresa, vol.17, N°1, pp. 137-157.

[7] Sanz-Marcos, P. y López Fernández, P. (2010). "Análisis de la cadena de suministro del sector aeronáutico 2010". Seminario de negocio aeronáutico. Instituto internacional de San Telmo, 22 de septiembre de 2010.

Propuesta experimental para el dimensionamiento del Espacio Semántico en la aplicación de la Ingeniería Kansei-Chisei en entornos de fabricación Lean

Antonio Córdoba Roldán⁽¹⁾, Mariano Marcos Bárcena⁽²⁾, Francisco Aguayo González⁽¹⁾

⁽¹⁾Departamento de Ingeniería del Diseño, Universidad de Sevilla, c/ Virgen de África 7, 41012.
Tf: (+34) 95 455 28 27, E-mail: acordoba1@us.es

⁽²⁾Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, Universidad de Cádiz, Avda. Universidad de Cádiz, nº 10. Campus Universitario de Puerto Real. 11519. Cádiz

Resumen

En los proyectos de Ingeniería Kansei el espacio semántico recoge y describe el dominio de emociones o *kanseis* y el dominio racional o *chisei* mediante términos que apelan a los sentimientos y racionalidad del trabajador en relación con el entorno de trabajo. El objetivo es obtener y cuantificar la respuesta emocional y cognitiva mediante la aplicación de herramientas neurocientíficas. El espacio semántico, en entornos Lean, debe integrar la significación y los valores Lean, en la conceptualización y explicitación de términos kansei y chisei.

1. Introducción

En el ámbito laboral, para el diseño de un entorno de trabajo, se puede comprobar si alguien está realizando un trabajo indebidamente midiendo el estado muscular mediante un electromiógrafo (EMG). Otro ejemplo sería captar el interés de un trabajador por determinadas partes de la interfaz de una máquina a través del movimiento ocular mediante un seguimiento con equipos de eyetracking. Por otro lado, se puede conocer si un puesto de trabajo gusta o no mediante la expresión facial de la persona e incluso cuantificando el estado de activación neural del trabajador por electroencefalografía (EEG). A parte de esto hay que tener en cuenta la ergonomía del puesto de trabajo, en base a por ejemplo, al grado de flexión de la cadera, la distancia recorrida... incluyendo la motivación del trabajador la cual puede ser detectada en base a la energía que este necesita para llevar a cabo la tarea.

La presente propuesta de proyecto tiene como objetivo el desarrollo y aplicación de un modelo integrador de diseño emocional y diseño racional desde una perspectiva cuantitativa con enfoque neurocientífico centrada en el usuario o trabajador para su aplicación al diseño de entornos de fabricación Lean a nivel de planta (macro), de puesto de trabajo (meso) y de herramientas (micro). La propuesta participa de la evolución de la innovación en los sistemas de fabricación inteligente y sostenible, con enfoque en el trabajador. Para conseguir dicho objetivo se realizará una propuesta metodológica basada en el concepto de Ingeniería Kansei-Chisei. La

idea principal para el desarrollo metodológico de la Ingeniería Kansei-Chisei es utilizar el marco metodológico de la Ingeniería Kansei desarrollado por Nagamachi para incorporar el chisei.

El concepto de kansei está estrechamente relacionado con valores afectivos, emocionales del ser humano, el concepto chisei trabaja para aumentar el conocimiento o entendimiento de las descripciones verbales de hechos lógicos.

La propuesta metodológica por Ingeniería Kansei-Chisei hace necesario la definición de un espacio semántico y de un espacio de propiedades.

El espacio semántico es la fase de la Ingeniería Kansei en la cual se establecen los términos kanseis y chiseis que se van a estudiar desde el punto de vista del diseño del entorno de trabajo. La elección correcta de los kanseis y chiseis es de gran importancia para definir al usuario potencial, ya que este esperará experimentar ciertas emociones con el entorno de trabajo.

Por otro lado, el espacio de propiedades es la fase de la Ingeniería Kansei en la cual se establecen las propiedades del entorno de trabajo que se van a estudiar desde el punto de vista del kansei y chisei.

2. Fisiología del kansei y chisei

Aproximadamente, se puede decir que el kansei es una estructura de la mente subordinada, que conecta los estímulos exteriores (diseño del entorno de trabajo) a las emociones. La mayoría de las emociones se generan en el cerebro en un área denominada sistema límbico. Desde una

perspectiva evolutiva, el sistema límbico es mucho mayor que el resto del cerebro humano. Incluye funciones básicas tales como la regulación de la respiración, la presión arterial, etc., y controla la forma en que reaccionamos emocionalmente a los estímulos externos [1]. Todos estos procesos se llevan a cabo inconscientemente ya que la conciencia se ubica en las partes más nuevas del cerebro como son los lóbulos frontales.

Los seres humanos pueden controlar sus emociones a un cierto grado conscientemente, pero no completamente [1]. Para el kansei esto significa que el sistema límbico es el indicado para medir las emociones en el cerebro.

3. Espacio semántico

El kansei y el chisei, antes de generarse, se componen de vista, oído, olfato, gusto... Las experiencias sensoriales se almacenan junto a la memoria experiencial en el mismo momento, lo cual se traduce en un registro emocional.

Algo que se ha memorizado, decidido o juzgado previamente con un cierto valor puede resurgir cuando se presenta un estímulo similar o se percibe como similar. Por ejemplo si a una máquina se le enciende un piloto luminoso rojo, puede evocar anteriores usos de otras máquinas y emerger una respuesta de alerta o peligro.

El receptor no siente únicamente como resultado de procesos fisiológicos, el kansei y el chisei se generan en combinación con las experiencias pasadas y la información de memoria (hipocampo) estando íntimamente relacionados con la experiencia previa ante un determinado estímulo. Todas las emociones a través de los sentidos se sienten como emociones apoyadas por las experiencias de la vida diaria del receptor.

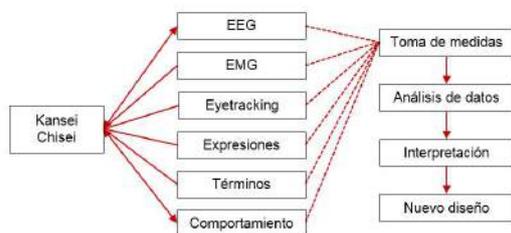


Figura 1: Procesamiento de estímulo

Existen emociones compuestas que combinan sensaciones (modalidades sensoriales), especialmente la vista, que domina el 70% -80% de la estimulación sensorial, de gran impacto kansei. Por ejemplo, basta con una imagen de una máquina para hacer sentir lo amistosa o fácil de usar que será.

La figura 1 muestra como el kansei se manifiesta de varias maneras o por varias vías,

pudiéndose obtener un dimensionamiento psicológico del estado emocional de la persona [2]. Por ejemplo, este se puede dimensionar o cuantificar a través de las señales neurales usando electroencefalografía, pudiendo conocer cuál es el estado de actividad neural.

Estas nuevas funciones requieren conocer emociones ocultas y kansei profundos de las acciones, expresiones, lenguaje hablado, etc., de los trabajadores en sus puestos de trabajo. El personal directivo, de gestión, personal de servicio al cliente, etc., necesitan compartir los mismos kanseis y tener la capacidad de leerlos en las personas con las que están tratando.

4. Medición del kansei y chisei

El kansei representa una estructura individual mental. Comprender los kansei no es fácil e implica una gran cantidad de empatía y experiencia. Tradicionalmente, los sentimientos y las emociones han sido tratados por ciencias de análisis comportamental como la psicología y la sociología. Los precursores de la Ingeniería Kansei y otras metodologías para el desarrollo de productos afectivos se dieron cuenta del problema de cuantificar el kansei, y se propuso el desarrollo de un modelo estadístico matemático correcto para la predicción del comportamiento de los usuarios. El objetivo era eliminar la predicción comportamental basada en interpretaciones cualitativas.

Por otro lado es de vital importancia conocer cómo y dónde se origina el kansei y cómo este puede ser captado y convertido en información útil para el diseño y desarrollo de entornos. El kansei como tal es un sensación interna, pero en la actualidad sólo se puede medir utilizando métodos basados en la externalización.

Nagamachi hace diferencia ente dos tipos de medidas principalmente:

1. Medidas psicológicas: haciendo referencia a medidas obtenidas mediante encuestas, test... haciendo referencia principalmente a la técnica de Diferencial Semántico.
2. Medidas fisiológicas: medidas de respuestas fisiológicas, comportamientos y expresiones corporales generadas por 'estimulación externa' como la medición del ritmo cardíaco, EMG y EEG.

Todos los métodos mencionados anteriormente se han aplicado con éxito en diferentes áreas de aplicación kansei. Sin embargo, los sentimientos y las impresiones son estructuras complejas, que requieren instrumentos de medición sensibles. Por desgracia, incluso el más poderoso de los métodos de medición no es capaz de revelar el kansei completo de alguien, sólo pequeñas partes de él. Se ha demostrado que como medida adicional que complementa a las

descripciones semánticas, el EMG y el EEG pueden ser útiles [3].

Electroencefalografía e Ingeniería Kansei

El EEG es la señal eléctrica detectable en la superficie del cuero cabelludo. Se trata de una señal con máxima resolución temporal, puesto que discrimina y sitúa en el tiempo, de forma adecuada, distintas respuestas cerebrales. Gracias al desarrollo de algoritmos matemáticos capaces de calcular qué áreas de la corteza cerebral originan la actividad registrada en el exterior, el EEG puede proporcionar información espacial de baja resolución pues discrimina y sitúa en el espacio de forma orientativa las respuestas cerebrales.

La electroencefalografía en la Ingeniería Kansei como técnica de análisis y medición fue utilizada por el profesor Tomoyuki Yoshida [4]; el cuál midió la frecuencia y la cantidad de las fluctuaciones de ondas alfa (de 8 a 13 Hz) en el lóbulo frontal (Fp1, Fp2) dando a conocer la relación entre ellos y la comodidad o sensación de relajación (se conoce que las bandas de frecuencia alfa en el EEG aumentan durante el reposo tranquilo.)

Yoshida, tras la realización de múltiples experimentos, descubrió que un gradiente en el dominio de las frecuencias bajas está fuertemente asociado con la comodidad y la sensación de relajación. Y por otro lado, que un gradiente más pronunciado en el dominio de frecuencias altas, está fuertemente asociado con la sensación de confort subjetivo.

De sus muchos resultados de investigación, él construyó un modelo básico de emoción compuesto de dos ejes, la activación del sentimiento (excitante / calma) y el confort (cómodo / incómodo). Además de esto, Yoshida, encontró asociaciones de fluctuación de ondas alfa no sólo con la comodidad, sino también con el disfrute, que representa la emoción de la comodidad [4].

5. Propuesta metodológica y diseño experimental

El registro EEG requiere en primer lugar la colocación de electrodos en el cuero cabelludo al sujeto de prueba. El empleo de un número cada vez mayor de electrodos ha extendido el uso de gorros de registro, que incorporan ya los electrodos, sin necesidad de colocarlos uno a uno. Nagamachi considera que los estímulos que pasan a través del globo ocular se convierten en señales que se propagan al lóbulo occipital y pasan a través de otras regiones hasta que son procesadas como kansei por la corteza prefrontal [2]. Estos nos indica que se debe prestar atención a la información recibida por

los electros ubicados en dicha zona, en concreto, como se expuso anteriormente en los electrodos Fp1 y Fp2.

Por tratarse de una señal muy débil es necesario someterla a una amplificación para poder tratarla y analizarla. El primer problema que plantea este tipo de equipos es que la no discrimina entre señal y ruido, por lo que se debe utilizar filtros que lo atenúen. Las interferencias más dañinas para el EEG son las oculares, que son de origen interno y que consisten en el registro de los movimientos oculares y parpadeos. Su mayor inconveniente es que pueden tener una frecuencia similar a la del EEG siendo en ese caso imposibles de filtrar. Además, su amplitud es normalmente muy superior a la propia señal EEG y pueden afectar a cualquier electrodo. Este tipo de interferencias se denominan artefactos y en muchas ocasiones pueden ser eliminados mediante análisis visual de la señal.

En este estudio se desea conocer qué circuitos cerebrales se activan ante una alternativa de diseño de entorno de trabajo que resulte atractivo. Para ello se puede plantear diseñar una tarea con tres tipos de estímulos: 15 representaciones de entornos muy atractivos (ATR+), 15 de entornos de atractivo intermedio (ATRO) y 15 poco atractivos (ATR-).

Seleccionados los estímulos el siguiente paso es definir la manera de presentarlos. En el diseño de bloques se recurriría a presentar las alternativas de diseño en series de la misma categoría experimental: los 15 entornos ATR+ se presentarían seguidas (con su correspondiente intervalo entre alternativa y alternativa), en otro bloque se presentarían todas las ATRO y en otro las ATR-. En general los diseños de bloques potencian el efecto de cada categoría experimental (por ejemplo, ATR+, ATRO, ATR-) y por tanto permiten mejorar la razón S/R. En cambio el diseño de bloques tiene el inconveniente de que el sujeto puede predecir con facilidad qué tipo de estímulo vendrá a continuación, lo que puede constituir un problema en algunos estudios, además puede producir habituación (disminución de la respuesta por repetición del estímulo) más fácilmente que en los diseños alternativos [5].

La siguiente decisión será analizar que estímulos se van a presentar. En los diseños de experimentos intersujetos, las condiciones experimentales se aplican a muestras diferentes. En este caso un grupo de sujetos se le presentarían los entornos ATR+, a otro grupo los ATRO y a otro los ATR-. En los intrasujetos se presentan todas las condiciones experimentales a todos los sujetos. El principal problema de los diseños intersujetos es que, en caso de que se observen diferencias

significativas en la respuesta a los distintos tipos de entornos, no es posible saber si el grupo que percibió los entornos ATR+ produjo respuestas distintas al que percibió ATR0 o al que percibió ATR-, debido a la manipulación experimental (diseño del entorno). En los estudios intrasujetos, estos factores se convierten en constantes, es decir, cesan de afectar diferencialmente ya que van a influir en todas las categorías experimentales dentro de cada sujeto.

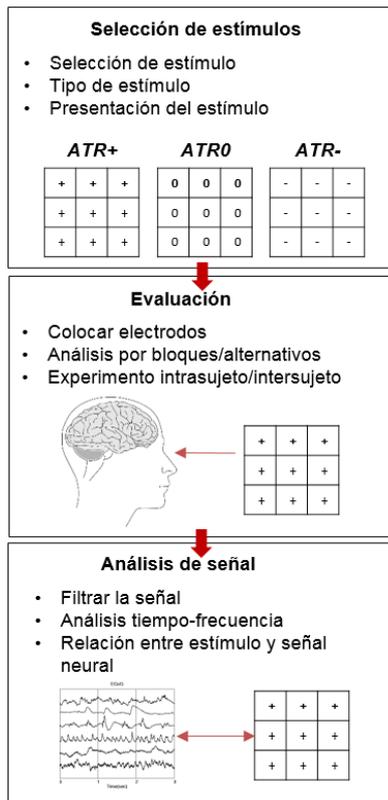


Figura 2: Propuesta experimental

Para el análisis y la interpretación de señales se requiere una ejecución en varias fases. En primer lugar, debe procederse a la extracción del parámetro más informativo de la señal, y su cuantificación en función del tratamiento experimental, en este caso las condiciones ATR+, ATR0, ATR-). En segundo lugar, debe comprobarse si esas condiciones producen un efecto significativo en el parámetro que se ha cuantificado (por ejemplo, si el patrón de respuestas es $ATR+ > ATR0 > ATR-$, a través de contrastes estadísticos [5]. Por último, se debe interpretar los resultados estadísticos obtenidos, por ejemplo, qué estructuras cerebrales están en la base de la percepción estética, en qué momento se activan, etc.

Por otro lado también será de interés disponer de datos espaciales. Para ello se realiza una cuantificación de la distribución topográfica de la señal consiste en representar en un mapa del

cuerdo cabelludo, qué amplitud o frecuencia presenta cada punto del cuero cabelludo en un momento dado. La distribución topográfica muestra información de sobre cómo se manifiesta espacialmente la actividad cerebral en cada condición experimental. Por ejemplo, permite explorar si las condiciones ATR+, ATR0 y ATR-, producen patrones espaciales diferentes. Si la distribución topográfica varía de una condición a otra, puede inferirse que cada condición activa de manera diferente el cerebro.

6. Conclusión

Es necesario que no solo el entorno y sistema de fabricación sea eficaz, limpio y óptimo si no que las personas que forman parte y participan de ese entorno de fabricación posean una calidad de trabajo que les ayude mediante la optimización de los sentimientos psicológicos generados (motivación, confort...) y la propia organización del trabajo, buscando así una calidad en el desarrollo personal del trabajador. Esta calidad personal del trabajador se traducirá en una mejora productiva sobre el sistema de producción.

Nagamachi hace referencia a este enfoque y lo denomina como Ergo-TeamWork el cual se basa en la búsqueda de la óptima compatibilidad entre humano y máquina y sistema de trabajo [6].

El objetivo es conseguir un impacto en la motivación, satisfacción, rendimiento y fiabilidad del trabajo, enlazando así con los principios de los sistemas de fabricación Lean.

4. Referencias

- [1] Damaiso, A.R. (1996). El error de Descartes. Papermac, London
- [2] Nagamachi, M. & Mohd, A. (2015). Kansei Innovation. Practical Design Applications for Product and Service Development. CRC
- [3] Picard, R. (1997). Affective Computing. Massachusetts Institute of Technology.
- [4] Yoshida, T. (1990). The measurement of EEG frequency fluctuation and evaluation of comfortableness, Journal of the Acoustical Society of Japan, 46, 914-919.
- [5] Carretié, L. (2011). Anatomía de la mente: emoción, cognición y cerebro. Editorial Pirámide.
- [6] Nagamachi, M. (2008). Ingeniería Kansei y las actividades exitosas del trabajo en equipo.

Propuesta metodológica para el estudio de procesos OSD. Aplicación a estructuras híbridas CFRP-AI

A.J. Sánchez Sotano⁽¹⁾, J. Salguero Gómez⁽²⁾

⁽¹⁾Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, Av. Universidad de Cádiz nº10, 11519-Puerto Real, Cádiz, 956015123, alejandro.sanchezsotano@alum.uca.es

⁽²⁾ Departamento de Ingeniería Industrial e Ingeniería Civil, Av. Ramón Puyol s/n (Algeciras, Cádiz).

Resumen

El presente trabajo presenta una metodología para el taladrado en un solo paso (One-shot Drilling OSD), proponiendo para ello una metodología de trabajo. Ésta, se aplica sobre una estructura híbrida compuesta por material compuesto con fibra de carbono y la aleación de aluminio 7475-T761. Se aborda desde la perspectiva del uso prolongado de una herramienta y los resultados que ofrece. La primera parte, determina los parámetros de cortes favorables a través de pequeñas series, utilizados posteriormente en el segundo ensayo. Éste, estudia la herramienta en distintos momentos de su vida, proporcionando una estimación de uso a través de diferentes factores.

1. Introducción

El taladrado es una operación que se realiza a diario, cobrando gran importancia especialmente en la industria aeronáutica. Tanto es así, que una de las grandes compañías del sector realizó más de 15 millones de veces esta operación en 2012 [1]. Se aplica a un gran abanico de materiales, siendo de especial interés los materiales compuestos y materiales metálicos avanzados como las aleaciones de aluminio o de titanio [2].

La necesidad de agilizar el proceso de fabricación para disminuir los costes asociados, lleva a combinar materiales que en servicio trabajan juntos y mecanizarlos de forma conjunta, formando estructuras híbridas. Teniendo en cuenta que cada material precisa de condiciones particulares para obtener los mejores resultados, y que la tendencia se focaliza en la disminución de tiempos, se propone el taladrado de la estructura en un solo paso, utilizando para ello una única herramienta en todo el proceso [3].

En este trabajo se abordará el estudio del proceso OSD, aplicando una metodología que permita analizar distintas variables sobre las que apoyar las conclusiones obtenidas.

2. Metodología

La metodología de trabajo se compone de tres secciones, correspondiendo cada una de ellas a las fases de antes del mecanizado, mecanizado y posterior al mecanizado. Se desarrollará a través de su aplicación práctica a estructuras híbridas de material compuesto con fibra de carbono

(CFRP) y la aleación de aluminio A97475-T761, ambos materiales de gran interés en el sector aeronáutico.

En la sección de pre-mecanizado se estudian los diversos componentes que intervienen en el proceso (herramientas, estrategias, desgaste...), los materiales a emplear o la tecnología a emplear durante los ensayos, describiendo, además, las características y objetivos de cada uno.

Se ha realizado un primer ensayo relativo a variación de parámetros de corte respecto a los utilizados en la industria, variando en un +/- 10% la velocidad de avance, manteniendo la velocidad de corte constante a 100 m/min (4823 rpm) en material compuesto y 110 m/min (5305 rpm) en aluminio. Se empleará un stack formado de una plancha de material compuesto y otra de aluminio. Los parámetros que mejores resultados ofrezcan se utilicen en el ensayo posterior. Éste corresponde a un ensayo de vida, buscando analizar el comportamiento de la herramienta a lo largo de su vida útil. En este caso, se emplearán dos planchas de fibra de carbono y una de aluminio. El motivo de este cambio es la inclusión de la operación de avellanado.

La estrategia de mecanizado se compone de tres fases. Un mecanizado en continuo en el material compuesto, hasta alcanzar una zona próxima a la intercara fibra-aluminio, momento en que se varía a una estrategia peck drilling sin extraer la herramienta por completo, considerando el proceso en un solo paso. Por último, en el segundo ensayo, se cambian los parámetros de corte una segunda vez para la realización del

avellanado en continuo. Los parámetros utilizados en el primer ensayo se recogen en la Tabla I. En todo momento el mecanizado se lleva a cabo sin aporte de lubricación.

Tabla I. Avances para el ensayo 1.

Serie	f - CFRP (mm/rev)	f - Al (mm/rev)
1	0.225	0.063
2	0.225	0.070
3	0.225	0.077
4	0.250	0.063
5	0.250	0.070
6	0.250	0.077
7	0.275	0.063
8	0.275	0.070
9	0.275	0.077

Indistintamente del ensayo realizado, se han llevado a cabo en un centro de mecanizado de cinco ejes KONDIA FIVE-400, sobre cuya mesa de trabajo se ha instalado una mesa dinamométrica calibrada, de forma que puedan recogerse los esfuerzos generados durante el corte. Sobre ésta, se asegura el utillaje empleado, conformado por una placa de sacrificio pre taladrada y un marco superior que asegure las planchas de trabajo. Las características de la herramienta empleada se recogen en la Tabla II.

Tabla II. Propiedades herramienta.

Propiedad	Valor
Material	Metal duro
Recubrimiento	Diamante
Diámetro	6.6 mm
Longitud de corte primaria	19 mm
Nº dientes de corte	2
Ángulo de hélice	25 °
Ángulo de punta primario	130 °
Ángulo de punta secundario	60 °
Ángulo de avellanado	130 °
Radio de acuerdo	0.7 mm

La segunda sección corresponde a la preparación de los elementos y maquinaria, así como la codificación empleada para clasificar los distintos datos obtenidos en el proceso. Tras esto, se procede a la realización material de los ensayos.

Por último, la sección de post-mecanizado detalla la metodología de evaluación de los datos recogidos en la fase previa. Los parámetros relevantes que se han considerado para este estudio se resumen en el análisis de rebaba, diámetro, rugosidad, radio de avellanado y tratamiento de las señales de esfuerzos capturadas. Debido a las

características concretas de la aplicación práctica, en el primer ensayo se realizarán 9 series de 10 taladros, de los cuales se evaluarán los agujeros números 1, 4, 7 y 10. En cuanto al segundo ensayo, al realizar un número mayor de agujeros, se evaluarán el primero y posteriormente cada 20.

La evaluación deberá seguir una secuenciación específica, de forma que altere en la menor medida posible las probetas.

Relativo al estudio metrológico, en primer lugar, se mide la altura máxima de rebaba, utilizando para ello un comparador amplificador electrónico. La medición obtenida corresponde a la diferencia de altura entre la superficie de la plancha y la altura máxima de rebaba.

Posteriormente, se limpian las probetas con una solución de éter y alcohol, de forma que se eliminen las partículas que proceden del mecanizado, evitando que se encuentren presentes al medir diámetro y al elaborar las réplicas de los agujeros, que se realizan utilizando material termoestable bicomponente.

La medición de diámetros se llevará a cabo con un micrómetro de interiores de tres contactos, realizando tres medidas por material a distintas alturas. Es importante la verificación de la calibración del mismo, por lo que se propone una medida en anillo patrón tras la evaluación de varios agujeros.

Las réplicas elaboradas previamente se utilizarán para evaluar la calidad microgeométrica del agujero a través de la rugosidad media aritmética. Se evaluará utilizando un rugosímetro con los parámetros ajustados al tamaño de la muestra, realizando cuatro mediciones en distintas posiciones para comprobar la repetitividad de resultados.

Además, en el caso del segundo ensayo, las réplicas se utilizarán para medir el radio de acuerdo entre el avellanado y la superficie de la caña, utilizando para ello un microscopio óptico de medición por coordenadas.

En cuanto a la evaluación de las señales de esfuerzos registrados, se tendrán en consideración los tramos estables del mecanizado, correspondiendo estos a los dos mecanizados en continuo del material compuesto, cada uno de los pecks del taladrado en aluminio. De cada uno de los tramos se extraerán los valores de fuerzas medias en la dirección de avance, así como los máximos y mínimos registrados.

3. Resultados y Discusión

Tal y como se detalla en la metodología, el primer parámetro a evaluar es la altura de rebaba. Se ha incluido un límite máximo

aceptable marcado en 0.3 mm, siendo esta la máxima permitida en el sector aeronáutico.

Se observa que la dispersión de valores es elevada. Esto es debido a que los mecanismos de formación de rebaba son bastante impredecibles y no se tiene un alto grado de control sobre ellos.

En cuanto a los diámetros medidos, se han incluido unas líneas de tolerancia, determinadas por el fabricante de la herramienta, que marcan el tamaño del agujero teórico que debe producir la herramienta en el material compuesto.

Se observa que todas las mediciones en fibra de carbono se encuentran por encima de las tolerancias superiores, así como gran parte de las mediciones en aluminio. Por ello, se ha considerado que el análisis se base en la dispersión de los valores de cada serie en lugar de los valores nominales.

El análisis de rugosidad toma como valor máximo permitido 3.2 micrómetros, siendo este, al igual que en el caso de la rebaba, el máximo permitido en el sector aeronáutico. Se ha observado que todas las mediciones se encuentran dentro de este límite. En el caso del material compuesto, los valores se encuentran entre 1.5 y 2.7 micrómetros mientras que en el aluminio oscilan entre 0.7 y 1.9 micrómetros, ofreciendo éste mejor calidad.

Observando las imágenes tomadas, se determina que en el caso de menos avance en fibra y mayor en aluminio, el desgaste en los filos es el más favorable, pese a que debería existir mayor abrasión y adhesión que en el resto de combinaciones. Esta bondad se debe a la interrelación de los mecanismos de desgaste entre sí, de forma que la adhesión protege la herramienta de la abrasión, a la par que esta

evita la formación del filo recrecido por aluminio.

Tras los resultados de este primer ensayo, se ha realizado una matriz de ponderación, asignando diversos valores a cada serie en función de calidad ofrecida en cada apartado, siendo las series 1, 2 y 3 (menor avance en material compuesto) las que mayor puntuación obtienen. Finalmente, la serie 3 aporta los parámetros de avance seleccionados para la realización del segundo ensayo: 0.225 mm/rev para el material compuesto, y de 0.077 mm/rev para la aleación metálica.

La Figura 1 recoge las figuras correspondientes al ensayo 2. Cada una de ella representa las mediciones de rebabas (A), diámetro (B) y radio de acuerdo (C), además las fuerzas medias evaluadas (D).

En la inspección visual llevada a cabo previa a la medición de la rebaba, se constata que la altura varía notablemente y no sigue un patrón fijo de crecimiento. Si se observó que su tipología es uniforme hasta, aproximadamente, el taladro 480, en el que cambia a tipo corona. Esta variación coincide con el incremento de altura que se observa en la Figura 1.A a partir de este agujero, señal de un desgaste elevado en la herramienta.

El estudio de diámetros muestra que, en la primera parte del ensayo, la fibra de carbono presenta valores muy dispersos, estabilizándose posteriormente, Figura 1.B. Puede estar motivado por defectología en el material o una temperatura superior que expanda en mayor medida el material compuesto, eliminando más cantidad de material. Se observa que el mecanizado de aluminio es mucho más estable y las medidas se encuentran dentro del límite de

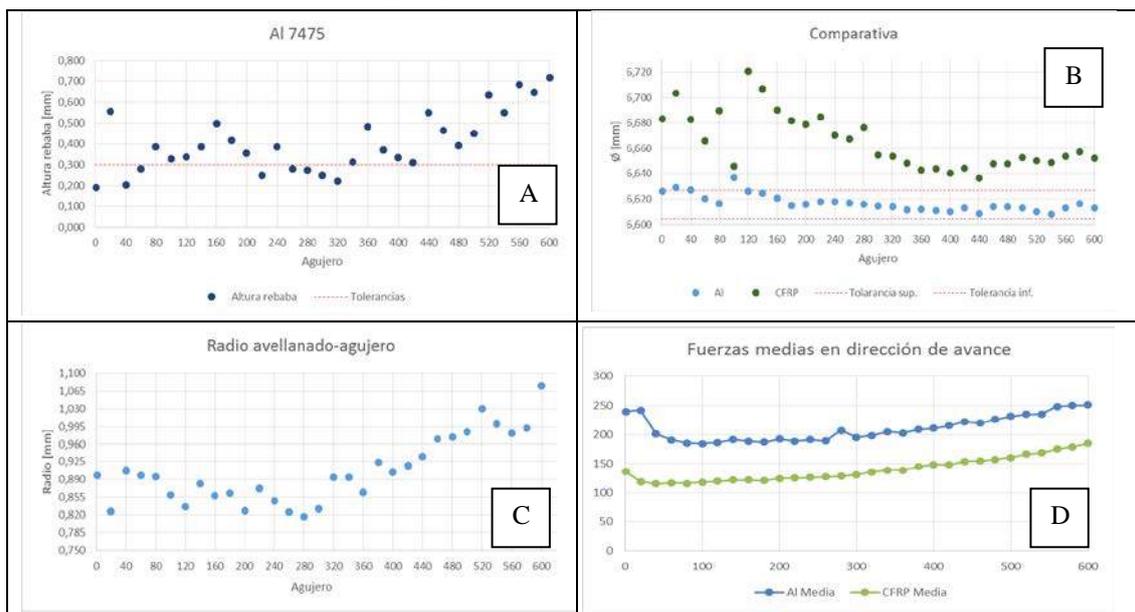


Figura 1. Resultados obtenidos tras el segundo ensayo

tolerancia de la herramienta marcado, tomando ligeramente mayores valores en la primera parte, reforzando la teoría de una temperatura superior.

En este caso, al igual que ocurre en el primer ensayo, todos los valores de rugosidad medidos se encuentran dentro de las tolerancias establecidas, sin apreciarse una tendencia evolutiva clara, por lo que en este apartado el rendimiento de la herramienta es bueno.

Las medidas del radio de acuerdo entre el avellanado y la caña de la réplica se muestran estables durante los dos primeros tercios del ensayo, con una variación de medida de aproximadamente de un milímetro Figura 1.C. A partir de ese momento, adquiere una tendencia ascendente asociada al desgaste del filo de corte del avellanado, comprobado visualizando las imágenes tomadas durante el mecanizado.

Relativo a la visualización y análisis del estado de la herramienta a través de las imágenes capturadas, se ha observado que el desgaste se acentúa en la última parte del ensayo, coincidiendo con el incremento de altura de rebaba, y una mayor inclinación de la pendiente ascendente de las fuerzas de corte. La zona que mayor desgaste presenta es el filo de corte principal, apreciándose abrasión producida por fibra de carbono. Por otro lado, se encuentra una micro fractura en el extremo de la punta (Figura 2), pudiendo ser uno de los motivos del cambio de tipología de rebaba.



Figura 2. Microrotura en el filo de la herramienta.

En cuanto al análisis de fuerzas, se ha llevado a cabo el tratamiento de señal comentado, aplicando un filtro de equilibrado de señales debido a una deriva de la señal en el equipo de medición. En la Figura 1.D se recogen las fuerzas medias en el material compuesto y en el aluminio.

Se registra una caída brusca de los esfuerzos tras los primeros taladros, correspondiente a la estabilización de la herramienta tras los primeros usos. Posteriormente se observa una tendencia ligeramente creciente de los esfuerzos debido al desgaste progresivo que sufre la

herramienta, cuya pendiente aumenta conforme aumenta el número de taladros realizados. Se observa que, la fuerza en el mecanizado del metal, es superior a la del material compuesto, algo esperable debido a las características mecánicas de cada material.

Otra las apreciaciones extraíbles de esta gráfica, es que la tendencia en ambos materiales es similar, manteniendo una diferencia en los valores de esfuerzos de, aproximadamente, 60 newton. Esto implica que el desgaste está afectando de forma parecida al mecanizado de cada material.

4. Conclusiones

Tras los ensayos realizados y su posterior análisis, se han obtenido las conclusiones siguientes:

- El proceso en OSD es una alternativa viable en el mecanizado de materiales híbridos.
- La herramienta utilizada devuelve resultados viables para el proceso estudiado, destacando la buena calidad microgeométrica y la alta estabilidad en el mecanizado de aluminio.
- El desgaste de la herramienta se acentúa en los últimos 100 taladros, indicando que la herramienta se acerca al final de su vida útil. Se considera que la herramienta es válida para la realización de, al menos 400 taladros.
- El proceso de desbarbado sigue siendo necesario, puesto que no se ha controlado la formación de rebaba de manera satisfactoria
- En cuanto al tamaño de los agujeros realizados, se considera que la geometría de la herramienta es válida, y que con una pequeña reducción de su diámetro, se podrían obtener los resultados esperados en este campo.

5. Agradecimientos

Agradecer al área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación por su consejo, apoyo y materiales facilitados para la realización de este trabajo.

6. Referencias

- [1] J. Salguero, M. Batista, P. Mayuet, A. Portal, P. Arroyo, M. Marcos, *A SEM/EDS study on the tool wear in the OSDD processes of CFRP/Al hybrid stacks*, Wear of Materials, 9th International Conference, Portland (USA), 2013.
- [2] J. Sánchez, *Materiales Compuestos en la industria aeronáutica*, AIRBUS-CSIC.
- [3] G. Gardiner, *Machining update: One-shot dry drilling of stacked materials*, High-Performance Composites, Mayo 2014.

Propuesta metodológica para el estudio de mecanizado de pieles metálicas

I. Del Sol⁽¹⁾, M. Marcos⁽¹⁾ A. Rivero⁽²⁾

⁽¹⁾Dpto Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, Avd. de la Universidad de Cádiz nº11, 11519 Puerto Real, 956485123, irene.delsol@uca.es

⁽²⁾ Tecalia Research & Innovation, División de Industria y Transporte, Mikeletegi Pasalekua, 7. 20009 Donostia-San Sebastián (Gipuzkoa).

Resumen

Las pieles metálicas se emplean en la industria aeroespacial como elementales del fuselaje de las naves. Estas piezas interesa que sean lo más ligeras posibles, por lo que una vez conformadas se les somete a operaciones de mecanizado, tradicionalmente mediante fresado químico, reduciendo así su peso. Sin embargo, este proceso es muy contaminante por lo que este trabajo propone una metodología para el estudio del mecanizado de alta velocidad de pieles como posible alternativa ecológica al fresado químico.

1. Introducción

Las pieles metálicas son elementales de los aviones empleados para recubrir la estructura base del fuselaje del avión [1]. Son por tanto, de piezas estructurales, generalmente de grandes dimensiones, cuya esbeltez es elevada y a las que se le realizan operaciones de mecanizado para reducir su peso final dejando rigidizadores internos en la cara no visible de la pieza [2].

Estas piezas se conforman por deformación plástica antes de ser mecanizadas y pueden haberseles realizado operaciones previas como taladrados de premontaje. Por ello, es posible que durante el proceso de mecanizado se produzcan alivios de tensiones residuales que afecten a la geometría final de la pieza. Además, debido a su esbeltez, el mecanizado a realizar presenta dificultades en el amarre y mecanizado convencional. Por estos motivos, tradicionalmente esta operación de mecanizado se realiza por fresado químico. Esta tecnología no convencional es bastante desconocida y sólo se encuentra en ciertas empresas muy especializadas. Como tecnología sus principales inconvenientes son [3,4]:

- la contaminación producida por los baños empleados, que utilizan bases fuertes.
- el tiempo de operación, se trata de un proceso lento con multitud de operaciones previas y posteriores de preparación y limpieza.
- la difícil automatización del proceso; los baños empleados y en consecuencia de las naves donde tenga lugar el proceso.
- la integridad superficial de la pieza obtenida que puede presentar corrosión intergranular, un acabado superficial rugoso incluso hablando de características

geométricas ya que se trata de un proceso en el que es difícil controlar el espesor exacto de mecanizado.

En base a estos inconvenientes se propone el estudio del mecanizado de alta velocidad para sustituir al fresado químico en estas operaciones de aligeramiento de peso. Esta propuesta formó parte de un programa internacional llamado CleanSky [5] a partir del cual se desarrollaron distintos equipos que asegurasen la correcta fijación de la pieza y en algunos de los cuales se pudiera comprobar on-line el espesor de la pieza. Pero en los que no se desarrolló una optimización del proceso de mecanizado en sí mismo.

En cuanto al proceso de mecanizado los únicos antecedentes encontrados en este campo están relacionados con el mecanizado de paredes delgadas a partir de estructuras monolíticas [6]–[8]. Estos estudios se pueden clasificar en dos grandes bloques, los dedicados al estudio del comportamiento de la pieza (tensiones residuales, integridad superficial) y del mecanizado (estudio del comportamiento estático y dinámico del sistema) y los dedicados al estudio de los parámetros de influencia en el proceso (parámetros de corte, estrategias, herramienta, utillaje, etc.)

Esta bibliografía servirá de base para la realización de la metodología de estudio desarrolla y como referencia en los parámetros a analizar inicialmente.

2. Metodología

En este trabajo se ha diseñado una metodología de base para el estudio del mecanizado en seco de pieles de aluminio. Esta metodología se encuentra esquematizada de forma general en la

Figura 1. En ella se recoge todo el proceso de los ensayos y la respectiva caracterización de los mismos.



Figura 1. Diagrama de la metodología para el estudio del mecanizado de piezas.

Para empezar se ha diseñado una codificación específica que permite identificar los ensayos, las probetas y los resultados.

A continuación se ha escogido la probeta empleada en los ensayos iniciales. Esta será una probeta de UNS A192024-T3 (composición en la Tabla I) de 260x260mm a la que se le realizarán como máximo 16 cajeras de 50x50mm.

Tabla I. Composición química en % de la aleación de aluminio UNS A92024 [9]

	Cr	Fe	Cu	Mn	Mg	Si	Zn	Ti
Min	-	-	3,8	0,3	1,2	-	-	-
Max	0,1	0,5	4,9	0,9	1,8	0,5	0,25	0,15

En los ensayos se mantendrá fija la velocidad de avance (0.05 mm/diente) y la profundidad de corte (0.2mm) y se variará la velocidad de giro del cabezal mecanizando a 8 000, 10 000 y 12000 rpm. Se emplearán dos herramientas distintas, una fresa frontal (H1) y una fresa de punta tórica (H2) y se seguirá la misma trayectoria pero variando la estrategia de mecanizado, en unos casos en oposición (O) y en otros en concordancia (C).

Los ensayos se realizarán en un centro de mecanizado Kondia-Five 400. El sistema de amarre escogido es el más sencillo de los propuestos y consiste en atornillar la probeta en cuatro puntos extremos a una mesa de fijación (Figura 2.)

Para la monitorización on-line (Figura 2.) se emplearán dos acelerómetros, uno para medir las vibraciones de la pieza y otro para medir las del cabezal., una mesa dinamométrica para el estudio de las fuerzas generadas en el proceso. Este último estudio es de gran importancia ya

que uno de los principales objetivos es obtener una relación entre las fuerzas generadas y el espesor mecanizado para poder en un futuro, implantar un sistema de control adaptativo basado en la monitorización del mecanizado, obteniendo de esta forma resultados on-line aproximativos del espesor de pieza obtenido.

Los datos recogidos deberán analizarse tanto en el dominio de la frecuencia como en estudios estadísticos de los parámetros obtenidos.

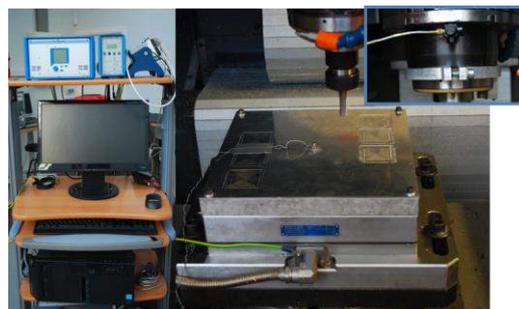


Figura 2. Montaje del experimental y sistema de adquisición de datos.

También se realizará una monitorización off-line que permita la evaluación de las piezas. Este análisis podrá recogerse en un cuadro de decisión como el que se muestra en la Figura 3. Así se puede analizar mediante una evaluación visual el estado de la pieza fabricada en función de todos los aspectos estudiados facilitando la decisión de conformidad o no conformidad de la pieza. Los números representados en el cuadro de decisión indican las siguientes propiedades estudiadas que se agrupan en tres grandes bloques de características: macrogeométricas, microgeométricas y de integridad superficial.

En la macrogeometría se evaluará inicialmente en un primer bloque: la rectitud (1), la planitud (2), los defectos estéticos (3) y la ondulación superficial (4) obtenidas. En un segundo bloque: los radios de acuerdo laterales (5), los de las esquinas (6), la profundidad del mecanizado (7) o el espesor final de la pieza y las dimensiones de la cajera (8).

Dentro de la microgeometría es de interés el estudio de la rugosidad superficial (9) y de los perfiles topográficos obtenidos (10).

Finalmente se considera apropiada la evaluación de la integridad superficial incluyendo en ella estudios de: microdureza (11); cambios microestructurales (12), tensiones residuales (13) generadas, y resistencia a la corrosión (14), a la tracción (15) y a la fatiga (16). Asimismo, podría ampliarse con el estudio de otras características físico químicas (17) que puedan afectar al comportamiento funcional de la pieza.

1	5	9	11
			12
2	6		13
			14
3	7	10	15
			16
4	8		17

Figura 3. Cuadro de decisión basado en las características de la probeta evaluadas off-line.

3. Resultados y Discusión

Tras la realización de un estudio preliminar se han obtenidos los siguientes resultados dividiéndolos en dos apartados en función de su adquisición, on-line u off-line.

3.1 Monitorización on-line

La monitorización on-line incluye dos tipos de señales distintas: las señales de fuerzas y las de vibraciones.

Dentro del análisis de las señales de fuerzas obtenidas se han podido identificar patrones periódicos ligados a las pasadas realizadas y las trayectorias de mecanizado seguidas. Además se ha comprobado que los resultados de las fuerzas en una revolución se pueden relacionar con los diagramas de fuerzas teóricas del proceso.

En cuanto a las vibraciones registradas, estas son mayores en los ensayos realizados en concordancia y parecen registrar una aparente aparición de chatter en los ensayos centrales realizados a 10 000 rpm. Estos ensayos son más inestables en todas las condiciones debido a su posición con respecto al sistema de amarre. De lo cual, se deduce que una optimización del mismo es de vital importancia para el correcto desarrollo del mecanizado de estas piezas.

También se ha realizado un estudio estadístico de los datos obtenidos y se ha observado que en el mecanizado de cajas de pequeñas dimensiones el valor medio de las fuerzas en X e Y no se ve afectado por la longitud de la trayectoria mecanizada por lo que se propone el estudio de estos parámetros sólo en un tramo intermedio del sistema y facilitar el diseño proporcionado del sistema de amarre.

En cuanto al análisis de las vibraciones se ha observado que mediante estudios en frecuencia se pueden filtrar las debidas a la entrada y salida de la herramienta en la pieza durante el mecanizado, aunque es posible que el filtro a aplicar sea de tipo Wavelet debido al aumento de la longitud de la trayectoria mecanizada según se amplían las dimensiones de la caja.

3.2 Monitorización off-line

En este apartado se han analizado todos los datos recogidos en el cuadro de decisión anteriormente descrito exceptuando el bloque de integridad superficial que será estudiado en trabajos futuros.

Analizando los perfiles de forma recogidos a lo largo de toda la caja en dirección longitudinal y transversal se obtiene que las zonas periféricas se encuentran dentro de tolerancia en rectitud y ondulación superficial pero que parte de los resultados pueden ser debidos a una curvatura de la piel producida tras el mecanizado posiblemente relacionada con las tensiones residuales de la pieza.

En cuanto al estudio dimensional de la probeta se ha observado que los espesores cumplen los requisitos de diseño sólo en los ensayos de oposición (Figura 5.). En los realizados con estrategias de concordancia las fuerzas generadas son mayores y por tanto la flexión de la piel durante el mecanizado es mayor aumentando la profundidad de corte por el efecto de succión producido.

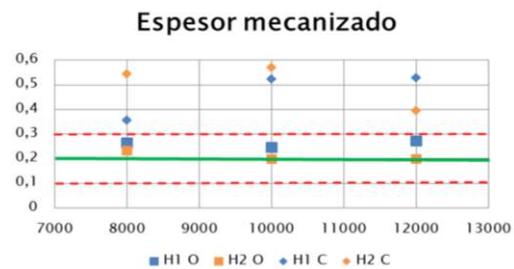


Figura 5. Análisis del espesor mecanizado en función del ensayo y la velocidad de giro del cabezal.

Sin embargo, en el estudio de las características microgeométricas, concretamente en el de rugosidad, se ha observado que exceptuando el ensayo en el que se detectó aparentemente el fenómeno de chatter, todos los ensayos se encuentran por muy debajo de la tolerancia exigida (3,2 μ m) como se puede observar en la Figura 6.

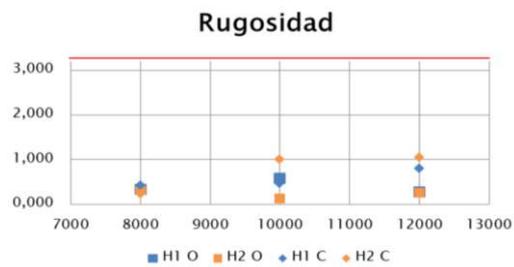


Figura 6. Análisis de la rugosidad en función del ensayo y la velocidad de giro del cabezal.

Además analizando visualmente estos perfiles se ha observado que es muy fácil identificar otras características geométricas ligadas a los mismos como pueden ser la distancia entre pasada y las marcas dejadas por las herramientas en función de la trayectoria seguida. También se aprecia la simetría del perfil debida a las trayectorias de mecanizado.

Por otro lado, estudiar parámetros menos extendidos a nivel industrial como son el sesgo (Rsk) y la curtosis (Rku) puede ser de gran interés ya que dan información sobre la distribución estadística del perfil obtenido que se pueden relacionar con la estabilidad del mecanizado.

4. Conclusiones

Las principales conclusiones de este trabajo preliminar son:

- Se ha propuesto una metodología de estudio de abarca los parámetros de mayor influencia en el mecanizado de pieles metálicas.
- Se ha comprobado que el mecanizado de pieles metálicas puede ser una alternativa viable para sustituir al fresado químico en la realización de cajeados en pieles.
- Se han definido las vías de investigación necesarias para caracterizar este tipo de mecanizado.
- Se descarta el mecanizado en concordancia como estrategia apta para este proceso.

Asimismo, se han definido las líneas futuras de investigación que se consideran apropiadas para realizar el proyecto de tesis. Entre ellas se encuentran estudios que interrelaciones fuerzas piel a mecanizar, estudio de trayectorias más adecuadas, estudio de herramientas de corte empleadas y su desgaste. Así como el estudio de la influencia del sistema de amarre en los resultados entre otros.

El trabajo deberá finalizar realizando una comparación entre una probeta mecanizada por fresado químico y otra por mecanizado de alta velocidad y comprobando que mediante éste último se siguen cumpliendo los requisitos de diseño (geométrico y funcional) de estas piezas y realizando un estudio de rendimiento de ambos procesos para estudiar la viabilidad ecológica del segundo frente al primero.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha recibido financiación de la fundación Tecnalía Research & Innovation a través de la Cátedra Tecnalía de la Universidad de Cádiz.

6. Referencias

- [1] Federal Aviation Administration, *Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge*. Doc. Internet, URL: https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/pilot_handbook/. (última consulta: 2015/07/03).
- [2] F. A. Regulations, "Aircraft Structure," in *Pilot Handbook*, pp. 1–16.
- [3] V. Rodriguez, M. Nuñez, and P. Rodal, "Fresado químico en el sector aeroespacial ventajas e inconvenientes," *IMHE*, 3,(2008).
- [4] H. El-Hofy, *Advanced Machining Processes: Nontraditional and Hybrid Machining Processes*. McGraw Hill Professional, 1 Ed, 2005.
- [5] Clean Sky, "Mission & Objectives | Clean Sky." Doc. Internet, URL: <http://www.cleansky.eu/content/article/mission-objectives>. (última consulta: 2015/06/08).
- [6] S. Herranz, F. J. Campa, L. N. L. de Lacalle, a Rivero, a Lamikiz, E. Ukar, J. a Sánchez, and U. Bravo, "The milling of airframe components with low rigidity: a general approach to avoid static and dynamic problems," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 219, no. 11, pp. 789–801, Apr. 2005.
- [7] B. Li, X. Zuo, J. Yang, X. Jiang, and J. Ni, "Interactive influence of linked characteristics during machining of thin-walled parts," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 72 (2014), 1727–1734.
- [8] G. Sridhar and R. B. P, "Understanding the challenges in machining thin walled thin floored Avionics components," *Int. J. Appl. Sci. Eng. Res.*, 2 (2013), 93–100.
- [9] "ASM Material Data Sheet." Doc. Internet, URL: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA7075T73>. (última consulta: 2015/05/31).

Propuesta metodológica para la monitorización on-line de la formación de rebabas en el taladrado en seco de la aleación UNS R56400 (Ti6Al4V)

Francisco Javier Puerta Morales⁽¹⁾, Mariano Marcos Bárcena⁽²⁾, Jorge Salguero Gómez⁽³⁾

⁽¹⁾Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, Av. Universidad de Cádiz nº 10, 11519 Puerto real (Cádiz), 956 015142, fran.puerta@uca.es

⁽²⁾Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, Av. Universidad de Cádiz nº 10, 11519 Puerto Real (Cádiz)

⁽³⁾Departamento de Ingeniería Industrial e Ingeniería Civil, Av. Ramón Puyol s/n, Algeciras (Cádiz)

Resumen

En el presente trabajo se ha realizado un estudio del proceso de taladrado, prestando una especial atención al caso particular de taladrado de la aleación de titanio UNS R56400 y al defecto de la formación de rebabas que se produce tras dichas operación. El objetivo final es establecer una propuesta metodológica que permita establecer una relación entre parámetros extraídos del proceso en tiempo real, con parámetros geométricos de la rebaba.

Este trabajo es un punto de partida cuya meta sería llegar a eliminar o minimizar los retrabajos derivados de la eliminación del defecto de la rebaba junto con los costes asociados.

1. Introducción

Dentro de la industria de la fabricación, la operación más utilizada y repetida es la operación de taladrado, operación que cobra aún más un especial interés cuando se trata de la industria aeronáutica, donde las uniones soldadas están totalmente prohibidas. Por lo tanto, las uniones y ensamblajes se llevan a cabo mediante el remachado, implicando la realización de agujeros previos.

La competitividad en este sector obliga a realizar grandes inversiones en I+D+i en busca de alguna mejoras que proporcionen alguna ventaja competitiva. En este sentido y teniendo en cuenta que en un avión medio existen aproximadamente 85.000 remaches, el proceso de taladrado se repite miles de veces a lo largo de toda su estructura, debiéndose asegurar en todos ellos el cumplimiento de unas tolerancias dimensionales, micro y macro geométricas, y propiedades físico-químicas muy estrictas, y que vienen definidas desde la fase de diseño. A todo esto hay que añadir que la operación de taladrado es de las últimas operaciones que se realizan en los componentes, por lo que un error en la ejecución de esta operación puede suponer el tener que rechazar un producto que ya ha supuesto un alto coste.

El contexto descrito supone que cualquier mejora en el proceso de taladrado tendría un importante impacto económico sobre producto final. Este hecho hace que aparezca un creciente

interés por la mejora de la eficiencia de dicho proceso, cosa que puede verse reflejada en el número de publicaciones relacionadas con este tema (Figura 1) [1,2].

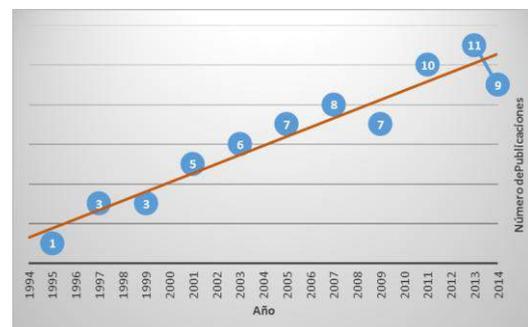


Figura 1 Publicaciones relacionadas con el taladrado de titanio

Un caso especial es el taladrado de las aleaciones de titanio, donde las mismas propiedades que convierten en un material estratégico clave para el sector aeronáutico, también hacen que sea en un material difícil de mecanizar y donde la operación de taladrado es especialmente problemática.

Tomando como referencia una de las principales compañías aeronáuticas (Airbus) y analizando la evolución de los materiales empleados, se observa como las aleaciones de titanio van cobrando cada vez más importancia en los nuevos modelos de aviones. Por tanto, resulta clave la mejora del rendimiento del proceso de conformado de estos materiales.

Tras la realización de la operación de taladrado, el agujero obtenido presenta una defectología que puede agruparse en tres grandes grupos: defectos dimensionales, geométricos y físico-químicos, a los que hay que añadir el defecto de la rebaba producido como combinación de los defectos geométricos y las propiedades físico-químicas.

La formación de rebabas en el taladrado es particularmente problemática debido a que produce problemas de atascos, desalineamientos, deterioro de los componentes y separaciones entre las piezas a unir. Estos problemas generan la necesidad de realizar operaciones posteriores de limpieza y desbardado los cuales son difícilmente automatizables, no aportan valor añadido y en piezas de precisión pueden llegar a suponer hasta el 30% de los costes de la pieza [3-6].

El proceso de formación de la rebaba, que en términos generales es muy similar en cualquier proceso de corte, éste consiste una serie de fracturas y deformaciones plásticas del material (Figura 2) [7].

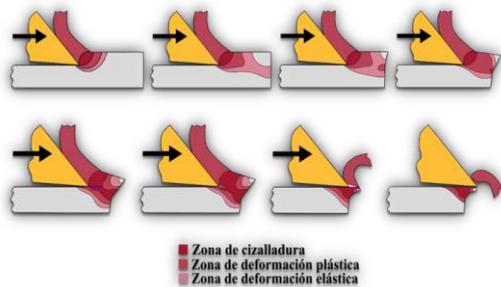


Figura 2. Etapas del proceso de formación de rebabas en materiales dúctiles

Para el caso del taladrado el punto de inicio de la fractura y la ductilidad del material definirán la geometría final de rebaba. De modo que una fractura inicial cerca del borde del agujero generará una rebaba reducida y uniforme, pero si se produce una deformación plástica seguida de la fractura del material cerca del centro del agujero, la rebaba que se formará será grande y con forma de corona. En un punto intermedio se encuentra la formación de una rebaba grande e irregular (Figura 3) [8].

Para la propuesta metodológica que se pretende realizar, se observa que la mayoría de autores coinciden en destacar los parámetros de temperatura y fuerza de empuje como determinantes sobre la formación de rebabas. Es importante recordar que dichos parámetros también están al mismo tiempo directamente relacionados con muchos otros [9-11].

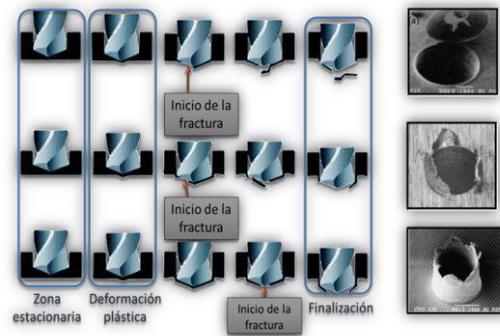


Figura 3. Formación de la rebaba en el taladrado

Para la clasificación de la rebaba se considera importante resaltar que no hay ninguna norma globalmente extendida y aceptada para su medición o evaluación, y por lo general las empresas utilizan normas internas.

Para el caso de estudio se considera importante el análisis de la geometría completa de la rebaba. Dicha geometría queda suficientemente bien definida en las rebabas uniformes, a través de los siguientes cuatro parámetros (Figura 4):

- Altura de rebaba “h”.
- Espesor de la raíz de la rebaba “bi”.
- El radio de la raíz de la rebaba “r”.
- Espesor de la rebaba “bm”.

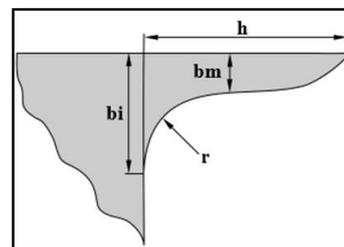


Figura 4. Parámetros geométricos de la rebaba

2. Metodología o Metodología Experimental

Para la definición de la propuesta metodológica se ha realizado un esquema (Figura 5) donde se definen todas las etapas necesarias para la correcta definición de los ensayos y su evaluación.

A continuación se justifica las elecciones optadas para la realización de ensayo experimental.

El material seleccionado ha sido la aleación de titanio UNS R56400, debido a su papel estratégico en el sector aeronáutico y por la especial dificultad que presenta en su conformado.

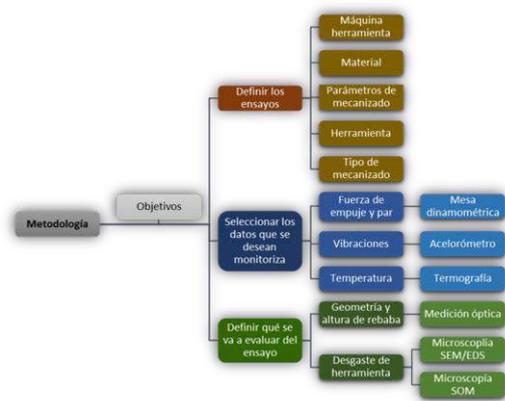
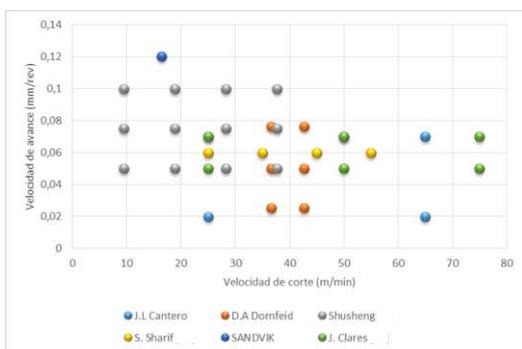


Figura 5 Esquema seguido para la definición y realización de la propuesta metodológica

A pesar de las dificultades que presenta el titanio, como condiciones de corte se ha decidido que la operación de taladrado se realice en ausencia de lubricación, es decir, taladrado en seco. De esta forma se mejora el rendimiento medioambiental del proceso y se eliminan los costes asociados a los lubricantes así como las operaciones de limpieza posteriores.

La selección de las herramientas se ha realizado a partir de las características óptimas que se destacan tras búsqueda bibliográfica realizada: Dos filos de corte, ángulo de punta de 140°, recubrimiento de TiAlN, ángulo de desprendimiento ortogonal 16,9874°, ángulo de desalojo 25,1°.

Para la selección de los parámetros de corte se ha realizado una gráfica con los valores de los parámetros usados en la bibliografía consultada, para finalmente seleccionar valores intermedios que nos proporcionen un espectro que se considera suficiente para una primera fase metodológica.



Para la selección de la máquina herramienta se deben tener en cuenta que el rango de velocidades y la potencia de la máquina deben permitirnos la realización de los ensayos holgadamente.

Tomando como base las aportaciones de trabajos anteriores, se han seleccionado como parámetros a monitorizar los que tienen una mayor influencia sobre la formación de rebabas, y a partir de ahí los equipos que realizarán la medición. Estos son: Fuerza y par (mesa dinamométrica), temperatura (cámara termográfica), vibraciones (acelerómetro piezoeléctrico).

Para la evaluación de off-line de la rebaba se ha seleccionado un método de medición sin contacto utilizando una técnica de foco variable, generando un modelo completo en tres dimensiones de la geometría completa de la rebaba.

Velocidad de corte (m/min)	Velocidad de avance (mm/min)
30	0,025
	0,050
	0,075
	0,100
50	0,025
	0,050
	0,075
	0,100

3. Conclusiones

- Se ha realizado un estudio de la defectología del taladrado y de la importancia de la rebaba en los mismos.
- Una mejora de la calidad de estos taladros permitirá maximizar el rendimiento del proceso de taladrado.
- Se han identificado las características geométricas básicas de la rebaba como defecto característico del proceso de taladrado.
- Se ha propuesto una metodología que permitirá la caracterización de estos defectos y el control on-line de los mismos.
- Esta metodología permitirá detectar cuando se sobrepasan las tolerancias admisibles y así disminuir el número de retrabajos necesarios maximizando el rendimiento general del proceso.
- Al no existir una norma ampliamente aceptada es necesario el establecimiento de unos criterios específicos para su clasificación.

5. Referencias

[1] A. Rivero, S. Herranz, G. Aramendi, A. Celaya, L.N. Lopez de Lacalle, Dry and high speed drilling of aluminium, a change for the

aeronautical industry, DAAAM International Scientific Book, 519-530, 2003

[2] D. Jorge Salguero Gómez, Análisis, evaluación y propuestas de mejora del rendimiento del Mecanizado de Alta Velocidad de aleaciones de aluminio de interés en la industria aeronáutica, Tesis Doctoral

[3] S. Min, J. Kim, D. Dornfeld, Development of a drilling burr control chart for low alloy steel, AISI 4118, J. Mater. Process. Technol. 113 (1-3)4-9, 2001

[4] L. Ken Lauderbaugh, Analysis of the effects of process parameters on exit burrs in drilling using a combined simulation and experimental approach, Journal of Materials Processing Technology 209 1909-1919, 2009

[5] D.A. Dornfeld, J.S. Kim, H. Dechow, J. Hewson, L.J. Chen, Drilling burr formation in titanium alloy Ti6Al4V, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 1999

[6] Begoña Peña, Gorka Aramendi, Asunción Rivero, Luis N. López de Lacalle, Monitoring of drilling for burr detection using spindle torque, International Journal of Machine Tools & Manufacture 45, 1614-1621, 2005

[7] Hashimura M, Hassamont J, Dornfeld DA Effect of In-plane Exit Angle and Rake Angles on Burr Height and Thickness in Face Milling Operation. Transactions of the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering 121(1):13-19, 1999

[8] Una aproximación al estado del arte del estudio de los defectos de rababa en taladrado de las aleaciones de aluminio. Trabajo Fin de Master Universitario en Ingeniería de Fabricación. Severo Raúl Fernández Vidal. 2012

[9] Rivero A, Aramendi G, Herranz S, López de Lacalle LN, An experimental investigation of the effect of coatings and cutting parameters on the dry drilling performance of aluminium alloys. Int J Adv Manuf Techol 28:1-11, 2006

[10] Gaitonde VN, Karnik SR, Achyutha BT, Siddeswarappa B, Methodology of Taguchi optimization for multi-objective drilling problem to minimize burr size. International Journal Advanced Manufacturing Technology 34:1-8, 2008

[11] Ramulu M, Branson T, Kim D, A study on the drilling of composite and titanium stacks, Compos Struct 54:67-7, 2001

[12] Newton TR, Morehouse J, Melkote SN, Turner S, An experimental study of interfacial burr formation in drilling of stacked aluminium sheets. Transactions of NAMRI/SME 36:437-444, 2008

[13]

Tratamiento láser como método de activación superficial de fibra de carbono

M. Botana Galvin⁽¹⁾, J. Botana⁽¹⁾

⁽¹⁾Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química Inorgánica. Escuela Superior de Ingeniería. Laboratorio de Corrosión. Avenida de la Universidad. Puerto Real. 956016762 marta.botana@uca.es

Resumen

En este documento se recogen los avances realizados hasta la fecha en el plan de trabajo recogido en la Tesis Doctoral titulada “Tratamiento láser como método de activación superficial de fibra de carbono”. Una vez presentado y aprobado el Plan de Investigación, se presentan a continuación las actividades desarrolladas durante el primer año y medio del desarrollo de dicha Tesis, así como un avance de los primeros resultados obtenidos. Por último se presenta un planteamiento del plan de trabajo previsto hasta la finalización del trabajo y lectura de la Tesis, prevista para marzo de 2017.

1. Introducción

La Tesis Doctoral titulada “Tratamiento láser como método de activación superficial de fibra de carbono” tiene como objetivo principal estudiar el empleo de la tecnología láser como alternativa automatizable y reproducible a los métodos de activación superficial de paneles de fibra de carbono empleados actualmente en la industria aeronáutica. El proceso de activación superficial supone una etapa crítica en el proceso de unión adhesiva [1], es necesario dotar a las superficies a unir de unas propiedades físico-químicas superficiales adecuadas. En la actualidad los principales métodos empleados se basan en procesos de lijado manual, granallado, peel-ply o ataques químicos. Sin embargo todos ellos presentan diferentes inconvenientes que han llevado a la necesidad de buscar nuevos métodos de activación superficial.

En los últimos años, el estudio de la tecnología láser se ha incrementado debido a las ventajas que supone su empleo: es una tecnología de no contacto, sus resultados son controlables y reproducibles y es una tecnología respetuosa con el medio ambiente. Hasta el momento, el uso de la tecnología láser en el campo de los materiales compuestos se ha centrado en tareas de mecanizado [2-4], operaciones de reparación [5-6] y activación superficial. En cuanto a las tareas de activación superficial se han desarrollado trabajos basados en el estudio de láseres de CO₂ y UV [7], y de diferentes fuentes de láseres de excímeros [8].

El objetivo general de la presente Tesis Doctoral es establecer la validez del tratamiento superficial empleando un láser UV como mecanismo de activación superficial de paneles de CFRP que sustituya a los métodos de activación superficial empleados en la actualidad en el sector aeronáutico.

Durante el primer año y medio de desarrollo de esta Tesis se han desarrollado completamente las Etapas 1 a 4 recogidas en el Plan de Investigación, por lo que se está cumpliendo con el cronograma previsto en dicho Plan. Estas 4 etapas constituyen el estudio del efecto de la radiación UV sobre paneles de CFRP fabricados por diferentes mecanismos (RTM, tejido y cinta unidireccional), la selección de condiciones óptimas de procesado y la evaluación del comportamiento adhesivo de elementos planos activados con las condiciones óptimas seleccionadas.

Por otro lado, durante el último cuatrimestre de 2015 se está desarrollando una estancia en el Grupo de Investigación de Ingeniería de Superficies del University College Dublin, en Irlanda. El objetivo de esta estancia es estudiar el proceso de activación superficial de paneles de CFRP empleando tecnología de plasma atmosférico [9-10]. De esta forma, será posible comparar los resultados de los dos posibles procesos alternativos de activación superficial de mayor importancia en la actualidad. Además, es un objetivo principal publicar los resultados obtenidos de esta comparación en una revista de alto índice de impacto.

2. Metodología Experimental

El trabajo experimental realizado hasta el momento se ha desarrollado siguiendo el siguiente esquema.

1. Procesado láser de muestras planas de CFRP fabricadas mediante RTM, tejido y cinta unidireccional. En esta primera etapa se ha estudiado el efecto de la radiación UV sobre paneles de CFRP fabricados por diferentes mecanismos. Se han estudiado diferentes variables de procesado del equipo láser: potencia y frecuencia de la radiación, velocidad de barrido, número de sombreados y paso angular entre repeticiones.
2. Caracterización superficial de muestras procesadas. Para evaluar la activación superficial obtenida tras el procesado láser se ha estudiado la morfología superficial tras el procesado láser y la mojabilidad de las superficies. El estudio morfológico se ha llevado a cabo utilizando una lupa estereoscópica, tomando macrográficas a diferentes aumentos (11x, 20x y 72x). Por otro lado, la mojabilidad de la superficie se ha determinado mediante la medida del ángulo de contacto, utilizando agua destilada como líquido de medida. Además, se preparó y caracterizó una muestra de referencia para cada tipo de material. Para ello, se lijó manualmente una muestra de cada tipo de material empleando una lijadora orbital con disco de carburo de silicio de 220 grit.
3. Selección de condiciones óptimas de procesado. Una vez estudiadas todas muestras procesadas se determinó un criterio de selección de condición óptima de procesado en base a los resultados obtenidos. Este criterio se basó en las siguientes premisas: morfología de resina marcada con alto nivel de homogeneidad superficial y valor de ángulo de contacto inferior a la referencia.
4. Estudio químico superficial de muestras procesadas con las condiciones seleccionadas como óptimas. Se ha realizado un análisis químico superficial mediante medias de XPS, tanto a nivel elemental como espectros de alta resolución de C, O y N. Además, se ha estudiado el cambio de rugosidad superficial, utilizando un perfilómetro óptico confocal, que permitió obtener valores de macro y micro rugosidad.
5. Estudio de la adhesividad de paneles planos de CFRP de RTM, tejido y cinta unidireccional activados mediante láser UV y lijado manual. Se procesaron paneles de

RTM, tejido y cinta unidireccional empleando las condiciones seleccionadas como óptimas y mediante lijado manual. A continuación se encolaron los paneles procesados haciendo uso de una prensa de platos calientes. Para evaluar el comportamiento adhesivo de la unión se realizaron ensayos de cortadura simple y de tenacidad a fractura interlaminar, GIC.

6. Evaluación de los resultados obtenidos. Se estudiaron los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos y los modos de fallos observados, y se determinó si los parámetros seleccionados como óptimos conducen a una mejor activación superficial que la obtenida mediante lijado manual.

Para la realización de estas actividades se ha utilizado el siguiente equipamiento:

- Láser UV de estado sólido y frecuencia triplicada de Nd:YAG, modelo TruMark6350 de Trumpf. El equipo posee una longitud de onda de 355 nm y una duración de pulso de 11 ns. A 33 kHz alcanza una potencia nominal de 5 W, una potencia de pulso de más de 15 kW y una energía de pulso de 0.15 mJ. Cuando se trabaja a distancia focal (237 mm), el diámetro del haz es de 10 μm y la fluencia máxima alcanzable es de 193 J/cm².
- Lupa estereoscópica modelo MST53 de Leica.
- Equipo de medición de ángulo de contacto fabricado en el laboratorio y el plugging "Snake" de J-images.
- Espectrofotómetro de fotoelectrones de rayos X modelo Kratos Axis Ultra DLD equipado con una fuente monocromática de rayos X usando un ánodo de Al-K α .
- Perfilómetro óptico 3D modelo Z-300 de Zeta Instruments.
- Máquina de ensayos universal modelo Shimadzu AG-X con capacidad de 10 kN.
- Máquina de ensayos universal model Instron 5982 con capacidad de 100 kN.

Por otro lado, desde Septiembre se está trabajando en el University College Dublin en el estudio del tratamiento con plasma atmosférico sobre paneles de CFRP fabricados mediante tejido y cinta unidireccional. La metodología de trabajo será similar a la empleada hasta el momento. Los resultados obtenidos permitirán comparar el comportamiento adhesivo de paneles de CFRP activados mediante las técnicas que más están siendo estudiadas.

Una vez concluida la estancia se retomará el plan de trabajo presentado en el Plan de Investigación, en el que se abordará el estudio de la activación de superficial de paneles con

geometrías complejas y se analizarán diferentes variables de ensayo a partir de las condiciones óptimas establecidas. Por último, se procederá a escribir los resultados obtenidos y a la posterior lectura de la Tesis.

3. Resultados y Discusión

Se presentan a continuación los resultados obtenidos hasta el momento en el desarrollo de la Tesis Doctoral.

3.1 Estudio morfológico

Analizando las macrográficas obtenidas de las muestras procesadas con láser UV se han diferenciado 6 tipos diferentes de morfologías, ordenadas de menor a mayor daño superficial, Figura 1. Se determinó que es posible controlar el efecto de la radiación controlando la fluencia de la misma.

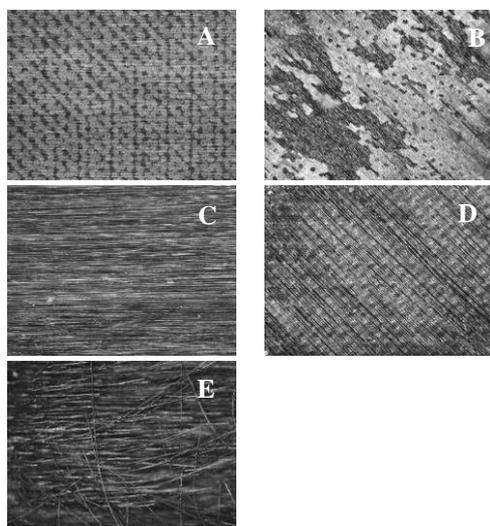


Figura 1. A) Resina marcada. B) Desprendimiento resina. C) Fibra expuesta. D) Fibra marcada. E) Fibra rota.

Como se comentó en apartado anterior, se seleccionaron como válidas aquellas condiciones que condujeron a resina marcada, ya que no existe riesgo de dañar las fibras y por tanto modificar las propiedades mecánicas del material compuesto.

3.2 Estudio de la mojabilidad

Se realizaron medidas de ángulo de contacto a todas las muestras procesadas, y se seleccionaron las condiciones que supusieran menor ángulo de contacto que las muestras de referencia. Esto se debe a que la mojabilidad se relaciona con la adhesividad de la superficie, ángulos de contacto bajos implican alta adhesividad.

3.3 Selección de condiciones óptimas

Siguiendo el criterio expuesto en el apartado anterior (morfología de resina marcada con alto nivel de homogeneidad superficial y valor de ángulo de contacto inferior a la referencia) se seleccionaron las condiciones óptimas expuestas en la Tabla I. Además, queda recogido el valor de ángulo de contacto medido para cada una de ellas.

Tabla I. Condiciones óptimas de procesado

Material	RTM	Tejido	Cinta
Potencia	30%	60%	60%
Frecuencia	20 kHz	20 kHz	20 kHz
Velocidad	3000 mm/s	1000 mm/s	2000 mm/s
Nº repeticiones	4	2	4
Paso angular	90°	90°	0°
Ángulo Contacto	68°	55°	54°

3.3 Estudio de superficie química

Las medidas de XPS realizadas han demostrado que el procesado láser UV produce dos efectos en la química de la superficie. En primer lugar se ha observado la eliminación de especies contaminantes, por lo que queda garantizado el efecto limpiador. Además, los espectros de alta resolución de C, O y N han probado que las especies químicas presentes en la superficie aumentan su estado de oxidación.

3.4 Estudio del comportamiento adhesivo

En las Tablas II y III se recogen los valores de resistencia a la cortadura y de tenacidad a la fractura interlaminar, respectivamente, de las muestras de RTM, tejido y cinta activadas mediante láser y lijado manual.

Tabla II. Resistencia a la Cortadura simple.

Material y activación	Resistencia a la cortadura	Incertidumbre
RTM	Lijado	24.2 MPa
	Láser	14.2 MPa
Tejido	Lijado	23.0 MPa
	Láser	27.7 MPa
Cinta	Lijado	27.7 MPa
	Láser	29.8 MPa

Tabla II. Tenacidad de fractura interlaminar

Material y activación	Tenacidad de fractura	Incertidumbre
-----------------------	-----------------------	---------------

		interlaminar	
RTM	Lijado	891 J/m ⁻²	118 J/m ⁻²
	Láser	559 J/m ⁻²	75 J/m ⁻²
Tejido	Lijado	872 J/m ⁻²	92 J/m ⁻²
	Láser	907 J/m ⁻²	88 J/m ⁻²
Cinta	Lijado	1038 J/m ⁻²	244 J/m ⁻²
	Láser	1112 J/m ⁻²	83 J/m ⁻²

4. Conclusiones

En base a los resultados obtenidos en esta primera etapa del desarrollo de la Tesis Doctoral se pueden concluir los siguientes puntos.

- Es posible controlar el efecto de la radiación UV sobre la superficie del material compuesto mediante el control de la fluencia de la misma. Valores bajos de fluencia conducen a modificación a nivel de resina, mientras que con condiciones más energéticas se puede llegar a romper la fibra.
- La radiación láser UV ejerce un efecto limpiador y oxidante sobre las superficies de fibra de carbono.
- Se han encontrado condiciones de procesado láser que conllevan a una mejora en el comportamiento adhesivo de paneles planos de CFRP fabricados mediante tejido y cinta unidireccional respecto a los mismos paneles activados mediante lijado manual. Sin embargo, las condiciones seleccionadas para el RTM presentan peor comportamiento adhesivo que las muestras de referencia.

En base a estas conclusiones, se continuarán utilizando las mismas condiciones de procesado para el tejido y la cinta unidireccional en los posteriores estudios. Para el RTM, se continuará la búsqueda de condiciones óptimas de procesado que mejoren el comportamiento adhesivo de los paneles respecto al lijado manual.

5. Referencias

[1] T.A. Schmid Fuertes, T. Kurse, T. Körwien y M. Geistbeck. Bonding of CFRP primary aerospace structures – discussion of the certification boundary conditions and related technology fields addressing the needs for development. *Compos. Interface* 2015; 22 (8): 795-808.

[2] A. Wolynski, T. Hermann, P. Mucha, H. Haloui y J. L'huillier. Laser ablation of CFRP using picosecond laser pulses at different wavelengths from UV to IR. *Physics Procedia* 2011;12:292-301.

[3] Y. Feng. Co-occurrence of photochemical and thermal effects during laser polymer ablation via a 248-nm excimer laser. *Appl. Surf. Sci.* 2000;156:177-182.

[4] O. Yalukova y I. Sárady. Investigation of interaction mechanisms in laser drilling of thermoplastic and thermoset polymers using different wavelengths. *Compos. Sci. Technol.* 2006;66:1289-1296.

[5] F. Völkermeier, F. Fischer, U. Stute y D. Kracht. Laser based approach for bonded repair of carbon fiber reinforced plastics. *Physics Procedia* 2011;12:537-542.

[6] F. Fischer, L. Romoli y R. Kling. Laser-based repair of carbon fiber reinforced plastics. *CIPF Ann-Manuf Techn* 2010;59:203-206.

[7] F. Fischer, S. Kreling, P. Jäschke, M. Fraunhofer, D. Kracht y K. Dilger. Laser surface pre-treatments of CFRP for adhesive bonding in consideration of the absorption behaviour. *J. Adhesion* 2012;88:350-363.

[8] S. Kreling, F. Fischer, F. Delmdahl, F. Gäßner y K. Dilger. Analytical characterization of CFRP laser treated by excimer laser radiation. *Physics Procedia* 2013;41:282-290.

[9] A.K. Saelhoff, C. Janssen, G. Seide, T. Gries y N. Müller. Green plasma meets black fibers-Environmentally friendly carbon fiber activation by plasma treatment. *Chemical Fibers International* 2013;63(4):229-230.

[10] V.J. Law, J. Mohan, F.T. O'neill, A. Ivankovic y D.P. Dowling. Air based atmospheric pressure plasma jet removal of FreKote 710-NC prior to composite-to-composite adhesive bonding. *Int. J. Adhes. Adhes* 2014;54:72-81.

