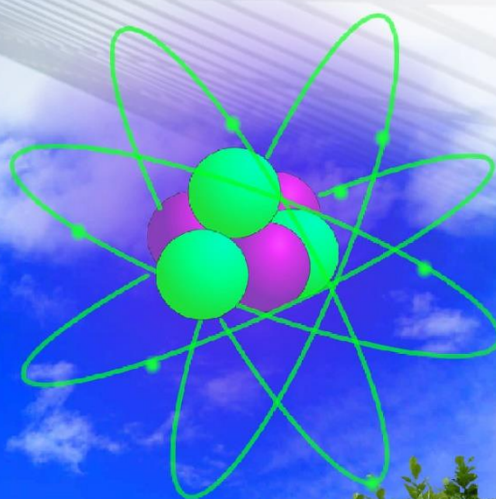
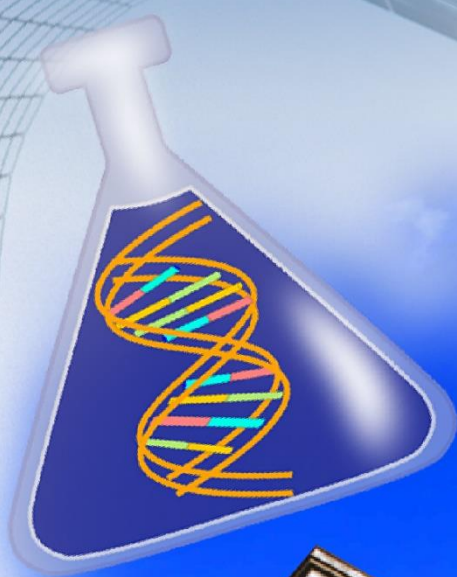


IV JORNADA DE INVESTIGACIÓN Y POSTGRADO

Libro de Actas
Noviembre 2017



Ingeniería y Tecnología



IV JORNADA DE INVESTIGACIÓN Y POSTGRADO

Libro de Actas
Noviembre 2017





Editorial Área de Innovación y Desarrollo,S.L.

Quedan todos los derechos reservados. Esta publicación no puede ser reproducida, distribuida, comunicada públicamente o utilizada, total o parcialmente, sin previa autorización.

Primera edición: **abril 2018**

© del texto: **los editores (Ana M. Beltrán y Manuel Félix)**

Derechos de explotación y distribución de la obra: **ÁREA DE INNOVACIÓN Y DESARROLLO, S.L.**
(www.3ciencias.com)

ISBN: **978-84-948577-6-8**

DOI: <http://dx.doi.org/10.17993/IngyTec.2018.34>

Comité organizador

Ana M. Beltrán
Diego Larios
Julia Martín
Manuel Félix
Yadir Torres
José A. Rodríguez

Comité científico

Alberto Romero
Alejandro Linares
Amalia Luque
Antonio Guerrero
Antonio Rosales
Diego Larios
Esteban Alonso
Francisco Aguayo
Íñigo Monedero
José María Gallardo
Jose A. Rodríguez
Juan Ignacio Guerrero
Julián Lebrato
Julia Martín
Niurka Rodríguez
Óscar López
Yadir Torres

Colaboradores

Ana Paloma Cabral
Cristina Domínguez
Susana Lojo

Agradecimientos

Estas jornadas han sido financiadas por la ayuda Proyecto: 2017/00000962 (IV JORNADAS DE INVESTIGACIÓN DE LA EPS) del Plan Propio de la Universidad de Sevilla

Índice

COMUNICACIONES ORALES.....	9
C1 ANALIZADORES DE RED DE BAJO COSTE	11
Torres García, Fco. Javier; Bravo Rodríguez, Juan Carlos; Borrás Talavera, María Dolores.	
C2 NEURODISEÑO Y NEUROUSABILIDAD DE AUTOMOVILES. uNA PROPUESTA DESDE LA INGENIERIA NEUROKANSEI-CHISEI	25
Núñez Romero, Raúl; Aguayo González, Francisco y Córdoba Roldán, Antonio.	
C3 SISTEMA INTELIGENTE INALÁMBRICO PARA ANÁLISIS Y MONITORIZACIÓN DE LÍNEAS DE TENSIÓN SUBTERRÁNEAS EN SMART GRIDS (SIAM)	33
Romero Hinojosa, Francisco; Parejo Matos, Antonio; Larios Marín, Diego Francisco; León de Mora, Carlos.	
C4 INGENIERÍA DE CARACTERÍSTICAS PARA CLASIFICACIÓN DE SEÑALES SONORAS.....	41
Gómez Bellido, Jesús. Luque Sendra, Amalia. Carrasco Muñoz, Alejandro.	
C5 EL NUEVO PARADIGMA DE LA INDUSTRIA 4.0 Y SU APLICACIÓN A LA INDUSTRIA AGROALIMENTARIA	47
Guerrero Cano, Manuel. Luque Sendra, Amalia. Lama Ruiz, Juan Ramón.	
C6 VENTAJAS DE LA GESTIÓN ACTIVA DE LA DEMANDA (DEMAND MANAGEMENT) EN EL CONTROL DE SMART GRIDS.....	55
Parejo Matos, Antonio; Romero Hinojosa, Francisco; Personal Vázquez, Enrique; León de Mora, Carlos.	
C7 EFECTO DEL PROCESADO SOBRE LAS PROPIEDADES Y MORFOLOGÍA DE BIOPLÁSTICOS DE PROTEÍNA DE SOJA.	65
E. Álvarez, A. Jiménez, C. Bengoechea, J.M. Aguilar, A. Guerrero.	
C8 APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE RESIDUOS INDUSTRIALES DE ALTA CARGA ORGÁNICA MEDIANTE CODIGESTIÓN ANAEROBIA.....	73
Benito Mora, Carlos; Alonso Contreras, Antonio José; Garvi Higuera, María Dolores; Morón Romero, María del Carmen; Lebrato Martínez, Julián	
C9 ESTABILIDAD FÍSICA DE MEZCLAS DE ACEITE ESENCIAL DE TOMILLO Y UN TENSIOACTIVO NO IÓNICO	87
Martín, María José; García, M ^a Carmen; Ramírez, Pablo; Muñoz, José; Alfaro, M ^a Carmen.	
C10 INFLUENCIA DE LA FORMULACIÓN Y DE LAS VARIABLES DE PROCESADO SOBRE LA ESTABILIDAD FÍSICA DE EMULSIONES DE ACEITE ESENCIAL DE TOMILLO.....	95
García, M ^a Carmen, Portillo, Celia, Martín M ^a José, Alfaro, M ^a Carmen, Muñoz, José.	
C11 CONTROL Y ESTUDIO DEL PROCESO DE EMULSIFICACIÓN EN EMULSIONES PROTEICAS DE ACEITE EN AGUA MEDIANTE UN REÓMETRO DE MEZCLADO.....	101
Romero, Alberto; Pérez-Puyana, Víctor; Marchal, Paul; Choplin, Lionel; Guerrero, Antonio	
C12 CONTROL Y ESTUDIO DEL PROCESO DE EMULSIFICACIÓN EN EMULSIONES PROTEICAS DE ACEITE EN AGUA MEDIANTE UN REÓMETRO DE MEZCLADO	109
Romero, Alberto; Pérez-Puyana, Víctor; Marchal, Paul; Choplin, Lionel; Guerrero, Antonio	
C13 SISTEMA INFORMÁTICO MÓVIL PARA EL APOYO AL CESE TABÁQUICO MEDIANTE MENSAJES MOTIVACIONALES PERSONALIZADOS.....	119
Luna-Perejon, Francisco, Dominguez-Morales, Juan Pedro, Civit Masot, Javier, Hors-Fraile, Santiago, Civit-Balcells, Anton.	
C14 ESTIMACIÓN DE DISTANCIAS MEDIANTE UN SISTEMA DE ESTÉREO-VISIÓN BASADO EN RETINAS DVS	131
Domínguez-Morales, Manuel; Jiménez-Fernández, Ángel; Cerezueta-Escudero, Elena; Luna-Perejón, Francisco; Durán-López, Lourdes; Linares-Barranco, Alejandro.	

COMUNICACIONES POSTERS.....	139
P1 DESARROLLO DE MATERIALES POLIMÉRICOS POROSOS MEDIANTE ELECTROHILADO.....	141
Cabrerá, L., Félix, M., Pérez-Puyana, V., De la Fuente, J.	
P2 COMPUESTOS PERFLUORADOS EN EQUINODERMOS MARINOS: METODOLOGÍA ANALÍTICA PARA SU DETERMINACIÓN Y MONITORIZACIÓN.....	147
Martín, Julia; Santos, Juan Luis; Aparicio, Irene; Alonso, Esteban Zafra-Gómez, Alberto; Vílchez, José Luis.	
P3 ESTUDIO DE LA ETAPA DE MEZCLADO EN EL DESARROLLO DE BIOPLÁSTICOS A BASE DE PROTEÍNA DE GUISANTE.....	157
Pérez-Puyana, Víctor; Ramos, María; Carvajal, Juan María; Félix, Manuel; Bengoechea, Carlos.	
P4 USO DE BIOPOLÍMEROS PARA LA ELABORACIÓN DE ANDAMIOS CON APLICACIÓN EN INGENIERÍA TISULAR	165
Pérez-Puyana, Víctor. Carreño-Carmona Isabel. Romero García, Alberto. Guerrero Conejo, Antonio.	
P5 ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD FÍSICA, PROPIEDADES REOLÓGICAS Y MICROESTRUCTURA DE SISTEMAS AEROSIL 200/AGUA. INFLUENCIA DE UN TENSIOACTIVO NO IÓNICO.....	171
Santos, Jenifer; Calero, Nuria; Trujillo-Cayado, Luis A.; Alfaro, María del Carmen; Muñoz, José.	
P6 DESARROLLO DE GELES BIOACTIVOS BASADOS EN RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DEL ARROZ.....	177
Félix, M., Pérez-Puyana, V., Romero, A., Guerrero, A.	
P7 METHODOLOGY FOR THE DEVELOPMENT OF ECOLOGICAL EMULSIONS FORMULATED WITH GREEN SOLVENTS OR ESSENTIAL OILS.....	183
Trujillo-Cayado, Luis A; Alfaro, María del Carmen; Santos, Jenifer; Calero, Nuria; Muñoz, José.	
P8 DISEÑO NEURO-FRACTAL DEL CURRÍCULUM Y PROCESOS DE ENSEÑANZA y APRENDIZAJE EN TECNOLOGÍA Y PROCESOS INDUSTRIALES.....	189
Suárez Fernández-Miranda, S.; Aguayo González, F.; Lama Ruiz, J.R.	
P9 OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS DE FABRICACIÓN CIBERFISICOS EN INDUSTRIA 4.0 CON BIG DATA.....	199
Morales García, Ana Isabel. Lama Ruiz, Juan Ramón. Aguayo González, Francisco. Martín Gómez, Alejandro M.	
P10 EL FACTOR HUMANO EN LA PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES EN LOS NUEVOS ENTORNOS DE TRABAJO DE LA CONSTRUCCIÓN 4.0.....	205
Mantilla Muñoz Martín, Aguayo González Francisco, Peralta Álvarez M. Estela.	
P11 SOSTENIBILIDAD 4.0: ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA INTEGRADO DEL PRODUCTO INTELIGENTE CONECTADO	213
de las Heras García de Vinuesa, Ana; Córdoba Roldán, Antonio; Ávila Gutiérrez, María Jesús; Aguayo González, Francisco.	
P12 PROPUESTA DE FABRICACIÓN FRACTAL DISTRIBUIDA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE LA INDUSTRIA AERONAÚTICA EN INDUSTRIA 4.0.....	219
Castro Hormigo, F. Javier; Peralta Álvarez, M. Estela; Aguayo González, Francisco.	
P13 EL FACTOR HUMANO EN LA PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES EN LOS NUEVOS ENTORNOS DE TRABAJO DE LA CONSTRUCCIÓN 4.0.....	225
Mantilla Muñoz Martín, Aguayo González Francisco, Peralta Álvarez M. Estela.	

COMUNICACIONES ORALES

C1

ANALIZADORES DE RED DE BAJO COSTE

Torres García, Fco. Javier; Bravo Rodríguez, Juan Carlos; Borrás Talavera, María Dolores. Grupo de investigación en Ingeniería Eléctrica (INVESPO). Departamento de Ingeniería Eléctrica. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Sevilla.

RESUMEN

El uso masivo de dispositivos electrónicos, tanto en entornos domésticos como industriales, tiene un impacto directo e inmediato en la creciente y compleja red de distribución eléctrica a la que se conectan. De aquí la necesidad de analizar la calidad de la señal eléctrica y su energía asociada en la propia red e instalaciones afectadas.

Por otra parte, la evolución exponencial de microcontroladores y micro PC'S y su aplicación al procesado de señales, convierte a estos dispositivos en candidatos excepcionales para cubrir la mencionada necesidad del análisis de la calidad eléctrica. Esta es justamente la propuesta que se hace en este trabajo.

La detección de las perturbaciones eléctricas de mayor incidencia en la calidad de la señal de red se puede realizar de diferentes formas. En este caso, se propone el uso de una potente herramienta matemática como es la Transformada Wavelet (TW), con una contrastada aplicabilidad en este campo. Su traducción a nivel de programación mediante un complejo algoritmo es implementada en dispositivos de bajo coste, particularmente en Arduino y Raspberry Pi. A partir de este algoritmo es posible la detección, análisis y clasificación de distintas perturbaciones eléctricas de forma más intuitiva.

Se ha diseñado un sistema capaz de adquirir y analizar la señal de la tensión eléctrica y monitorizar dichos resultados, demostrando la aptitud de estos sistemas de bajo coste para dicho análisis.

Palabras clave: "Power Quality", "Wavelet", "Electrical disturbances", "Low cost devices".

ABSTRACT

The massive use of electronic devices, both in domestic and industrial environments, has a direct and immediate impact on the electrical network in which they are connected. This fact generates the need for a power quality analysis in the electrical distribution network and affected installations.

On the other hand, the exponential evolution of microcontrollers and micro PC'S and their application to signal processing, makes these devices exceptional candidates to cover the aforementioned power quality analysis. This is precisely the proposal made in this work.

The detection of electrical disturbances with greater incidence in power quality can be made in different ways. In this case, the use of a powerful mathematical tool such as the Wavelet Transform (WT), with a proven applicability in this field, is proposed. Its translation at the programming level through a complex algorithm is implemented in low cost devices, particularly in Arduino and Raspberry Pi. From this algorithm it is possible to detect, analyze and classify different electrical disturbances in a more intuitive way.

A system capable of acquiring and analyzing the voltage signal, as well as monitoring the results, has been designed, showing the capacity of these low cost devices for such analysis.

Keywords: "Power Quality", "Wavelet", "Electrical disturbances", "Low cost devices".

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Introducción

Los innumerables dispositivos electrónicos que facilitan múltiples tareas cotidianas tienen un impacto directo en la red de suministro eléctrico que los alimentan. Estos dispositivos causan diferentes

perturbaciones en la señal eléctrica con variados efectos, que van desde molestias visuales en las personas que comparten un espacio iluminado artificialmente, hasta el salto intempestivo de protecciones eléctricas, pasando por daños o malfuncionamiento de sistemas de control, etc. Por tanto, dado que estas perturbaciones causan efectos adversos y considerables pérdidas económicas, se hace necesario su análisis y caracterización para tomar medidas que puedan mitigar su efecto.

Para el procesamiento de estas señales eléctricas se ha propuesto el uso de la Transformada Wavelet (TW), debido fundamentalmente a que es capaz de realizar un análisis multirresolución (MRA), tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, para localizar de forma precisa los eventos que alteran la calidad eléctrica.

Estado de la cuestión

Wavelets

La bibliografía sobre la TW en el análisis de perturbaciones eléctricas comienza a finales del siglo XX (1994-1995). Sin embargo, en lo que se refiere a su aspecto matemático, no es un método novedoso, ya que se conocía con anterioridad a esta fecha.

La TW, objeto principal de este proyecto, fue el resultado de numerosas investigaciones. Fue Jean Morlet el primero que, investigando un método para modelar la propagación del sonido a través de la corteza terrestre, descubrió este nuevo método matemático que no tenía las limitaciones de la Transformada de Fourier (TF).

Posteriormente, un matemático también francés llamado Yves Meyer [6] descubrió que estas funciones Wavelets formaban bases ortonormales caracterizadas por tener contenido energético finito. Estas bases ortonormales fueron estudiadas y definidas por Ingrid Daubechies [7]. Sin embargo, el encargado de relacionar los bancos de filtros en cuadratura con estas bases ortonormales fue Stephane Mallat [8]. Mallat y Meyer fueron los precursores de la construcción de wavelets tal y como la conocemos hoy en día, gracias a su Análisis Multirresolución (MRA).

A partir de este descubrimiento de Mallat, se hace un avance decisivo en el análisis de señales mediante procesamiento digital. Además, es a partir de este momento cuando se comienza a investigar en la incorporación de esta nueva herramienta en distintos campos de aplicación, como la compresión de imágenes, la detección de terremotos, etc.

Calidad de la señal eléctrica

Tradicionalmente, el análisis de la calidad eléctrica se realiza desde dos estados de la señal bien diferenciados: el estado estacionario y el estado transitorio o no estacionario. El primero de ellos puede ser debido principalmente a la distorsión armónica, por lo que para su análisis se aplica la TF, mientras que para el estado no estacionario se utiliza la TW que es objeto de este trabajo.

Como se explicará con posterioridad, la TW empleada para la detección de fallos en la señal eléctrica ofrece una mayor resolución en el tiempo para altas frecuencias y una mayor resolución en frecuencia para componentes de baja frecuencia. Por ello es el método más apropiado para detectar fallos eléctricos no estacionarios. Sin embargo, los resultados están fuertemente condicionados por la óptima elección de la función wavelet base [35].

Por tanto, la TW se presenta como un método efectivo para detectar y localizar distintas perturbaciones eléctricas [34], clasificarlas con el apoyo de la inteligencia artificial [15], e incluso para calcular distintos términos de potencia [22], [23], [3].

En particular, la TW implementada en este proyecto sigue las directrices que proporciona un algoritmo propuesto en un trabajo referente en este campo [2].

Índices de calidad

Para poder efectuar este análisis se hace necesaria la utilización de unos índices de calidad, mediante los cuales pueda realizarse una caracterización de forma rápida y simple.

Tradicionalmente se han usado diferentes índices para la cuantificación de dicha calidad de la señal eléctrica. En [38] y [39] se muestran los índices de calidad más comunes para la cuantificación de dicha calidad eléctrica hasta el momento. Sin embargo, tienen el inconveniente de la utilización solo para régimen estacionario.

Debido a la gran difusión y utilización del método de la Transformada Wavelet para el análisis no estacionario, se hace necesario que en se redefinan los índices de calidad utilizados hasta el momento [39].

En la actualidad, han surgido otros índices de calidad de la señal eléctrica. En particular, en este proyecto se utiliza el índice de calidad propuesto en [5], llamado Distorsión Transitoria Instantánea (ITD), mediante el cual se pueden detectar las perturbaciones eléctricas y representarlas gráficamente, de forma rápida y simple.

Implementación en dispositivos inteligentes

El desarrollo e investigación acerca de medidores eléctricos inteligentes es algo muy usual hoy día, tal y como podemos observar en [13] y [15]. El papel de estos dispositivos en las redes de distribución inteligentes (Smart Grid) es crucial. La capacidad que ofrecen de conocer en tiempo cuasi real las potencias asociadas a las diferentes cargas eléctricas que se distribuyen por la red, y realizar estas medidas de forma sincrónica constituyen un hito sin precedentes [14], [16], [17] y [18]. La versatilidad de estos dispositivos es incuestionable, ya que además permiten la recogida de datos remotos según diferentes protocolos de comunicaciones o su visualización y monitoreo en aplicaciones (App) de dispositivos móviles.

Sin embargo, los estudios que actualmente tiene más interés por su carácter innovador, tratan del desarrollo de estos medidores con dispositivos de bajo coste [10], [11] y [12] como el propuesto en este trabajo.

Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es el análisis de perturbaciones no estacionarias mediante la transformada Wavelet. Además, con dicho análisis se pretende algo también fundamental como es la detección de estos eventos eléctricos.

Para ello, se propone el desarrollo y la creación de un prototipo medidor con dispositivos de bajo coste, de manera que pueda ser adquirido por cualquier tipo de usuario, tanto en el ámbito doméstico como en un entorno industrial.

METODOLOGÍA

Marco teórico

Transformada Wavelet (TW)

Una onda wavelet tiene una forma oscilante característica que confina bien su energía y le permite hacer análisis en tiempo y frecuencia de forma conjunta.

El aspecto más relevante de estas ondas wavelets es que pueden servir como base para la generación y el análisis de señales no estacionarias, proporcionando mayor información en tiempo y frecuencia que los análisis convencionales como el de Fourier.

Esta TW es eficiente para el análisis de señales no estacionarias y de rápida transitoriedad. Esta transformada mapea la señal en una representación de tiempo-escala. La principal ventaja que tiene respecto a anteriores análisis es que facilita el MRA con ventanas dilatadas. El análisis de las frecuencias de mayor rango se realiza usando ventanas estrechas, mientras que el análisis de las frecuencias de menor rango se realiza con ventanas más anchas, como se ilustra en la figura 1.

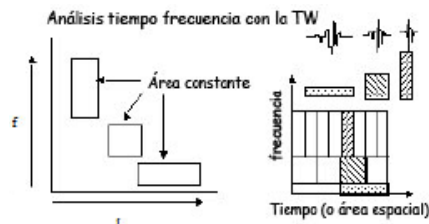


Figura 1: Estructura gráfica del análisis tiempo-frecuencia con Wavelets.

En los sistemas eléctricos, las señales pueden presentar variaciones temporales de frecuencia, huecos de tensión, sobretensiones, transitorios, etc. Es por ello, por lo que la TW se vuelve una herramienta muy apropiada para detectar estos eventos que pueden producirse en dichas señales eléctricas.

La TW de una función $f(t)$ consiste en la descomposición en una serie de funciones $\Psi_{s,\tau}(t)$ que forman una base y son llamadas "Wavelet madre". Esta TW, de forma general, se define de la siguiente forma:

$$W_f(s, \tau) = \int f(t) * \Psi_{s,\tau}^*(t) dt$$

Las funciones Wavelets se generan a partir de la translación y cambio de escala de la "Wavelet madre" de la siguiente forma:

$$\Psi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} * \Psi\left(\frac{t - \tau}{s}\right)$$

Donde " τ " y " s " son los parámetros de translación y de escala de dicha función Wavelet.

En la Figura 2 se representan diferentes tipos de funciones Wavelet madre. En este trabajo se utiliza la de Daubechies 4 (db04). Se ha escogido esta función debido a que es la de mayor aceptación en éste ámbito, en relación a resultados obtenidos y optimización de recursos matemáticos.

El (MRA) suele realizarse mediante la transformada Wavelet discreta (WMRA). De esta forma se realiza el análisis wavelet de cada componente de frecuencia con una resolución diferente. Este es el hecho en el que reside su gran ventaja frente a otros métodos de análisis.

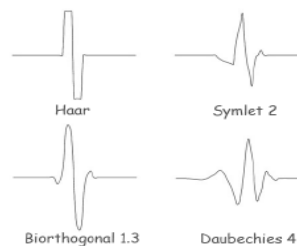


Figura 2: Diferentes ondas Wavelets madre.

De forma general, en este análisis MRA se filtra una señal en el dominio del tiempo mediante filtros paso-baja, $h(n)$, y filtros paso-alta, $g(n)$, con lo que se consigue eliminar ciertas componentes de alta y baja frecuencia. Estas componentes discriminadas son distintas en cada fase debido a que la salida de cada filtro es diezmada con un factor de 2. En el presente trabajo este proceso es realizado en 6 niveles diferentes.

El proceso de descomposición del mencionado análisis se describe de forma gráfica en la siguiente imagen, donde se observa la descomposición en diferentes niveles con los filtros paso-baja y paso-alta:

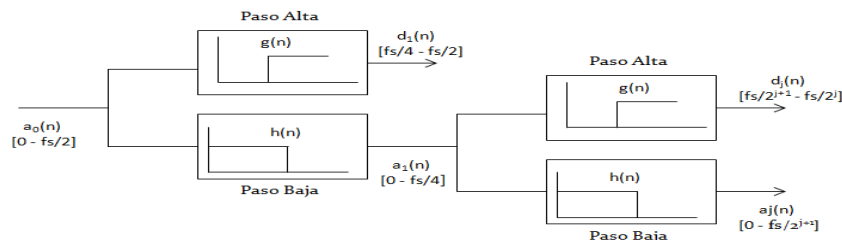


Figura 3: Descomposición en distintos niveles en análisis Wavelet.

Al realizar este análisis, los resultados de interés quedan en los coeficientes de salida de los filtros paso-alta ("d") y paso-baja ("a"). Según la descomposición realizada se pueden obtener las componentes frecuenciales en cada nivel (Tabla 1).

Nivel	Banda de frecuencia (Hz)	Banda armónicos
d1	3200 Hz- 6400 Hz	63º - 127º
d2	1600 Hz- 3200 Hz	33º - 63º
d3	800 Hz- 1600 Hz	17º - 31º
d4	400 Hz- 800 Hz	9º, 11º, 13º, 15º
d5	200 Hz- 400 Hz	5º, 7º
d6	100 Hz- 200 Hz	3º
a6	DC- 100 Hz	1º (Fundamental)

Tabla 1: Frecuencia de corte de distintos niveles de descomposición Wavelets.

Mediante este MRA cualquier señal puede ser expresada según:

$$x(n) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} a_{j,k} * h_{j,k}(n) + \sum_{i=j}^{\infty} \sum_{k \in \mathbb{Z}} d_{i,k} * g_{i,k}(n)$$

Los coeficientes “d” son los denominados coeficientes de detalle, y los coeficientes “a” se denominan coeficientes de aproximación. Los coeficientes h(n) son los coeficientes del filtro paso-baja, y los g(n) son los coeficientes de los filtros paso-alta.

Estos coeficientes de detalle y de aproximación pueden ser definidos, de forma general, mediante la siguiente expresión:

$$d_{j,k} = 2^{-\frac{j}{2}} * \int_{-\infty}^{\infty} x(n) * g_{j,k}(2^{-j}n - k) dn$$

$$a_{j,k} = 2^{-\frac{j}{2}} * \int_{-\infty}^{\infty} x(n) * h_{j,k}(2^{-j}n - k) dn$$

Para la realización de este WMRA existen diferentes algoritmos. En este caso, se ha utilizado el algoritmo de la TW recursiva, en su forma matricial.

El inicio para la formulación de este algoritmo ha de partir necesariamente de la definición de los citados bancos de filtros, filtros paso-baja y filtros paso-alta. La Wavelet madre seleccionada, Daubechies 4, que definen dichos filtros según matrices que tienen cuatro elementos por cada fila.

En cuanto a los filtros paso-alta, g(n), utilizados para obtener los coeficientes Wavelet “d”, se realizan utilizando estos cuatro componentes:

$$\tilde{g}(1) = \frac{1+\sqrt{3}}{8}; \quad \tilde{g}(2) = \frac{3+\sqrt{3}}{8}; \quad \tilde{g}(3) = \frac{3-\sqrt{3}}{8}; \quad \tilde{g}(4) = \frac{1-\sqrt{3}}{8}$$

Mientras que los componentes de la matriz de los filtros paso-baja, h(n), se definen de la siguiente forma:

$$\tilde{h}(1) = \tilde{g}(4); \quad \tilde{h}(2) = -\tilde{g}(3); \quad \tilde{h}(3) = \tilde{g}(2); \quad \tilde{h}(4) = -\tilde{g}(1)$$

La formulación de las matrices que definen los filtros de paso-alta (\tilde{A}_1) y paso-baja (\tilde{B}_1) son:

$$\tilde{A}_1 = \begin{bmatrix} \tilde{g}(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \tilde{g}(1) & \tilde{g}(2) & \tilde{g}(3) \\ \tilde{g}(3) & \tilde{g}(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \tilde{g}(1) & \tilde{g}(2) \\ \tilde{g}(2) & \tilde{g}(3) & \tilde{g}(4) & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \tilde{g}(1) \\ \tilde{g}(1) & \tilde{g}(2) & \tilde{g}(3) & \tilde{g}(4) & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \tilde{g}(1) & \tilde{g}(2) & \tilde{g}(3) & \tilde{g}(4) \end{bmatrix}$$

$$\tilde{B}_1 = \begin{bmatrix} \tilde{h}(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) \\ \tilde{h}(3) & \tilde{h}(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) \\ \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) & \tilde{h}(4) & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \tilde{h}(1) \\ \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) & \tilde{h}(4) & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) & \tilde{h}(4) & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) & \tilde{h}(4) \end{bmatrix}$$

Sin embargo, la realización de este algoritmo tiene un pequeño inconveniente. Se trata de la aparición del llamado “Efecto de Borde”. Este efecto de borde es el responsable de crear en extremos de la ventana unos valores de los coeficientes de aproximación y coeficientes Wavelet falsos.

Para evitar este efecto indeseado se ha realizado el análisis con un tamaño de muestras de 10+1 ciclos, para posteriormente y una vez realizado el MRA, eliminar ese ciclo extra de 256 muestras. La mitad de dichas muestras se eliminan del principio de la ventana y la otra mitad del final de la misma. De esta forma se obtiene un resultado final con 10 ciclos de la señal (2560 muestras) limpias de efecto de borde.

Índice de calidad de distorsión transitoria instantánea (ITD)

Para la caracterización del método presentado se utiliza el denominado Índice de Distorsión Transitoria (ITD) [15], propuesto por nuestro grupo de investigación para poder clasificar estas perturbaciones eléctricas y que se define como:

$$ITD(n) = \sqrt{\frac{\sum_{k \in Kd} d_{j,k}^2}{\sum_{k \in Ka} A_k^2}}$$

$$A_k^2 = \frac{1}{N} * \sum_{j=1}^N a_{j,k}^2$$

donde:

- N: se trata del número de muestras que se obtienen en el análisis Wavelet. En el caso de nuestra investigación se tratan de 2560 muestras.
- $d_{j,k}$: se tratan de todas las componentes de los coeficientes Wavelet del análisis, en cada uno de los 6 niveles tratados. En definitiva, se tratan de todas las muestras de d1, d2, d3, d4, d5 y d6.
- A_k : se trata del valor RMS de la componente fundamental, es decir de la componente a6.

La definición de este índice de calidad ITD(n) se puede interpretar como una evaluación de la calidad de la señal eléctrica variable en el tiempo, determinada por el cociente en el dominio de tiempo-frecuencia entre la energía de la perturbación eléctrica y la energía de la componente fundamental de la señal eléctrica.

Implementación

Una etapa importante en el desarrollo de este proyecto ha sido la implementación de la TW para poder conseguir los objetivos propuestos. Se ha abordado desde una doble perspectiva. En la primera se ha desarrollado todo el hardware, donde se implementan los componentes físicos del dispositivo, como circuito de acondicionamiento, sensores, etc.; y en la segunda fase se ha abordado el software, donde se implementa con programación C y Python en el microcontrolador y micro-PC.

Implementación hardware

El dispositivo diseñado para poder analizar la calidad eléctrica será capaz de analizar redes monofásicas de tensión.

El desarrollo del hardware se divide en tres partes fundamentales (Figura 4): por un lado está el microcontrolador de bajo coste (Arduino) y el micro-PC de bajo coste (Raspberry Pi 3) utilizados; y por otro lado se encuentra la placa de acondicionamiento, para poder adaptar los valores de la señal medidas hacia los valores admitidos por el microcontrolador y micro-PC.

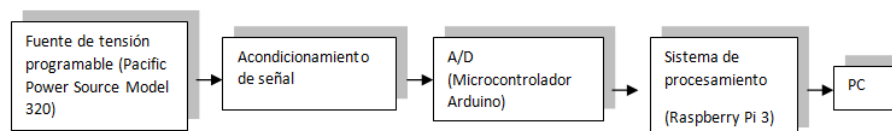


Figura 4: Etapas de implementación hardware de dispositivo diseñado.

El microcontrolador seleccionado es el Arduino DUE. Este microcontrolador es usado para la adquisición de la señal a medir con el convertidor analógico-digital (ADC) y enviar estos datos por puerto serie. El principal requerimiento de este microcontrolador es tener la suficiente capacidad para muestrear la señal de tensión de la red y poder enviar estos datos por el puerto serie hacia un micro-PC, más potente que este microcontrolador, en el que realizar el procesamiento de estos datos.

Las especificaciones de este microcontrolador usado son:

- CPU Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 de 32 bits a 84 MHz.
- SDRAM de 96 KB.
- Controlador DMA
- Memoria Flash de 512 KB.
- ADC, 12 entradas analógicas con 12 bits de resolución.
- 54 pines digitales de entrada/salida.
- 2 puertos USB para comunicación serie.
- Salida HDMI.
- Conexión Ethernet.

Este microcontrolador tiene 12 entradas analógicas con un rango de medida de 0 – 3.3V. En este proyecto de investigación se usa una sola entrada para adquirir la señal de tensión. Debido al pequeño rango de medida que tiene dicho microcontrolador en sus entradas analógicas se hace indispensable una etapa de acondicionamiento de la señal, previa al ADC.

De acuerdo al teorema de Niquist-Shannon, la mínima frecuencia de muestreo para obtener hasta el armónico número 50 (2500 Hz) es de 5kHz. Sin embargo, en este trabajo es necesario obtener una frecuencia de muestreo más alta debido a que se muestrearán señales con transitorios oscilatorios rápidos. Además, tal y como se explicó en el apartado de la transformada Wavelet, se quiere obtener 11 ciclos de la señal de tensión con una tasa de 256 muestras por ciclo. Debido a ello, la frecuencia de muestreo a la que trabaja el dispositivo ADC es de 12,8kHz.

El segundo requerimiento de este microcontrolador era el envío de los datos digitales, salida del dispositivo ADC, por el puerto serie hacia otro dispositivo. Estos datos deben ser recibidos por el micro-PC de bajo coste. Este envío de datos se realiza a través de un puerto serie como el puerto USB con una tasa de 2400 bits por segundo (bps).

El micro ordenador de bajo coste es usado para poder recibir los datos enviados anteriormente por el microcontrolador y realizar el procesamiento adecuado de estos datos digitales recibidos. De esta forma, una vez recibidos los datos digitales, el siguiente paso será el procesamiento de la monitorización de la señal de tensión medida y la detección de posibles perturbaciones presentes en la señal eléctrica, con la transformada Wavelet. Sin embargo, todo este procesamiento es llevado a cabo por software en el micro ordenador.

Las especificaciones de la Raspberry Pi 3 son:

- Quad Cortex A53, CPU de 4 núcleos a 1,2 GHz.
- GPU de 400 MHz.
- SDRAM de 1 GB.
- Memoria Micro-SD.
- 40 pines GPIO (General Purpose Input/Output).
- 4 puertos USB para la comunicación serie.
- Conexión Ethernet.
- Conexión de Bluetooth 4.0 (802.11n).
- Salida HDMI.

Este micro-PC Raspberry Pi 3 es mucho más potente que el microcontrolador de Arduino DUE. Por esta razón éste último sólo realiza la adquisición de la señal y se reserva para la primero todo el bloque de cálculo del procesamiento.

El acondicionador tiene como objetivo trasladar los valores de la señal de tensión de la red eléctrica (230 V RMS) a valores admisibles por el ADC (0 – 3,3 V).

La medida de la señal de tensión puede ser realizada de diferentes formas: mediante divisores de tensión, transformador de tensión o con un transductor de tensión. El divisor de tensión posee el

problema de la seguridad hacia las personas y el propio dispositivo hardware, además de su disipación de calor en la resistencia eléctrica. La segunda opción, el transformador de tensión, tiene el inconveniente del desfase introducido en el secundario de dicho transformador al medir la señal de tensión. En este caso, se usa un transductor de tensión por ser la opción más segura debido al aislamiento galvánico que proporciona.

Para el transductor utilizado se hace necesario que todos los ciclos de la señal de tensión sean positivos, debido a que el ADC de Arduino no puede leer valores negativos. Por esta razón, se introduce un amplificador operacional, tipo UA741CP. Este amplificador operacional se configura en modo sumador-inversor para obtener de esta forma una tensión offset de 1,7 V. Con esta tensión offset, la señal de tensión es positiva en todos sus ciclos. En la etapa de software, se corrige esta tensión de offset introducida mediante hardware y la ganancia del propio amplificador operacional.

Todos los elementos de los que está compuesto este acondicionador de señal necesitan una alimentación de corriente continua (DC) de $\pm 15V$. Para suministrar esta alimentación, la primera opción es una fuente de alimentación de 230 V AC/ 15 V DC simétrica, pero este elemento es muy caro para un dispositivo de bajo coste como el diseñado. Debido a que esta alimentación es solo para los componentes del circuito acondicionador, y no necesita un perfecto filtrado de esa alimentación, se usa un transformador tipo Block 230 V AC/ 2x15V AV, 2,3VA. A la salida de este transformador existirá una corriente alterna AC de 15 V, sin embargo, la alimentación necesaria es de $\pm 15 V$ de continua. Por esta razón, además de usar este transformador también se usa un puente rectificador de diodos, tipo W08G-04, 800V.

Las salidas de este puente rectificador son señales rectificadas con valor $\pm 15V$ RMS. A continuación, se hacen pasar por reguladores de tensión de +15 V y -15 V, tipo L7815CV y L7915CV respectivamente y finalmente por filtros capacitivos con lo que se obtiene una señal mucho más continua.

La salida del amplificador operacional debe ser la entrada del convertidor ADC del microcontrolador. Sin embargo, entre estos elementos existen otros elementos de protección, como es por ejemplo un fusible de 32 mA, para proteger este microcontrolador. Además, posee un diodo zener de 3.3 V para proteger el microcontrolador antes de sobretensiones existentes y un filtro antialiasing.

Además de estas protecciones, este circuito acondicionador es protegido con un fusible de 2 A dispuesto antes del transductor de tensión, para de esta forma salvaguardar el elemento más importante del dispositivo diseñado.

Implementación software

Esta etapa de software tiene dos partes fundamentales, una para cada microcontrolador empleado.

El software del microcontrolador Arduino es muy simple (Figura 5). Se leen los datos de la señal a medir mediante el uso del ADC y se envían mediante la comunicación serie hacia el otro dispositivo. Para ello se definen parámetros como son la frecuencia de muestreo y la tasa de bit. Además, también es necesario configurar algunos registros de este microcontrolador para que esta adquisición de datos y comunicación se realice de forma totalmente adecuada.

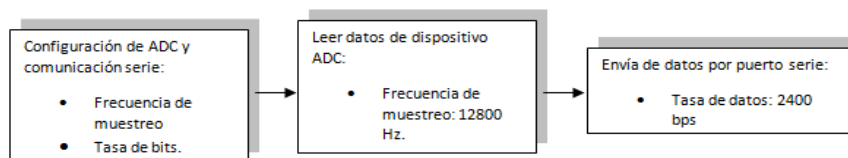


Figura 5: Etapas de implementación software de microcontrolador Arduino.

Respecto al software del ordenador de bajo coste que trata el procesamiento de los datos obtenidos, el cálculo de la transformada Wavelet y su índice ITD para poder detectar posibles perturbaciones eléctricas en la señal de tensión medida. En la figura 6 se puede observar el flujo de trabajo de dicho software en el dispositivo de Raspberry Pi 3:

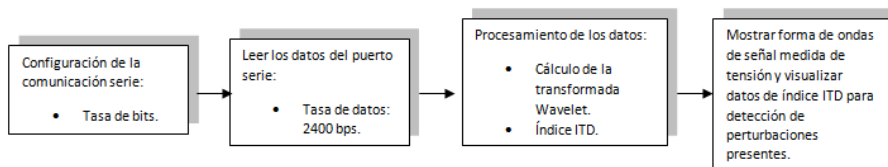


Figura 6: Etapas de implementación software de micro-PC Raspberry Pi 3.

En esta figura se puede observar el bloque principal del procesamiento de los datos. En este bloque, se calcula la transformada Wavelet con un análisis recursivo y se calcula el índice ITD para permitir detectar las posibles perturbaciones eléctricas presentes en las líneas eléctricas. Finalmente, se muestran los gráficos de las formas de ondas de la señal de tensión medida junto con su índice ITD. Estos gráficos son monitorizados mediante un escritorio virtual.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para poder verificar el correcto funcionamiento del dispositivo diseñado se han realizado una serie de casos prácticos reales para su verificación. Estos casos prácticos se basan en la creación de señales eléctricas de tensión con ciertas perturbaciones, para poder visualizar que este dispositivo y el índice de calidad propuesto detectan dicha perturbación eléctrica.

Estas perturbaciones eléctricas utilizadas son de acuerdo a la norma UNE-EN 50160, donde se describen y definen las posibles perturbaciones eléctricas que pueden existir en las redes generales de distribución eléctrica, además de definir las características de dichas perturbaciones. Estas perturbaciones probadas y verificadas son:

- Transitorio oscilatorio.
- Huevo de tensión.
- Sobretensión temporal.
- Sobretensión transitoria.
- Interrupción de tensión.
- Notch.

Estas perturbaciones eléctricas son diseñadas mediante la fuente de tensión programable, modelo Pacific Power Source Model 320. A continuación se muestran los resultados obtenidos de las principales perturbaciones que pueden existir en la red eléctrica, como son el huevo de tensión, el transitorio oscilatorio, y el conjunto de estas dos perturbaciones. La primera de ellas, el huevo de tensión se puede observar en la siguiente figura, perturbación eléctrica muy presente en las redes eléctricas en situaciones como pueden ser el inicio y fin de cortocircuitos cortos o incluso ante situaciones de un aumento de corriente en instalaciones conectadas a esta red eléctrica:

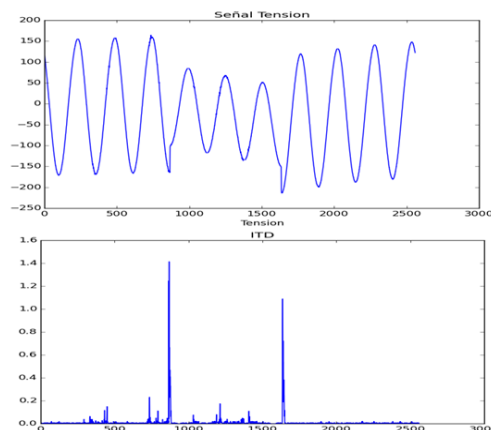


Figura 7: Señal medida con perturbación de huevo de tensión e índice de calidad ITD

Tal y como se puede observar en la anterior figura, la perturbación del huevo de tensión perfectamente visualizada. Además, el objetivo más importante de este proyecto de investigación, la

detección de las perturbaciones eléctricas, se puede observar que se detecta de forma totalmente correcta mediante este índice de calidad ITD.

Observando el índice de calidad de esta perturbación eléctrica, este índice se mantiene con valores muy próximos a cero cuando el armónico presente es el fundamental (50 Hz), es decir, la señal es totalmente sinusoidal. Sin embargo, antes la presencia del inicio y fin del hueco de tensión, se puede observar como el valor de este índice de calidad se dispara a valores mucho más superiores a 0. De esta forma, se puede determinar el instante de inicio y de fin de este hueco de tensión.

La segunda perturbación eléctrica a verificar se trata de la perturbación de un transitorio oscilatorio, muy presente en las redes eléctricas en situaciones como conexiones de bancos de condensadores, conexión de otras líneas eléctricas, etc. Los resultados obtenidos de este segundo caso de prueba se visualizan en la siguiente figura:

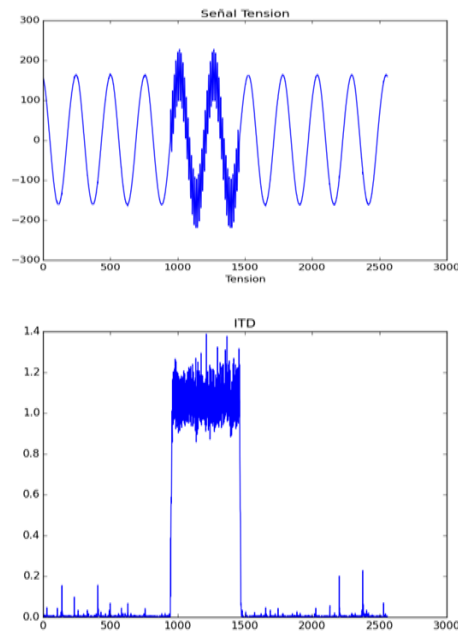


Figura 8: Señal medida con perturbación de transitorio oscilatorio e índice de calidad ITD

Al igual que sucedía en la anterior perturbación visualizada, la visualización de esta perturbación eléctrica es completa. Además, en su índice ITD sucede lo mismo que sucedía ante la perturbación eléctrica del hueco de tensión. De esta forma, ante una onda de señal sinusoidal, sin perturbaciones, este índice de calidad se comporta dando valores muy próximos a cero. Sin embargo, ante la presencia de la perturbación eléctrica, se observa como éste índice de calidad se dispara a valores superior a 0. Por lo que se detecta también, de forma totalmente clara, la presencia de una perturbación eléctrica como es el transitorio oscilatorio.

A pesar de que estas perturbaciones mostradas son muy usuales en las redes eléctricas. A menudo no solo aparece una perturbación eléctrica, sino que las perturbaciones se presentan de forma conjunta. Debido a esto, también es necesario comprobar que este dispositivo diseñado también funciona de forma totalmente perfecta ante la presencia de un conjunto de perturbaciones. En este caso, se ha escogido un conjunto de las perturbaciones anteriormente mostradas, como son el hueco de tensión y el transitorio oscilatorio. Los resultados de este tercer caso de prueba son:

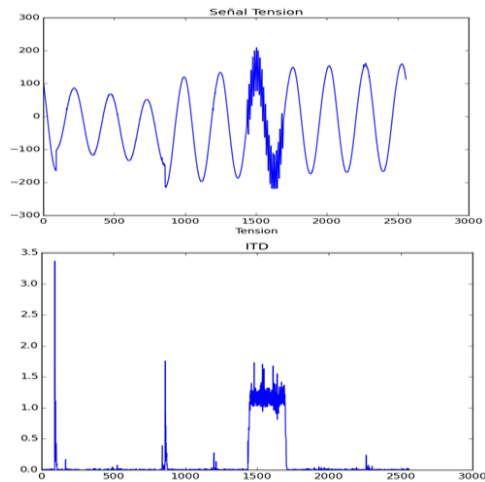


Figura 9: Señal medida con perturbación conjunta de hueco de tensión y transitorio oscilatorio, e índice de calidad ITD.

Tal y como se puede observar en esta figura, en la imagen superior se puede observar como la señal medida está formada por un hueco de tensión al principio y un transitorio oscilatorio. Además, se puede observar como dicha visualización de la señal es perfecta. Respecto a la detección de las perturbaciones, el principal objetivo de dicho proyecto de investigación, se puede observar como este índice de calidad actúa de igual forma con una y con dos perturbaciones eléctricas presentes en la señal a medir. De esta forma, sucede igual que lo sucedido con anterioridad, este índice proporciona valores muy próximos a cero cuando dicha señal es sinusoidal. Sin embargo, ante el inicio y fin del hueco de tensión, y ante el transitorio oscilatorio, se puede observar como dicho índice de calidad proporciona valores mucho mayores a 0, por lo que se puede detectar de forma totalmente correcta dichas perturbaciones eléctricas.

CONCLUSIONES

La calidad eléctrica se está convirtiendo en un asunto fundamental en las líneas de redes eléctricas. Este hecho es así debido al gran uso de dispositivos electrónicos en el día a día por las personas. Estos dispositivos generan numerosas ventajas en su uso individual, sin embargo generan numerosos problemas en las redes eléctricas. Es debido a estos problemas que ocasionan, por las perturbaciones eléctricas que generan en ellos, por la importancia que adquiere la calidad eléctrica actualmente.

Además, actualmente existen dispositivos para poder analizar dicha calidad eléctrica. Sin embargo, dichos dispositivos son muy caros y ante perturbaciones no estacionarias como las que están existiendo actualmente en las líneas eléctricas es necesario la utilización de una herramienta para el análisis de dichas perturbaciones.

Es por ello el diseño de un dispositivo que pueda analizar estas perturbaciones eléctricas no estacionarias, las cuales no pueden ser analizadas con herramientas tradicionales como es el análisis Fourier. Por ello, se ha tratado este tema y se analiza mediante el análisis Wavelet. Además, es necesario un índice de calidad para poder detectar estas perturbaciones eléctricas. Debido a la novedad de este tema, dicho índice no existe en bibliografías. Por ello, la creación de un índice de calidad (ITD), el cual es creado por nuestro grupo de investigación, mediante el cual se pueda detectar la presencia de estos eventos en las señales de tensión de forma rápida.

Además, otro hecho que hace el desarrollo de este proyecto de investigación es el precio de los actuales analizadores de red, los cuales son muy caros. Por ello, la necesidad de crear un dispositivo que sea capaz de analizar estas perturbaciones y además se trate de un dispositivo de bajo coste, capaz de ser adquirido por cualquier persona, tanto en uso doméstico como en uso industrial.

Con todo esto, en este proyecto de investigación se demuestra como es posible el análisis de estas perturbaciones eléctricas mediante la transformada Wavelet además de su detección, mediante el índice

de calidad propuesto. También se diseña el prototipo para poder detectar estas perturbaciones eléctricas, utilizando dicha transformada Wavelet.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación fue realizado bajo la supervisión del Dr. D. Juan Carlos Bravo Rodríguez, responsable del Grupo de investigación en Ingeniería Eléctrica (INVEPOT), y de la Dra. D^a. María Dolores Borrás Talavera, a quienes me gustaría expresar mi más profundo agradecimiento, por hacer posible la realización de este estudio. Además, de agradecer su paciencia, tiempo y dedicación que tuvieron para que este proyecto saliera de manera exitosa.

También agradecer al departamento de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Sevilla, por todo el apoyo y ayuda mostrada para poder sacar adelante dicho proyecto de investigación.

Para finalizar no quiero perder la oportunidad sin agradecer a mis padres y hermano todo el apoyo que han depositado en mi desde el principio. Siempre apoyandome y aportando su incondicional y constante apoyo día tras día. Además de agradecerlo también a mi novia y amigos, los cuales me han aportado todo su cariño y apoyo constantemente durante la realización de este proyecto de investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bezerra Costa, Flávio. (2010). "Uma técnica de diagnóstico em tempo real de distúrbios transitórios baseada na Transformada Wavelet para uso em registradores Digitais de Perturbação". Universidade Federal de Campina Grande.
- [2] Bezerra Costa, Flavio. (2014). "Fault-induced transient detection base don real-time analysis of the wavelet coefficient energy". IEEE Transactions on Power Delivery. Vol 29, num 1, pag 140-153.
- [3] Eguíluz Morán, Luis Ignacio. (2001). "Potencia en régimen no-sinusoidal". Universidad de Cantabria. XVII Cursos de verano de Laredo.
- [4] Borrás, M.D., Bravo, J.C., Montaña, J.C. (2016). "Disturbance ratio for optimal multi-event classification in Power Distribution Networks". IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol 63, num 5, pag 3117-3124.
- [5] Borrás Talavera, María Dolores. (2016). "Contribuciones a la calidad de la señal eléctrica basadas en wavelets e inteligencia artificial". Sevilla, Universidad de Sevilla.
- [6] Meyer, Y. (1990). "Ondelettes et operateurs", Hermann, Paris.
- [7] Daubechies, I.(1992.). "Ten lectures on Wavelets". Society for Industrial and Applied Mathematics. Philadelphia, Pensylvania.
- [8] Mallat, S.G. (1989). "A theory for multiresolution signal decomposition the wavelet representation", IEEE Transactions on Pattern Recog. And Machine Inteligence. Vol 11, Num 7, Pag 674-693.
- [9] Koley, Ebha, Kumar, Raunak., Ghosh, Subhojit. (2016). "Low cost microcontroller based fault detector, classifier, zone identifier and locator for transmission lines using wavelet transform and artificial neural network: A hardware co-simulation approach". International Journal of Electrical Power and Energy Systems. Vol 81, Pag 346-360.
- [10] Albu, M., Sanduleac, M., Stanescu, C. (2016). "Syncretic use of smart meters of Power Quality monitoring in emerging networks". IEEE Transactions of Smart Grid. Vol 8, Num 1, Pag 485-492.
- [11] Aurilio, G., Gallo, D., Landi, C. (2014). "A low cost smart meter network for a smart utility". Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, IEEE International.
- [12] Janani, R., Jayasri, R.S., Deepa, G. (2015). "Low cost Power Quality analyzer for academic applications". Student Journal of Electrical and Electronics Engineering. Vol 1, Num 1.
- [13] Kabalci, E. (2016). "Emerging smart metering trends and integration at ML-LV level". 3^o International Smart Grid Workshop and Certificate Program.
- [14] Tomesc, L., Dobra, P. (2007). "Lox-cost Power Quality analyzer". IFAC Workshop'07.
- [15] Music, M., Hasanspahic, N., Bosovic, A. (2016). "Upgrading smart meters as key components of integrated Power Quality monitoring system". Environmental and Electrical Engineering (EEEIC), IEEE 16th International Conference.

- [16] Montoya, F.G., Alcayde, A., Sánchez, P., Gómez, J. (2010). "zEnergy: An open source Project for Power Quality assessment and monitoring". Proceedings of the 2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG).
- [17] Yaemprayoon, S., Boonplian, V. (2016). "Developing an innovation smart meter based on CS5490". Electrical Engineering/ Electronics, Telecommunications and Information Technology (ECTICON).
- [18] Thongkhao, Y., Pora, W. (2016). "A low-cost Wi-Fi smart plug with on-off and energy metering functions". Electrical Engineering/ Electronics, Telecommunications and Information Technology (ECTICON).
- [19] Sun, Q., Li, H., Ma, Z. (2016). "A comprehensive review of smart energy meters in intelligent energy networks". IEEE Internet of Things Journal, Vol 3, Num 4.
- [20] Santoso S., Powers E.J., Grady W.M., Hofmann P. (1996). "Power quality assessment via wavelet transform analysis". IEEE Trans. Power Delivery. Vol. 11, Num 2, Pag 924-930.
- [21] Pandey S.K., Satish L. (1998). "Multiresolution signal decomposition: a new tool for fault detection in power transformers during impulse tests". IEEE Trans. Power Delivery. Vol 13, Num 14, Pag 1194-1200.
- [22] Weon-Ki Y., Devaney M.J. (1998). "Power measurement using the wavelet transform", IEEE Trans. Inst and Meas. Vol. 47, Num 5, Pag 1205-1210.
- [23] Weon-Ki Y., Devaney M.J. (2000). "Reactive power measurement using the wavelet transform", IEEE Trans. Inst ans Meas. Vol 49, Num 2, Pag 246-252.
- [24] Heydt G.T. (1998). "Electric power quality: a tutorial introduction", IEEE Computer Applications in Power. Vol 11, Num 1, Pag 15-19.
- [25] Heydt G.T., Jewell W.T. (1998). "Pitfalls of electric power quality indices", IEEE Trans. Power Delivery. Vol 13, Num 12, Pag 570-578.
- [26] Kandil M.S., Farghal S.A., Elmitwally A. (2001). "Redefined power quality indices", IEEE Proc. Gen., Trans. And Distr. Vol 148, Num 6, Pag 590-596.
- [27] Santoso S., Powers E.J., Grady W.M., Hofmann P. (1996). "Power quality assessment via wavelet transform analysis", IEEE Trans. Power Delivery, Vol 11, Num 2, Pag 924-930.
- [28] Pandey S.K., Satish L. (1998). "Multiresolution signal decomposition: a new tool for fault detection in power transformers during impulse tests", IEEE Trans. Power Delivery, Vol 13, Num 14, Pag 1194-1200.
- [29] Heydt G.T. (1998). "Electric power quality: a tutorial introduction", IEEE Computer Applications in Power, Vol 11, Num 1, Pag 15-19.
- [30] Heydt G.T., Jewell W.T. (1998). "Pitfalls of electric power quality indices, IEEE Trans. Power Delivery, Vol 13, Num 12, Pag 570-578.

C2

NEURODISEÑO Y NEUROUSABILIDAD DE AUTOMOVILES. UNA PROPUESTA DESDE LA INGENIERIA NEUROKANSEI-CHISEI

Núñez Romero, Raúl; Aguayo González, Francisco y Córdoba Roldán, Antonio. Departamento Ingeniería del Diseño. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Sevilla.

RESUMEN

En este trabajo de investigación se plantea una innovación metodológica en los procesos de diseño y desarrollo de productos industriales, con enfoque en el usuario. El objetivo central es el planteamiento de un modelo de orientación neurocientífica para la aplicación de la Ingeniería Kansei-Chisei al diseño de productos en el sector del automóvil. Esta propuesta participa en la ampliación del concepto de ergonomía aplicada a productos y a entornos de trabajo, la cual ha evolucionado desde los conceptos de ergonomía clásica o ergonomía física hacia otros ámbitos relacionados con la incorporación e interacción emocional y racional del diseño. En el ámbito de la ergonomía, el diseño productos ha evolucionado de una concepción racional centrada exclusivamente en la eficiencia práctica, a planteamientos de concepción emocional mediante la incorporación de soluciones de diseño afectivo por Ingeniería Kansei. El objetivo final de la Ingeniería Kansei Chisei es establecer la relación entre emoción, razón y propiedades vehículo, de tal manera que los resultados puedan ser utilizados para mejorar el confort y la eficiencia del producto.

Palabras clave: *Ingeniería kansei, diseño afectivo, neurodiseño, diseño de automóvil*

ABSTRACT

In this research work, is proposed a methodological innovation in the design and development processes of industrial products, with a focus on the user. The central aim is the approach of a neuroscientific orientation model for the application of Kansei-Chisei Engineering to the design of products in the automotive sector. This proposal participates in the expansion of the concept of ergonomics applied to products and work environments, which has evolved from the concepts of classical ergonomics or physical ergonomics to other areas related to the incorporation and emotional and rational interaction of design. In the field of ergonomics, product design has evolved from a rational conception focused exclusively on practical efficiency, to approaches of emotional conception through the incorporation of affective design solutions by Kansei Engineering. The final objective of the Kansei-Chisei Engineering is to establish the relationship between emotion, reason and vehicle properties, in such a way that the results can be used to improve the comfort and efficiency of the product.

Keywords: *Kansei engineering, affective design, neurodesign, car design*

INTRODUCCIÓN

Desde que Nagamachi desarrollase en la década de los 70 la Ingeniería Kansei [2], ésta ha evolucionado como una disciplina muy vinculada al sector industrial con numerosas y exitosas innovaciones. El Mazda Miata, o también conocido como Mazda MX-5, ha sido un éxito de ventas para la empresa automovilística. El diseño de este coche fue el primero en desarrollarse basado en Ingeniería Kansei. Y desde entonces otros fabricantes en la industria del automóvil, como Nissan, Ford, Saab o Volvo, han empleado también el enfoque de Ingeniería Kansei. Y no solo en el sector del automóvil, sino en otros muchos sectores industriales dan uso al enfoque de Ingeniería Kansei para desarrollar productos exitosos (por ejemplo Shisheido, Panasonic, Samsung, Sharp...). Sharp desarrollo una videocámara con pantalla externa asistido por Nagamachi [8]. También ha sido aplicada esta Ingeniería en la creación de tonos para los teléfonos móviles [12] y el diseño de interruptores de maquinas [13]. Incluso como hito importante, cabe desatacar que el Ministerio japonés de Economía, Comercio y La industria (METI) ha declarado el valor Kansei como el cuarto valor eje para industria japonesa que "mejora los estilos de vida de la gente

y vigoriza la economía "(METI, 2007). Desde sus inicios hasta hoy la Ingeniería Kansei (IK) ha evolucionado y tomado relevancia, llegando a un amplio reconocimiento a nivel internacional.

En la situación actual, las empresas y usuarios no valoran únicamente la funcionalidad, utilidad, seguridad y adecuado precio de los productos (valores clásicos), sino también las emociones y los sentimientos que le proporcionan. Por ejemplo, ante dos vehículos aproximadamente equivalentes en funcionalidad, calidad y precio, la decisión final de compra es hacia aquel que le proporciona un mayor 'feeling' o que mejor refleja un determinado estilo de vida (Figura 1).

Derivado de lo anterior, resulta de interés el desarrollo de una metodología cuantitativa para diseñar y desarrollar productos que evoquen unos determinados sentimientos y emociones en los usuarios. Por ello, en el trabajo de investigación se propondrá una aportación metodológica al diseño industrial con la que se puedan desarrollar productos y entornos que provoquen una emoción positiva y motivante. Es decir, el objetivo es conseguir mediante el diseño de productos industriales una conexión placentera con el usuario mediante el diseño de productos motivantes y con vinculación atemporal con el usuario. Esta situación forma parte del resultado evolutivo de las técnicas de ergonomía, que en su estado más evolucionado de desarrollo se orientan a la concepción de productos y entornos de trabajo placenteros, afectivos y motivantes[1 y 2].

Bajo este supuesto se desarrolló el concepto de Ingeniería Kansei, como metodología cuantitativa que ayuda a los ingenieros diseñadores a incorporar la emoción, afecto y sentimientos como requerimiento en los productos y entornos industriales. Este será el punto de partida para el desarrollo metodológico y de aplicación que se plantea en la investigación.

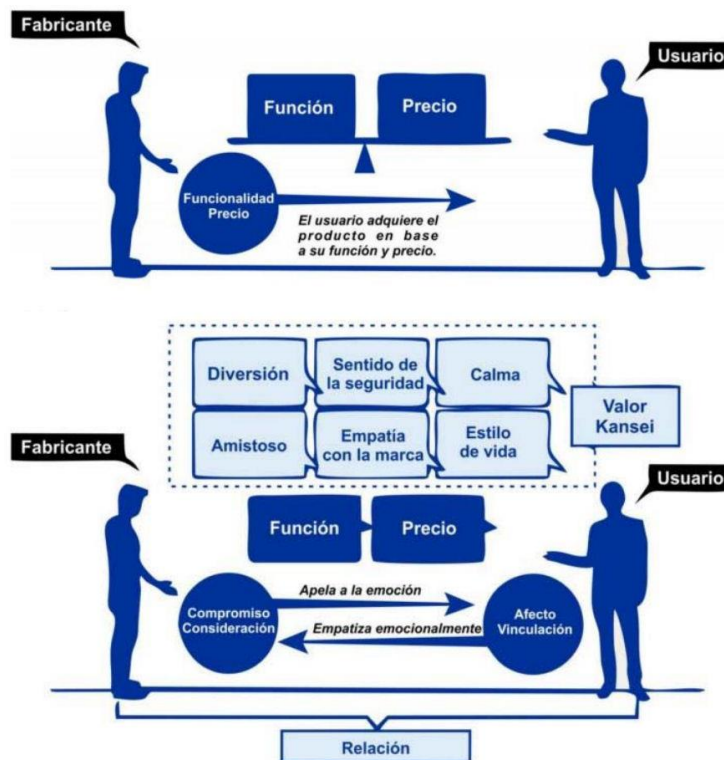


Figura 1: Valores tradicionales versus Valores nuevos en la adquisición de productos. Adaptado de [3].

CONTEXTO DE APLICACION

La concreción en los momentos actuales de la línea de investigación de metodologías innovadoras de diseño y desarrollo de productos industriales en los que se incardina este trabajo de investigación se corresponde con los conceptos de neuro-ergonomía y neuro-diseño, teniendo en cuenta todo lo referente al marco de aplicación de sistemas de fabricación en Industria 4.0 e industria conectada inteligente, soportada por las tecnologías de la información como: sensórica inteligente, internet de las cosas, big

data, *cloudcomputing*, realidad aumentada, dispositivos móviles, *wearables*, sistemas de inteligencia artificial.

A día de hoy la Ingeniería Kansei se ha desarrollado clasificado en 6 tipos [4, 8, 9, 10]:

Tipo I. En esta modalidad se representa en una estructura de árbol la estrategia del diseño del producto y la segmentación del mercado, para identificar las necesidades afectivas del consumidor y enlazarlas con las propiedades del producto.

Tipo II. KES, por su definición en inglés: *Kansei Engineering System*, es una modalidad asistida por ordenador, donde herramientas estadísticas son las encargadas de la asociación entre las necesidades afectivas, Kansei y las propiedades del producto.

Tipo III. Esta modalidad es parecida al tipo II, pero en este no solo los modelos matemáticos muestran las propiedades del producto, según los requerimientos de Kansei, sino que esta modalidad puede predecir, según un producto definido, los Kansei provocados por las propiedades del producto.

Tipo IV. También es una modalidad asistida por ordenador como los tipos anteriores, con la particularidad de ser más complejos los modelos matemáticos, y tiene un carácter predictivo.

Tipo V. Modalidad virtual. En este tipo la realidad virtual toma el protagonismo, que es la forma en que se representan las imágenes del producto.

Tipo VI. La base de datos Kansei es accesible vía Internet, por lo que soporta trabajo en grupo e ingeniería concurrente. Utiliza herramientas de gestión de calidad del tipo: Despliegue de la Función Calidad (QFD) [7], aplicadas a la industria de servicios, y busca el diseño de todos los procedimientos del servicio tomando como origen las preferencias del usuario [2 y 11].

OBJETIVOS

La línea de investigación sobre metodologías y técnicas de diseño y desarrollo de productos industriales centradas en el usuario (enfoque social), constituye el eje central del desarrollo de este trabajo. El propósito de la investigación es dar repuesta al necesario empoderamiento del factor humano en los procesos de diseño y desarrollo de nuevos productos. Con tal propósito, el objetivo de investigación se ha concretado en la formulación de un modelo metodológico de diseño industrial con orientación neurocientífica denominado Ingeniería Kansei-Chisei y en su aplicación al diseño y desarrollo de un vehículo.

Establecida una metodología que satisface el diseño emocional del producto, el siguiente ámbito de estudio será (de forma simultánea) la adaptación racional del producto al usuario. Este concepto de diseño racional de productos va más allá del término clásico de ergonomía de producto y procesos de fabricación (orientado a los factores humanos), centrándose en el concepto de diseño adaptado al usuario, principalmente en términos de usabilidad productos. Para abarcar la racionalización del producto se plantea la metodología de Ingeniería Chisei, como enfoque cuantitativo que ayuda a los ingenieros diseñadores a incorporar en los productos recursos orientados a proveer placer a través de los procesos cognitivos de razón (soluciones que satisfagan requerimientos). Esta metodología no está desarrollada y su estructuración e incorporación en el diseño de productos está por definir en el actual estado del arte de la Ingeniería Kansei y Chisei [4]

Satisfechos los criterios ergonómicos basados en los factores humanos clásicos, se va a centrar la atención en aportar una metodología compacta que ayude a la incorporación de factores centrados en el usuario, en las dimensiones afectiva y de razón (Ingeniería Kansei e Ingeniería Chisei).

En primer lugar se realizará un estado de arte con el objetivo de poder realizar una propuesta metodológica que aúne en un mismo modelo metodológico la Ingeniería Kansei y la Ingeniería Chisei, denominando dicho modelo como Ingeniería Kansei-Chisei. Actualmente no existe ninguna propuesta formal de incorporación metodológica al diseño de productos de aspectos de diseño emocional y del diseño racional. Esta propuesta metodológica se centrará en el desarrollo de la Ingeniería Kansei, añadiéndole la dimensión Chisei o parte racional del diseño.

Los antecedentes expuestos determinan y justifican un ámbito de interés para acometer la realización del trabajo de investigación en la que se realizará una propuesta metodológica compacta cuantitativa con base neurocientífica para el diseño emocional y racional.

Por otra parte se propondrá la incorporación de técnicas neurocientíficas en las etapas tempranas del proceso de diseño y desarrollo de productos industriales, tales como la electroencefalografía (EEG), la electromiografía (EMG) y técnicas de oscilometría (EY).

Los resultados obtenidos en la investigación en base al modelo propuesto, permitirán la integración del usuario en el proceso de diseño y desarrollo de productos en su etapa temprana con un enfoque motivo-racional-afectivo.

La propuesta de formulación metodológica forma parte de la evolución del concepto de ergonomía aplicada a productos industriales, la cual ha evolucionado desde los conceptos de ergonomía clásica o ergonomía física, hacia otros ámbitos relacionados con la adecuación emocional y racional del diseño de productos y sistemas de trabajo.

La aplicación de la propuesta metodológica formulada es apalancar al factor humano en el proceso de diseño y desarrollo de productos industriales, la mejora de su sostenibilidad social, llevando a cabo un caso de estudio con especial interés en el nivel de conceptualización de productos. En este nivel, se realizará el análisis y propuestas de diseño del exterior e interior de un vehículo.

En el entorno de fabricación, la propuesta y aplicación metodológica, contribuirá a facilitar al trabajador el desarrollo de sus tareas dentro del entorno, de una manera placentera (emocional) (Ingeniería Kansei) y optimizando la eficacia de las tareas que desarrolla (Ingeniería Chisei). Ello se traducirá en una mejora del sistema de producción, con un enfoque más amplio que el de la clásica mejora de la productividad por la racionalización de los procesos de trabajo o mejora de métodos. 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, bajo el nuevo contexto de Industria 4.0.

La forma de proceder sería establecer un dominio semántico emocional (kansei) y racional (chisei), bajo una jerarquía integrada de términos kansei y chisei, aportando un esquema de diseño fractalizado, para su articulación en otros productos de similar función y características.



Figura 2: Ejemplo de kanseis de producto para un automóvil.

De esta manera se dispondría de una jerarquía de términos kansei y chisei integrada en las primeras etapas del proceso de diseño y desarrollo de productos industriales. De este modo se busca conseguir el empoderamiento del factor humano (usuarios) en los procesos de concepción y diseño bajo su conexión emotivo-racional-afectiva formando un tejido sin costura en el entramado socio-técnico que constituyen las necesidades de los usuarios y las necesidades empresariales.

METODOLOGÍA

Al estar en una fase inicial de la investigación en el presente apartado se expondrá la metodología utilizada para establecer el actual Estado del Arte.

El principal objetivo del estado del arte que se lleva a cabo en esta primera fase es aportar desde una perspectiva científica, psicológica y neurocientífica una definición completa y actualizada de los conceptos kansei y chisei en el área de conocimiento del diseño y desarrollo de productos.

La revisión, en primer lugar, se centra en definir los conceptos kansei y chisei desde el enfoque de la ingeniería del diseño industrial (*engineeringdesign*) o diseño de productos (*productdesign*). Se analizan los dos conceptos por separado para posteriormente llevar a cabo un análisis de cómo se estructuran e interactúan entre ellos.

En segundo lugar, se analiza el kansei y el chisei desde un punto de vista neurocientífico, analizando cómo se generan estos conceptos y cómo se puede acceder a ellos para cuantificarlos a través de la actividad neurobiológica. Esto incluye una revisión centrada en analizar y exponer las mejores técnicas neurocientíficas disponibles para abordar el estudio del kansei y el chisei a través de la actividad y registros neurofisiológicos.

Por último se lleva a cabo una revisión de los escasos trabajos de investigación centrándose en las fases experimentales propuestas para las técnicas de electroencefalografía (EEG) y oscilometría (Eyetracking, ET) en el ámbito del diseño industrial de equipos y entornos de fabricación.

Posteriormente se aborda el clásico enfoque de kansei y chisei desde la perspectiva psicológica y las mejores técnicas psicométricas para la cuantificación de estos constructos psicológicos.

En base a los tipos de revisión bibliográfica propuesta por Mayer [5], en el presente estado del arte se llevará a cabo una revisión de tipo Status Quo. Mayer define este tipo de revisión como una descripción de la investigación más actual para un tema o campo de investigación determinado. En base a los tipos de revisión bibliográfica propuesta por Squieres [6], se llevará a cabo una revisión de tipo descriptiva. Squieres define este tipo de revisión como una puesta al día sobre conceptos útiles en áreas en constante evolución. Este tipo de revisión tiene carácter descriptivo, se trata de describir el estado del conocimiento sobre lo investigado. Ambos tipos de revisión se complementan ya que tratan la revisión de un tema o concepto desde distintos puntos de vista descriptivos.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La Ingeniería Kansei, al ser una metodología de origen japonés, utiliza en su definición y conceptualización términos como kansei y chisei que no tienen una traducción directa en la cultura occidental, por lo tanto, se ha considerado de gran interés entender realmente que es el kansei y el chisei y como se conectan con la metodología de Ingeniería Kansei.

En primer lugar se puede apreciar que el término “**kansei**” tiene una tendencia creciente en documentos publicados desde el año 2000 hasta la actualidad en las principales bases de datos científicas como se muestra en la Figura 3. Esto es indicador del interés de la comunidad científica en los aspectos relaciones con la Ingeniería Kansei, diseño afectivo y emocional desde un punto de vista científico y técnico.



Figura 3: Evolución de publicaciones en Scopus para “kansei” (año, número de publicaciones).

En segundo lugar, el término “**chisei**” no tiene presencia en las bases de datos científicas consultadas, Compendex y Scopus. Si se han encontrado textos mediante Google Academics, los cuales introducen el concepto chisei en la Ingeniería Kansei como contraparte del kansei [4].

El análisis de publicaciones que relaciones conjuntamente los términos kansei y chisei con el objeto de aplicación de a vehículos, ha dado como resultado la inexistencia de artículos y demás textos técnicos que apliquen Ingeniería Kansei a sistemas de fabricación.

Por otro lado, se han seleccionado la electroencefalografía (EEG) y la oscilometría (ET) como mejores técnicas de enfoque neurocientífico para la obtención y cuantificación del kansei y el chisei. Las bases de datos consultadas ofrecen más de 170.000 documentos relacionados con el término de búsqueda “**Electroencephalography**”. Si se realiza una búsqueda, en la misma base de datos, centrada en el ámbito del diseño de productos, el número de publicaciones es muy reducido. Se han encontrado en

torno a 80 publicaciones relacionadas con el término “**ElectroencephalographyProductDesign**” (Figura 4).



Figura 4: Publicaciones en Scopus para “**ElectroencephalographyProductDesign**” (año, número de publicaciones).

Las bases de datos consultadas (Compendex y Scopus) ofrecen en torno a 500 publicaciones científicas relacionadas con el término de búsqueda “**Eyetracking**”. La mayoría de documentos están relacionados con el campo de la psicología, la computación y las ciencias sociales. Si se realiza una búsqueda centrada en el ámbito del diseño de productos, el número de publicaciones es muy reducido. Se han encontrado en torno a 15 publicaciones relacionadas con el término “**EyetrackingProduct**”. Aun así, se puede apreciar que a pesar de ser un ámbito de estudio donde la aplicación de dicha técnica no está extendida, se puede observar que el estudio y aplicación de la técnica de *Eyetracking* en el ámbito del diseño de productos sigue la tendencia ascendente (Figura 5).

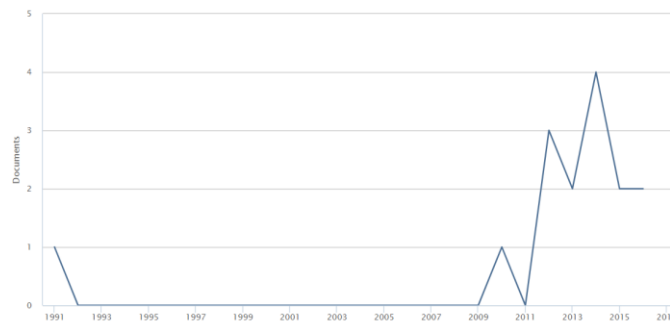


Figura 5: Publicaciones en Scopus para “**EyetrackingProduct**” (año, número de publicaciones).

De la búsqueda efectuada en las bases de datos de puede concluir que el auge de la Ingeniería Kansei como metodología diseñada es semejante al de técnicas como la oscilometría y la electroencefalografía. El uso de estas técnicas en IK hace que la propia metodología siga desarrollando hacia resultados de síntesis más óptimos, y a su vez, la IK para las técnicas propuestas supone un área de conocimiento que permite poder seguir investigando hacia nuevas aplicaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Córdoba Roldán, A., Aguayo González, F. y Marcos Bárcena, M (2017). *Aplicación de la Ingeniería Kansei-Chisei en entornos de fabricación Lean*. Tesis Doctoral. Escuela Superior de Ingeniería, Universidad de Cádiz.
- [2] Nagamachi, M. (1995) Kansei Engineering: A new ergonomic consumer-oriented technology for product development. *Industrial Ergonomics ELSEVIER International Journal of Industrial Ergonomics*. 1995, vol. 15, pp. 3-11
- [3] Ministry of Economy Trade and Industry of Japan (2015). Kansei Initiative. [en línea] meti.go.jp/english/policy/mono_info_service/mono/kansei2009/ (Consultado en diciembre de 2017)

- [4] Schütte, S. (2005) Engineering emotional values in product design : Kansei engineering in development S.L. Linköping University. Department of Mechanical Engineering, 2005. ISBN 9185299464.
- [5] Mayer, P. (2009) Guidelines for writing a Review Article. Basel, Zurich: Basel Plant Science Center.
- [6] Squires, J.E., Estabrooks, C.A., Gustavsson, P. y Wallin, I. (2007) Individual determinants of research utilization by nurses: a systematic review update. Nursing Research, vol. 56, n.o Supplement 1, pp. S4-S6
- [7] Akao, Y., "History of Quality Function Deployment in Japan". Hansa Publisher, 1990.
- [8] Nagamachi, M. (1997a), "Requirement identification of consumer's needs in product design", Proceedings of IEA '97, 1997, Finnish Institute of Occupational Health, Tampere, Finland, p. 231-233.
- [9] Nagamachi M., "Kansei Engineering: the Implication and Applications to Product Development. Systems", IEEE SMC '99 Conference Proceedings. IEEE, 1999, Vol. 6, pp. 273- 278
- [10] Nagamachi M., "Kansei Engineering as a powerful consumer-oriented technology for product development", Applied Ergonomics, Vol.33, 2002, pp. 289-294.
- [11] Nagamachi, M. (1997b), "Kansei Engineering: The Framework and Methods", Kansei Engineering 1, Nagamachi, M. (ed.), Kaibundo Publishing Co. Ltd., Kure, 1997, pp. 1-9.
- [12] Deng, Y. and Kao, Y. P., "The development of musical selection plan based on kansei similarity", National Chiao Tung University, Institute of Applied Art, 2003.
- [13] Schütte, S., Eklund, J., "Design of rocker switches for work-vehicles-an application of Kansei Engineering". Applied Ergonomics, Vol. 36, 2005, pp. 557-567.
- [14] Osgood, C. E., Suci, G. J. and Tannenbaum, P. H., "The Measurement of Meaning", University of Illinois Press, Illinois, 1957.

C3

SISTEMA INTELIGENTE INALÁMBRICO PARA ANÁLISIS Y MONITORIZACIÓN DE LÍNEAS DE TENSIÓN SUBTERRÁNEAS EN SMART GRIDS (SIAM)

Romero Hinojosa, Francisco; Parejo Matos, Antonio; Larios Marín, Diego Francisco; León de Mora, Carlos. Grupo de investigación TIC-150: Tecnología Electrónica e Informática Industrial. Departamento de Tecnología Electrónica. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Sevilla.

RESUMEN

El mantenimiento de la infraestructura eléctrica supone un enorme coste para las compañías. Por ello, es una línea de investigación activa el desarrollo de sistemas de monitorización de dicha infraestructura. Lamentablemente, es inevitable que se sigan produciendo algunos desperfectos, debido a agentes externos y al propio desgaste de las instalaciones.

Estos problemas provocan las “faltas” (que es la interrupción del suministro eléctrico en una zona afectada). Ante dichas faltas las compañías deben actuar con la mayor celeridad posible (identificando la posición de la falta y reconfigurando la red). No obstante, a pesar de los avances existentes en monitorización de líneas eléctricas, la localización de una “falta” no es un problema sencillo, requiriendo una gran inversión de recursos materiales y humanos. Una de las infraestructuras en las que más se agrava este problema es en las líneas de media tensión subterráneas, ya que su monitorización actualmente está poco desarrollada.

Por ello, en el marco del proyecto SIAM se han investigado diversas soluciones para la monitorización de este tipo de líneas de distribución, para las cuales actualmente se está finalizando el desarrollo de un prototipo preindustrial, que permita monitorizar y facilite la localización en caso de falta.

Palabras clave: *Red Eléctrica Inteligente, Localización de Faltas, Línea Eléctrica subterránea, PLC.*

ABSTRACT

The maintenance of electrical structure to guarantee the proper functioning of service, pose a huge cost for the electrical enterprises. This causes that monitoring of the electrical infrastructure becomes an active research line, so we can reach a fast error detection and reduce the electrical lines problems. Unfortunately, it is impossible to avoid damages in the system caused by external agents, that causes electrical installation wear away.

These Problems produce “faults” (Interruption of energy supply over one affected area).

The companies need to fix this fault quickly (The Company need to locate the fault and reconfigure the electrical network, trying to restore the energy supply to the bigger number of clients). However, the fault location need to employ a lot of workers and materials, despite nowadays the monitoring process is very advanced.

This problem is worse in the medium voltage underground lines, because of fault monitoring devices are little developed here.

In SIAM Project, we have studied some solutions to fix monitoring problem of underground medium voltage lines. Currently, we have finished a prototype that can monitor and locate fault in medium voltage underground lines without the need to damage the cable or its shield.

Keywords: *Smart Grid, Fault Location, Underground Electrical Line, Power Line Communication.*

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El proyecto SIAM (Sistema Inteligente Inalámbrico para Análisis y Monitorización de Líneas de Tensión Subterráneas en Smart Grids) está englobado en el concepto que se conoce actualmente como

Smart Grids [1], dentro del paradigma de las ciudades inteligentes (en inglés, *Smart Cities*) [2]. Smart grids se utiliza para referirse a las redes de distribución eléctrica "inteligentes" [3]. La red inteligente se define así porque son redes eléctricas donde la electricidad no solo va hacia un sentido, sino que es bidireccional.

Las Smart Grids son básicamente redes de distribución eléctrica combinadas con modernas tecnologías de información [4], que proporcionan datos tanto a las empresas distribuidoras de electricidad como a los consumidores, lo que es ventajoso para ambas partes. Por lo tanto, la Smart Grid es más compleja en su funcionamiento que la actual red eléctrica.

En las smart grids se está tendiendo al paradigma de los sistemas autocicatrizantes (self-healing) [5][6], los cuales, son sistemas compuestos por sensores y software avanzado que usan datos en tiempo real para aislar y reconfigurar la red de distribución, con esto se pretende minimizar el impacto en los clientes (véase la Figura), buscando maximizar la eficiencia de la red [7]. Para lograr este objetivo, se recurre a las técnicas de Localización de faltas, aislamiento y restauración del servicio (Fault Location Isolation and Service Restoration, FLIR).

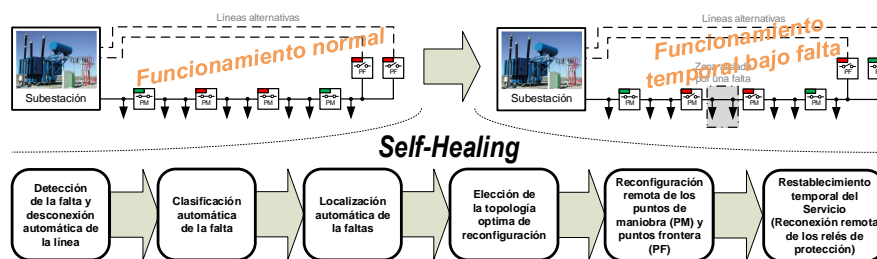


Figura 1: Self-Healing [8].

El proyecto SIAM, actualmente en desarrollo, plantea el diseño de un sistema enmarcado dentro de las ciudades inteligentes que permita la monitorización de las instalaciones de distribución eléctrica subterráneas de media tensión.

Una falta (cualquier evento que provoca una alteración en la corriente eléctrica que circula por una línea, tal y como se observa en la Figura), en este tipo de redes afecta de manera muy significativa a la calidad del servicio de los usuarios. Es por ello que las empresas suministradoras están muy interesadas en la supervisión de estos tipos de redes, que a día de hoy no cuentan con la sensorización adecuada para detectar y localizar estas incidencias.

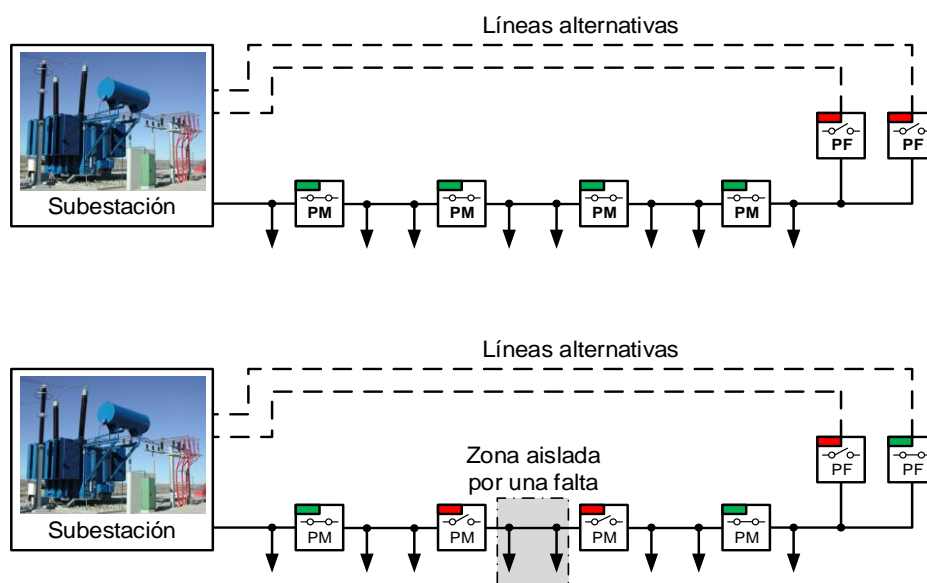


Figura 2: Zona aislada por una falta [8].

Tal y como se representa en la Figura , el proyecto SIIAM propone una red de sensores [9] para realizar dicha monitorización, basándose en el empleo de algoritmos de inteligencia computacional (*Intelligent Computation, IC*); redes neuronales (*Artificial Neural Networks, ANNs*), lógica difusa (*Fuzzy Logic, FL*), árboles de decisión (*Decision Trees, DTs*) o máquina de soporte de vectores (*Support Vector Machines, SVMs*) [8], para la detección de las incidencias, tales como cortocircuitos y/o roturas de los cables. Estos algoritmos han sido testeados mediante simuladores diseñados específicamente para tal fin, demostrando obtener un éxito en la localización de faltas muy superior a la obtenida con otros sistemas de monitorización.

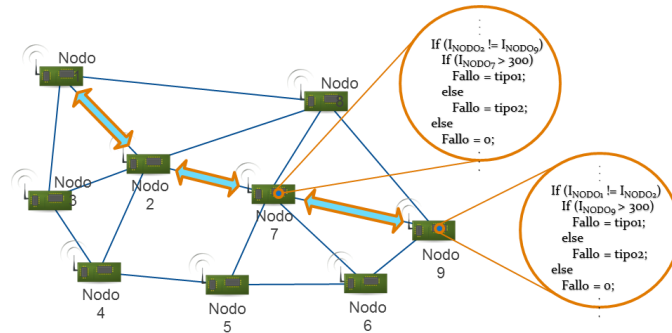


Figura 3: Arquitectura de SIIAM.

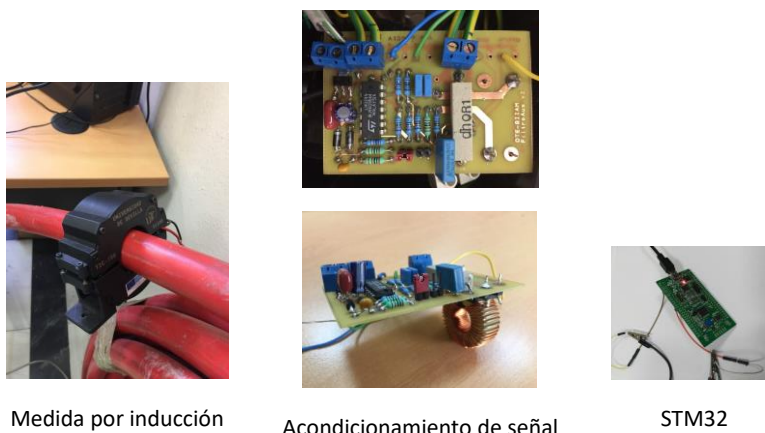
METODOLOGÍA

Tras un período de investigación y pruebas, se ha decidido que cada dispositivo SIIAM debe estar compuesto de varios subsistemas.

Subsistema de medida

Se representa en la

Figura y es el encargado de medir los armónicos presentes en las corrientes de fase de cada segmento de la línea trifásica a monitorizar. Para ello, se cuenta con diversos sensores de corriente, los cuales se acoplan a cada línea, y mediante inducción captan la intensidad que circula por ella, además de disponerse de un sistema de procesamiento de bajo consumo, capaz de detectar, mediante el debido acondicionamiento de la señal, si los valores obtenidos están fuera de rango, empleando algoritmos IC, todo este proceso de captación está gestionado mediante un procesador cortex M3.



Medida por inducción

Acondicionamiento de señal

STM32

Figura 4: Subsistema de medida

Subsistema de comunicaciones

Su funcionamiento se representa en la Figura 5. Está basado en tecnología PLC (*Power Line Communication*), sigue el estándar IEC 61334-5-1 y permite emplear los propios cables a monitorizar como medio de transporte de la información. Empleando algoritmos de reencaminamiento de bajo consumo [10], es posible recoger en un sistema central toda la información sobre el estado actual de la red. Este subsistema está representado en la Figura 5.

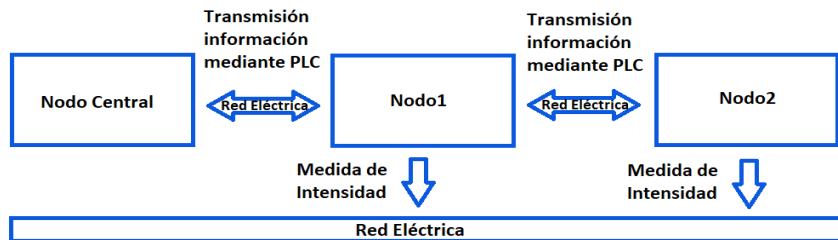
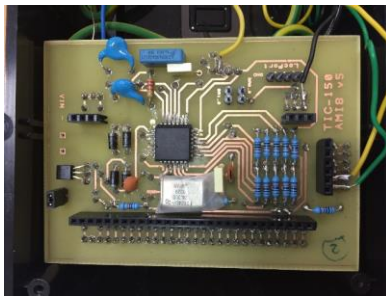
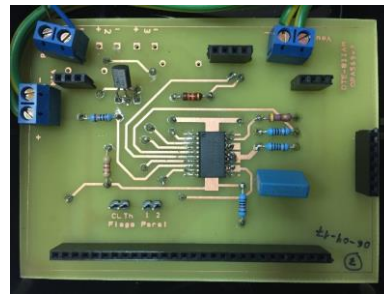


Figura 5: Funcionamiento Subsistema de comunicaciones.



Modem PLC



Acondicionamiento de señal

Figura 6: Subsistema de comunicaciones

Subsistema de alimentación

Se representa en la Figura 7. Está basado en tecnología de recolección energética [11], de forma que aprovecha los campos eléctricos generados por los propios cables, durante su funcionamiento normal, para cargar las baterías requeridas para alimentar el sistema.

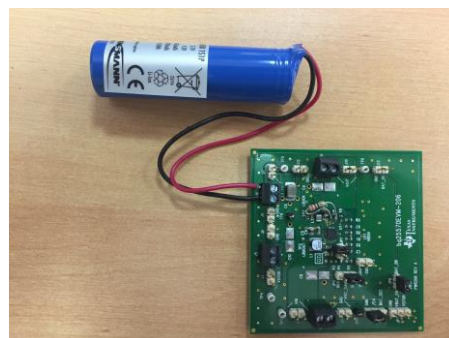


Figura 7: Subsistema de alimentación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Siguiendo la metodología descrita anteriormente, se diseñó y construyó un prototipo inicial. Con este prototipo se realizaron varias pruebas para garantizar el correcto funcionamiento de todos los

subsistemas diseñados, así como realizar diversos ajustes y mejoras. Además, se han realizado pruebas de campo (Figura 8) para observar el funcionamiento del sistema de comunicación entre dos dispositivos iguales, siendo los resultados satisfactorios. Figura

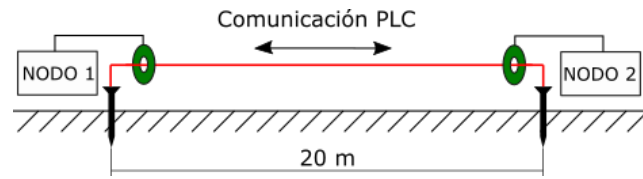


Figura 8: Pruebas en campo de prototipo.

Una vez comprobado el correcto funcionamiento, se ha llevado a cabo el diseño y desarrollo de un prototipo pre industrial trifásico capaz de controlar el envío y recepción de los mensajes entre nodos, además de gestionar la carga de la batería que alimenta al sistema, por lo tanto, dicho dispositivo está preparado para ser instalado en una red subterránea trifásica de media tensión real. Este prototipo puede verse en la Figura 9.



Figura 9: Prototipo Preindustrial.

Este prototipo ha sido probado en laboratorio, captando información de dos nodos acoplados a una misma línea, de la cual realizan medidas de intensidad, comunicando entre ellos. Uno de estos nodos actúa como nodo central, que conectado a un ordenador mediante puerto serie, transmite su propia medida, junto a la recibida del otro nodo. El resultado de estas pruebas es mostrado mediante una aplicación diseñada para SIAM (Figura).

Decoded msg	
Current: line 1:	AC=115.238 A, Phase=55.1758 °, DC=1247; line 2: AC=0 A, Phase=0 °, DC=0; line 3: AC=0 A, Phase=-161.975 °, DC=1241

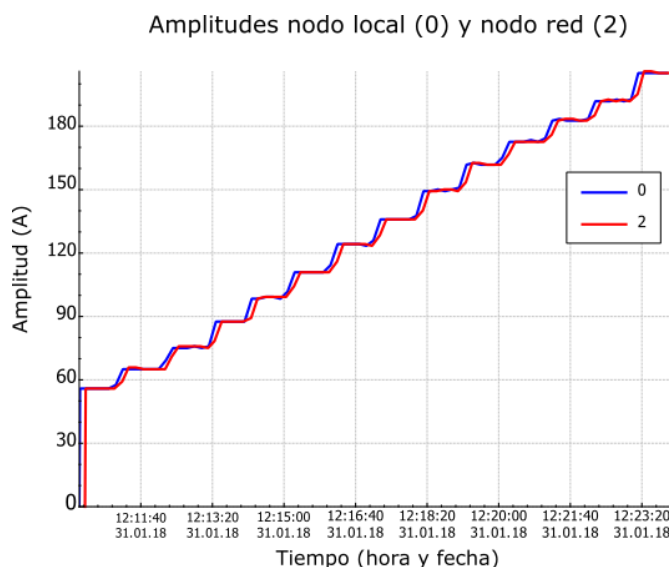


Figura 10: Datos proporcionados por la aplicación.

Estos datos muestran el resultado de la comunicación entre los dos nodos mencionados anteriormente, como se puede observar en la gráfica la señal que se transmite (azul), prácticamente coincide con la señal que se recibe (rojo), de aquí se deduce que la medida de corriente y la comunicación entre nodos es correcta.

CONCLUSIONES

En este documento se ha presentado una de las líneas de investigación en la que el grupo de investigación TIC-150 lleva trabajando varios años, respaldado a través de proyectos como son el SIAM (ref. TEC2013-40767-R) o el DELFOS (ref. P023-10/E24). Para ello se ha comentado brevemente, el objetivo de este proyecto y el nivel de desarrollo en el que se encuentra.

Este proyecto tiene muchas ventajas, y es de gran interés para mejorar la detección de errores en líneas eléctricas subterráneas de media tensión, dado que actualmente existen métodos de localización de faltas que requieren de un gran coste o tiempo.

SIAM representa un claro ejemplo del carácter multidisciplinar del grupo TIC-150, además de su capacidad para poder afrontar proyectos complejos, ya que abarca varios campos de la ingeniería como pueden ser: desarrollo software, desarrollo hardware, sistemas de comunicación industrial, sistema eléctrico, etc.

AGRADECIMIENTOS

Quisiéramos agradecer a la dirección de la Escuela Politécnica Superior por la organización de estas jornadas. También quisiéramos agradecer al Ministerio de Economía y Competitividad por la concesión del proyecto reto I+D+i del plan Estatal 2013-2016 SIAM: “Sistema Inteligente Inalámbrico para Análisis y Monitorización de Líneas de Tensión Subterráneas en Smart Grids” con referencia: TEC2013-40767-R, que ha permitido financiar los costes del proyecto presentado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Farhangi, H.(Jan.-2010). The path of the smart grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 8, (no. 1). Pp. 18–28.
- [2] Chakraborty, D.(Sep.-2015).Smart Cities – From concept to action. [Online]:<http://blog.schneider-electric.com/smart-cities/2015/09/17/smart-cities-concept-action>.
- [3] Das, R., Madani, V., Aminifar, F., McDonald, J., Venkata, M., Novosel, D., Bose, A. and Shahidehpour, M.(2015). Distribution automation strategies: Evolution of technologies and the business case. *IEEE Power & Energy Society General Meeting*.
- [4] Personal, E., Guerrero, J. I., Garcia, A., Peña, M. and Leon, C.(Nov.-2014). Key performance indicators: A useful tool to assess Smart Grid goals. *Energy*, vol. 76.Pp. 976–988.
- [5] Amin, S. M. and Giacomoni, A. M.(Jan.-2012). Smart Grid, Safe Grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 10, (no. 1).Pp. 33–40.
- [6] Zidan, A and El-Saadany, E. F.(Sep.-2012). A Cooperative Multiagent Framework for Self-Healing Mechanisms in Distribution Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, (no. 3).Pp. 1525–1539.
- [7] Kezunovic, M., McCalley, J. D. and Overbye, T. J.(May-2012). Smart Grids and Beyond: Achieving the Full Potential of Electricity Systems. *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, (no. Special Centennial Issue). Pp. 1329–1341.
- [8] Personal Vazquez, E.(2016). Sistema para localización de faltas en líneas subterráneas de distribución eléctrica de media tensión, mediante una red distribuida de sensores de corrientes.*Universidad de Sevilla*.
- [9] Chong, C.-Y. and Kumar, S. P.(Aug.-2003). Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges. *Proceedings of the IEEE*, vol. 91, (no. 8). Pp. 1247–1256.
- [10] Larios, D. F., Barbancho, J., Rodriguez, G., Sevillano, J. L., Molina F. J., and Leon, C.(2012). Energy efficient wireless sensor network communications based on computational intelligent data fusion for environmental monitoring. *IET Communications*, vol. 6, (no. 14). P. 2189.
- [11] Ding, Z., Perlaza, S. M., Esnaola, I. and Poor, H. V.(Feb.-2014). Power Allocation Strategies in Energy Harvesting Wireless Cooperative Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, (no. 2). Pp. 846–860.

C4

INGENIERÍA DE CARACTERÍSTICAS PARA CLASIFICACIÓN DE SEÑALES SONORAS

Gómez Bellido, Jesús. Luque Sendra, Amalia. Carrasco Muñoz, Alejandro. Grupo de investigación TEP022 y TIC150. Departamentos de Ingeniería del Diseño y Tecnología Electrónica. Universidad de Sevilla.

RESUMEN

Muchos autores han demostrado que el canto de anuros puede ser un indicador del cambio climático. Por esta razón, la clasificación del sonido del canto de anuros se ha convertido en un tema importante para biólogos y otros científicos del clima.

A lo largo de este artículo se describirá la investigación que se llevará a cabo para encontrar el mejor camino de realizar una clasificación automática de los cantos de anuros.

Palabras claves: *características, dimensionalidad, sonido, clasificación, secuencias.*

ABSTRACT

Several authors have shown that the sounds of anurans can be used as an indicator of climate change. For this purpose anuran sound automatic classification has become an important issue for biologists and other climate scientists.

In this paper, we will describe the research to find the best way to perform an automatic classification of anurans sounds.

Keywords: *feature, dimensionality, sound, classification, sequences.*

INTRODUCCIÓN

El cambio climático se está convirtiendo en una de las preocupaciones más exigentes para toda la humanidad. Por esta razón, se están definiendo y monitoreando muchos indicadores para observar la evolución del calentamiento global. Algunos de estos indicadores tienen que ver con el impacto del calentamiento de la biosfera, midiendo el cambio en la población de algunas especies animales.

De hecho, la producción de sonido en animales ectotérmicos está fuertemente influenciada por la temperatura ambiente (Marquez and Bosch 1995) que puede afectar varias características de su sistema de comunicación acústica. Como resultado, la temperatura puede afectar significativamente los patrones de llamada de canciones modificando el inicio, duración e intensidad de los episodios de llamada.

Por lo tanto, el análisis y la clasificación de los sonidos producidos por ciertas especies animales ha destacado como indicador de los cambios de temperatura. Particularmente interesante son los resultados obtenidos por el análisis de sonidos de anuros (Llusia et al. 2013).

En trabajos previos (Luque et al. 2016), se ha propuesto un método automático para la clasificación de sonidos. De acuerdo a estos trabajos, se divide el sonido en pequeños segmentos uniformes, llamados *frames*, y a cada uno de ellos se le caracteriza con 18 parámetros usándose la norma MPEG-7 para la definición. Sin embargo, el enfoque de hacer uso del conjunto de características MPEG-7 no es el único que se puede aplicar para la clasificación de sonidos.

Probablemente el enfoque más común para la extracción de características del sonido sea el basado en los *Mel Frequency Cepstral Coefficients* (MFCC), los cuales derivan del cepstrum

del sonido. En (Young et al. 2002) se describe un algoritmo detallado para la obtención de los MFCC.

METODOLOGÍA

La ingeniería de características es un campo de la minería de datos (inteligencia artificial, aprendizaje automático, ...) que trata de procesar la información en bruto que se posee sobre un determinado problema y transformarla en un conjunto de parámetros (características) que puedan ser utilizados más fácilmente en tareas posteriores (clasificación, predicción, etc).

En el contexto de este trabajo, la clasificación de sonidos, la ingeniería de características tiene tres etapas fundamentales:

1. Extracción de características. A partir de una señal sonora se abordará la obtención de un conjunto de características mediante dos enfoques:
 - MFCC
 - MPEG-7
2. Construcción de características. Partiendo de las características anteriores, se elaborarán nuevas características que puedan reflejar el carácter secuencial de los sonidos.
3. Selección de características. Se seleccionan las características más relevantes para la clasificación de los sonidos del conjunto obtenido en los procesos anteriores.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Extracción de características

Partiendo de la información del sonido sin procesar, magnitud del sonido en sucesivos instantes de tiempo (s_j). El volumen de información puede llegar a ser, en muchos casos, muy elevado y con información redundante. En esta etapa se aplicarán diversas técnicas de representación del sonido que reducen el número de valores.

- Por ejemplo, una muestra de sonido de una duración de 10 segundos, muestreada a 44,1 kHz, supone exactamente 444.100 valores.
- Para la mayoría de las técnicas, se divide el sonido en *frames* de una duración determinada. Siguiendo con el ejemplo anterior, para una duración del *frame* de 10 ms, se generan un total de 441 valores en cada *frame* y un total de 1.000 *frames*.

La mayoría de técnicas extrae un conjunto de características (e) de cada *frame* del sonido.

- Siendo N el número de valores que contiene un *frame* y S_j el conjunto de valores de sonido de j -ésimo *frame*. Se tiene que,
$$S_j = s_k \forall (j - 1) \cdot N + 1 \leq k \leq j \cdot N$$
- El conjunto e_j de parámetros extraídos del j -ésimo *frame* se calcula como función de los valores del sonido en ese *frame* $e_j = f(S_j)$.
- Por lo tanto, continuando con el ejemplo anterior, si utilizamos 18 parámetros para representar un *frame*, el número total de valores necesarios para describir el segmento de 10 segundos es de 18.000 valores, un 4% del total original.

Extracción de características MPEG-7

La norma MPEG-7, es un estándar (Carpentier 2005) de la organización internacional para la estandarización, desarrollado por el grupo MPEG, grupo que se encarga de desarrollar normas para la representación codificada del audio y el vídeo digital, que define un conjunto de

parámetros para la representación de un sonido. Estos parámetros se obtienen de diversos métodos de análisis, como son:

- Procesamiento en el dominio del tiempo
- Procesamiento en el dominio de la frecuencia
- Codificación predictiva lineal (LPC)

MPEG-7 no está dirigido a ninguna aplicación en particular, simplemente es un estándar para la descripción del material multimedia: habla, audio, vídeo, imágenes y modelos 3D.

Extracción de características MFCC

La obtención de los Coeficientes Mel Cepstral (*MFCC, Mel-Frequency Cepstrum Coefficients*) ha sido considerada como una de las técnicas de parametrización de la voz más importante y utilizada (Davis and Mermelstein 1980). El objetivo de esta transformación es obtener una representación compacta, robusta y apropiada para posteriormente obtener un modelo estadístico con un alto grado de precisión. En la Figura 1 se recoge el resultado de la extracción de parámetros MFCC para un sonido.

Uno de los inconvenientes que tienen los parámetros MFCCs es que su método de obtención no está normalizado, pudiendo haber ligeras variantes entre una y otra implementación. Aunque no es de ámbito general, la norma (Standard 2003) se define como una forma de obtención de estos parámetros para telefonía. Durante nuestros estudios este será, con alguna adaptación, el método empleado.

La adaptación realizada se debe al hecho de que la norma utiliza *frames* de 25 ms, a una frecuencia de muestreo de 16 kHz. Esto supone que cada *frame* está formado por 400 valores. En nuestro caso, la frecuencia de muestreo será de 44,1 kHz, no contemplada en la norma. Por ello se propone adaptar la duración del *frame* a un valor de 10 ms, la misma que en MPEG-7, lo que supone que estará formado por 441 valores.

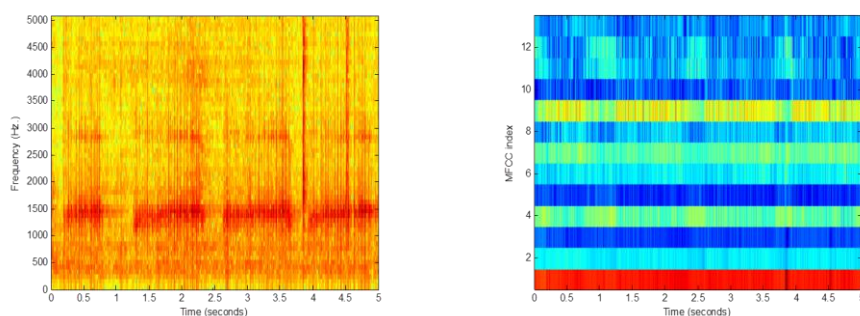


Figura 1: Espectrograma (izquierda) y parámetros MFCC (derecho).

Construcción de características

En esta etapa, se parte del conjunto de características e , obtenido en la extracción de características.

Durante esta etapa, se opera en ellos con distintas transformaciones, construyendo una o varias características nuevas, para el j -ésimo frame, se tiene $c_j = f(e)$.

- Es típico el uso de parámetros de tendencias, por ejemplo, los $\Delta MFCC$ o los $\Delta\Delta MFCC$ (Sharma et al. 2014).
- También pueden generarse características que contengan información regional del sonido, como puede ser la variación de un parámetro en un microsegundo en torno a un *frame*.

Estas características construidas se añaden a las extraídas, para construir el conjunto de características π que representa un sonido. Por tanto, se tiene para el j -ésimo *frame*, $\pi = e_j \cup c_j$.

Selección de características

En numerosas ocasiones el conjunto de características π obtenidas en las etapas anteriores tiene un cierto grado de redundancia, por lo que puede ser reducido sin grave deterioro de la potencia representativa de los mismos.

Por ello, se puede seleccionar un subconjunto p de características de tal forma que, para el j -ésimo *frame*, $p_j \subset \pi_j$.

CONCLUSIONES

En este artículo, se han descrito las etapas fundamentales de las que consta la ingeniería de característica y que serán objeto de estudio durante esta tesis, además de los dos principales métodos de extracción de características que se desarrollarán, MFFC y MPEG-7.

Para concluir, se ha de mencionar que esta tesis partirá de estudios previos realizados por los grupos de investigación, por lo tanto, se pretende dar mayor formalidad a estos estudios en el apartado de la ingeniería de características.

AGRADECIMIENTOS

A los grupos de investigación TEP022 y TIC150 de la Universidad de Sevilla por los trabajos previos a esta tesis.

A la Escuela Politécnica Superior de Sevilla por la organización de la Jornadas Doctorales que ha permitido la publicación del presente trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- Carpentier, G. (2005). Information technology—multimedia content description interface—part 4: Audio, amendment 2: High-level descriptors. In Motion Picture Expert Group (ISO/IEC JTC 1 SC29).
- Davis, S. and Mermelstein, P. (1980). Comparison of parametric representations for monosyllabic word recognition in continuously spoken sentences. *IEEE transactions on acoustics, speech, and signal processing*, 28(4):357–366.
- ETSI. 202 050 v1. 1.3: Speech processing, transmission and quality aspects (stq); distributed speech recognition; advanced front-end feature extraction algorithm; compression algorithms. ETSI standard, 2002.
- Llusia, D., Márquez, R., Beltrán, J. F., Benitez, M., and Do Amaral, J. P. (2013). Calling behaviour under climate change: geographical and seasonal variation of calling temperatures in ectotherms. *Global change biology*, 19(9):2655–2674.
- Luque, J., Larios, D. F., Personal, E., Barbancho, J., and León, C. (2016). Evaluation of mpeg-7-based audio descriptors for animal voice recognition over wireless acoustic sensor networks. *Sensors*, 16(5):717.
- Márquez, R. and Bosch, J. (1995). Advertisement calls of the midwife toads *alytes* (amphibia, anura, discoglossidae) in continental Spain. *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research*, 33(3-4):185–192.

Sharma, S., Shukla, A., and Mishra, P. (2014). Speech and language recognition using mfcc and delta-mfcc. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 12(9):449–452.

Young, S., Evermann, G., Gales, M., Hain, T., Kershaw, D., Liu, X., Moore, G., Odell, J., Ollason, D., Povey, D., et al. (2002). *The htk book*. Cambridge university engineering department, 3:175.

C5

EL NUEVO PARADIGMA DE LA INDUSTRIA 4.0 Y SU APLICACIÓN A LA INDUSTRIA AGROALIMENTARIA

Guerrero Cano, Manuel. Luque Sendra, Amalia. Lama Ruiz, Juan Ramón. Departamentos de Ingeniería del Diseño. Universidad de Sevilla.

RESUMEN

El concepto Industria 4.0 se corresponde con el nuevo paradigma de la industria digitalizada e interconectada. El desarrollo tecnológico que estamos viviendo permite fabricar con un nivel de valor agregado cada vez más alto, y el sector agroalimentario no es una excepción en este nuevo escenario. Se han planteado tres líneas de trabajo para desarrollar durante la investigación planificador de la demanda, mantenimiento predictivo y gestión energética inteligente. Para ello se plantearán una serie de hipótesis que se validarán mediante su aplicación en las instalaciones que Procavi tiene en su planta de Marchena. Centrándonos en la industria agroalimentaria se analizará las nuevas oportunidades y retos, evolucionar del nuevo paradigma industrial.

Palabras clave: *Industria 4.0, Industria agroalimentaria, Smart Factory.*

ABSTRACT

The Industry 4.0 concept corresponds to the new paradigm of the digitalized and interconnected industry. The technological development that can currently be manufactured with a level of added value at the same time, and the agri-food sector is no exception in this new scenario. The current technological development allows manufactured with a high level of added value, and the agri-food sector is no exception in this new scenario. Three lines of work have been proposed for the development during the investigation, the demand planner, the predictive maintenance and the intelligent energy management. To this end, a series of hypotheses will be proposed that will be validated through their application in the facilities that Procavi has in Marchena. Focusing on the agri-food industry, we analyze the new opportunities and challenges, evolution of the new industrial paradigm.

Keywords: *Industry 4.0, agri-food industry, Smart Factory.*

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las industrias se enfrentan a la necesidad de ser cada vez más eficientes, robusta y colaborativa [1]. Teniendo claro que los principales objetivos son optimizar los procesos productivos, cada vez más automatizados, y alcanzar un mayor ahorro en el consumo de los recursos de las empresas. El reto al que se enfrentan es ser capaz de vincular todas las operaciones de la planta con el resto de departamentos de la empresa. De esta forma se consigue que los datos fluyan libremente dentro de la organización, convirtiéndose en información útil.

El nuevo paradigma industrial, conocido por Industria 4.0 en Europa y por IIoT (Industrial Internet of Things) en Norte América, pretende hacer frente a este nuevo escenario, gracias a la digitalización y a la implementación de nuevas estrategias de mejora de eficiencia basadas en las tecnologías TI. Este paradigma surge de la creciente necesidad de acceder, agregar y analizar datos de producción y sistemas para mejorar la toma de decisiones y, por lo tanto, el rendimiento general de la empresa.

Para cumplir con las nuevas expectativas, las organizaciones industriales necesitan un proceso automatizado para entregar información de la planta a un nivel corporativo más alto de manera precisa, estandarizada, eficiente y segura. Para tal fin la industria cuenta con los llamados facilitadores tecnológicos.

ANTECEDENTES

A lo largo de la historia, las transformaciones económicas ocurren cuando convergen las nuevas tecnologías y los cambios significativos en la manera de producir.

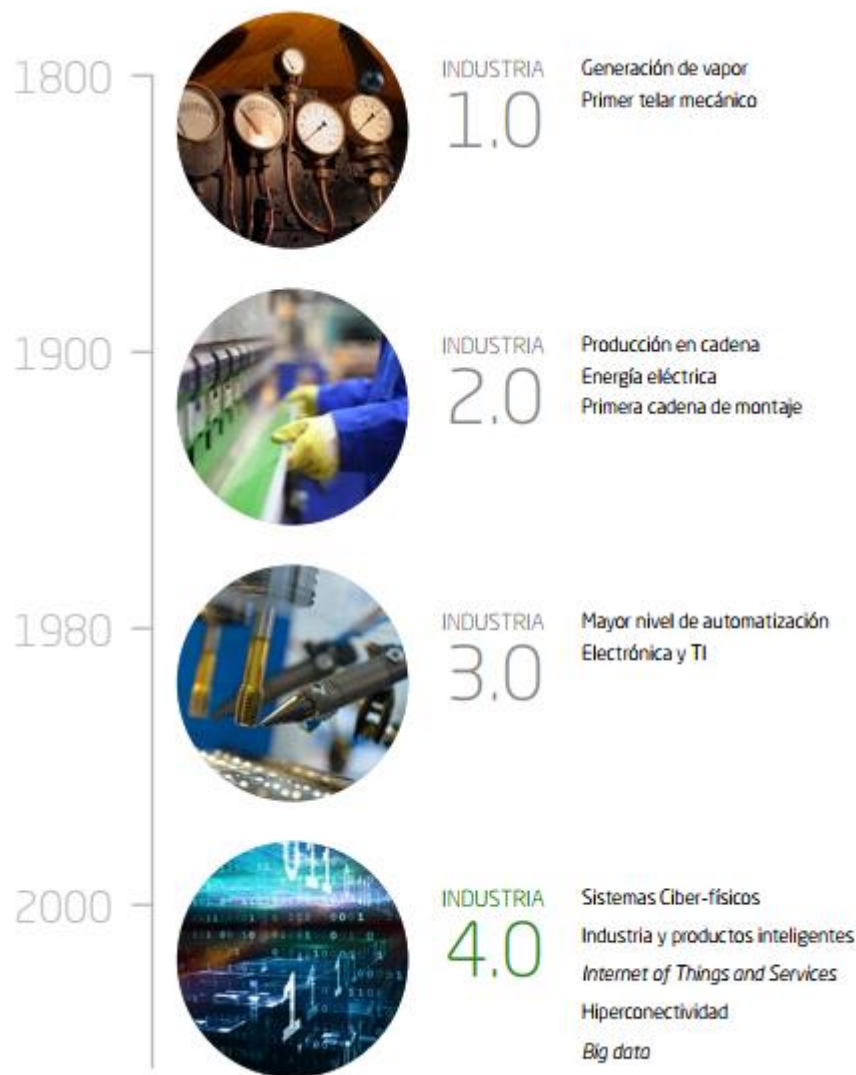
Como Revolución Industrial se entiende el proceso de transformación económica, social y tecnológica que marca un punto de inflexión en la historia, modificando e influenciando todos los aspectos de la vida cotidiana de una u otra manera.

Hasta la fecha se han catalogado tres revoluciones industriales [3]. La Primera Revolución Industrial fue inicialmente impulsada y promovida por la máquina de vapor; cuando las máquinas reemplazaron a los hombres como principal fuente en la fabricación. La Segunda Revolución Industrial se da cuando en la primera década del siglo XX la energía eléctrica convergió con el motor de combustión interna; entonces se da la producción masiva de bienes manufacturados. La Tercera Revolución Industrial se produce a principios de siglo mediante tres grandes agentes tecnológicos: robótica, ingeniería genética y telecomunicaciones.

Por lo tanto, se puede concluir que el desarrollo tecnológico permite fabricar productos con un nivel de valor agregado cada vez más alto, reduciendo costos a los fabricantes y dando como resultado una mayor demanda de eficiencia durante la etapa de fabricación.

Ahora nos encontramos con lo que algunos autores denominan la Cuarta Revolución Industrial o Industria 4.0. Todo el sistema de innovación y sus componentes han experimentado recientemente un gran progreso gracias a la digitalización, lo que ha reducido la brecha entre el estado de implementación.

Y el sector agro-alimentario no es una excepción en este nuevo escenario. Por ejemplo, en los últimos años, el rápido desarrollo de Internet of Things (IoT) ha ayudado mucho a la cadena de suministro de alimentos en la importancia práctica. El IoT es una opción inevitable para mejorar la logística, y si se comparan las situaciones anteriores y posteriores a la implementación de nuevas tecnologías de red para la gestión de la logística de los alimentos, se puede concluir que su aplicación tiene un gran efecto estimulante. Por ejemplo, es posible identificar y establecer la trazabilidad desde el cultivo hasta la cadena de producción en los entornos de procesamiento de alimentos, proporcionando a la cadena de suministro información efectiva para su identificación y trazabilidad.



Fuente: Elaboración propia en base a *Zukunftprojekt Industrie 4.0*

Figura 2: Las Revoluciones Industriales.

La industria agroalimentaria no solo es estratégica para cumplir la función de suministro de productos alimentarios de calidad a la población, sino que también es un gran generador de empleo, ya que en la mayoría de los casos el valor agregado de los empleados es alto.

BENEFICIOS Y OPORTUNIDADES QUE APORTA LA INDUSTRIA 4.0

Entre los beneficios que este nuevo paradigma aporta se pueden incluir mejorar el desarrollo tecnológico y dinamización de la economía, flexibilidad de la producción (mediante la realización de cambios en la configuración del proceso productivo que no afectan en el tiempo de fabricación), personalización de servicios y productos (se podrá satisfacer las necesidades de los clientes, incluso con bajos volúmenes de producción), optimización del proceso de toma de decisiones (gracias a la información en tiempo real), aumento en productividad y eficiencia de recursos (a través de un seguimiento exhaustivo de todo el proceso productivo) y la creación de nuevas oportunidades de negocios, especialmente en servicios derivados o de apoyo.

La industria agroalimentaria posee una serie de características particulares que la caracteriza: productos perecederos, la legislación específica, riesgo de alertas y crisis, estricto control de la seguridad alimentaria, márgenes comerciales ajustados (debido a la presión competitiva), etc. Y a todo esto hay que

añadir que el consumidor final es cada vez es más exigente, con gustos cambiantes, interactúa a través de las redes sociales, que busca personalización del producto y tratamiento exclusivo. [2]

Por lo tanto, podemos identificar las siguientes oportunidades para esta industria en particular:

- Mejorar competitividad, ofreciendo al mercado productos mejores, más baratos y que se ajusten lo más fielmente posible a la demanda, respondiendo con la máxima rapidez.
- Nuevos modelos de negocio creados por el uso de las TICs
- Flexibilidad y eficiencia en la producción, mediante el uso de herramientas que conectan todo el proceso de fabricación
- Mejorar la trazabilidad gracias al mayor control de los datos mediante conjunto un conjunto de medidas, acciones y procedimientos digitalizados que permiten registrar e identificar cada producto desde su origen hasta su destino final
- Tiempos de respuesta menores, reduciendo costes y mejorando calidad del producto.
- Sostenibilidad y medio ambiente, reduciendo el gasto energético y controlando los recursos disponibles.
- Cadena de valor colaborativa, mejorando la comunicación entre los diferentes agentes involucrados en el ciclo de vida de los productos.

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Hablando del sistema industrial español, y el andaluz en particular, el gran número de pymes no ayuda a la competitividad ante un mercado internacional cada vez más globalizado. Si además añadimos la gran atomización, nos encontramos ante un panorama donde el nuevo paradigma de Industria 4.0 se presenta como una herramienta para enriquecer el tejido económico [4].

El objetivo de la investigación es aplicar las herramientas de la Industria 4.0. Con estas herramientas cualquier industria sería capaz de crear fábricas inteligentes, caracterizadas por una intensa capacidad de adaptación, alta eficiencia en el uso de los recursos y control total sobre la cadena de valor.

Es clave conocer cuáles son las herramientas y los habilitadores tecnológicos existentes, para poder seleccionar los más adecuados en cada tipo de industria.

En concreto se van a desarrollar los trabajos en Procavi S.L., industria agroalimentaria situada en la provincia de Sevilla. Actualmente Procavi es una de las compañías líderes europeas en la producción integral de carne de pavo. Desde sus inicios en 2002, Procavi invierte en innovación con el objetivo de convertirse en la referencia tecnológica más avanzada de su sector, lo que la convierte en un marco perfecto para desarrollar diversas herramientas de Industria 4.0.

La investigación se dividirá en dos etapas claramente diferenciadas. En una primera etapa se investigará y profundizará en el paradigma de Industria 4.0. El objetivo de esta primera etapa es identificar las aplicaciones potenciales que más valor aporten al sector agroalimentario. En la segunda etapa se llevará a cabo la implementación de las herramientas que se hayan elegido en el paso anterior.

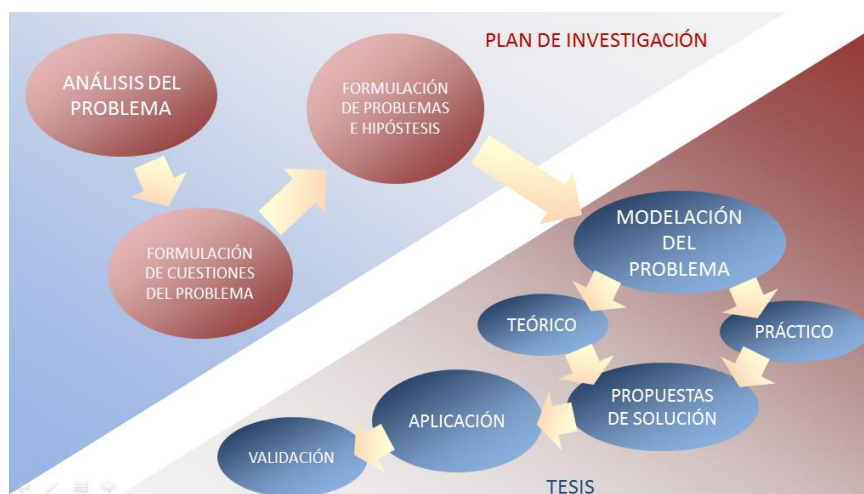


Figura 2: Etapas de la investigación.

Si nos centramos en Procavi, se han definido tres problemas a abordar:

1. Predicción de la demanda
2. Mantenimiento predictivo
3. Gestión energética

La producción, comercialización y distribución de productos agroalimentarios precederos constituye una prioridad para cualquier fabricante de este tipo de productos. Uno de los principales desafíos a los que nos enfrentamos es hacer llegar al mercado esta clase de productos en perfecto estado [5].

La predicción de la demanda juega un papel clave en la industria agroalimentaria, ya que las materias primas no están disponibles en todo momento y según la demanda del mercado. Las evidencias indican que la predicción a medio plazo está sujeta a fuertes incertidumbres y factores que escapan al control.

Unos de los puntos en los que se basa el crecimiento de Procavi es el desarrollo de un modelo productivo y de gestión empresarial eficiente denominado Control Integral de Procesos (CIP) [6].

El CIP permite controlar directamente todas las actividades, desde las granjas de cría y producción; las materias primas para la elaboración de piensos y los propios piensos compuestos; la transformación, elaboración y comercialización de productos cárnicos; hasta investigar las necesidades y demandas de los consumidores y tratar la información que se deriva de la gestión en los puntos de venta.

Uno de los objetivos de esta tesis es ayudar a la toma de decisiones relativa a la planificación de la producción. Con toda la información disponible y generada por el CIP se pretende realizar una predicción de la demanda y, por ende, de la producción necesaria para satisfacer dicha demanda.

Por otro lado, vamos a trabajar en desarrollar estrategias de Mantenimiento predictivo. Este modelo de mantenimiento (también conocido como mantenimiento basado en la condición - CBM) es el conjunto de técnicas que permiten, reduciendo los costes del programa de mantenimiento tradicional, preventivo y correctivo, asegurar la disponibilidad y rendimiento de los elementos que componen un sistema [7].

El mantenimiento predictivo parece una herramienta ideal, ya que su aplicación permite ver cómo los componentes se degradan con el tiempo, detectar y clasificar casi en tiempo real el deterioro de dichos componentes.

La implementación de un procedimiento de mantenimiento predictivo y el potencial desarrollo de esta capacidad de pronosticar fallos con suficiente antelación ayudaría a reducir la logística que implica el mantenimiento de los sistemas de producción.

La tercera propuesta de investigación se centra en la Gestión energética. En este punto de la tesis se pretende la formación en sistemas de medición y verificación de ahorro e implantación de sistemas de gestión energética [8].

El desarrollo de nuevos sistemas y herramientas basadas en TIC hacen posible la mejora de la eficiencia energética en todos los sectores, la optimización y mejora de la gestión energética, la gestión activa de la demanda y la movilidad eléctrica.

Estos servicios energéticos tratan de solucionar esta problemática unificando en un mismo modelo predictivo la compra de energía, gestión energética, el mantenimiento de las instalaciones consumidoras de energía y la realización de medidas de ahorro y eficiencia energética y aprovechamiento de energías renovables.

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La metodología que vamos a seguir se basa en el método científico [9]:

- Formulación de preguntas
- Recopilación de datos
- Prueba de hipótesis



Figura 3: Metodología de investigación.

El primer paso será la formulación de preguntas o hipótesis sobre las oportunidades identificadas. La pregunta debe definir lo que se quiere averiguar, se revisará la investigación y literatura existente sobre el tema. Con una comprensión del tema y una pregunta bien definida se crea una hipótesis que se pondrá a prueba contra una suposición contraria llamada hipótesis nula.

A continuación, se realizará la recopilación de información. Para ello se diseñará un estudio y/o experimento para recopilar información. Prestando especial atención las variables de estudio.

Por último, se comprobarán las Hipótesis. Con este punto se pretende comprobar si los resultados respaldan la Hipótesis. El procedimiento será organizar la información y analizarla para ver si respalda o rechaza tu hipótesis. La gran mayoría de las investigaciones científicas son finalmente probadas por métodos estadísticos, brindando un grado mayor de confianza en los resultados.

CONCLUSIONES

En un mundo cada vez más interconectado y globalizado es necesario incrementar y mejorar la competitividad, ofreciendo al mercado productos mejores, más baratos y que se ajusten lo más fielmente posible a la demanda. Las tecnologías son la base del éxito industrial y suponen un factor crítico para alcanzar una posición de liderazgo en cualquier sector.

El nuevo paradigma de Industria 4.0 se basa en la innovación, automatización y procesos más sofisticados que suponen un salto exponencial en la capacidad competitiva de la industria. Mantener un estado competitivo depende de la capacidad de adaptación al momento evolutivo en el que nos encontramos y, por lo tanto, a la capacidad de incorporar las nuevas tecnologías.

La industria española no debe dejar pasar las oportunidades que ofrece la adopción de las herramientas que constituyen la Industria 4.0.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido apoyado Procavi S.L. Dando soporte y permitiendo la utilización de sus conocimientos e infraestructuras.

REFERENCIAS

- [1] MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO. *La transformación digital de la industria española. Informe preliminar*. Gobierno de España. Ministerio de Economía, Industria y Competitividad. 2017. Disponible en: <http://www6.mityc.es/IndustriaConectada40/informe-industria-conectada40.pdf>
- [2] MARTINEZ SIMARRO, D. *El futuro es hoy: la fábrica de alimentos 4.0*. Centro tecnológico ainia. 2017. Disponible en: <http://www.ainia.es/insights/el-futuro-es-hoy-la-fabrica-de-alimentos-4-0/>
- [3] MINISTERIO DE FOMENTO. *Las revoluciones industriales*. Instituto Nacional de Información Geográfica. 2017. Disponible en: https://www.ign.es/espmmap/figuras_industria_bach/pdf/Industria_Fig_01_texto.pdf
- [4] Gobierno de España. Ministerio de Economía, Industria y Competitividad. 2017 [consulta: 8 noviembre 2017]. Disponible en: <http://www.industriaconectada40.gob.es/Paginas/Index.aspx>
- [5] Seminario, R. P. *La comercialización y la distribución de productos perecederos agroalimentarios y pesqueros*. Ministerio de agricultura, pesca y alimentación. Madrid. 1998. ISBN 84-491-0388-6
- [6] ARISPÓN ORTÍZ, F.J. *Control integral de procesos. Garantizar la Seguridad en la Industria Alimentaria*. AECOSAN - Agencia española de consumo, seguridad alimentaria y nutrición. 2016. Disponible en: http://www.aecosan.msssi.gob.es/AECOSAN/docs/documentos/noticias/2016/Escorial_16/Francisco_Jose_Arispon.pdf
- [7] MONOGRAFÍAS DEL SOPT. *Mantenimiento predictivo y monitorización estructural en plataformas militares*. Ministerio de defensa. 2016. Disponible en: https://publicaciones.defensa.gob.es/media/downloadable/files/links/m/o/monografia_sopt_16.pdf
- [8] DE ESPAÑA, ENERGÉTICA. *Plan de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020*. ENERGÉTICA, 2011, vol. 2011, p. 2020.
- [9] GONZALO, G. E. *Métodos y técnicas de la investigación científica. Material gráfico de apoyo: guía de estudios y transparencias*. Biblioteca FAU-UNT. Inédito, 2001.

VENTAJAS DE LA GESTIÓN ACTIVA DE LA DEMANDA (DEMAND MANAGEMENT) EN EL CONTROL DE SMART GRIDS

Parejo Matos, Antonio; Romero Hinojosa, Francisco; Personal Vázquez, Enrique; León de Mora, Carlos. Grupo de investigación TIC-150: Tecnología Electrónica e Informática Industrial. Departamento de Tecnología Electrónica. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Sevilla.

RESUMEN

La gestión del sistema eléctrico por las *utilities* se ve afectado por varios factores, como un aumento del consumo, una mayor penetración de las energías renovables y la tendencia a la generación distribuida (para minimizar pérdidas asociadas al transporte y distribución).

Obviamente, el consumo no es constante, produciéndose valles y picos. Habitualmente, dicha curva no se ajusta a la de generación, obligando a sobredimensionar la generación o desplegar sistemas de almacenamiento que amortigüen este desfase. Desafortunadamente, estas soluciones son costosas y finalmente repercuten en el cliente.

Una solución en auge es aplicar los sistemas de “Demand Response” (DR), que convierten el consumo del cliente en un activo controlable por el operador del sistema de distribución, permitiendo ajustar de forma dinámica su consumo energético, adaptándolo a las necesidades de la red y mejorando la eficiencia.

Para lograr esto debe establecerse una comunicación *utility*-usuario, mediante la cual pueda solicitarse una reducción del consumo en ciertas franjas horarias, aplicándole al cliente bonificaciones por ello.

Por todo esto, se estima que la tecnología DR será clave en el futuro del sistema eléctrico, y en la cual el TIC-150, a través de la colaboración con diversas *utilities* de ámbito internacional, está trabajando activamente.

Palabras clave: *Red, Inteligente, Demanda, Gestión, Respuesta.*

ABSTRACT

The management of the electric system is affected by many factors, such as the rising of the consumption, the growing of renewable energies and the apparition of distributed generation (in order to reduce losses in transmission and distribution).

Obviously, the consumption is not constant. The consumption curve contains “valleys” (low demand periods) and “peaks” (high demand periods). Traditionally, the generation curve does not fit with the consumption curve, so the electric generation system must be oversizing, or electric storage must be installed. Unfortunately, these solutions are expensive and they increase customer bill.

A new solution is applying Demand Response systems. They transform the consumption into an asset that the distribution system can manage, adjusting this consumption dynamically, adjusting it to the needs of the system and improving efficiency.

Obviously, to achieve this objective there must exist a utility-customer communication. This allows to request a reduction of customer consumption when it is needed. Customers would reduce their bill thanks to this.

This is why DR technology is expected to be key in the electric system future. The TIC-150 is collaborating actively with diverse international utilities in this field.

Keywords: *Grid, Smart, Demand, Management, Response.*

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Visto de un modo global y simplificado, podemos ver el sistema eléctrico tradicional como un sistema radial donde un agregado de entidades se encarga de generar energía, otras entidades transportan dicha energía y, por último, los consumidores solicitan la energía. Puede verse esta jerarquía en la **Figura 3** (Personal, 2015).

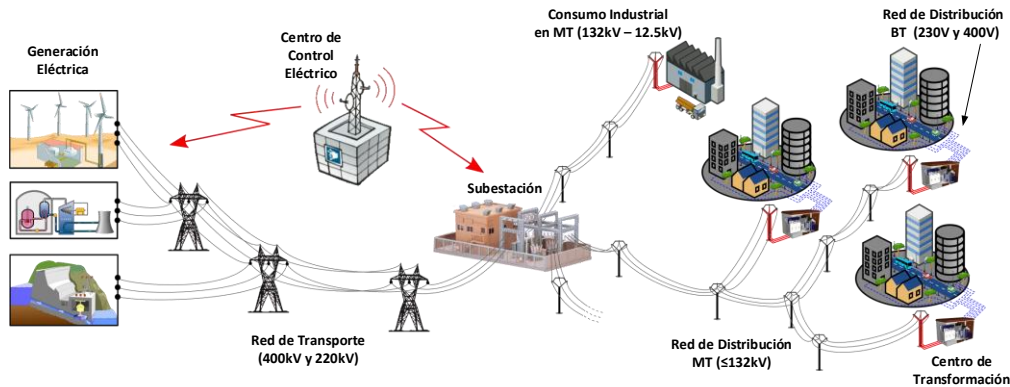


Figura 3: El sistema eléctrico tradicional (Personal, 2015).

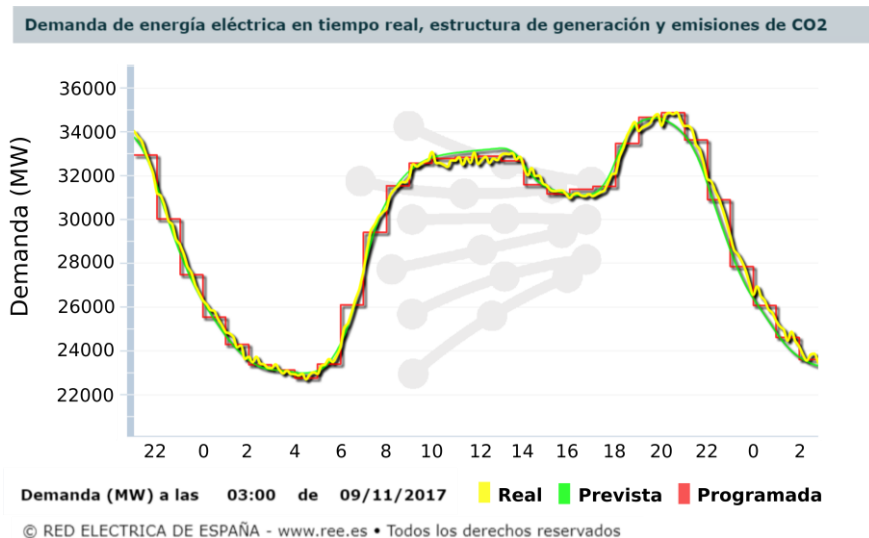


Figura 4: Curva de consumo típica¹

En este sistema debe mantenerse un equilibrio delicado, en el que las compañías generadoras deben estar continuamente produciendo la misma cantidad de energía que sus clientes necesitan.

A esto hay que añadir el hecho de que el consumo eléctrico de los clientes no es siempre igual a lo largo del día. Esto provoca lo que se llama “consumo valle” (períodos de consumo relativamente bajo) y “consumo pico” (períodos de muy alto consumo).

Estos consumos valle suelen darse tradicionalmente en las horas de madrugada (entre las 12 de la noche y las 6 de la mañana), mientras que los consumos pico se dan habitualmente a las horas de mediodía y al anochecer. Puede verse un ejemplo de curva de consumo típica en la **Figura 4**.

Además, en el caso de ciertas fuentes de energía renovables no se puede controlar cuándo se produce la generación, puesto que esto depende de factores externos. Por ejemplo, las centrales eólicas funcionarán bajo ciertas condiciones climatológicas en las que haya un nivel mínimo de viento, mientras que las centrales solares fotovoltaicas sólo producirán energía durante las horas con radiación solar, en

función de la cantidad de luz que sea posible captar. Puede verse la variación en la generación de los distintos tipos de fuentes energéticas en la Figura 5.

Como consecuencia de esta situación, el sistema eléctrico debe estar sobredimensionado (tanto en generación como en transporte y distribución) para hacerle frente. Es decir, se debe tener disponible una gran capacidad de generación adicional (centrales eléctricas) para que pueda entrar en funcionamiento durante los consumos pico, mientras que el resto del día puede que esas centrales estén detenidas. Habitualmente, esta generación la conforman centrales eléctricas de rápida respuesta y de potencia de generación fácilmente regulable, como por ejemplo las centrales de ciclo combinado.

Por otro lado, gracias al desarrollo de las redes eléctricas inteligentes (en inglés, *Smart Grids*, SG) (Farhangi, 2010) (Kezunovic, McCalley & Overbye, 2012) (Personal et al., 2014) en la última década se está produciendo una tendencia del sistema eléctrico hacia la generación distribuida (en inglés, *Distributed Generation*, DG), así como un aumento en la monitorización de las redes (Personal et al., 2016) (Stringfield, Marihart & Stevens, 1957). La gestión distribuida persigue un mayor acercamiento de la generación al consumo mediante la instalación de pequeños sistemas de generación. Esta generación distribuida conlleva una nueva problemática en lo que respecta a la estabilidad del sistema, puesto que aumenta el número de condiciones variables a tener en cuenta (Kakran & Chanana, 2018).

Todo esto conlleva enormes costos adicionales para las compañías, lo cual repercute en la factura del cliente.

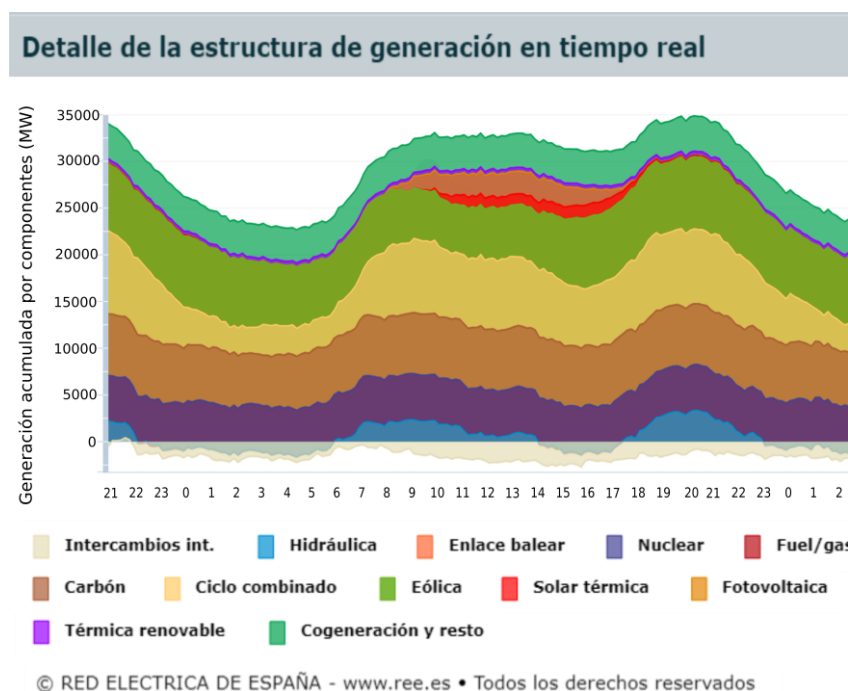


Figura 5: Tipos de generación energética¹

Gestión Activa de la Demanda

Con el objetivo de luchar contra estas dificultades en la gestión del sistema eléctrico, surge el concepto de gestión activa de la demanda (en inglés, *Demand Side Management*, DSM) (Baldwin, Rountree & Jock, 2018) (Di Santo et al., 2018) (Subkhankulova, Baklanov & McCollum, 2018).

La DMS supone un fuerte cambio en la filosofía de la gestión energética. Además de generar la energía necesaria para los consumidores, estas técnicas modifican la curva de consumo para hacerlo más regular a lo largo del día (reducir picos y valles), reduciéndose la relación pico-promedio (puede verse un ejemplo de esto en la Figura 6). Gracias a ello se puede reducir el sobredimensionamiento de la red, puesto que el consumo pico será menor. Es decir, requerirá menor inversión en instalaciones de generación, transporte y distribución.

Demanda de energía eléctrica en tiempo real, estructura de generación y emisiones de CO2

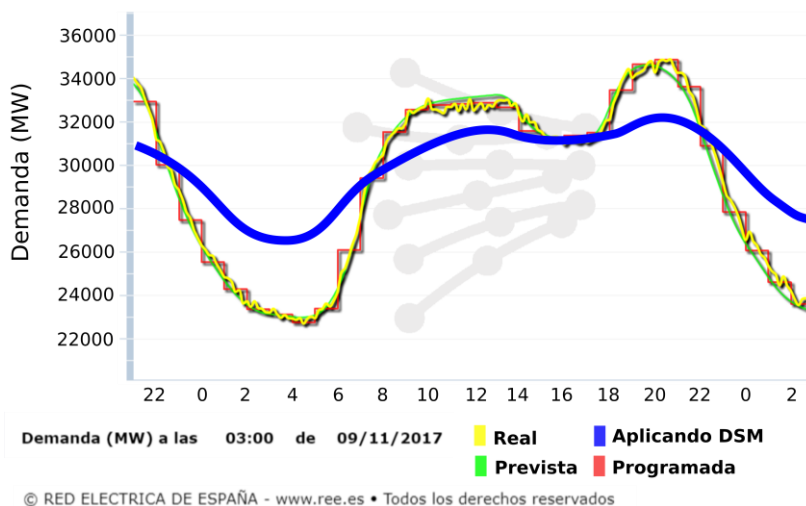


Figura 6: Resultado Gestión Activa de la Demanda¹

METODOLOGÍA

Para lograr este aplanamiento de la curva de consumo existen varios métodos:

- Añadir almacenamiento/generación al sistema: permite almacenar energía durante las horas valle y suministrarla durante las horas pico. No es una técnica de gestión de cargas (no es DSM propiamente dicha), pero da lugar a un desplazamiento del consumo.
- Sistema informativo: permite que la compañía suministradora informe a los clientes sobre el precio de la energía según las horas. Durante las horas pico la energía será más cara y durante las horas valle más barata. Estadísticamente, se ha comprobado que puede conseguirse hasta un 7% de aplanamiento de la curva.
- Respuesta a la demanda (en inglés, *Demand Response*, DR) (Hosseini, Niknejad & Barzegaran, 2018): implica el control de las cargas de consumo. Este concepto es lo que tradicionalmente se conoce como “interrumpibilidad”, que solía aplicarse exclusivamente a los grandes consumidores. El paradigma de DR plantea extender esta idea a los pequeños consumidores. Obviamente, para esto se debe llegar a un acuerdo entre compañías y clientes. La compañía suministradora podría solicitar a los clientes una reducción de su consumo en algunos momentos. A cambio de ello, los clientes obtendrían un descuento adicional en su factura eléctrica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para realizar la implementación de los sistemas de DR, existen varios protocolos estándar. Algunos ejemplos son el Smart Energy Profile 2.0 (SEP2) y Open Automatic Demand Response 2.0 (OpenADR 2.0) (Ebeid, 2015).

Estos protocolos permiten realizar el intercambio de mensajes en la comunicación entre el operador del sistema de distribución (en inglés, *Distribution System Operator*, DSO) y los clientes. Mediante este intercambio de información, es posible realizar las solicitudes de reducción de consumo, informar acerca del precio horario de la energía y realizar una gestión del sistema de forma centralizada o distribuida.

En cuanto a los dispositivos que permiten el uso de estos protocolos, existen numerosas alternativas comerciales de distintos fabricantes. En la Figura 7 pueden verse algunos ejemplos de dispositivos Virtual End Node (VEN) para el protocolo OpenADR.



Figura 7: Dispositivo GRIDlink¹ (izquierda) y Dispositivo ISY994Z¹ (derecha).

Ahora bien, es importante tener en cuenta que estos protocolos están definidos a nivel de mensajes, no de arquitectura. Es decir, lo que estandarizan es el intercambio de información (capa de comunicación) en sí mismo, no cómo es utilizada dicha información.

Un claro ejemplo de esto es la información referente al precio de la energía. Esta información puede intercambiarse mediante los protocolos antes referidos, puesto que existen mensajes adecuados para ello. No obstante, los protocolos no especifican cuál será la actuación del sistema completo como respuesta a un cambio en este precio, sino que corresponderá a los algoritmos de actuación especificar dicho comportamiento. Tampoco especifican cómo debe redireccionarse la información entre distintos niveles del sistema, cosa que dependerá de la arquitectura utilizada para jerarquizar los elementos de la red.

OpenADR no establece una estructura fija para su aplicación, sino que será posible crearla de la forma que más convenga según la situación. Pueden verse varios ejemplos de arquitecturas posibles para los Virtual Top Node (VTN) y los Virtual End Node (VEN) en la Figura 8 y Figura 9 (Herberg et al., 2014).

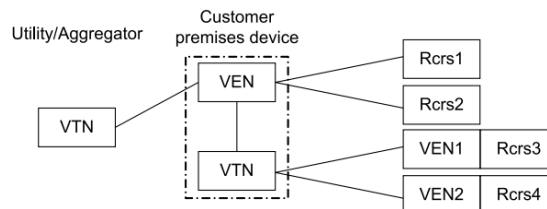


Figura 8: Arquitectura híbrida (Herberg et al., 2014).

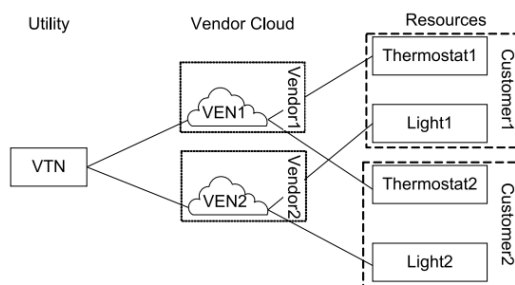


Figura 9: Arquitectura en nube (Herberg et al., 2014).

La jerarquía de los elementos que intervienen en el sistema cobra aún más importancia dentro de red debido al creciente interés por la generación distribuida. Esto provoca un aumento de la complejidad de gestión de las redes.

Para definir el comportamiento del sistema de DR en cada situación, los sistemas del operador del sistema de distribución (Distribution System Operator, DSO)

En resumen, es cierto que la estandarización de estos protocolos de comunicación es un gran avance para el uso de las técnicas de DR a nivel global, pero aún deben realizarse avances tanto en las arquitecturas de sistema utilizadas como en los algoritmos de comportamiento. Sólo así podrá garantizarse la interoperabilidad del sistema que permita la escalabilidad de las redes controladas.

Actualmente, en el grupo TIC-150 se está trabajando en diversos proyectos en la línea de Gestión Activa de la Demanda (DSM), y más concretamente en Respuesta a la Demanda (DR).

Mediante estos protocolos y dispositivos, así como el diseño de una arquitectura adecuada, se tiene como objetivo realizar el diseño y montaje de una “Show Room” de técnicas DR, en la cual exista una serie de dispositivos comunicados que permita poner en práctica estas técnicas y analizar sus posibilidades y posibles mejoras.

Es decir, se plantea como un banco de pruebas para el desarrollo de técnicas de gestión desde la utility para testear los servicios automáticos de respuesta a la demanda (en inglés, *Demand Response Automatic Services*, DRAS).

No obstante, hay otro aspecto fundamental que debe ser tenido en cuenta antes de llevar a cabo el diseño de la arquitectura final de sistema. Dicho aspecto es la simulación de los programas de DR deseados. Es decir, deberá tomarse las características principales de los programas de DR utilizados por compañías eléctricas reales (compañías americanas, principalmente) y simular su aplicación sobre distintos tipos de cliente según sus curvas de consumo y sus actuaciones frente a la ocurrencia de un evento de DR.

Esto permite comprobar qué comportamientos de cliente son más favorables de cara a realizar el objetivo de reducción de cada tipo de programa DR, así como simular en qué casos el cliente obtiene un incentivo (por haber cumplido con la reducción de potencia solicitada) y en cuáles recibe una penalización (por no haber cumplido con la reducción solicitada).

Estas simulaciones se han realizado utilizando el software Matlab (véase la Figura 10) debido a su potencia y polivalencia.

```
245     %línea base
246
247 -   for (i=11:30)
248 -       for(k=1:24)
249 -           base_line(i,k)=median(consumos(i-10:i,k));
250 -       end
251 -   end
252
253
254 -   consumo_modif=consumos(21,:);
255 -   consumo_modif(1,16)=consumo_modif(1,16)-0.2;
256 -   consumo_modif(1,17)=consumo_modif(1,17)-0.2;
257 -   consumo_modif(1,18)=consumo_modif(1,18)-0.2;
258 -   consumo_modif(1,19)=consumo_modif(1,19)-0.2;
```

Figura 10: Código simulación Matlab.

Mediante este código se han realizado diversos aspectos de la aplicación de un programa de tipo “Capacity Bidding Program”, uno de los más utilizados en la actualidad.

El primer paso fue realizar el cálculo de la línea base (consumo “típico”) del cliente durante el mes, realizando un tratamiento de sus datos de consumo simulados.

A partir de esta línea base, se ha simulado qué ocurrirá en los casos en los que el cliente no cumpla con los requisitos dispuestos (véase la Figura 11) o que los cumpla (véase la Figura 12). En el día simulado, se ha considerado la ocurrencia de un evento durante el período desde las 16:00 hasta las 20:00, en la que se ha solicitado una reducción de al menos 0,1 MW de potencia.



Figura 11: Consumo no reducido.

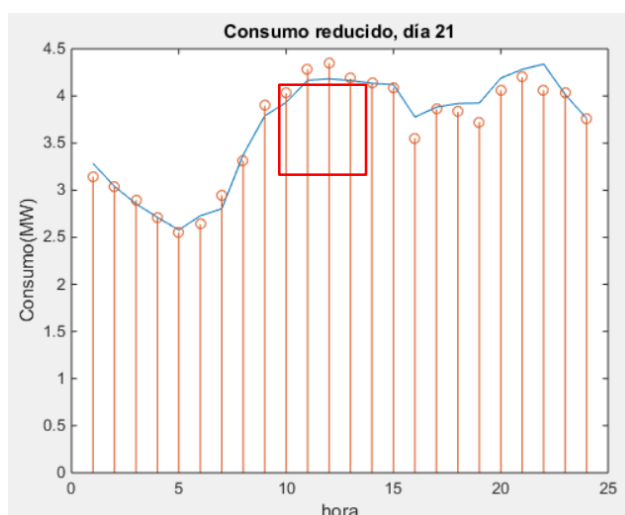


Figura 12: Consumo reducido.

En estas dos figuras puede verse la línea base para ese día (el día 21 del mes) en color azul, mientras que las muestras discretas en naranja representan el consumo horario del cliente. Tal y como se aprecia, en el caso de consumo no reducido se ha producido un consumo muy superior al permitido (está muy por encima de la línea base), mientras que en el segundo caso se ha producido una reducción significativa en las horas 16 y 19, mientras que se ha obtenido una reducción moderada en las horas 17 y 18.

Los resultados monetarios obtenidos para esta simulación han sido una penalización de 174,89 dólares en el primero de los casos (considerando que este ha sido el único evento en el mes), mientras que en el segundo caso el cliente ha obtenido un incentivo de 56,27 dólares.

Además, puede apreciarse que el beneficio del cliente en este segundo caso podría haber sido mayor si hubiese sido capaz de regularizar más su consumo durante las 4 horas del evento, puesto que la hora número 17 ha supuesto una leve penalización debido a que la reducción conseguida no ha superado los 0,1 MW.

Puede verse aquí una vez más la importancia de realizar una correcta gestión de los medios de almacenamiento energético, puesto que de esa forma podrá optimizarse la obtención de incentivos mediante la participación en DR.

CONCLUSIONES

Tal y como se ha observado, el sistema eléctrico está sufriendo un constante aumento de su complejidad. Esto se debe a la mayor demanda energética por parte de los usuarios, al aumento en el número de fuentes de energía disponibles y a la mayor presencia de la generación distribuida.

Teniendo en cuenta esta problemática, las técnicas de Respuesta a la Demanda pueden facilitar la gestión del sistema eléctrico. Esto traería ventajas tanto para las compañías como para los usuarios.

No hay que olvidar que, a pesar de los avances realizados en los estándares, aún queda mucho trabajo en lo que respecta a los algoritmos de gestión de redes.

Desde el grupo TIC150 se ha estado trabajando activamente en diversos proyectos en estas líneas, ya que se espera que las técnicas de DR sean un pilar fundamental en el futuro del sistema eléctrico y la Smart Grid.

Para llevar a cabo las decisiones en cuanto a la arquitectura de DR, se ha llevado a cabo la simulación de programas DR sobre clientes ficticios, para comprobar así qué comportamientos pueden resultar más convenientes para los clientes, así como permitirles la optimización de sus recursos DR. De este modo, podrá lograrse una mejor cooperación entre los clientes y las compañías, logrando así que estas técnicas puedan cumplir con los objetivos previstos.

AGRADECIMIENTOS

Quisiéramos agradecer a la dirección de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Sevilla por la organización de estas jornadas, así como por darnos la oportunidad de participar en ellas.

BIBLIOGRAFÍA

- Baldwin, E., Rountree, V., Jock, J. (2018). Distributed resources and distributed governance: Stakeholder participation in demand side management governance. *Energy Research and Social Science*. 39. pp. 37-45.
- Di Santo, K.G., Di Santo, S.G., Monaro, R.M., Saidel, M.A. (2018). Active demand side management for households in smart grids using optimization and artificial intelligence. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. 115. pp. 152-161.
- Ebeid, E., Rotger-Griful, S., Mikkelsen, S. A., Jacobsen, R. H. (2015). A methodology to evaluate demand response communication protocols for the Smart Grid. *IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW), London, 2015*. pp. 2012-2017.
- Farhangi, H. (2010). The path of the smart grid. *IEEE Power and Energy Magazine*. vol. 8, (no. 1) pp. 18–28.
- Herberg, U., Mashima, D., Jetcheva, J.G., Mirzazad-Barijough, S. (2014). OpenADR 2.0 deployment architectures: Options and implications. *IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Venice, 2014*. pp. 782-787.
- Hosseini, M., Niknejad, P., Barzegaran, M.R. (2018). The impact of customers' participation level and various incentive values on implementing emergency demand response program in microgrid operation. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 96. pp. 114-125.
- Kakran, S., Chanana, S. (2018). Smart operations of smart grids integrated with distributed generation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 81. pp. 524-535.
- Kezunovic, M., McCalley, J. D., Overbye, T. J. (2012). Smart Grids and Beyond: Achieving the Full Potential of Electricity Systems. *Proceedings of the IEEE*. vol. 100, (no. Special Centennial Issue). pp. 1329–1341.
- Personal, E. (2015). Sistema para Localización de Faltas en Líneas Subterráneas de Distribución Eléctrica de Media Tensión, mediante una Red Distribuida de Sensores de Corriente. University of Seville. PhD thesis.

- Personal, E., Garcia, A., Parejo, A., Larios, D., Biscarri, F., Leon, C. (2016). A Comparison of Impedance-Based Fault Location Methods for Power Underground Distribution Systems. *Energies*, vol. 9, (no. 12). pp. 1022-1052.
- Personal, E., Guerrero, J. I., Garcia, A., Peña, M., Leon, C. (2014). Key performance indicators: A useful tool to assess Smart Grid goals. *Energy*. vol. 76, pp. 976–988.
- Stringfield, T. W., Marihart, D. J., Stevens, R. F. (1957). Fault Location Methods for Overhead Lines. *Transactions AIEE, Part III: Power Apparatus Systems*. vol. 76, (no. 3). pp. 518–529.
- Subkhankulova, D., Baklanov, A., McCollum, D. (2018). Demand side management: A case for disruptive behaviour. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 629. pp. 47-59.

C7

EFFECTO DEL PROCESADO SOBRE LAS PROPIEDADES Y MORFOLOGÍA DE BIOPLÁSTICOS DE PROTEÍNA DE SOJA.

E. Álvarez, A. Jiménez, C. Bengoechea, J.M. Aguilar, A. Guerrero. Tecnología y diseño de productos multicomponentes (Rheo Tech). Departamento de Ingeniería Química. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Sevilla.

RESUMEN

La industria de los plásticos ha crecido notablemente en los últimos años. Este crecimiento, ligado a la baja biodegradabilidad de estos materiales, ha causado un grave problema medioambiental. La presente investigación pretende la obtención de materiales con alta capacidad de absorción de agua, que sean biodegradables y obtenidos a partir de fuentes renovables. Deberían además poseer propiedades mecánicas adecuadas para constituir una alternativa real a los plásticos sintéticos.

Estos bioplásticos son obtenidos mediante un proceso con diferentes etapas: una de mezclado de los componentes para conformar una masa homogénea; y una segunda de inyección en la que, aplicando presión, la masa es introducida en un molde de forma deseada. La capacidad de absorción de agua es afectada por la composición y las condiciones de procesado. El presente documento estudia cómo la temperatura y duración de la etapa de moldeo, además del tratamiento dehidrotérmico, modifican la capacidad de absorción del bioplástico. Los resultados concluyen que la capacidad de absorción de agua aumenta con menores temperaturas y tiempos de moldeo, a la vez que aumenta cuando el tratamiento dehidrotérmico es más corto. Asimismo, los módulos viscoelásticos poseen una tendencia a disminuir cuando la capacidad de absorción de agua en las muestras aumenta.

Palabras clave: *bioplástico, capacidad de absorción, viscoelasticidad.*

ABSTRACT

The remarkable growth experienced by the production and demand of the plastic industry during the last few years has resulted in a serious environmental issue associated specially to their low biodegradability. This work is focused on the manufacture of bioplastics with high water absorption capacity, obtained from renewable sources. Bioplastics produced should have adequate mechanical properties to be able to replace eventually synthetic plastics in specific markets. In order to obtain these bioplastics, two steps were carried out: the first one consists of a mixing stage to achieve a homogenous blend that is injection-molded during the second step. The water uptake capacity of these samples is influenced by both the formulation and the processing conditions of the blends. The present study is focused on the evolution of water uptake values when either the molding conditions (temperature and duration) or the length of a post-dehydrothermal treatment are modified. Results indicated an improvement in the water uptake when lower mold temperatures and shorter compaction stages were used. An analogous improvement was observed when the dehydrothermal process was shorter. Mechanical properties usually decreased as the water uptake of samples was improved.

Keywords: *bioplastic, water uptake, viscoelasticity.*

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La demanda de plásticos ha tenido un crecimiento incesante en las últimas décadas. En 2011 el consumo aproximado era de unos 280 millones de toneladas/año, y se prevé que este crecimiento se mantenga en torno al 3%, hasta alcanzar en 2020 una producción de 400 millones de toneladas. En los últimos años se ha incrementado la cantidad de plásticos reciclados. No obstante, este crecimiento es insuficiente para hacer frente a las necesidades de producción y consumo. Por otro lado, la gran demanda y fabricación de plásticos procedente de combustibles fósiles supone un grave problema de contaminación. Los motivos principales de esta contaminación son, entre otros, la muy baja degradabilidad que estos materiales presentan, pudiendo llegar a tardar en desaparecer del medio más

de 100 años; la gran cantidad de emisiones de gases producidos en su fabricación, o la disminución de las reservas de combustibles fósiles. Estos hechos evidencian la necesidad de encontrar una alternativa a estos materiales sintéticos. Un material que suponga una alternativa real a los plásticos sintéticos debe poseer una capacidad alta de biodegradabilidad, además de preservar las reservas de combustibles fósiles.

Igualmente, la revalorización de residuos y subproductos de la industria alimentaria a partir de producción de bioplásticos basados en ellos ha resultado de interés en los últimos años. Principalmente, los compuestos utilizados son polisacáridos, como el alginato, el quitosano, o proteínas, como el gluten (Zarate-Ramirez, L. S. et al., 2014; Gómez-Heincke, D. et al., 2017), colágeno (Cuq, B. et al., 1998), almidón (Privas, E. et al., 2013) o proteína de soja (Bourny, V. et al., 2017; Felix, M. et al., 2014) entre otros.

El presente estudio es continuación de otros trabajos anteriores relacionados con las propiedades de los bioplásticos con una base principalmente proteica; más concretamente de proteína de soja. En ellos, se pudo comprobar que estos plásticos pueden poseer una gran capacidad de absorción de agua (Fernández-Espada, L. et al., 2016) y biodegradabilidad, lo que haría propicio su uso en horticultura o comercialización como ingredientes en productos de higiene personal, que vienen siendo fabricados actualmente con componentes acrílicos, con un alto tiempo de degradabilidad.

A partir de la proteína de soja, mezclada con un plastificante (normalmente glicerina), se pueden conseguir bioplásticos con una buena capacidad de absorción de agua (Felix, M. et al., 2014), que puede absorber varias veces su peso en agua. Además, este aumento de la capacidad de absorción de agua en las probetas, puede llegar a ser más que notable cuando se funcionaliza la soja con un agente acilante como el anhídrido succínico o el dianhidro etilendiaminotetracético (SA y EDTAD respectivamente), que le proporciona grupos carboxílicos; consiguiendo que el bioplástico retenga un peso de agua casi 40 veces su peso inicial, convirtiéndolo así en un material superabsorbente (Cuadri, A.A. et al., 2017). Otros investigadores han podido concluir que el control del nivel de entrecruzamiento de la proteína y las condiciones de procesado de los bioplásticos tiene un efecto notable en sus propiedades (Gómez-Heincke, D. et al., 2017).

El objetivo del presente trabajo ha sido el estudio de las propiedades viscoelásticas y de absorción de agua de matrices poliméricas, obtenidas a partir de un bioplástico con base una proteica de soja, en función de las condiciones de procesado y de acondicionamiento de las probetas obtenidas.

METODOLOGÍA

Materiales y métodos

El aislado proteico de soja (SPI) utilizado en este estudio fue obtenido por la empresa *Protein Technologies International* (Bélgica), y suministrada por la proveedora PROANDA (España). La composición y características de este aislado proteico se indican en la tabla 1. Como plastificante fue utilizado glicerol puro (GL), de grado farmacéutico de la casa comercial PANREAC.

Humedad	<6%
Proteínas	<90%
Grasas	<1%
Cenizas	<5%
pH	7,07

Figura 13: Composición y propiedades del SPI.

- Obtención de muestras: se realizaron unas masas con una composición del 50% de SPI (materia activa) y el 50% de glicerina (plastificante). Para su correcta homogenización se aprovecha el movimiento contra-rotatorio de los rotores de un mezclador de laboratorio HAAKE POLYLAB, de la casa comercial ThermoScientific (Alemania). Se mantiene una velocidad de mezclado de 50 rpm durante unos 10 minutos, a una temperatura aproximada de 25°C. La mezcla obtenida se procesó en una inyectora neumática de pistón HAAKE Mini Jet II, del fabricante Thermo Scientific (Alemania). En ésta, primero se introduce en el cilindro de inyección la masa resultante del mezclado a una temperatura de 40°C. Posteriormente, se ejerce una presión de 500 bar durante 10 s para hacer pasar la masa desde el cilindro hasta un molde con una temperatura adecuada de molde, T_{mold} . La muestra se mantiene en el molde durante un tiempo, siendo sometida a una presión de compactación de 500 bar durante un tiempo

específico, t_{postiny} . Los valores no especificados en este apartado (T_{mold} y t_{postiny}) serán las variables objeto de estudio a lo largo del presente trabajo. Tras el proceso de inyección se obtuvieron probetas rectangulares de bioplásticos, con dimensiones 1x10x50 mm en grosor, anchura y longitud, respectivamente.

- **Absorción de agua:** las probetas son introducidas en un horno a 50°C para eliminar la humedad que éstas contienen durante un tiempo (t_{deshid}). Durante este tiempo, las proteínas pueden sufrir un proceso de entrecruzamiento en función de su procesado previo en la inyectora. Tras este proceso dehidrotérmico, las muestras, exentas de humedad, son sumergidas en agua durante un periodo de 24 horas. Para el cálculo de la cantidad de agua absorbida se utiliza la fórmula (1); donde w_1 es el peso de la muestra tras someterse al proceso dehidrotérmico y w_2 es el peso de la muestra cuando tras haberla sumergido en agua el periodo requerido:

$$\% \text{ absorción} = 100 \cdot \frac{w_2 - w_1}{w_1} \quad (1)$$

- **Caracterización mecánica:** Las probetas hinchadas, debido a la absorción de agua son congeladas a -40°C durante 2 horas, para posteriormente ser sometidas a liofilización. Durante este proceso, el agua que retienen es extraída sin modificar la estructura proteica de la matriz. Las matrices obtenidas se someten a unos ensayos dinámicos en modo de compresión para caracterizar sus propiedades viscoelásticas. Para ello se utilizó un reómetro RSA 3 de la firma TA Instruments (EE.UU.), con un sistema sensor cilíndrico tipo plato-plasto, realizándose, principalmente, barridos de frecuencia dentro del intervalo viscoelástico lineal.

- **Porosimetría:** se realiza un ensayo de porosimetría a baja presión para conocer el tamaño de poro de las muestras. La técnica está basada en la aplicación de presión para hacer penetrar el mercurio dentro de los poros del sólido. Esta técnica se realiza con un porosímetro del fabricante Quantachrome Instruments (EE.UU.) y es capaz de medir poros desde 0,6 hasta las 1000 μm .

- **Microscopía:** Para evaluar la microestructura de las muestras se utilizó un microscopio Zeiss Evo mediante microscopía electrónica de barrido con cámara de criogenización (Cryo-SEM) disponible en el Servicio de Microscopía de la Universidad de Sevilla (CITIUS). Para ello, pequeñas piezas de muestras fueron congeladas en nitrógeno líquido (-196 °C), y transferidas a la cámara de criogenización, donde se mantuvieron a -90 °C durante 7 minutos para eliminar cualquier trozo de hielo de su superficie. Las muestras fueron observadas utilizando voltajes de aceleración de 8 kV para una corriente del haz de 70 pA a una distancia de trabajo de 6 mm, siendo la magnificación utilizada de 10,000x.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para las masas obtenidas en la etapa de mezclado, se utilizó una relación SPI/GL igual a 1:1, esta composición fue escogida al demostrarse en trabajos anteriores que eran perfectamente homogéneas y maleables (Fernández-Espada, L. et al., 2016). Durante la etapa de mezclado de los ingredientes de las muestras se registran los valores del par de torsión, al tiempo que se obtiene su perfil de temperaturas. Los datos obtenidos (no mostrados en este trabajo) muestran que los perfiles de temperatura no presentan un incremento notable durante el proceso de mezclado, permitiéndonos afirmar de esta manera que no parece existir entrecruzamiento importante entre las moléculas de proteína durante esta etapa. Posteriormente, tras someter las masas obtenidas en la etapa de mezclado al proceso de inyección y moldeo, se obtuvieron bioplásticos uniformes. A continuación, se analizan la influencia de la temperatura de molde y del tiempo de tratamiento dehidrotérmico sobre la capacidad de absorción de agua de los bioplásticos de soja estudiados.

Modificación en la temperatura de molde y tiempo de tratamiento dehidrotérmico:

Se ha demostrado que la temperatura en el molde es un parámetro que influye notablemente en la capacidad de absorción de agua de un bioplástico, de hecho, la capacidad absorbente puede ser considerada un parámetro que mide indirectamente la densidad de entrecruzamiento (Bruyninckx, K. et al., 2015).

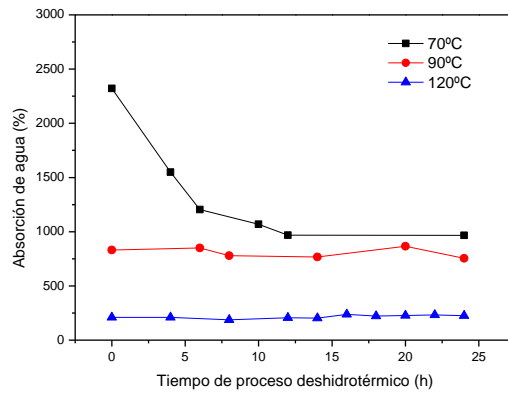


Figura 1: Absorción de agua (**1A**) y módulos elásticos a 1Hz (**1B**) para probetas inyectadas a distinta T_{mold} y sometidas a distinto $t_{\text{dehidr.}}$.

La Figura 1 muestra la relación entre la absorción de agua y el tiempo de procesado dehidrotermo en función de la temperatura de molde que se establece en proceso de inyección. Como puede observarse, el aumento de la temperatura de molde conlleva la obtención de unos bioplásticos que presentan una disminución en las propiedades de absorción de agua, independientemente de la duración del proceso dehidrotermo. Por otro lado, para la menor de las temperaturas estudiadas (70 °C), una mayor duración del proceso dehidrotermo supuso una disminución notable de la capacidad de absorción de agua de los bioplásticos obtenidos, particularmente en las primeras horas de residencia de la muestra en la estufa, mientras que las probetas obtenidas a las mayores temperaturas de molde (90 °C y 120 °C), el tiempo de procesado dehidrotermo no parece afectar significativamente a la capacidad de absorción de agua de las mismas. Este comportamiento puede explicarse admitiendo que durante el tiempo de moldeo tiene lugar un proceso de entrecruzamiento en las probetas, el cual se da en mayor extensión conforme la temperatura en el molde es mayor y conlleva una menor capacidad de absorción de agua en ellas. En este sentido, las probetas obtenidas a las mayores temperaturas de molde habrían alcanzado su máximo grado de entrecruzamiento en éste, no viéndose afectado posteriormente su grado de entrecruzamiento por el tiempo de procesado dehidrotermo ($t_{\text{dehidr.}}$) a 50°C; mientras que las probetas obtenidas para $T_{\text{mold}}=70$ °C parecen experimentar un cierto grado de entrecruzamiento durante el proceso dehidrotérmico, lo que supone una menor capacidad en la absorción de agua conforme este tiempo aumenta.

Otros autores han asociado un mayor módulo elástico (E') a una estructura más consolidada que, posteriormente, disminuirá la capacidad de hinchamiento del bioplástico, resultando en una menor capacidad absorbente (Gomez-Heincke, D. et al, 2017). Estos datos obtenidos de aumento en las propiedades mecánicas se corroboran con los estudios realizados por otros autores (Li, S. et al., 2015).

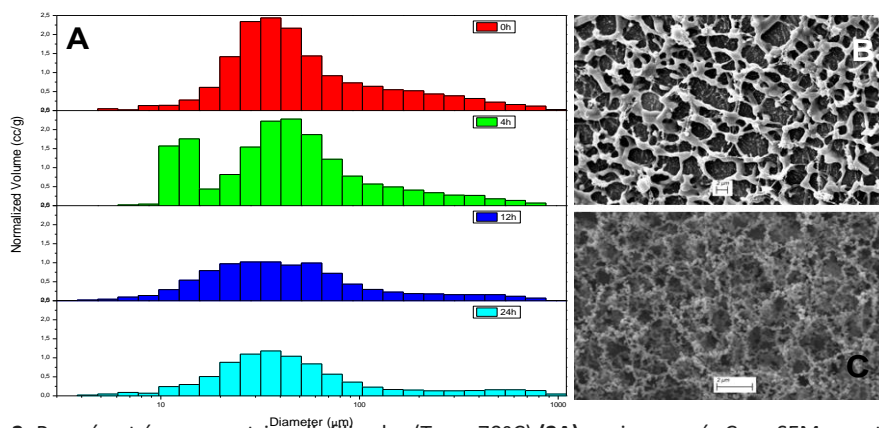


Figura 2: Porosimetría para matrices liofilizadas ($T_{\text{mold}}: 70^{\circ}\text{C}$) (**2A**) y microscopía Cryo-SEM para $t_{\text{deshidr.}}$: 0h (**2B**) y $t_{\text{deshidr.}}$: 24h (**2C**)

Al someter a las matrices a ensayos de porosimetría se pudo observar una disminución del tamaño de poro conforme la duración del proceso dehidrotérmico ($t_{\text{dehidr.}}$) era mayor. Así se muestra en la figura

2, donde se observa un número menor de poros para cada uno de los valores de tamaño o diámetro de poro. Los resultados obtenidos de Cryo-SEM muestran cómo el aumento del t_{dehidr} de 0 (Figura 2B) a 24 horas (Figura 2C) resulta en una estructura menos porosa, dificultando así la intrusión del agua en el ensayo de absorción, y resultando, por tanto, una capacidad de absorción de agua notablemente menor.

Al realizar SEM para muestras inyectadas con distinto t_{dehidr} (0, 4, 12 y 24) se obtienen los resultados (no mostrados) donde se puede observar como el tamaño de poro, para las probetas inyectadas a 70°C, disminuye paulatinamente a la vez que se aumenta la duración del proceso dehidrotérmico (t_{dehidr}); quedando patente que las condiciones de acondicionamiento de la muestra pueden modificar la estructura notablemente, aumentando su entrecruzamiento debido a la duración del tratamiento térmico al que la muestra es sometida. Las muestras que presentan un menor nivel de asociación entre cadenas (las menos entrecruzadas y más porosas) poseen generalmente más espacios para los puentes de hidrógeno que se puedan formar con las moléculas de agua (Zárate-Ramírez, L.S. et al, 2014).

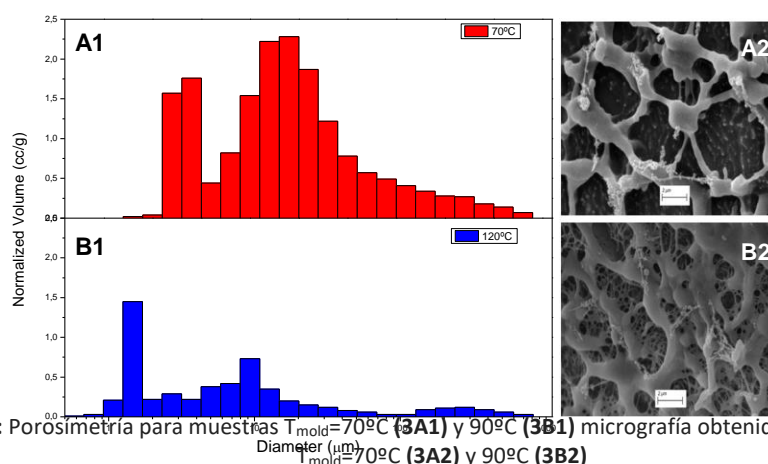


Figura 3: Porosimetría para muestras $T_{mold}=70^{\circ}\text{C}$ (3A1) y 90°C (3B1) micrografía obtenida por CryoSEM para $T_{mold}=70^{\circ}\text{C}$ (3A2) y 90°C (3B2)

Un marcado descenso de la porosidad también fue mostrado cuando se realizó el ensayo de porosimetría para las muestras que fueron inyectadas a mayores valores de T_{mold} , cuyos resultados se encuentran recogidos en la figura 3A1 y 3B1. Los resultados de SEM muestran como al aumentar la temperatura de molde los poros pasan de conformar una estructura más abierta (figura 3A2), donde la capacidad de hinchamiento de la muestra se presupone más factible, a una estructura con menor porosidad (figura 3B2) en la que se dificulta el hinchamiento posterior durante la absorción de agua.

Modificación en la temperatura de molde y tiempo compactación (o tiempo de molde):

Otro parámetro a tener en cuenta para el control de la absorción de agua en un bioplástico es el tiempo de compactación (t_{comp}) o tiempo de molde, ya que al prolongar este paso y al estar el molde a una cierta temperatura, estamos sometiendo al bioplástico a un tratamiento térmico que también influirá en el grado de entrecruzamiento del biomaterial, modificando así su capacidad de absorción de agua. En los resultados obtenidos se muestra, como se confirmó anteriormente, que un aumento en la duración del proceso dehidrotérmico disminuye la capacidad de absorción de manera notable, y como se puede comprobar en la figura 4, un descenso también es dado cuando el t_{comp} es mayor.

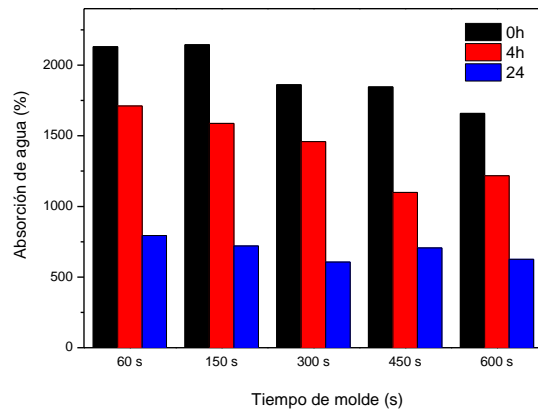


Figura 4: Absorción de agua para muestras sometidas a distintos t_{dehidr} y distintos t_{comp}

Conforme el grado de entrecruzamiento aumenta, se produce un incremento en los módulos elásticos (E'), ya que la estructura forma nuevos enlaces covalentes entre las cadenas, lo que favorece un aumento de su rigidez. Es por ello que, como es reflejado en la figura 5, los E' aumentan con el t_{dehidr} verificando la posibilidad de que una estructura más sólida se haya alcanzado (Perez, V. et al., 2016). Conforme el t_{dehidr} aumenta los módulos elásticos van acercándose, lo que quiere referirse a que el grado de entrecruzamiento dado en las probetas va acercándose.

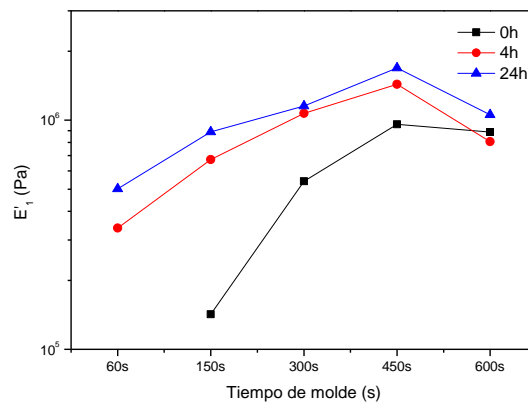


Figura 5: módulos elásticos a frecuencia 1Hz (E'_1) para distintos t_{deshid} y t_{comp}

Como ya se ha venido exponiendo, un aumento en el tiempo de un tratamiento térmico favorece un aumento de la interacción entre cadenas, resultando una disminución de la porosidad, en el aumento del t_{comp} puede observarse como en los ensayos de porosidad, recogidos en la figura 6, se da un desplazamiento del volumen normalizado hacia valores de diámetro de poros más pequeños, provocando así la disminución de la porosidad, que viene a dar como consecuencia un menor hinchamiento en la muestra, y, por consiguiente, el descenso en la capacidad absorbente de estos biomateriales.

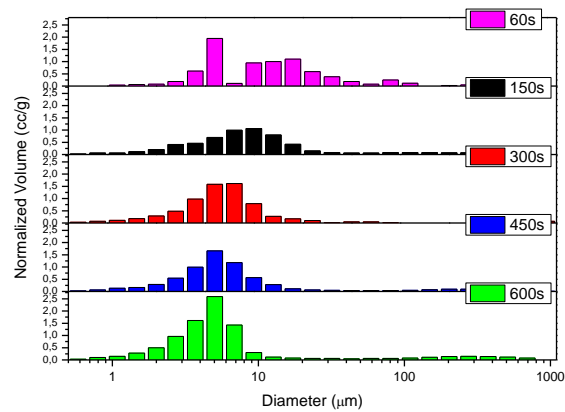


Figura 6: Porosidad a muestras obtenidas con distinto t_{comp}

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos nos permiten concluir que se pueden obtener materiales superabsorbentes a partir de bioplásticos con una base de proteína de soja y utilizando glicerina como plastificante, modificando exclusivamente sus parámetros de procesado. De forma que es posible que un bioplástico de soja aumente más de 10 veces su peso en agua cuando es inyectado con una T_{mold} igual a $70^{\circ}C$. El t_{dehidr} también es influyente en esta afirmación, ya que las muestras inyectadas a esta temperatura y no sometidas a ningún procesado dehidrotérmico posterior a la inyección no soportan la posterior manipulación, al no ser consistentes; en cambio, aquellas con un $t_{dehidr} > 10h$ (figura 1), no alcanzan el 1000% en absorción de agua, límite inferior a superar para ser calificadas como superabsorbentes. El t_{comp} para las muestras con $T_{mold} = 70^{\circ}C$ no parece determinante, ya que las mantiene dentro del rango superabsorbente (para $t_{dehidr} < 10h$). Las probetas inyectadas con $T_{mold} = 90^{\circ}C$ y $120^{\circ}C$ no alcanzan los niveles de materiales superabsorbentes, independientemente de cuáles sean su t_{dehidr} y t_{comp} . Esto se debe al alto grado de entrecruzamiento producido en el interior del molde durante la inyección.

AGRADECIMIENTOS

A los autores les gustaría mostrar su agradecimiento al apoyo económico recibido por MINECO/FEDER al proyecto CTQ2015-71164-P. También quisieran agradecer a los servicios del CITIUS (Universidad de Sevilla) por suministrar acceso y asistencia al servicio de porosimetría y microscopía.

BIBLIOGRAFÍA

- Bourny, V.; Perez-Puyana, V.; Felix, M.; Romero, A.; Guerrero, A. (2017). Evaluation of the injection moulding conditions in soy/nanoclay based composites. *European Polymer Journal*. (95). 539-546.
- Bruyninckx, K; Janssens, K.J.A.; Goderis, B; Delcour, J.A.; Smet, M. (2015). Removal of sulphide cross-links from wheat gluten and the effect thereof on the mechanical properties of rigid gluten bioplastic. *European Polymer Journal*. (68). 573-584.
- Cuadri, A.A.; Bengoechea, C.; Romero, A.; Guerrero, A. (2016). A natural-based polymeric hydrogel based on functionalized soy protein. *European Polymer Journal*. 85. 164-174.
- Cuq, B.; Gontard, N.; Guilbert, S. (1996). Thermoplastic properties of fish myofibrillar proteins: application to biopackaging fabrication. *Polymer*. 38. (16). 4071-4078.
- Felix, M.; Martín-Alfonso, J. E.; Romero, A.; Guerrero, A. (2014). Development of albumen/soy biobased plastic materials processed by injection molding. *Journal of Food Engineering*. (125). 7-16.
- Fernández-Espada, L.; Bengoechea, C.; Córdoba, F.; Guerrero, A. (2016). Thermomechanical properties and water uptake capacity of soy protein-based bioplastics processed by injection molding. *Journal of Applied Polymer*. (133). 43524.
- Gómez-Heincke, D.; Martínez, I.; Stading, M.; Gallegos, C.; Partal, P. (2017). Improvement of mechanical and water absorption properties of plant protein based bioplastic. *Food Hydrocolloids*. (73). 21-29.

- Li, S.; Donner, E.; Thompson, M.; Zhang, Y.; Rempel, C.; Lui, Q. (2017). Preparation and characterization of cross-linked canola protein isolate films. *European Polymer Journal*. (89). 419-430.
- Perez, V.; Felix, M.; Romero, A.; Guerrero, A. (2016). Characterization of pea protein-based bioplastics processed by injection moulding. *Food and Bioproducts Processing*. (97). 100-108.
- Privas, E.; Leroux, F.; Navard, P. (2013) Preparation and properties of blends composed of lignosulfonated layered double hydroxide/plasticized starch and thermoplastics. *Carbohydrate Polymers*. (96). 91-100.
- Zárate-Ramírez, L. S.; Romero, A.; Bengoechea, C.; Partal, P.; Guerrero, A. (2014). Thermo-mechanical and hydrophilic properties of polysaccharide/gluten-based bioplastics. *Carbohydrate Polymer*. (112). 24-31.

APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE RESIDUOS INDUSTRIALES DE ALTA CARGA ORGÁNICA MEDIANTE CODIGESTIÓN ANAEROBIA

Benito Mora, Carlos ^a; Alonso Contreras, Antonio José ^a; Garvi Higuera, María Dolores ^a; Morón Romero, María del Carmen ^b; Lebrato Martínez, Julián ^a

^a Grupo BIOTAR RNM159 PAIDI. Departamento Ingeniería Química. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Sevilla. 7. C/ Virgen de África, Cp.: 41011. Sevilla. España

^b Grupo BIOTAR RNM159 PAIDI. Departamento de Física Aplicada I. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Sevilla. 7. C/ Virgen de África, Cp. 41011. Sevilla. España.

RESUMEN

El desarrollo de nueva y más estricta legislación en materia de tratamiento de residuos, hace necesaria la utilización y mejora de tecnologías no convencionales que eviten los problemas ambientales asociados a las técnicas de gestión tradicionales, tales como la deposición en vertedero. Los residuos agroindustriales presentan, en la mayoría de los casos, una elevada carga orgánica, provocando impactos ambientales.

En el presente estudio se valora el aprovechamiento energético de los residuos de lactosuero, aguas glicerosas y lixiviado de vertedero, como cosustratos en el proceso de codigestión anaerobia, pudiendo ser esta, una alternativa de tratamiento, gestión y valorización de estos residuos y con el biogás producido, generar energía eléctrica, siendo otra fuente de energía renovable. El comportamiento de cada uno de los sustratos de trabajo han sido estudiados mediante ensayos de Biochemical Methane Potential, siendo una herramienta factible para el estudio de la biodegradabilidad o viabilidad del sustrato, adaptabilidad de los consorcios microbianos y la especialización de dichos consorcios a cada uno de los residuos de estudio en codigestión anaerobia. Se emplea el fango mixto como sustrato de referencia debido a su viabilidad en los procesos de digestión anaerobia.

Palabras clave: *Codigestión anaerobia, rendimiento de metano, Biochemical Methane Potential, adaptación de consorcios microbianos.*

Abreviaciones: *I, inóculo; S, sustrato; Co, Cosustrato; BMP, biochemical methane potential; ST, sólidos totales; SV, sólidos volátiles; FM, fango mixto; DQO, demanda química de oxígeno; AGV, ácidos grasos volátiles;*

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La generación indiscriminada de residuos, el incremento en la demanda de recursos naturales y el desechar todo aquello que ya no es útil, ha provocado graves daños al planeta y a sus recursos.

La generación mundial de residuos sólidos municipales es del orden de dos mil millones de toneladas por año, estimándose un aumento a tres mil millones en 2025 (Charles et al., 2009). El tratamiento de estos residuos consiste en su disposición bajo tierra o en vertederos controlados. Cuando el agua se filtra a través de los residuos en descomposición, extrae los componentes inorgánicos y orgánicos, produciendo lixiviados contaminantes que pueden constituir un importante riesgo potencial para el ecosistema circundante y las poblaciones humanas.

La industria de fabricación de biodiesel genera un residuo que es una mezcla de sustancias cuyo componente orgánico mayoritario es la glicerina, denominadas aguas de glicerina. La cantidad de aguas de glicerina que resultan del proceso de producción de biodiesel se aproxima al 10% del material de partida (Dasari et al., 2005). La gestión de las aguas de glicerina se presenta cada vez más complicada, con un coste que a largo plazo supondrá un gran inconveniente para la industria del biodiesel.

La industria láctea genera subproductos líquidos, los cuales requieren disposición de una gran cantidad de inversión de capital. La producción de lactosuero a nivel mundial genera más de 145 millones

de toneladas por año (Donoso-Bravo et al., 2009). A pesar de las diferentes posibilidades de la utilización de lactosuero, aproximadamente la mitad del producido a nivel mundial es descartado sin tratamiento (Donoso-Bravo et al., 2009).

Los lixiviados generados de los residuos sólidos urbanos, y las aguas glicerosas de la fabricación del biodiesel, presentan una difícil gestión y su valorización o reutilización no es óptima.

En los últimos años, la codigestión anaerobia de los desechos agroindustriales ha adquirido un interés considerable como una opción de gestión prometedora, siendo altamente sostenible tanto desde el punto de vista medioambiental como económico (Calabrò et al., 2015). La digestión anaerobia se considera como uno de los métodos más eficaces de gestión de residuos (Iacovidou et al., 2012). Al adoptar esta opción, no sólo se estabilizan y reciclan los residuos, sino que se disminuye drásticamente su carga contaminante y, también se genera energía utilizando motores de cogeneración que aprovechan el biogás producido en el proceso. La generación de energía eléctrica a partir de la codigestión anaerobia es especialmente importante, ya que la investigación en este campo se ha intensificado debido al agotamiento progresivo de los combustibles fósiles, así como a las preocupaciones relacionadas con el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (Weiland, 2010). El aprovechamiento energético de la biomasa y residuos orgánicos desempeña un papel crucial en la mitigación de los gases de efecto invernadero (Appels et al., 2011).

Los ensayos Biochemical Methane Potential (BMP) son una herramienta factible para el control de la digestión anaerobia (Khoufi et al., 2015)(Hagos et al., 2017), y de la codigestión anaerobia, así como comprobar la viabilidad de la utilización del residuo en estudio en el proceso y el comportamiento del digestor a nivel preventivo y/o correctivo (Goncalves Ferreira, 2013). Existen protocolos para la estimación del BMP (Angelidaki et al., 2009) (Labatut et al., 2011) y la valoración de la biomasa activa de manera eficiente (Arnaiz et al., 2006). El BMP se obtiene utilizando una pequeña cantidad de muestra de sustrato incubada en condiciones mesófilas y en presencia de un inóculo viable de microorganismos anaeróbicos. El gas acumulado producido a lo largo del tiempo, se mide hasta que alcanza el estado estacionario. En general, estos experimentos se realizan en reactores discontinuos de laboratorio, y el BMP específico se expresa como volumen de biogás o metano por unidad de masa de la materia orgánica (ensayos realizados bajo condiciones de temperatura y presión específicas).

La exactitud de los datos BMP depende en gran medida de las capacidades metabólicas específicas del inóculo utilizado (De Vrieze et al., 2015) (Gu et al., 2014). Además, la reducción de la actividad metanogénica de los microorganismos puede conducir en última instancia a unos resultados poco reproducibles y por lo tanto, a una subestimación del rendimiento del biogás (Angelidaki et al., 2009). Es aconsejable el uso de un inóculo fresco obtenido de un reactor anaeróbico activo, es decir, plantas de biogás de estiércol o lodos anaerobios de flujo ascendente que tratan aguas residuales domésticas.

La generación de electricidad a partir de biogás en los países de la OCDE, creció de 3,7 TWh en 1990 a 78,8 TWh en 2015, convirtiéndose en la tercera fuente de energía renovable de mayor crecimiento después de la energía eólica y solar. Este crecimiento representó casi el 80% de la producción de la OCDE en 2015 (IEA, 2016), proporcionando un impulso a la economía y mejorando el medioambiente (Abbasi et al., 2012)(Kumar and Saravanan, 2017).

Existe un rápido agotamiento de las fuentes de energía no renovables como el carbón y los combustibles fósiles que ha llevado a la degradación del medio ambiente, a los problemas de salud humana y el cambio climático mundial (Abbasi et al., 2012). El biogás generado no sólo puede proporcionar la generación de energía eléctrica del lixiviado, aguas glicerosas y lactosuero, sino que también tiene la ventaja de ser otra fuente de energía renovable que puede ser almacenada, lo que significa que su disponibilidad puede adaptarse a los diferentes patrones de demanda. Esto lo convierte en un componente esencial en las energías renovables (Wall et al., 2016).

En el presente estudio se valora el aprovechamiento energético del lixiviado, aguas glicerosas y lactosuero como cosustrato, en el proceso de codigestión anaerobia. El método BMP se utiliza para estudiar la biodegradabilidad o viabilidad de los procesos en una primera experiencia, en una segunda experiencia se estudia la posible adaptabilidad de los consorcios microbianos al residuo tratado y, en una tercera experiencia se evalúa la capacidad de especialización de dichos consorcios.

METODOLOGÍA

Inóculo

Se utilizó lodo en digestión mesófilo anaerobio como inóculo para acelerar el inicio del proceso. Este lodo se obtuvo de una estación de depuración de aguas residuales de El Coper, EMASESA, Sevilla, España. Las muestras se almacenaron en refrigeración a 4 °C para que no se alteren sus propiedades. Antes de comenzar el ensayo, se introdujo el inóculo en una cámara a 35 °C durante al menos 3 días. Este procedimiento se siguió para minimizar la producción endógena, readaptando el lodo a la temperatura del ensayo (Goncalves Ferreira, 2013). El inóculo presentó una caracterización de $11,8 \pm 1,1$ g L⁻¹ ST, $8,1 \pm 0,9$ g L⁻¹ SV, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1: Composición del Inóculo.

Parámetros	Unidades	Inoculo
DQO	g L ⁻¹	10,5 ± 0,9
Sólidos Totales (ST)	g L ⁻¹	11,8± 1,1
Sólidos Volátiles (SV)	g L ⁻¹	8,1 ± 0,9
Materia Volátil (MV)	%	68,09
pH		7,0 ± 0,1
Conductividad	mS cm ⁻¹	11,2 ± 0,2
Alcalinidad	mg CaCO ₃ L ⁻¹	3673 ±23
AGV	mg CaCO ₃ L ⁻¹	317±11
Relación AGV/Alcalinidad		0,09

Sustrato

El sustrato de referencia utilizado es el Fango mixto (mezcla de lodo primario y secundario), el cual se obtuvo de la estación de depuración de aguas residuales El Coper, EMASESA, Sevilla, España.

Se usó el fango mixto como referencia en esta investigación, ya que es habitual su tratamiento en digestores anaerobios de estaciones de depuración de aguas residuales con buenos resultados y repetitivos, así como los numerosos estudios relacionados sobre el mismo (Zhen et al., 2017) .

Tabla 2: Caracterización Sustrato.

Parámetros	Unidades	Sustrato (Fango Mixto)
DQO	g L ⁻¹	26,7 ± 1,8
Sólidos Totales (ST)	g L ⁻¹	27,3 ± 1,5
Sólidos Volátiles (SV)	g L ⁻¹	16,3± 1,6
pH		5,5 ± 0,2
Conductividad	mS cm ⁻¹	4,3 ± 0,5

Cosustratos

Los cosustratos utilizados en este estudio son: el lixiviado, aguas glicerosas y lactosuero, a los que no se les aplica ningún tratamiento previo antes de los ensayos. El lixiviado procede del vertedero de residuos no peligrosos de la Mancomunidad de La Vega, Sevilla, el lactosuero de la fábrica de quesos los Vázquez. En el caso de las aguas glicerosas han sido proporcionadas por Entaban Biocombustibles SA. Todos los cosustratos se han mezclado con fango mixto. La gran cantidad de materia orgánica que poseen las mezclas (tabla 3) sugiere que pueden ser valiosos para aumentar la producción de biogás en codigestión anaerobia, siendo esto el principal indicador en el ensayo y demostrando su viabilidad en el proceso. Esta posibilidad puede ser una alternativa para su valoración energética en los procesos de combustión.

Tabla 3: Caracterización mezcla sustrato –Cosustrato.

Parámetros	Unidades	Mezcla sustrato-Cosustrato		
		FM-Lixiviado	FM-Glicerina	FM-Lactosuero
DQO	g L ⁻¹	21,9 ± 1,4	59,3 ± 1,6	34,2 ± 1,5
Sólidos Totales (ST)	g L ⁻¹	23,7 ± 1,8	41,5 ± 1,7	26,9 ± 1,4
Sólidos Volátiles (SV)	g L ⁻¹	13,3 ± 1,5	27,7 ± 1,3	17,9 ± 1,6
pH		7,2 ± 0,5	2,5 ± 0,5	5,3 ± 0,2
Conductividad	mS cm ⁻¹	8,8 ± 0,4	12,8 ± 0,6	6,7 ± 0,4

Biochemical Methane Potential (BMP)

Con el fin de determinar la viabilidad anaerobia de los sustratos, se realizaron pruebas de BMP. La tecnología BMP proporciona el volumen de metano producido en condiciones normales por unidad de sustrato añadido, de manera que se puede determinar la productividad del biogás del sustrato (Nielfa et al., 2015).

Como digestores discontinuos, se utilizaron 30 botellas de vidrio borosilicato de 250 mL (en lo sucesivo denominadas digestores). Cada botella estaba equipada con un septum de goma, que permite tomar mediciones de presión diferencial. Los digestores se incubaron en agitación y a temperatura mesófila, entre 35-36 °C utilizando un equipo agitador (New Brunswick Scientific, agitador giratorio G10) a 150 rpm, durante 20-26 días con un volumen de trabajo total de 150 mL. Siguiendo el documento descrito por (Field, J., Sierra-Alvarez, R., Lettinga, 1988) (Soto et al., 1993), (Fdz-Polanco et al., 2005).

Cada reactor discontinuo contiene inóculo y una mezcla de sustrato-cosustrato, calculado a partir de la proporción de 0,5 gSV sustrato / gSV inóculo, ya que ofrece la cantidad óptima de alimentación a los microorganismos.

El volumen de gas producido se midió diariamente (Angelidaki et al., 2009), con el medidor de presión IFM PN5007. La composición gaseosa se analizó pasando el gas a través de un baño de NaOH 3N para capturar el CO₂. El gas resultante se asumió como metano, obteniendo el volumen de metano producido (Veluchamy and Kalamdhad, 2017).

La relación de 0,5 gSV Sustrato /gSV inóculo que se eligió podría ser un valor elevado respecto a estudios previos realizados (Angelidaki et al., 2009). Los valores de biodegradabilidad obtenidos en la prueba de BMP están fuertemente afectados por el valor de esta relación, a mayor proporción de Sustrato/Inóculo, mayor es la velocidad en la producción de biogás (Moreno-Andrade and Buitrón, 2003).

Para llevar a cabo la prueba de viabilidad, se deben proporcionar a los microorganismos del medio los elementos esenciales que son necesarios para su crecimiento, tales como nutrientes, vitaminas y oligoelementos. Por lo tanto, se añadieron FeCl₃.4H₂O, CoCl₂.6H₂O, MnCl₂.4H₂O, CuCl₂.2H₂O, ZnCl₂, H₃BO₃, EDTA, NH₄Cl, KH₂PO₄, CaCl₂.H₂O y MgSO₄.4H₂O (tabla 4)(Goncalves Ferreira, 2013). El volumen que se agrega es de 1 mL de solución por litro de inóculo.

Tabla 4: Micronutrientes y Macronutrientes.

Macronutrientes	Concentración	Unidades
NH₄Cl	170	gL ⁻¹
KH₂PO₄	37	gL ⁻¹
CaCl₂.H₂O	8	gL ⁻¹
MgSO₄.4H₂O	9	gL ⁻¹
Micronutrientes	Concentración	Unidades
FeCl₃.4H₂O	2.000	mgL ⁻¹
CoCl₂.6H₂O	2.000	mgL ⁻¹
MnCl₂.4H₂O	500	mgL ⁻¹
CuCl₂.2H₂O	30	mgL ⁻¹
ZnCl₂	50	mgL ⁻¹
H₃BO₃	5	mgL ⁻¹

(NH₄)₆.Mo₇O₄.4H₂O	90	mgL ⁻¹
Na₂SeO₃.5H₂O	100	mgL ⁻¹
NiCl₂.6H₂O	50	mgL ⁻¹

Se suministró una solución tampón con el fin de neutralizar los protones que se generan durante el proceso de descomposición del sustrato y mantener el pH del medio lo más constante posible. Una vez preparadas las mezclas, el valor de pH se fijó a 7,5 usando HCl (0,1 N) o NaOH (0,1N). Las pruebas se realizaron por triplicado.

Finalmente, los digestores en discontinuo se sellaron para crear y mantener las condiciones anaeróbicas hasta el final del ensayo, y, asimismo, se colocaron en un equipo agitador bajo temperatura controlada.

El volumen de biogás generado en cada botella se calculó a partir de la presión medida en cada uno.

Como patrón de comportamiento se utilizó FM (fango mixto) procedente de la EDAR El Copero, Sevilla España. De esta forma, se puede comparar la producción de biogás generado con los residuos investigados (lixiviado, aguas de glicerina y lactosuero) y, la producción de biogás generado con FM en EDAR, ya que la digestión anaerobia en EDAR está sobradamente estudiada. BMP se obtuvo como el biogás total producido dividido por el respectivo contenido de muestra SV. Los resultados se normalizaron con respecto al biogás total producido a partir de controles negativos preparados sólo con inóculo. Los ensayos de BMP se realizaron por triplicado.

$$V_{\text{Biogas}} = ((V_{\text{gas camera}} * T) / (P * T_{\text{ensayo}})) * P_{\text{medida}} / 1,101325$$

V_{Biogas}= volumen de biogas obtenido (mL)

V_{gas camera} = Volumen de gas en la cámara del BMP (150 mL)

T = Temperatura de referencia (273K)

P = presión de referencia (1 atm)

T_{ensayo}= temperatura ensayo (309 K)

P_{medida} = presión medida durante el ensayo (mbar)

El BMP determina la viabilidad de la utilización de cosustratos en el proceso de codigestión anaerobia. Para llevar a cabo la utilización de los residuos en una industria se debe hacer un prototipo a escala laboratorio.

Productividad de metano

Los rendimientos de biogás y metano al final de cada ensayo se calcularon dividiendo el volumen acumulado de biogás o metano por la masa de sustrato SV en la cantidad adicionada en los digestores.

Viabilidad y adaptabilidad de los procesos anaerobios

Para comprobar si la adición de los cosustratos fue viable anaeróbicamente, se realizó el primer experimento (BMP) de 21 días de ensayo, periodo de tiempo en el cual se estabiliza la producción de biogás. Como inóculo empleado en el primer experimento se utiliza el fango digerido extraído de los digestores de la EDAR.

Para evaluar la adaptabilidad y especialización de la biomasa, se realizaron los experimentos 2 y 3 siguiendo la metodología explicada en el punto 2.4. La única diferencia en la metodología es el inóculo empleado en cada uno de los experimentos:

- Experimento 1: El inóculo utilizado fue lodo en digestión mesófilo anaerobio procedente de EDAR.
- Experimento 2: los digestores discontinuos del experimento 1 se mantienen en reposo y refrigeración a 4°C durante 24 horas, se produce la decantación para obtener así la biomasa metanogénica adaptada al sustrato, este decantado es el inóculo.

- Experimento 3: el inóculo se obtiene cómo se explica en el experimento anterior pero utilizando la biomasa decantada de los digestores discontinuos del experimento 2.

Métodos Analíticos

La caracterización de cada sustrato e inóculo incluyó la determinación de los siguientes parámetros: pH, conductividad, demanda química de oxígeno (DQO), Sólidos Totales (ST), Sólidos Volátiles (SV), Sólidos Fijos (SF), Alcalinidad y Ácidos Grasos Volátiles (AGV).

La medida de pH, se realizó con un potenciómetro (Hatch HQ40D, precisión $\pm 0,01$) y, la conductividad con un medidor multiparamétrico (EUTECH PCD 650, precisión 0,0001 mS). La DQO se midió por titulación de sulfato de amonio ferroso tras una digestión total con Ag_2SO_4 y dicromato de potasio a 150 °C durante dos horas (APHA, 1998). Los ST se analizaron ponderando las muestras antes y después del secado a 105 °C. Los SV se determinaron por pérdida de ignición a 550 °C durante 20 minutos (APHA, 1998). Alcalinidad y AGV se midieron de acuerdo con el procedimiento estándar dado en (APHA, 1998). El volumen de biogás se calculó a partir de la medida de la presión con un transmisor de presión (IFM PN5007) con un rango de medida entre 0 y 1 bar ± 1 mbar.

El FM (fango mixto) se utilizó en el BMP como referencia viable de producción de biogás frente al BMP de los cosustratos en estudio, para evaluar la mejora obtenida a partir de su uso como cosustrato.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Viabilidad (Experimento 1).

Caracterización de influentes y efluentes.

La caracterización inicial y final del contenido de los BMP del experimento 1, se muestra en la tabla 5. El pH se mantiene constante tanto al inicio como al final de los ensayos de FM-Lixiviado, FM-Aguas de glicerina, FM-Lactosuero y FM, dentro del rango óptimo (6,5-7,5) para procesos anaerobios (Işik and Sponza, 2005).

El porcentaje de DQO eliminada de FM-Lixiviado, FM-Aguas de glicerina es muy similar a la del FM, siendo, ligeramente superior la eliminación de DQO del FM-Lactosuero.

Los AGV iniciales son mayores en los digestores con los cosustratos de aguas glicerosas y lactosuero que en el Fango mixto. En términos de disminución de AGV, en el FM-Lactosuero es de 32,3%, en el FM-Aguas glicerosas de 29,8%, y en el FM-lixiviado es de 1%, siendo el del fango mixto de un 16,5%. El porcentaje de disminución del VFA es inferior en FM-lixiviado debido a una baja producción de biogás. La alcalinidad en el BMP FM-Lixiviado y FM-Aguas glicerosas aumenta al final del ensayo, y muestra concentraciones cercanas al óptimo (Gerardi, 2003), lo que indica una gran capacidad tampón de las soluciones hacia eventuales cambios en el pH. El tampón protege contra una posible acidificación de los reactores dando un pH del mismo orden que el óptimo para microorganismos metanogénicos (Fannin, 1987). En los BMP de FM-Aguas glicerosas disminuye la alcalinidad, lo que indica una inestabilidad en el proceso.

La relación AGV/Alcalinidad obtenida en el experimento 1 para cada uno de los cosustratos es inferior a 0,4-0,5 (equivalentes de ácido acético / equivalentes de CaCO_3) (Borja et al., 2004), por lo que se considera que el proceso está funcionando favorablemente sin riesgo de acidificación. Esta relación se utiliza como un indicador de la estabilidad del proceso.

Tabla 5: Caracterización antes y después del BMP, Experimento 1.

Experimento 1		Inoculo (I)+Sustrato(FM) +Cosustrato			
Parámetros		I+FM	I+FM-Lixiviado	I+FM-Aguas glicerosas	I+FM-Lactosuero
DQO (g L ⁻¹)	Entrada	21,6 ±1,5	18,5±1,6	25,4 ±1,2	24,6 ±1,6
	Salida	10,5 ±1,6	9,0 ±1,5	15,2 ±1,4	10,9 ±1,4
	Eliminación (%)	51,4±1,4	51,4±1,5	52,4±1,3	55,6±1,5
ST (g L ⁻¹)	Entrada	17,4±1,3	14,8±1,2	19,7±1,6	18,9±1,4
	Salida	12,9 ±1,2	10,5 ±1,4	15,2±1,4	13,9 ±1,5
	Eliminación (%)	25,8±1,2	29,1±1,3	22,8±1,1	26,5±1,3
SV (g L ⁻¹)	Entrada	13,5 ±1,2	11,2 ±1,3	13,7 ±1,6	13,7±1,5
	Salida	10,5 ±1,1	8,3 ±1,4	10,8 ±1,8	8,9 ±1,1
	Eliminación (%)	22,2±1,2	25,8±1,4	21,2±1,2	35,1±1,3
pH	Entrada	7,9 ±0,1	8,3±0,2	7,5 ±0,1	7,6 ±0,1
	Salida	7,6 ±0,3	7,9 ±0,5	7,7 ±0,3	7,8 ±0,3
Conductividad(mS cm ⁻¹)	Entrada	6,5 ±0,2	7,3 ±0,2	8,7 ±0,3	6,9 ±0,2
	Salida	13,3±0,5	13,4±0,3	13,3±0,5	13,1±0,2
Alcalinidad (mg CaCO ₃ L ⁻¹)	Entrada	3469 ± 15	3572± 12	3837 ± 13	3571± 13
	Salida	7922 ±15	6707±15	2964±11	7389±14
AGV (mg CH ₃ COOH L ⁻¹)	Entrada	345 ±13	321±13	403 ±14	620 ±13
	Salida	288 ±11	318 ±13	283 ±12	419 ±12
Relación AGV/Alcalinidad	Entrada	0,10	0,07	0,09	0,14
	Salida	0,04	0,04	0,08	0,05

Producción de biogás y productividad de metano

La figura 1, ilustra las tasas de producción acumulada de biogás obtenida para el sustrato y cosustratos utilizados en el proceso. Como se puede observar, el volumen de biogás acumulado durante los 21 días de ensayo para el FM-Lactosuero es de 481 mL, en el FM-aguas glicerosas es de 339 mL siendo superiores ambos cosustratos con respecto al sustrato de referencia 253 mL del FM, mientras que el FM-lixiviado es muy inferior (146 mL).

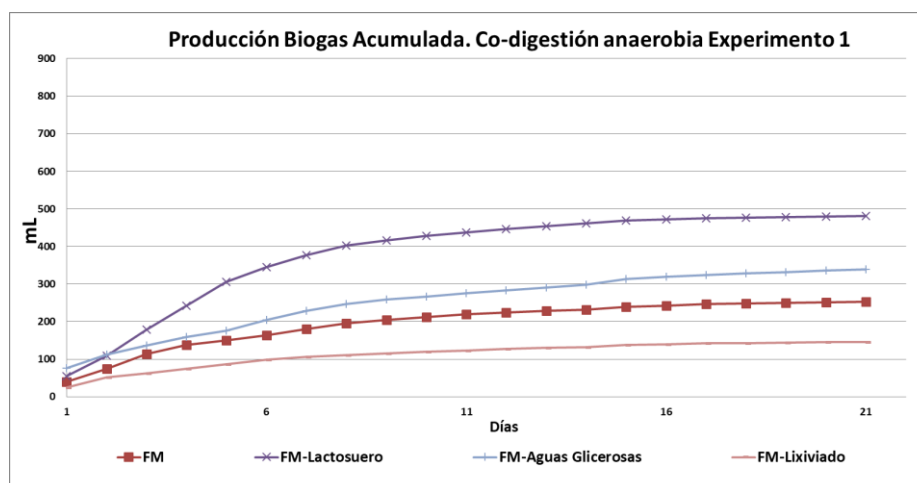


Figura 1: Producción de Biogás acumulado de la experiencia 1.

La productividad de metano representa el volumen de CH₄ (mL) producido por la cantidad de solidos volátiles añadidos (mLCH₄ g⁻¹SV).

El potencial metanogénico resultante del FM-lactosuero es de 672 mLCH₄/gSV, FM-lixiviado es de 202 mLCH₄/gSV, FM-Aguas glicerosas es de 398 mLCH₄/gSV, el del FM es de 386 mLCH₄/gSV. La adición del FM-lactosuero aumenta la producción de biogás y la producción de metano y no afecta a la estabilidad de la codigestión anaerobia, siendo viable este sustrato para su uso en codigestión anaerobia. La adición del FM-lixiviado como cosustrato en una codigestión anaerobia disminuye la producción de biogás y la productividad, tal y como se observa en las figuras 1 y 2. El comportamiento de FM-Aguas glicerosas es prácticamente igual al comportamiento del Fango mixto.

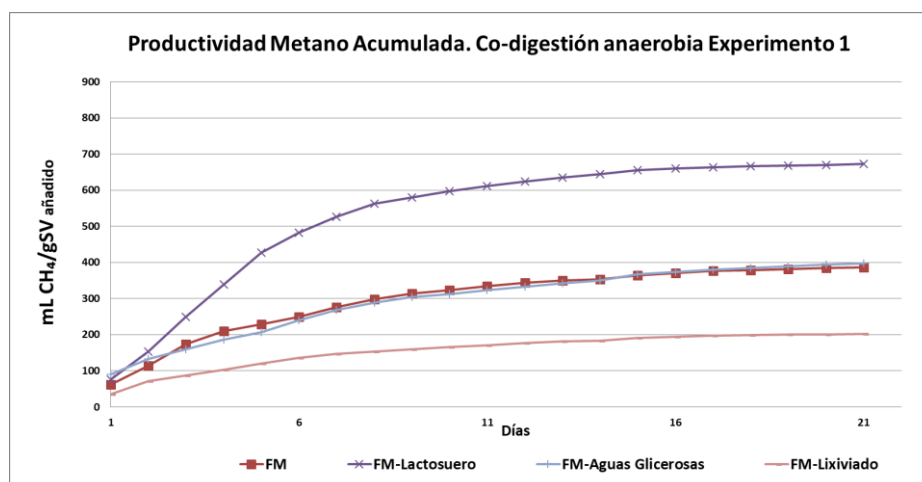


Figura 2: Productividad de metano acumulada, experiencia 1.

Viabilidad, adaptabilidad y especialización de la biomasa, Experimento 1, 2 y 3.

Una vez verificada la viabilidad del proceso en el experimento 1, se procede a estudiar la adaptabilidad de los consorcios microbianos a la adición de los cosustratos. Se puede entender que los SV son una relación aproximada del tamaño de los consorcios microbianos implicados en los procesos de cada digestor anaerobio.

Hay un porcentaje de eliminación de DQO menor en las experiencias 2 y 3 del BMP de FM-lixiviado respecto de la experiencia 1 y en el FM-aguas glicerosas, se ha eliminado un 9% menos de DQO, lo que corrobora la baja producción de biogás. En el caso del FM-lactosuero aumenta un 3% la eliminación de DQO respecto de experimento 3 al 1.

El valor de la relación en el estudio realizado para el FM-lixiviado, FM-Lactosuero, FM-aguas glicerosas (equivalente de ácido acético / equiv. CaCO₃), y para el FM, son similares en los tres experimentos y claramente inferiores al valor límite (Borja et al., 2004).

Tabla 6: Caracterización antes y después del BMP, Experimento 2.

Experimento 2 Parámetros		Inoculo (I)+Sustrato(FM) +Cosustrato			
		I+FM	I+FM-Lixiviado	I+FM-Aguas glicerosas	I+FM-Lactosuero
DQO (g L ⁻¹)	Entrada	21,3 ±1,2	19,8±1,7	23,9 ±1,3	23,4 ±1,5
	Salida	9,6 ±1,6	10,3 ±1,3	13,4 ±1,1	9,9 ±1,0
	Eliminación (%)	54,9±1,5	47,9±1,6	43,9±1,2	57,6±1,3
ST (g L ⁻¹)	Entrada	20,8±1,5	17,7±1,2	22,2±1,2	19,0±1,7
	Salida	12,7 ±1,4	11,5 ±1,6	15,2 ±1,3	11,9±1,6
	Eliminación (%)	38,9±1,2	35,1±1,3	31,5±1,3	37,4±1,1
SV (g L ⁻¹)	Entrada	10,8 ±1,2	8,9±1,0	11,5±1,5	9,8 ±1,1
	Salida	8,1 ±1,1	6,7 ±1,5	8,8 ±1,4	6,6 ±1,0
	Eliminación (%)	25,8±1,2	25,1±1,1	23,4±1,2	32,7±1,2
pH	Entrada	7,4 ±0,2	7,5 ±0,5	7,0 ±0,2	7,0 ±0,2
	Salida	7,6 ±0,5	7,9 ±0,3	7,7 ±0,4	7,8 ±0,4

Conductividad(mS cm ⁻¹)	Entrada	6,6 ±0,2	8,2 ±0,3	8,8 ±0,5	7,3 ±0,2
	Salida	13,3±0,4	13,4±0,7	13,3±0,5	13,1±0,4
Alcalinidad (mg CaCO ₃ L ⁻¹)	Entrada	4011± 12	4186± 13	3500± 12	4120± 18
	Salida	6411±18	6201±14	6000±15	6600±19
AGV (mg CH ₃ COOH L ⁻¹)	Entrada	511 ±13	481±14	841±15	1195±14
	Salida	250±11	250±12	793±16	341±10
Relación AGV/Alcalinidad	Entrada	0,13	0,11	0,20	0,24
	Salida	0,04	0,04	0,11	0,04

Tabla 7: Caracterización antes y después del BMP, Experimento 3.

Experimento 3		Inoculo (I)+Sustrato(FM) +Cosustrato			
Parámetros		I+FM	I+FM-Lixiviado	I+FM-Aguas glicerosas	I+FM-Lactosuero
		DQO (g L ⁻¹)	Entrada	22,1 ±1,7	20,4 ±1,6
Salida	11,2 ±1,3		10,5 ±1,2	13,5 ±1,4	9,9 ±1,0
Eliminación (%)	49,3±1,4		48,5±1,2	44,9±1,3	59,5±1,3
ST (g L ⁻¹)	Entrada	19,7±1,8	17,0±1,2	20,1±1,4	21,4±1,5
	Salida	12,8±1,5	11,4±1,3	14,9±1,8	11,8±1,4
	Eliminación (%)	35,1±1,1	32,9±1,4	25,9±1,2	44,8±1,2
SV (g L ⁻¹)	Entrada	11,4 ±1,7	9,1 ±1,5	12,0 ±1,2	10,1 ±1,2
	Salida	7,6 ±1,3	6,7 ±1,2	9,5 ±1,6	6,6 ±1,5
	Eliminación (%)	33,3±1,3	26,3±1,2	20,8±1,4	34,6±1,4
pH	Entrada	7,4 ±0,2	7,5 ±0,2	7,0 ±0,2	7,0 ±0,4
	Salida	7,6 ±0,3	7,9 ±0,3	7,7 ±0,5	7,8±0,3
Conductividad(mS cm ⁻¹)	Entrada	6,7 ±0,2	8,2 ±0,2	8,8 ±0,1	7,3 ±0,3
	Salida	13,4±0,5	13,5±0,5	13,4±0,6	13,08±0,8
Alcalinidad (mg CaCO ₃ L ⁻¹)	Entrada	4286± 14	4184± 12	3469± 13	4184± 17
	Salida	7800±17	8600±13	5801±18	8001±18
AGV (mg CH ₃ COOH L ⁻¹)	Entrada	694±11	611±12	972 ±15	1324±17
	Salida	344±12	352±12	780±16	471±15
Relación AGV/Alcalinidad	Entrada	0,16	0,12	0,23	0,26
	Salida	0,04	0,03	0,11	0,05

Producción de biogás

Las figuras 3,4 y 5 muestran las variaciones temporales de la producción diaria y acumulativa de biogás para los 3 experimentos de los cosustratos estudiados. En cuanto a la producción diaria de biogás figura 3, se observa inicialmente en cada uno de los 3 experimentos, que los valores son muy pronunciados para el primer día de incubación para el FM-Lactosuero, debido a la presencia de materia orgánica fácilmente biodegradable. Al mismo tiempo, se observa que el volumen de biogás producido es mayor que el producido en los ensayos de FM, lo que confirma la presencia de consorcios microbianos suficientes, capaces de metabolizar directamente el sustrato ensayado (Aragaw et al., 2013). Además, la

ausencia de una fase de latencia indica que el período de aclimatación de los microorganismos es rápido, pero también la ausencia de sustancias que pudieran haber tenido un efecto tóxico y/o inhibitorio sobre ellos (Nopharatana et al., 2007).

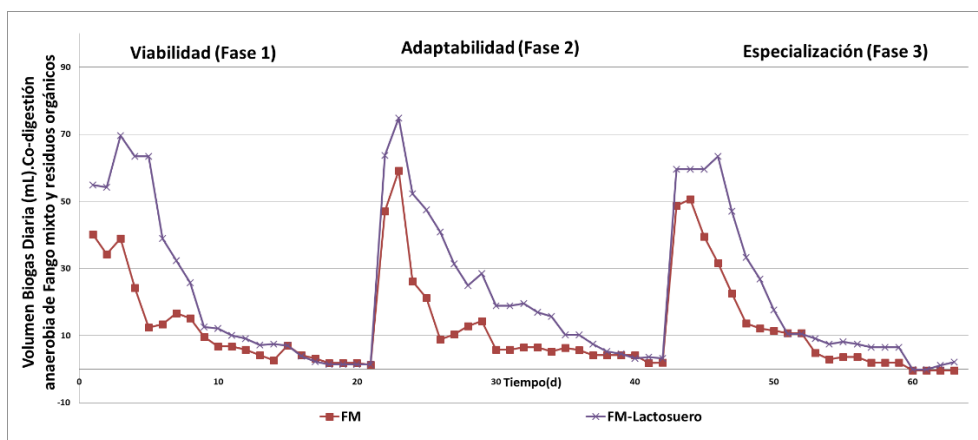


Figura 3: Producción diaria de biogás en las 3 experiencias, FM-Lactosuero.

En la Figura 4, se observa que a medida que van transcurriendo los días de ensayo en cada uno de los 3 experimentos de FM-Aguas Glicerosas, los valores de producción de biogás disminuyen progresivamente, debido a la presencia de sales de sulfato en este cosustrato, que son tóxicos para los consorcios microbianos. Al mismo tiempo, se observa que el volumen de biogás producido es menor que el de los ensayos de FM en el experimento 3, lo que confirma la no adaptación y la no especialización de consorcios microbianos.

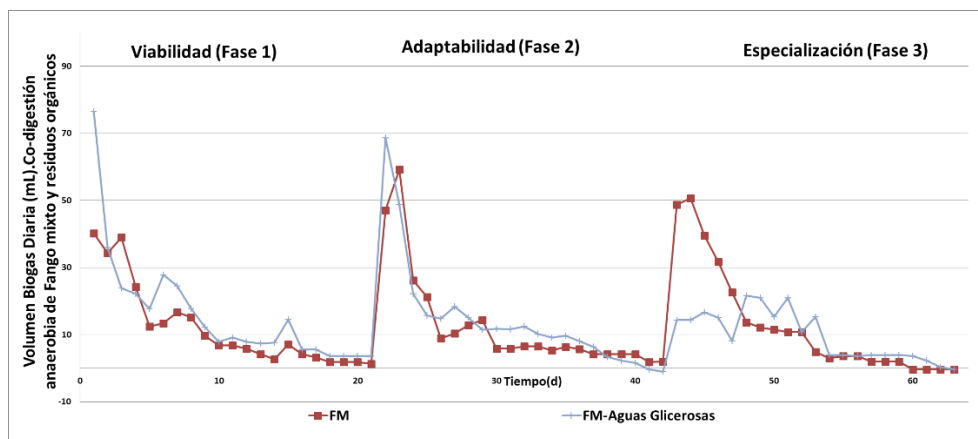


Figura 4: Producción diaria de biogás en las 3 experiencias, FM-Aguas Glicerosas.

En cada uno de los 3 experimentos, los valores de producción de biogás de FM-Lixiviado (figura 5) son menores al patrón de comportamiento, probablemente debido a la presencia compuestos difícilmente biodegradables que son tóxicos para los consorcios microbianos, por lo que no existe adaptación ni especialización de consorcios microbianos.

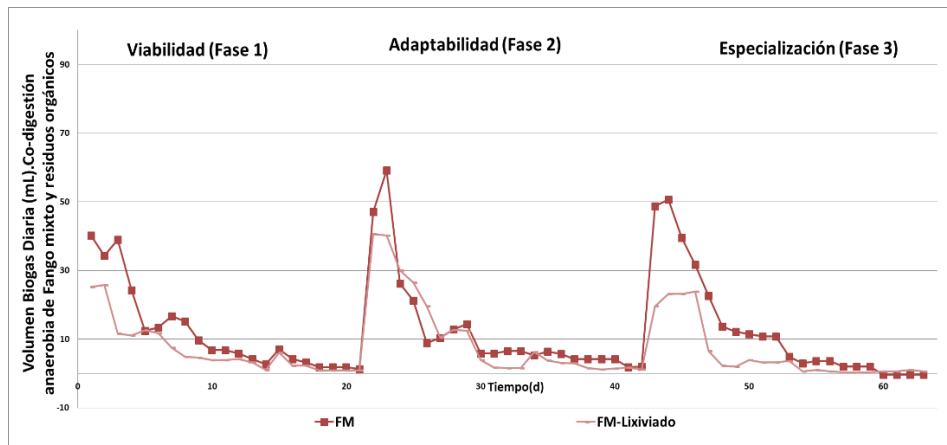


Figura 5: Producción diaria de biogás en las 3 experiencias, FM-Lixiviado.

Cómo se observa en la Figura 6, hay un aumento progresivo de productividad de metano ($\text{mL CH}_4/\text{gSV}$) con respecto a cada uno de los 3 experimentos. La productividad de metano del FM-lactosuero es de $2113 \text{ mL CH}_4/\text{gSV}$, significativamente superior al de FM que tiene una productividad de metano de $1146 \text{ mL CH}_4/\text{gSV}$. La adición del lactosuero aumenta el rendimiento de metano y no afecta a la estabilidad del proceso, siendo viable este cosustrato para su uso en codigestión anaerobia.

En cambio las aguas de glicerina y el lixiviado, presenta una productividad de metano inferior al patrón de comportamiento (FM, $1146 \text{ mL CH}_4/\text{gSV}$), siendo más notoria en el ensayo FM-Lixiviado ($626 \text{ mL CH}_4/\text{gSV}$). En el ensayo de FM-aguas glicerosas $937 \text{ mL CH}_4/\text{gSV}$.

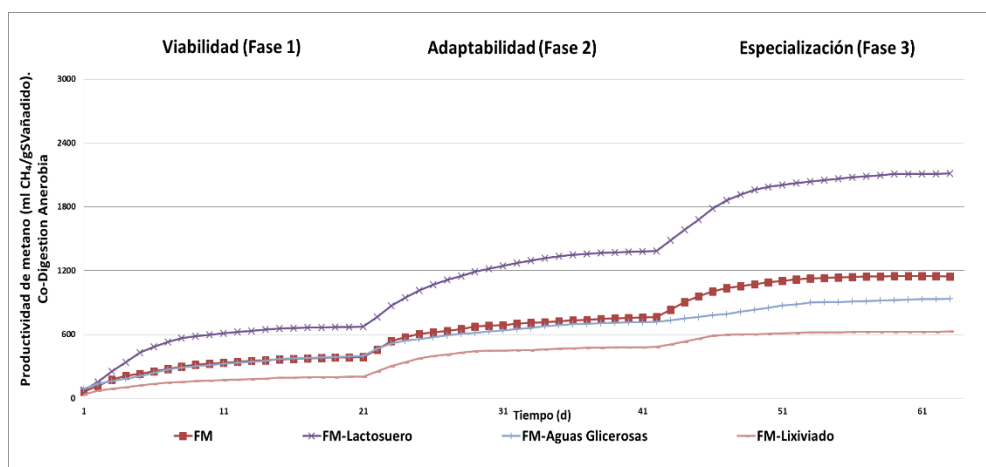


Figura 6: Productividad de Metano Acumulada, 3 experimentos.

CONCLUSIONES

Esta investigación se centró en la evaluación de los residuos: lixiviado, aguas glicerosas y del subproducto de la industria láctea (lactosuero), como cosustratos potenciales para la codigestión anaerobia utilizando ensayos convencionales de potencial bioquímico de metano. Para la relación empleada de $0,5 \text{ gSV Sustrato /gSV inóculo}$, el FM-Lactosuero tiene un alta producción de biogás y, los consorcios microbianos se adaptan y especializan rápidamente. Se ha demostrado que el lactosuero con fango mixto en codigestión anaerobia es viable y no presenta toxicidad e inhibición en ninguna de las 3 experiencias, ya que hay un aumento de producción de biogás en cada una de ellas, siendo notablemente superior en la experiencia 3.

El FM-aguas glicerosas presentan problemas de estabilidad en el proceso de codigestión, teniendo una disminución progresiva en la producción de biogás en cada una de las tres experiencias, debido a la

alta cantidad de sulfatos que contienen las aguas glicerosas estudiadas. El proceso se va acidificando y tiene un comportamiento inhibitorio. El gas generado tiene unas altas concentraciones de ácido sulfhídrico, por lo que no es aconsejable utilizar este residuo en codigestión anaerobia.

El FM-Lixiviado presenta una producción de biogás por debajo del patrón de comportamiento en cada una de las experiencias aún eliminando alrededor del 50% de DQO, lo cual indica que es un residuo tóxico, y no debe utilizarse como cosustrato con fango mixto en codigestión anaerobia.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Empresa Metropolitana de Abastecimiento y Saneamiento de Aguas de Sevilla. EMASESA, por el apoyo técnico y el suministro de fango mixto e inóculo que nos ha proporcionado.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbasi, T., Tauseef, S.M., Abbasi, S.A., 2012. Anaerobic digestion for global warming control and energy generation—An overview. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16, 3228–3242. doi:10.1016/j.rser.2012.02.046
- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J.L., Guwy, A.J., Kalyuzhnyi, S., Jenicek, P., van Lier, J.B., 2009. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Sci. Technol.* 59, 927. doi:10.2166/wst.2009.040
- APHA, 1998. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed.
- Appels, L., Assche, A. Van, Willems, K., Degreève, J., Impe, J. Van, Dewil, R., 2011. Peracetic acid oxidation as an alternative pre-treatment for the anaerobic digestion of waste activated sludge. *Bioresour. Technol.* 102, 4124–4130. doi:10.1016/j.biortech.2010.12.070
- Aragaw, T., Andargie, M., Gessesse, A., 2013. Co-digestion of cattle manure with organic kitchen waste to increase biogas production using rumen fluid as inoculums. *Int. J. Phys. Sci.* 8, 443–450. doi:10.5897/IJPS2013.3863
- Arnaiz, C., Gutierrez, J.C., Lebrato, J., 2006. Support material selection for anaerobic fluidized bed reactors by phospholipid analysis. *Biochem. Eng. J.* 27, 240–245. doi:10.1016/j.bej.2005.08.013
- Borja, R., Rincón, B., Raposo, F., Sánchez, E., Martín, A., 2004. Assessment of kinetic parameters for the mesophilic anaerobic biodegradation of two-phase olive pomace. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 53, 71–78. doi:10.1016/j.ibiod.2003.10.002
- Calabrò, P.S., Greco, R., Evangelou, A., Komilis, D., 2015. Anaerobic digestion of tomato processing waste: Effect of alkaline pretreatment. *J. Environ. Manage.* 163, 49–52. doi:10.1016/j.jenvman.2015.07.061
- Charles, W., Walker, L., Cord-Ruwisch, R., 2009. Effect of pre-aeration and inoculum on the start-up of batch thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste. *Bioresour. Technol.* 100, 2329–2335. doi:10.1016/j.biortech.2008.11.051
- Dasari, M.A., Kiatsimkul, P.P., Sutterlin, W.R., Suppes, G.J., 2005. Low-pressure hydrogenolysis of glycerol to propylene glycol. *Appl. Catal. A Gen.* 281, 225–231. doi:10.1016/j.apcata.2004.11.033
- De Vrieze, J., Raport, L., Willems, B., Verbrugge, S., Volcke, E., Meers, E., Angenent, L.T., Boon, N., 2015. Inoculum selection influences the biochemical methane potential of agro-industrial substrates. *Microb. Biotechnol.* 8, 776–786. doi:10.1111/1751-7915.12268
- Donoso-Bravo, A., Carballa, M., Filippi, G.R., Chamy, R., 2009. Treatment of low strength sewage with high suspended organic matter content in an anaerobic sequencing batch reactor and modeling application. *Electron. J. Biotechnol.* 12, 0–0. doi:10.2225/vol12-issue3-fulltext-15
- Fannin, K.F., 1987. *Anaerobic Digestion of Biomass: Start-up, Operation, Stability and Control*.
- Fdz-Polanco, F., Nieto, P., Pérez Elvira, S., van der Zee, F.P., Fdz-Polanco, M., García, P.A., 2005. Automated equipment for anaerobic sludge parameters determination. *Water Sci. Technol.* 52, 479 LP-485.

- Field, J., Sierra-Alvarez, R., Lettinga, G., 1988. Ensayos anaerobios, in: Proceedings of the 4th Symposium on Wastewater Anaerobic Treatment. Valladolid, pp. 52–81.
- Gerardi, M.H., 2003. The Microbiology of Anaerobic Digesters, John Wiley. ed.
- Goncalves Ferreira, L.C., 2013. Evaluación de la biodegradabilidad anaerobia de residuos orgánicos pre-tratados térmicamente. Valladolid.
- Gu, Y., Chen, X., Liu, Z., Zhou, X., Zhang, Y., 2014. Effect of inoculum sources on the anaerobic digestion of rice straw. *Bioresour. Technol.* 158, 149–155. doi:10.1016/j.biortech.2014.02.011
- Hagos, K., Zong, J., Li, D., Liu, C., Lu, X., 2017. Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 76, 1485–1496. doi:10.1016/j.rser.2016.11.184
- Iacovidou, E., Ohandja, D.-G., Voulvoulis, N., 2012. Food waste co-digestion with sewage sludge – Realising its potential in the UK. *J. Environ. Manage.* 112, 267–274. doi:10.1016/j.jenvman.2012.07.029
- IEA, I.E.A., 2016. Renewables Information [WWW Document].
- Işık, M., Sponza, D.T., 2005. Substrate removal kinetics in an upflow anaerobic sludge blanket reactor decolorising simulated textile wastewater. *Process Biochem.* 40, 1189–1198. doi:10.1016/j.procbio.2004.04.014
- Khoufi, S., Louhichi, A., Sayadi, S., 2015. Optimization of anaerobic co-digestion of olive mill wastewater and liquid poultry manure in batch condition and semi-continuous jet-loop reactor. *Bioresour. Technol.* 182, 67–74. doi:10.1016/j.biortech.2015.01.092
- Kumar, K.P., Saravanan, B., 2017. Recent techniques to model uncertainties in power generation from renewable energy sources and loads in microgrids – A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 71, 348–358. doi:10.1016/j.rser.2016.12.063
- Labatut, R.A., Angenent, L.T., Scott, N.R., 2011. Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates. *Bioresour. Technol.* 102, 2255–2264. doi:10.1016/j.biortech.2010.10.035
- Moreno-Andrade, I., Buitrón, G., 2003. Influence of the initial substrate to microorganisms concentration ratio on the methanogenic inhibition test, *Water Science and Technology*.
- Nielfa, A., Cano, R., Fdz-Polanco, M., 2015. Theoretical methane production generated by the co-digestion of organic fraction municipal solid waste and biological sludge. *Biotechnol. Reports* 5, 14–21. doi:10.1016/j.btre.2014.10.005
- Nopharatana, A., Pullammanappallil, P.C., Clarke, W.P., 2007. Kinetics and dynamic modelling of batch anaerobic digestion of municipal solid waste in a stirred reactor. *Waste Manag.* 27. doi:10.1016/j.wasman.2006.04.010
- Soto, M., Méndez, R., Lema, J.M., 1993. Methanogenic and non-methanogenic activity tests. Theoretical basis and experimental set up. *Water Res.* 27, 1361–1376. doi:10.1016/0043-1354(93)90224-6
- Veluchamy, C., Kalamdhad, A.S., 2017. Biochemical methane potential test for pulp and paper mill sludge with different food / microorganisms ratios and its kinetics. *Int. Biodeterior. Biodegradation* 117, 197–204. doi:10.1016/j.ibiod.2017.01.005
- Wall, D.M., Allen, E., O’Shea, R., O’Kiely, P., Murphy, J.D., 2016. Investigating two-phase digestion of grass silage for demand-driven biogas applications: Effect of particle size and rumen fluid addition. *Renew. Energy* 86, 1215–1223. doi:10.1016/j.renene.2015.09.049
- Weiland, P., 2010. Biogas production: current state and perspectives. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 85, 849–860. doi:10.1007/s00253-009-2246-7
- Zhen, G., Lu, X., Kato, H., Zhao, Y., Li, Y.-Y., 2017. Overview of pretreatment strategies for enhancing sewage sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: Current advances, full-scale application and future perspectives. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 69, 559–577. doi:10.1016/j.rser.2016.11.187

ESTABILIDAD FÍSICA DE MEZCLAS DE ACEITE ESENCIAL DE TOMILLO Y UN TENSIOACTIVO NO IÓNICO

Martín, María José; García, M^a Carmen; Ramírez, Pablo; Muñoz, José; Alfaro, M^a Carmen. Reología Aplicada. Tecnología de Coloides. Escuela Politécnica Superior, Universidad de Sevilla, C/ Virgen de África, 7, 41011, Sevilla, España.

RESUMEN

El aceite esencial de tomillo es un componente natural con propiedades antioxidantes y antimicrobianas; propiedades que lo hacen muy interesante en campos como el alimentario, el cosmético o el agroalimentario. Los alquil polipentósidos son una nueva clase de tensioactivos derivados de recursos agrícolas renovables como paja de trigo. Son tensioactivos respetuosos con el medio ambiente, ya que muestran alta y rápida biodegradabilidad, así como baja toxicidad. En este trabajo se ha estudiado un alquil polipentósido comercialmente conocido como Appyclean 6548. Este tensioactivo no iónico es sólido a temperatura ambiente y soluble en disolventes orgánicos por lo que para ser usado como emulsionante de emulsiones ecológicas O/W es necesario fundirlo en la fase oleosa. Por este motivo, en esta investigación se estudia el efecto del tratamiento térmico al que es sometida una mezcla aceite esencial de tomillo/Appyclean 6548 en relación en peso 90,9/9,1, sobre su estabilidad física. Adicionalmente, se investiga la influencia de dicho tratamiento sobre la estabilidad física de emulsiones aceite esencial de tomillo/W obtenidas con una fase dispersa de concentración equivalente a la estudiada en la fase previa. Para abordar los objetivos planteados se han usado técnicas como la difracción láser y barridos de retrodispersión de luz.

Palabras clave: *aceite esencial, emulsiones, tensioactivo no iónico.*

ABSTRACT

Thyme essential oil is a natural compound with antibacterial and antioxidant activity which are really interesting to be used as functional ingredient in food, cosmetics and agrochemical industries. Alkyl polypentosides are a new class of surfactants which coming from agricultural renewable resources as wheat straw. They are non-toxic and biodegradable surfactants commercially known as Appyclean. In this case, Appyclean 6548 was studied. This non-ionic surfactant is solid and it is immiscible in water so, the emulsifier was melted and dissolved in the oil phase. For this reason, the influence of thermal treatment was studied in a 90.9/9.1 mass ratio (thyme essential oil/Appyclean 6548) on physical stability of these dispersions. Additionally, this influence was investigated on the stability and droplet size distribution of thyme essential oil/W emulsions. In order to achieve this goal laser diffraction and multiple light scattering techniques were used.

Keywords: *essential oil, emulsions, non-ionic surfactant.*

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En los últimos años los aceites esenciales, como el aceite esencial de tomillo, han ganado un gran interés debido a sus propiedades antioxidantes, antimicrobianas, antiviral y actividad antifúngica. Estas propiedades los hacen ser muy deseables en industrias como la cosmética, alimentaria, farmacéutica o la agricultura (Chang, McLandsborough, & McClements, 2015).

No obstante, los aceites esenciales se caracterizan por ser hidrófobos por lo que su utilización en productos de base acuosa está limitada (Rodríguez-Rojo, Varona, Núñez, & Cocero, 2012). Además, su olor intenso hace que la incorporación en altas dosis sea difícil en determinados tipos de productos. Este problema podría ser resuelto mediante la formulación de emulsiones de tipo aceite en agua (O/W). Numerosos trabajos se están desarrollando en los que la fase orgánica es un aceite esencial que procede de una planta aromática (García, Alfaro y Muñoz, 2015; Trujillo et al., 2016).

Una emulsión consiste en la dispersión de dos líquidos inmiscibles donde uno de ellos se encuentra disperso en el otro en forma de gotas. Las emulsiones son termodinámicamente inestables siendo imprescindibles para su formación la introducción de un tercer componente: el emulsionante. El agente emulsionante se localiza en la interfase de ambos líquidos, reduciendo la tensión interfacial y contribuyendo en la mayoría de los casos a una mayor estabilidad (Dickinson, 1989). En esta investigación se utiliza como emulsionante un tensioactivo no iónico del tipo alquilpolipentósido derivado de la biomasa de trigo que muestra alta y rápida biodegradabilidad y baja toxicidad. Además, está libre de polietilenglicol (PEG), no es una fuente de compuestos orgánicos volátiles (VOCs) y no contiene conservantes. Se trata, pues, de un tensioactivo respetuoso con el medio ambiente y, por lo tanto, ideal para formulaciones verdes. Ahora bien, el tensioactivo empleado en esta investigación es sólido a temperatura ambiente y soluble en la fase oleosa. Por tanto, para ser usado como emulsionante previamente es necesario fundirlo y disolverlo en el aceite esencial.

En este trabajo se estudia el efecto de la historia térmica experimentada por una mezcla de aceite esencial de tomillo y alquilpolipentósido sobre su estabilidad física así como la influencia de dicho tratamiento sobre los tamaños medios y la estabilidad física de emulsiones O/W que utilizan esa mezcla aceite/tensioactivo como fase dispersa. Se utilizan técnicas de retrodispersión de luz (multiple light scattering) y de difracción laser para detectar los mecanismos de desestabilización (cremado, floculación o coalescencia) que sufren las emulsiones.

METODOLOGÍA

Material es

Se ha utilizado aceite esencial de tomillo (TO) proporcionado por Bordas Chinchurreta (938 k/m³ a 20°C) y el tensioactivo no iónico comercialmente conocido como Appyclean 6548 (APP) suministrado por Wheatoleo cuyo HLB está comprendido entre 9-9,5. Químicamente se conoce como alcohol C14/C18 de poliglucósido.

Preparación de las muestras

Preparación de las dispersiones

La mezcla aceite esencial de tomillo/tensioactivo estudiada se formuló con una relación en masa de 90,1/9,1, equivalente a la que presenta la fase dispersa en la emulsión final (10/1). Para su preparación se consideraron diferentes tratamientos térmicos: a) Por un lado, el tensioactivo se añade al aceite esencial de tomillo en la proporción adecuada y la mezcla, inicialmente a 25°C, se somete a choque térmico introduciéndola en una estufa de laboratorio a 60°C, b) Por otro lado, el tensioactivo se añade al aceite esencial de tomillo en la proporción adecuada y la mezcla, inicialmente a 25°C, se somete a una rampa de temperatura hasta un valor T (60°C o 70°C) durante 15 minutos. Adicionalmente, para cada uno de esos tratamientos se contemplan dos opciones: 1) en la que el tensioactivo se añade al aceite esencial de tomillo tal y como es suministrado y 2) otra en la que el tensioactivo antes de ser añadido al aceite se funde, se enfría y solidifica de nuevo y, posteriormente, es añadido. De aquí en adelante la nomenclatura a usar para referirnos a los diferentes tratamientos térmicos será la siguiente: XT Y-T, donde X=C o R para referirse a choque térmico o rampa de temperatura respectivamente, Y= F(fundido) o SF (sin fundir) para referirse a si el tensioactivo antes de ser añadido al disolvente y proceder con el tratamiento térmico de la mezcla, ha sido fundido o utilizado tal cual es suministrado y T= 60°C o 70°C para referirse a la temperatura aplicada en el tratamiento térmico.

Preparación de las emulsiones

Emulsiones al 30% en peso de aceite esencial de tomillo y 3% de Appyclean 6548 fueron preparadas en dos etapas. En la primera etapa, la fase dispersa (RT F-70 y RT SF-70) fue añadida lentamente a la fase acuosa haciendo uso de un sistema rotor-estator Silverson L5M, equipado con una malla especial emulsionadora, a 8000rpm durante 30s. En la segunda etapa se homogeneizó toda la muestra durante 90

s a 8000 rpm. La temperatura se mantuvo constante a 25°C. De esta forma se obtienen las emulsiones de aquí en adelante denominadas ERT SF-70 y ERT F-70.

Estabilidad Física

La estabilidad física de las muestras ha sido investigada mediante la técnica de retrodispersión múltiple de luz. Esta técnica proporciona perfiles del % de luz retrodispersada y transmitida en función de la altura de la célula de medida que contiene a la muestra a diferentes tiempos de envejecimiento. A partir del análisis de dichos perfiles es posible establecer los mecanismos de desestabilización sufridos por las muestras. Para comparar la estabilidad física de los diferentes sistemas investigados, el Índice de Estabilidad de Turbiscan (TSI) resulta de gran interés. Este tiene en cuenta todos los mecanismos de desestabilización que tienen lugar en la muestra, desde la parte inferior del recipiente que la contiene hasta la parte superior. Cuanto mayor es su valor, más inestable es el sistema (Lesaint et al., 2009).

Tamaño de gotas

La distribución de tamaños de gotas fueron determinadas mediante la técnica de difracción láser usando el equipo Malvern Mastersizer X. Los diámetros medios de gota han sido expresados como el diámetro medio de Sauter ($D_{3,2}$) y el diámetro medio volumétrico ($D_{4,3}$):

$$D_{3,2} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i d_i^3}{\sum_{i=1}^N n_i d_i^2} \quad \text{ec. 1}$$

$$D_{4,3} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i d_i^4}{\sum_{i=1}^N n_i d_i^3} \quad \text{ec. 2}$$

donde d_i es el diámetro de la gota, N es el número total de gotas y n_i es el número de gotas que tienen el diámetro d_i . Para determinar la anchura de las distribuciones de tamaño de gota se ha utilizado el parámetro “span” que se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\text{span} = \frac{D(v,0.9) - D(v,0.1)}{D(v,0.5)} \quad \text{ec. 3}$$

donde $D(v,0.9)$, $D(v,0.5)$ y $D(v,0.1)$ son los diámetros acumulativos al 90%, 50% y 10% respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 1, se ilustran los valores del TSI en función del tiempo de envejecimiento para las dispersiones sometidas a choque térmico a 60°C y rampa de temperatura a 60°C, ambas con el tensioactivo sin fundir previamente a la adición en el aceite y con el tensioactivo tal cual es suministrado. Esta figura revela que, independientemente de que el tensioactivo sea fundido o no previamente al tratamiento térmico con el disolvente, las dispersiones sometidas a rampa de temperatura presentan menores valores de TSI y, por tanto, una mayor estabilidad física que cuando son sometidas a choque térmico. Al mismo tiempo se ilustra que las dispersiones presentan una mayor estabilidad física cuando el tensioactivo es utilizado sin fundir previamente a su incorporación en el aceite esencial. En definitiva, a partir de la figura 1 se extrae que las dispersiones de aceite esencial de tomillo/Appyclean 6548 presentan una mayor estabilidad cuando el tensioactivo es utilizado sin fundir previamente a su incorporación en el aceite esencial y cuando la mezcla es posteriormente sometida a una rampa de temperatura hasta 60°C.

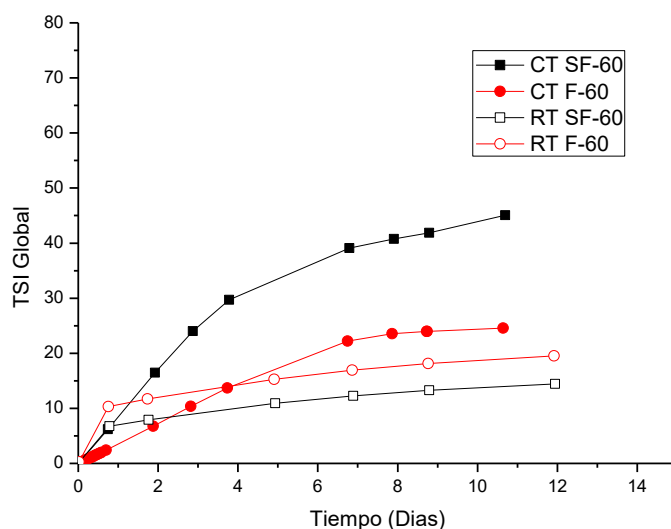


Figura 14: TSI Global en función del tiempo de envejecimiento de mezclas TO/APP sometidas a rampa de temperatura y choque térmico a 60°C con tensioactivo Appyclean 6548 fundido y sin fundir previamente.

Se plantea a continuación si un aumento de temperatura en la rampa de preparación de la mezcla supondría un incremento de la estabilidad física. En la figura 2 se representa el TSI en función del tiempo de envejecimiento para mezclas TO/APP preparadas con rampa térmica a 60°C y 70°C y con el tensioactivo sin fundir. Se observan valores más bajos de TSI y, por tanto, mayor estabilidad, para fases dispersas sometidas a rampas de temperatura más elevada. Este resultado podría explicarse considerando que la solubilización del tensioactivo en el disolvente es más eficaz a mayor temperatura.

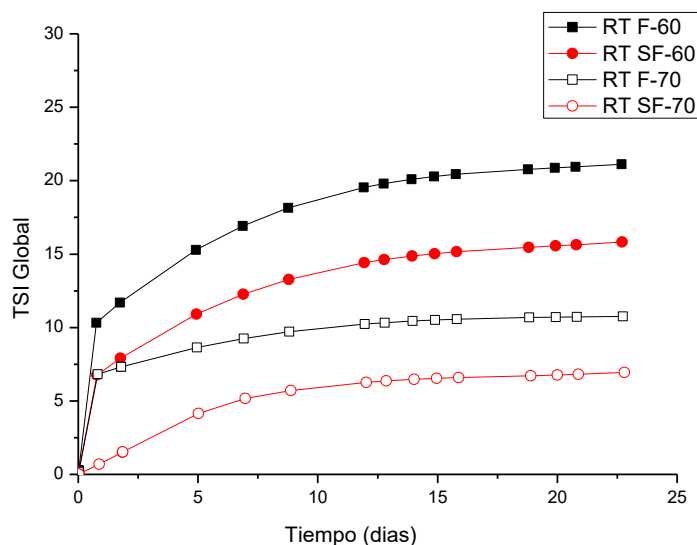


Figura 2: TSI Global en función del tiempo de envejecimiento de mezclas TO/APP sometidas a rampa de temperatura a 60°C y 70°C con tensioactivo Appyclean 6548 fundido y sin fundir previamente.

Dado que las dispersiones TO/APP más estables resultan ser las obtenidas en rampas de temperatura a 70°C, se preparan emulsiones con estas fases dispersas utilizando el tensioactivo previamente fundido y sin fundir (ERT F-70 y ERT SF-70) y se comparan. En la figura 3 se ilustran las distribuciones de tamaños de gota de ambas emulsiones a las 24 horas de su preparación. Como puede

observarse, la emulsión procesada con el tensioactivo sin fundir previamente resulta ser monomodal y, además, se encuentra desplazada hacia menores tamaños de gota. Los valores de los diámetros medios de gota (Sauter y volumétrico) y span, mostrados en la tabla 1, confirman lo que ya se anticipaba en las distribuciones, es decir, la emulsión preparada con el tensioactivo que no ha sufrido ningún tratamiento térmico previo es la que presenta los menores valores. Por lo tanto estos resultados muestran que el uso del tensioactivo tal cual es suministrado, sin recibir ningún tratamiento térmico previo a su adición al disolvente, presenta mejores tamaños de gota y menor polidispersidad. Ninguna de las emulsiones presenta un aumento de gota significativo con el tiempo de envejecimiento.

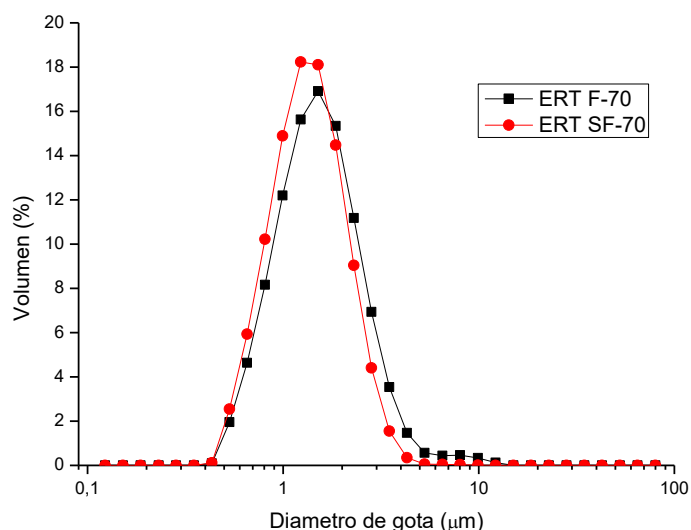


Figura 3: Distribución de tamaños de gota para emulsiones aceite esencial de tomillo/W cuyas fases dispersas fueron preparadas mediante rampa de temperatura a 70°C con el tensioactivo Appyclean 6548 fundido y sin fundir. Tiempo de envejecimiento de 24h.

Tabla 1: Diámetros medios $D_{3,2}$ y $D_{4,3}$ y span para emulsiones aceite esencial de tomillo/W cuyas fases dispersas fueron preparadas mediante rampa de temperatura a 70°C con el tensioactivo Appyclean 6548 fundido y sin fundir. Tiempo de envejecimiento de 24h.

Emulsión	$D_{3,2}$ (µm)	$D_{4,3}$ (µm)	Span
ERT SF-70 (Appyclean 6548 sin fundir)	1,09	1,32	1,167
ERT F-70 (Appyclean 6548 fundido)	1,21	1,57	1,358

Los resultados del estudio de la estabilidad física realizado mediante “multiple light scattering” hasta los 9 días de envejecimiento se presentan en la figura 4 donde a modo de ejemplo se representa el porcentaje de luz retrodispersada (“backscattering”, %BS) frente a la altura de la célula de medida para la emulsión obtenida con la fase dispersa RT SF-70. Como puede observarse, el %BS desciende en la zona baja de la célula de medida mientras que en la zona intermedia permanece prácticamente constante. La bajada del %BS observada en la zona baja indica la existencia de un proceso de desestabilización por cremado. El cremado se produce por la diferencia de densidades entre la fase continua y la fase dispersa (en forma de gotas de disolvente), lo que conlleva el ascenso de esta última desde la parte inferior del recipiente que contiene a la muestra hasta la parte superior. Los valores aproximadamente constantes del %BS en la zona intermedia indican que los mecanismos de desestabilización por coalescencia y/o floculación no son relevantes. En la zona alta de la célula de medida también se produce un descenso del %BS que puede deberse a la aparición de coalescencia como consecuencia de la ruptura de las interfases de las gotas más grandes acumuladas en la fase cremada (Trujillo-Cayado et al., 2016). Resultados similares se obtienen para la emulsión cuya fase dispersa se sometió al tratamiento térmico RT F-70. A

partir, pues, de los resultados obtenidos se puede concluir que el mecanismo de desestabilización predominante en ambas muestras es el cremado.

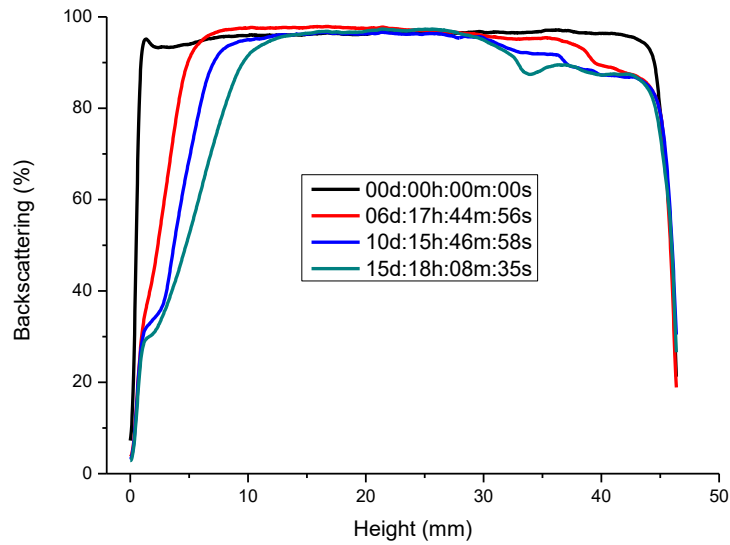


Figura 4: %Backscattering frente a la altura de la célula de medida para emulsiones aceite esencial de tomillo/W cuyas fases dispersas fueron preparadas mediante rampa de temperatura a 70°C con el tensioactivo Appyclean 6548 fundido y sin fundir.

Con el objeto de cuantificar el proceso de desestabilización que sufren las emulsiones estudiadas, en la figura 5 se compara el TSI en función del tiempo de envejecimiento para ambas. Así la emulsión procesada con la fase dispersa en la que el tensioactivo Appyclean 6548 sin fundir se añade al aceite y se someten juntos a una rampa de temperatura hasta 70°C (ERT SF-70) presenta mejor estabilidad física (TSI más bajo) que aquella otra que es procesada con la fase dispersa RT F-70. Este resultado es coherente con el obtenido por difracción láser donde la emulsión ERT SF-70 presenta valores más bajos de los diámetros medios y menor polidispersidad.

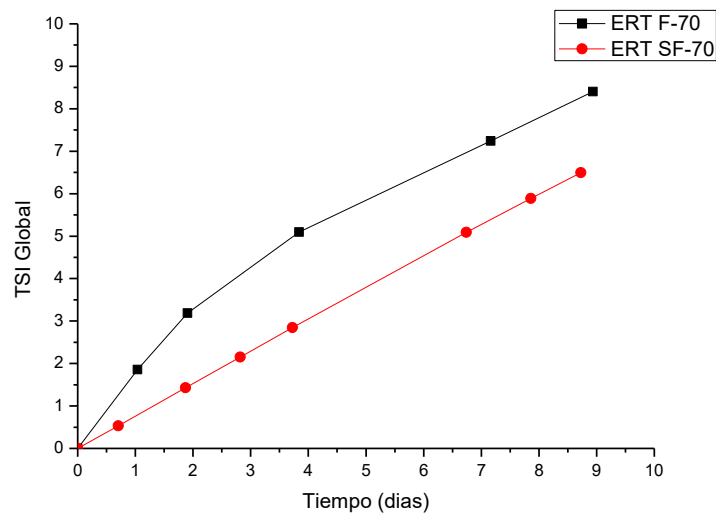


Figura 5: TSI Gobal frente al tiempo de envejecimiento para emulsiones aceite esencial de tomillo/W cuyas fases dispersas fueron preparadas mediante rampa de temperatura a 70°C con el tensioactivo Appyclean 6548 fundido y sin fundir.

CONCLUSIONES

La estabilidad física de mezclas aceite esencial de tomillo/Appyclean 6548 (futura fase dispersa de una emulsión aceite esencial de tomillo/agua) en una relación 90,1/9,1 preparadas siguiendo un protocolo de rampa de temperatura es mayor que aquellas obtenidas mediante choque térmico. En rampa de temperatura, aquellas mezclas TO/APP preparadas a mayor temperatura (70°C) presentan mayor estabilidad física. Respecto al uso del tensioactivo tal cual es suministrado o fundido previamente a su incorporación al aceite esencial de tomillo, señalar que la estabilidad física de la mezcla disolvente/tensioactivo es mayor cuando este se utiliza sin fundir.

Por otro lado, el estudio de emulsiones formuladas con aceite esencial de tomillo y Appyclean 6548 indica que sufren un mecanismo principal de desestabilización por cremado. Una mejor estabilidad física de la fase dispersa obtenida mediante rampa de temperatura hasta 70°C en la que el tensioactivo no ha sido fundido previamente repercute en una mejor estabilidad física de la emulsión final y menores valores de los diámetros medios de gota.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte de los resultados obtenidos en el proyecto CTQ2015-70700-P, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España y por la Comisión Europea (Programa FEDER).

BIBLIOGRAFÍA

- Chang, Y., McLandsborough, L., & McClements, D. J. (2015). Fabrication, stability and efficacy of dual-component antimicrobial nanoemulsions: Essential oil (thyme oil) and cationic surfactant (lauric arginate). *Food Chemistry*, 172, 298–304. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.081>
- Dickinson, E; Woskett, C. C. (1989). *Food Colloids*, (London, U. K.): Royal Society of Chemistry
- García, M.C., Alfaro, M.C. and Muñoz, J. (2015). Influence of the ratio of amphiphilic copolymers used as emulsifiers on the microstructure, physical stability and rheology of α -pinene emulsions stabilized with gellan gum. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 135, 465–471.
- Lesaint, C., Glomm, W. R., Lundgaard, L. E., & Sjöblom, J. (2009). Dehydration efficiency of AC electrical fields on water-in-model-oil emulsions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 352(1–3), 63–69. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2009.09.051>
- Rodríguez-Rojo, S., Varona, S., Núñez, M., & Cocero, M. J. (2012). Characterization of rosemary essential oil for biodegradable emulsions. *Industrial Crops and Products*, 37(1), 137–140. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.11.026>
- Trujillo-Cayado, L. A., Santos, J., Alfaro, M. C., Calero, N., & Muñoz, J. (2016). A further step in the development of oil-in-water emulsions formulated with a mixture of green solvents. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 55(27), 7259–7266. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b01320>

C10

INFLUENCIA DE LA FORMULACIÓN Y DE LAS VARIABLES DE PROCESADO SOBRE LA ESTABILIDAD FÍSICA DE EMULSIONES DE ACEITE ESENCIAL DE TOMILLO

García, M^a Carmen, Portillo, Celia, Martín M^a José, Alfaro, M^a Carmen, Muñoz, José. TEP-943: Reología Aplicada. Tecnología de Coloides. Departamento de Ingeniería Química. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Sevilla.

RESUMEN

En la actualidad, los consumidores tienden a preferir productos que contengan compuestos naturales en lugar de aditivos sintéticos. Este hecho hace que en los últimos tiempos se haya realizado un gran esfuerzo en el estudio de formulaciones de emulsiones cuya fase orgánica está compuesta por aceites esenciales procedentes de plantas aromáticas. Estos aceites, como por ejemplo, el aceite esencial de tomillo (*Thymus Vulgaris*), constituido principalmente por timol, permiten diseñar productos más ecológicos y más seguros.

En este estudio, se ha evaluado la estabilidad física de emulsiones concentradas de aceite de tomillo en función de la concentración de un tensioactivo de baja toxicidad y rápida biodegradación, Appyclean 6548. Dicho tensioactivo es no iónico del tipo alquil polipentósido, cuyo HLB está entre 9.0 y 9.5. En primer lugar, se obtuvo una emulsión primaria mediante el uso de un homogeneizador de alta velocidad rotor-stator, Silverson L5M. Posteriormente, se hizo pasar esta emulsión por un homogeneizador de alta presión por microcanales, Microfluidizer M110P. Finalmente, se estudió la estabilidad de las emulsiones resultantes mediante la combinación de técnicas como la difracción láser y la retrodispersión de luz en toda la longitud del recipiente que contenía la muestra.

Palabras clave: *Emulsiones, disolvente verde, aceite esencial, tensioactivo ecológico, emulsificación.*

ABSTRACT

Nowadays, the consumers tend to prefer product containing natural components instead of synthetic additives. For this reason, recently the researchers have made a great effort to study formulation of emulsions whose organic phase containing essential oils from aromatic plants. These oils, such as, thyme essential oil (*Thymus Vulgaris*), consisting mainly of thymol, make possible to design more ecological and safer products.

In this study, the physical stability of concentrated emulsions has been assessed as a function of a surfactant with low toxicity and rapid biodegradation, Appyclean 6548. This is a non-ionic surfactant, alkylpolypentoside, with HLB of 9.0-9.5. Firstly, a coarse emulsion was obtained by means of a rotor-stator homogenizer. Then, this emulsion was submitted at high pressure by a microchannel homogenizer. Finally, the stability of the resulting emulsions using multiple light scattering and laser diffraction.

Keywords: *Emulsions, green solvent, essential oils, ecological surfactant, emulsification.*

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Como consecuencia de las propiedades que poseen los aceites esenciales, se ha producido un gran interés por ellos recientemente. Propiedades como la actividad antiviral, actividad antibiótica o antifúngica (Burt, 2004) o propiedades contra patógenos que se transmiten a través de los alimentos, hacen a estos aceites muy atractivos para su aplicación en la industria alimentaria, cosmética, farmacéutica y agroquímica.

En el caso particular de la industria alimentaria, la tendencia actual de los consumidores a adquirir productos que contienen conservantes de origen natural en lugar de aditivos sintéticos (Chang, 2012)

favorece el empleo de los aceites esenciales como aditivos antimicrobianos naturales para alargar la vida útil de los alimentos y bebidas.

A pesar de las numerosas ventajas que posee la incorporación de aceites esenciales con actividad antimicrobiana, presentan una serie de inconvenientes, como su baja solubilidad en agua y su fuerte sabor e intenso aroma que condicionan su utilización en altas dosis ya que puede generar cambios organolépticos en ciertos productos alimenticios (Salvia-Trujillo, 2015). Una alternativa prometedora, sería el diseño de formulaciones de emulsiones de aceite en agua (O/W) cuya fase dispersa esté constituida por aceites esenciales. De esta forma, los componentes antimicrobianos serían incorporados con mayor facilidad al mejorarse su capacidad de dispersión en un medio acuoso. En los productos agroquímicos, el aceite esencial se encuentra en forma de gota dispersa en medio continuo (García, M.C. et al., 2016). Se caracterizan, además, porque poseen una buena eficacia y son respetuosos con el medio ambiente por su mayor biodegradabilidad y menor toxicidad.

Una emulsión es una dispersión termodinámicamente inestable de dos fases inmiscibles en las cuales, en este caso una emulsión aceite en agua (O/W), una fase oleosa está dispersa en forma de gota en una fase continua acuosa. Para mejorar la estabilidad de la emulsión, es necesario un tercer componente, el tensioactivo. Este se sitúa en la interfase entre los dos medios, reduciendo la tensión interfacial y contribuyendo en la mayoría de los casos a una mayor estabilidad (Dickinson, 1989). En este trabajo, se ha usado como tensioactivo, Appyclean 6548, un tensioactivo no iónico del tipo alquil polipentósido (APP). Este tensioactivo es respetuoso con el medioambiente ya que muestra una alta y rápida biodegradación, así como, una baja ecotoxicidad lo cual lo hace ideal para su empleo en formulaciones verdes.

El objetivo principal de este estudio ha sido evaluar la estabilidad física de emulsiones O/W de aceite esencial de tomillo como fase dispersa en función de la concentración de surfactante presente en la formulación y del método de emulsificación utilizado, comparando una emulsión obtenida por homogenización primaria llevada a cabo con un sistema rotor-estátor Silverson L5M y una emulsión procesada con una homogenización secundaria adicional llevada a cabo con un homogenizador Microfluidizer M-110P.

METODOLOGÍA

Materiales

Aceite esencial de tomillo, suministrado por Destilaciones Bordas Chinchurreta, al 40% en peso, fue utilizado como fase dispersa de las emulsiones O/W investigadas. Las propiedades físicas de este aceite esencial se muestran en la Tabla 1. Como agente emulsionante se ha empleado un alcohol C14/C18 de poliglucósido suministrado por Wheatoleo cuyo nombre comercial es Appyclean 6548. Las concentraciones estudiadas fueron 4%, 6%, 8% y 10% en peso. Además, como conservante se utilizó un 0.1% en peso de azida sódica. Finalmente, se utilizó la cantidad de agua Mili-Q necesaria para completar la formulación.

Propiedades físicas	Valor
Color	Pardo
Densidad (kg/m ³)	938
Índice de refracción	1.505
Rotación óptica	1.1
Solubilidad en etanol 70°C/25°C	3

Tabla 2: Propiedades físicas del aceite esencial de tomillo proporcionado por Destilaciones Bordas Chinchurreta.

Preparación de las emulsiones

Las fases dispersa y continua se prepararon por separado. Por un lado, se preparó la fase dispersa disolviendo la cantidad necesaria de tensioactivo en el aceite de tomillo, donde es soluble, mediante una rampa de temperatura hasta 70°C. Por otro lado, se preparó la fase acuosa diluyendo la azida sódica en la cantidad de agua Mili-Q necesaria para completar la formulación. Una vez preparada las fases continua y dispersa se procedió a preparar la emulsión primaria en un homogeneizador rotor-estator Silverson L5M a 2000 rpm durante 210 s. Posteriormente, la emulsión primaria se hizo pasar una vez por un homogeneizador de alta presión, Microfluidizer M110P, a una presión de 2500 psi (17.2 MPa). Esta es denominada en el texto como emulsión final.

Distribución de tamaños de gota

Para la determinación de la distribución de tamaños de gota y diámetros medios de las emulsiones se ha empleado la técnica de difracción láser usando un equipo Malvern Mastersizer X con una lente de 45 mm. El índice de refracción utilizado fue 1.464 y de absorción de 1. La primera medida de control se realizó a las 24 horas después de la preparación de la muestra y posteriormente se hicieron medidas, a la semana, a las dos semanas, etc., de envejecimiento.

Estabilidad física

El estudio de la estabilidad física de las emulsiones se hizo mediante múltiple light scattering usando un Turbiscan Lab Expert capaz de medir la intensidad de luz retrodispersada en toda la longitud del recipiente que contenía la muestra.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1 muestra, a título de ejemplo, la distribución del tamaño de gota para la emulsión primaria y la emulsión final para el sistema que contenía un 2% en peso de Appyclean 6548. El resto de emulsiones presentó el mismo comportamiento. Como puede observarse, se produce un desplazamiento de la distribución hacia tamaños de gotas más pequeños cuando se hace pasar la emulsión por el homogeneizador de alta presión. Esta figura muestra que mientras la emulsión primaria es bimodal, para el caso de la emulsión final es trimodal. En la emulsión final, el primer máximo que corresponde a menores tamaños representa a un mayor porcentaje en volumen de gotas y el segundo máximo correspondiente a tamaños entre 2 y 20 μm es mayor en la emulsión primaria. Sin embargo, se puede observar un tercer máximo entre 60 y 70 μm en la distribución de tamaños de gotas de la emulsión final. Este fenómeno podría estar relacionado con un proceso de recalescencia como consecuencia de un exceso de energía (Jarafi, et al., 2008). Estos efectos están avalados por los valores medios del diámetro de Sauter y volumétrico y el valor del Span presentados en la Tabla 2. Como puede observarse, se produce una disminución tanto del diámetro medio de Sauter como del diámetro medio volumétrico, disminución que implica una reducción importante del tamaño de gota. Además, se observa un aumento en el valor del Span, indicando que la muestra que pasa por el homogeneizador de alta presión es más polidispersa.

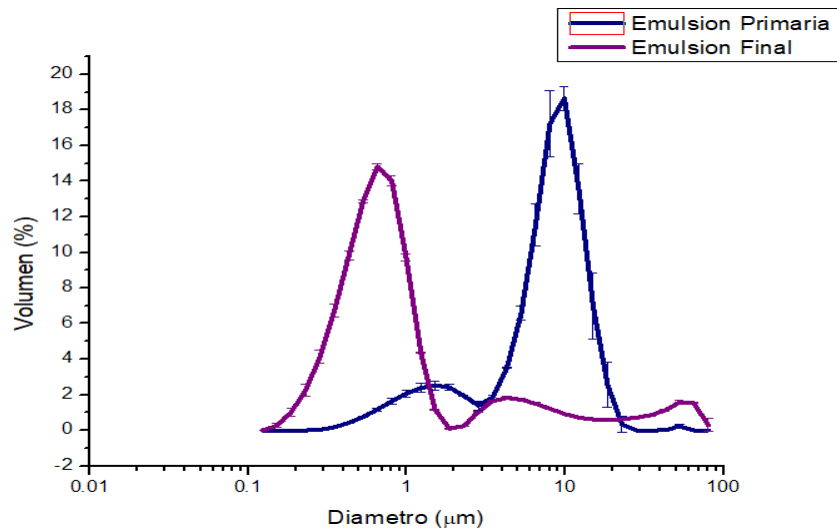


Figura 1: Distribución de tamaños de gota de la emulsión primaria y final correspondiente al sistema que contenía 40 % en peso de aceite esencial de tomillo y 2% en peso de Appyclean 6548. Temperatura ambiente.

	D [3,2] μm	E _D [3,2] μm	D [4,3] μm	E _D [4,3] μm	Span	E _{span}
Emulsión primaria	3.57	2.2E-01	7.32	5.9E-01	1.46E+00	5.67E-02
Emulsión Final	0.58	1.10E-01	4.1	1.17E+00	1.35E+01	7.20E+00

Tabla 2: Diámetros medios de Sauter y volumétrico y Span para la emulsión primaria y final del sistema que contenía 40% en peso de aceite esencial de tomillo y 2% en peso de Appyclean 6548. Temperatura ambiente.

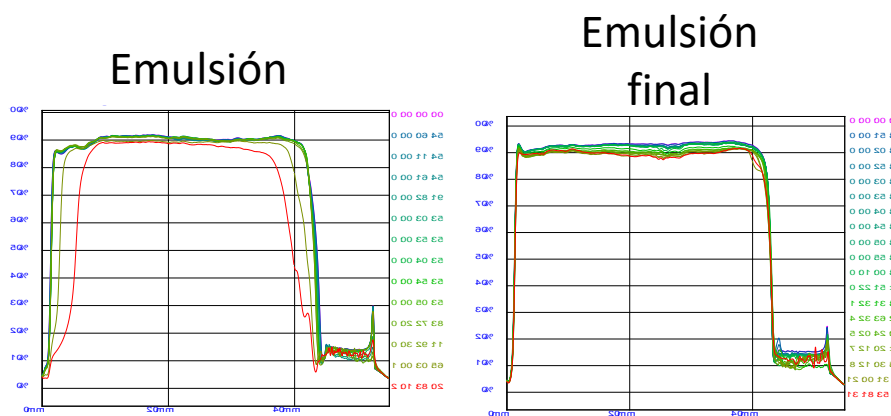


Figura 2: Efecto de la microfluidización sobre los resultados de múltiple light scattering para emulsiones que contenían 40% en peso de aceite esencial de tomillo y 8% de Appyclean 6548. Temperatura ambiente.

La Figura 2 muestra los valores del porcentaje de backscattering en toda la longitud de la célula de medida que contenía a la muestra en función del tiempo de envejecimiento para el sistema que contiene 40% en peso de aceite y 8% en peso de tensioactivo antes y después de la microfluidización. Los resultados correspondientes a la emulsión primaria muestran un descenso del backscattering en la zona más baja de la muestra indicando un proceso de clarificación como consecuencia de una migración de las gotas hacia la parte alta del recipiente (cremado). Además, también se observa una disminución del backscattering en la parte alta del recipiente que contiene la muestra debido a un fenómeno de separación de muestra (oiling-off) probablemente resultante de un mecanismo de desestabilización por coalescencia. En el caso de la emulsión final, se observa que la reducción del tamaño de gota debido al paso de la emulsión por el homogeneizador de alta presión, evita el proceso de cremado. Además presenta una disminución del

backscattering en la parte alta de la muestra menor que la emulsión primaria y este descenso se produce a tiempos de envejecimiento mayores.

La cinética de desestabilización se muestra en la Figura 3 donde se representan los valores medios de backscattering, a una altura de la muestra comprendida entre 20 mm y 25 mm, en función del tiempo de envejecimiento.

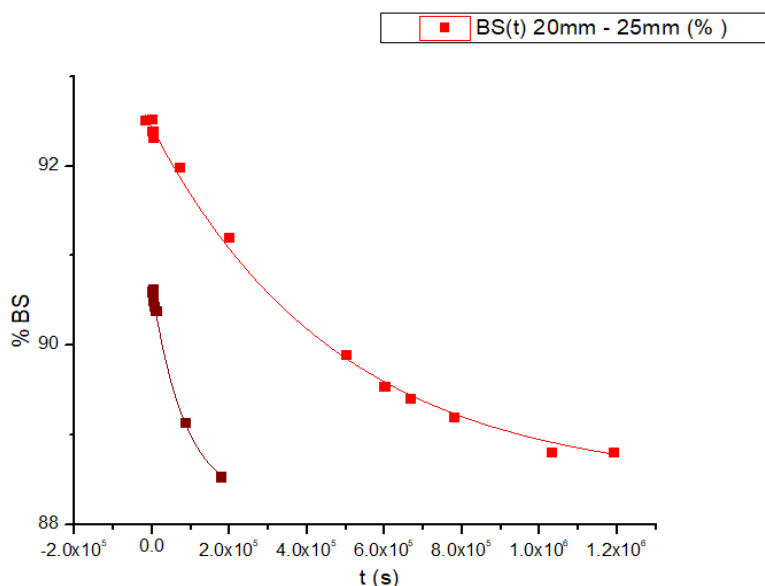


Figura 3: Valores medios de backscattering a una altura de la muestra comprendida entre 20 mm y 25 mm en función del tiempo para las emulsiones primaria y final correspondientes al sistema con 40% en peso de aceite esencial de tomillo y 8% en peso de Appyclean 6548

Estos resultados fueron ajustados a una ecuación cinética de primer orden (1):

$$BS = BS_e + (BS_0 - BS_e) \exp(-kt) \quad (1)$$

Donde BS es el backscattering en función del tiempo de envejecimiento, BS_0 es el valor del backscattering inicial, BS_e es el valor de backscattering alcanzado en el equilibrio y k es la constante cinética de primer orden. En la Tabla 3, se muestran los valores obtenidos para estos parámetros de ajustes.

	BS_0	E_{BS_0}	BS_e	E_{BS_e}	$k (s^{-1})$	Ek	R^2
Emulsión Primaria	90.63	1.77E-02	88.25	-	1.17E-05	4.75E-07	0.99
Emulsión Final	92.43	3.42E-02	88.45	-	2.06E-06	5.56E-08	0.99

Tabla 3: Parámetros de ajuste a la ecuación cinética de las emulsiones primaria y final correspondientes al sistema con 40% en peso de aceite esencial de tomillo y 8% en peso de Appyclean 6548.

El paso de la emulsión por el homogeneizador de alta presión, microfluidizer M110P, provoca una disminución de la constante cinética (Tabla 3) indicando que los mecanismos de desestabilización son más lentos en la emulsión final.

El resto de formulaciones estudiadas presentaron los mismos mecanismos de desestabilización pero a tiempos de envejecimiento diferentes. De todas ellas, la emulsión con 40% en peso de aceite esencial de tomillo y 6% de Appyclean 6548 fue la más estable de todas.

CONCLUSIONES

Este estudio demuestra que el paso de las emulsiones primarias por un homogeneizador de alta presión por microcanales produce un aumento en la estabilidad física de la emulsión, como consecuencia de una reducción del tamaño de gotas. Además, este hecho fue avalado por el valor del coeficiente

cinético de primer orden, que fue menor para las emulsiones finales, indicando una desestabilización más lenta. Destacar que los menores tamaños de gota obtenidos en las emulsiones finales, es decir, emulsiones que pasaron a través del homogeneizador M110P, no presentaron la desestabilización por cremado que sufrían las emulsiones primarias. Adicionalmente se puede decir que los resultados de distribución de tamaños de gota y múltiple light scattering indicaron que la emulsión más estable fue aquella formulada con 40% en peso de aceite esencial de tomillo y 6% de Appyclean 6548.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte de los resultados obtenidos en el proyecto CTQ2015-70700-P, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España y por la Comisión Europea (Programa FEDER).

BIBLIOGRAFÍA

- Burt, S. (2004). Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in foods—a review. *International journal of food microbiology*, 94 (3), 223-253.
- Chang, Y., McLandsborough, L., McClements, D. J. (2012). Physical properties and antimicrobial efficacy of thyme oil nanoemulsions: influence of ripening inhibitors. *Journal of agricultural and food chemistry*, 60 (48), 12056-12063.
- Dickinson, E., Woskett, C. C. (1989). *Food Colloids*, (London, U. K.): Royal Society of Chemistry.
- García, M.C., Alfaro, M.C., Muñoz, J. (2015). Influence of the ratio of amphiphilic copolymers used as emulsifiers on the microstructure, physical stability and rheology of α -pinene emulsions stabilized with gellan gum. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 135, 465-471.
- Jafari, S.M., Assadpoor, He. E., Bhandari, B. Y. (2008). Re-coalescence of emulsion droplets during high-energy emulsification. *Food Hydrocolloids* 22, 1191-1202.
- Salvia-Trujillo, L., Rojas-Graü, A., Soliva-Fortuny, R., Martín-Belloso, O. (2015). Physicochemical characterization and antimicrobial activity of food-grade emulsions and nanoemulsions incorporating essential oils. *Food Hydrocolloids*, 43, 547-556.

C11

CONTROL Y ESTUDIO DEL PROCESO DE EMULSIFICACIÓN EN EMULSIONES PROTEICAS DE ACEITE EN AGUA MEDIANTE UN REÓMETRO DE MEZCLADO

Romero, Alberto¹; Pérez-Puyana, Víctor²; Marchal, Paul³; Choplin, Lionel³; Guerrero, Antonio¹.

1. Tecnología y Diseño de Productos Multicomponentes (TEP-229). Departamento de Ingeniería Química. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Sevilla.
2. Tecnología y Diseño de Productos Multicomponentes (TEP-229). Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Química. Universidad de Sevilla.
3. GEMICO, ENSIC. Université de Lorraine.

RESUMEN

En el presente trabajo se evalúa la importancia de controlar el proceso de emulsificación ya que tendrá una marcada influencia en las propiedades que presenten las emulsiones finales. Dicho control se ha efectuado con un reómetro de mezclado utilizando una geometría helicoidal, demostrando la utilidad de dicha herramienta inusual para el control durante el proceso de formación de emulsiones. En el caso de estudio, se han seleccionados emulsiones alimentarias de aceite en agua utilizando proteínas como agentes emulsionantes. La caracterización de las diferentes emulsiones preparadas engloba tanto medidas de sus propiedades de flujo como la distribución de tamaño de gotas atendiendo tanto a la influencia de variables de procesado (velocidad de agitación, pH, etc.) como su composición (tipo y concentración de proteína, concentración de aceite, etc.). Los resultados obtenidos reflejan la influencia de dichos parámetros tanto sobre la viscosidad de la emulsión como sobre el perfil de la distribución de tamaño de gota.

Palabras clave: *Reómetro de mezclado, Emulsificación, Viscosidad, Distribución Tamaño Gota.*

ABSTRACT

In the present work the importance of controlling the emulsification process is evaluated, as it will strongly influence the properties of the final emulsions. The control has been carried out with a mixer-type rheometer using a helical geometry, showing the utility of that unusual tool for the control during the formation of emulsions. In the case of the study, oil-in-water food emulsions have been selected using proteins as emulsifying agents. Furthermore, the characterization of the different prepared emulsions includes both measurements of their flow properties and the distribution of particle size, taking into account the influence of processing variables (agitation speed, pH, etc.) and their composition (type and concentration of protein, oil concentration, etc.). The results obtained reflect the influence of the above mentioned parameters both on the viscosity of the emulsion and on the profile of the drop size distribution.

Keywords: *Mixer-type rheometer, Emulsification, Viscosity, Droplet Size Distribution.*

Abreviaturas: *DSD, distribución de tamaño de gotas; rpm, revoluciones por minuto; SDS, Sodium Docecyl, % o %(P/P), porcentaje en peso; %(V/V), porcentaje en volumen; η , viscosidad*

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Una emulsión es el resultado del mezclado de dos líquidos inmiscibles mediante la dispersión en forma de gotas de uno, denominado como fase dispersa, en otro (fase continua). Para conseguir la formación de una emulsión de manera estable es necesario que la tensión interfacial sea mínima, para lo que se requiere el uso de una sustancia denominada emulsionante. Las propiedades de una emulsión (estabilidad, propiedades reológicas, etc.) dependen no sólo de la presencia de un agente emulsionante sino también de la distribución del tamaño de gota (Galus and Kadzinska, 2015), por lo que el proceso de formación de la emulsión es esencial. Considerando este proceso de formación, el uso de reómetros de

tipo mezclador, presenta la ventaja de extraer información reológica durante el proceso de formación de la emulsión, así como del producto final (emulsiones ya estabilizadas).

Por otro lado, la estabilidad de una emulsión es un factor esencial a tener en cuenta para realizar una emulsión. Una emulsión es estable cuando el número, tamaño y distribución de gota no cambian con el tiempo. Por tanto, la desestabilización de las emulsiones depende principalmente del tamaño inicial de las gotas, la reología de la fase continua y las interacciones entre partículas. De ahí que la vida y la estabilidad de una emulsión final están fuertemente correlacionadas con la distribución del tamaño de gota y las interacciones entre estas partículas en la fase dispersa (Melik and Fogler, 1988), la reología de la fase continua y el pH final de la emulsión debido a que altera la superficie de la proteína y, por lo tanto, modifica las interfaces formadas previamente (Romero, Córdoba, Guerrero, 2009).

En definitiva, el objetivo principal es poner de manifiesto la utilidad de un reómetro de mezclado para controlar el proceso de emulsificación y, por ende, las propiedades de las emulsiones resultantes. Para ello, se ha procedido a caracterizar emulsiones, estudiando la influencia de diferentes variables como son la concentración y el tipo de agente emulsionante, así como la velocidad de agitación durante el proceso de emulsificación. Dichas variables repercutirán sobre las propiedades finales de las emulsiones obtenidas.

METODOLOGÍA

Proceso de emulsificación

El reómetro de mezclado consiste en un recipiente cilíndrico equipado con un sistema doble helicoidal instalado en un reómetro de esfuerzo controlado RF II (Rheometric Scientific, EEUU). Se preparan diferentes emulsiones aceite en agua en dicho reómetro (girando a 0,8 rpm) con un homogeneizador Ultra Turrax T-25 (IKA, Alemania). El proceso detallado de emulsificación consiste en 4 etapas principales: (1) agitación de una dispersión proteica durante 30s con Ultra Turrax (UT), (2) adición de aceite y agitación con Ultra Turrax durante 420s, seguido de (3) 60s con agitación Ultra Turrax sin adición de aceite y finalmente, (4) 290s finales sin agitación ni adición para estabilizar el valor de viscosidad.

Caracterización de emulsiones

Las emulsiones se caracterizaron en función de tres variables: el tipo de agente emulsionante utilizado (concentrado proteico de albúmina, patata, arroz y cangrejo), la concentración de emulsionante (0,75; 1,50; 3,00 y 5,00 % (P/P)) y la velocidad de agitación durante el proceso de emulsificación (5000, 10000, 15000 y 20000 rpm). La concentración de aceite y el pH utilizado se mantuvieron constantes para todos los estudios (65% (P/P) y 3, respectivamente). Las variables utilizadas para cada uno de los estudios aparecen resumidas en la siguiente tabla (Tabla 1):

Tabla 3: Parámetros establecidos para cada uno de los estudios llevados a cabo

Variables	Concentración Aceite (%)	pH	Tipo Agente Emulsionante (Concentrados proteicos)	Concentración Agente Emulsionante (% (P/P))	Velocidad Agitación (rpm)
Tipo Agente Emulsionante	65	3	Albúmina Arroz Cangrejo Patata	3,00	15000
Concentración Agente Emulsionante	65	3	Albúmina	0,75 1,50 3,00 5,00	15000
Velocidad Agitación	65	3	Albúmina	3,00	5000 10000 15000 20000

- Ensayos reológicos:

Se realizaron curvas de flujo en un reómetro RF II (Rheometric Scientific, EEUU). Las medidas se realizaron a 25°C desde 0,1 a 10 Hz, utilizando una geometría tipo placa-placa (diámetro: 25 mm) con superficie rugosa, evitando así el deslizamiento de la muestra (gap: 1 mm).

- Distribución de Tamaño de Gota:

Medidas de la distribución del tamaño de gota (DSD) se realizaron en un equipo de dispersión de luz láser (Malvern Mastersizer 2000, Reino Unido). Se utilizó SDS como material de desagregación para facilitar la alteración de los flóculos (aglomeración de gotas), a menudo lograda por interacciones gota-gota (Hebishy, Buffa, Guamis, Blasco-Moreno, Trujillo, 2015).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calibración Reómetro de mezclado

En primer lugar se llevó a cabo la calibración del reómetro de mezclado. Para ello, se estudió un fluido Newtoniano de viscosidad conocida (glicerina) y una de las emulsiones estudiadas, utilizando tanto la geometría convencional (platos paralelos) como el sistema helicoidal acoplado al reómetro. Los resultados mostrados en la Figura 1 demuestran que existe una muy buena concordancia entre ambas geometrías. Estos resultados confirman la validez del método utilizado para controlar la viscosidad de las emulsiones.

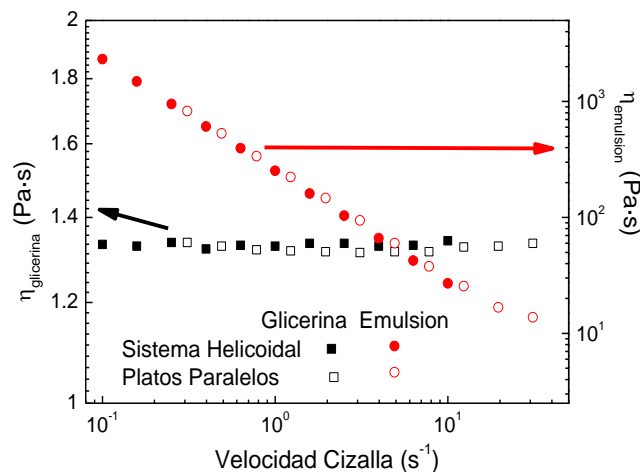


Figura 15: Valores de viscosidad (η) obtenidos en el reómetro de mezclado con el sistema helicoidal y la geometría convencional (platos paralelos) para la glicerina ($\eta_{\text{glicerina}}$) (fluido Newtoniano) y la emulsión ($\eta_{\text{emulsión}}$) de referencia (fluido no Newtoniano).

Evaluación del tipo de agente emulsionante

La Figura 2 muestra los resultados de la viscosidad obtenida del reómetro de tipo mezclador sobre el proceso de emulsificación para todos los sistemas de concentrados proteicos estudiados (arroz, cangrejo, patata y albúmina) a una concentración de aceite del 65% y a pH 3.

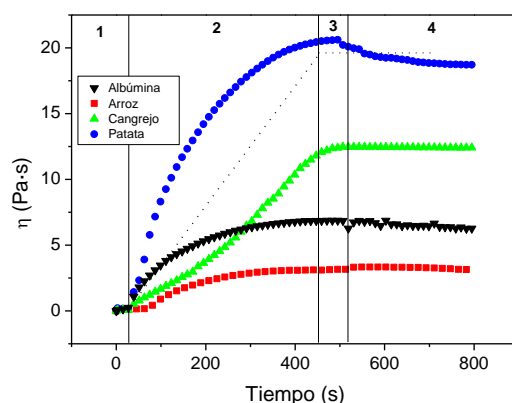


Figura 2: Evolución de la viscosidad a 0.8 rpm durante el proceso de emulsificación de emulsiones preparadas con diferentes agentes emulsionantes (concentrados proteicos de albúmina, arroz, cangrejo y patata). La línea de puntos corresponde con la evolución de fase oleosa durante el proceso.

Puede verse cómo la viscosidad de las emulsiones tiene una dependencia bastante marcada de la etapa de emulsificación. De ahí que, durante los primeros 30s (cuando el único componente es el concentrado proteico disperso en agua), la viscosidad no cambia durante el tiempo de mezclado. De hecho, no se encontraron diferencias significativas entre los distintos sistemas. Sin embargo, tras la adición de aceite (etapa 2), la viscosidad de los sistemas aumentó en cada caso hasta alcanzar un valor máximo. En esta etapa, se pueden encontrar dos comportamientos diferentes. Por un lado, las emulsiones basadas en arroz y albúmina alcanzaron un valor constante antes de terminar la adición de aceite. Por otro lado, las emulsiones de patata y cangrejo aumentan su viscosidad con la cantidad de aceite.

Por tanto, los perfiles de viscosidad revelan diferencias en función de la proteína utilizada. La viscosidad de la emulsión de patata es la más alta, mientras que la que se encuentra para las emulsiones usando arroz es la más baja. Las emulsiones basadas en cangrejo y albúmina mostraron un comportamiento intermedio.

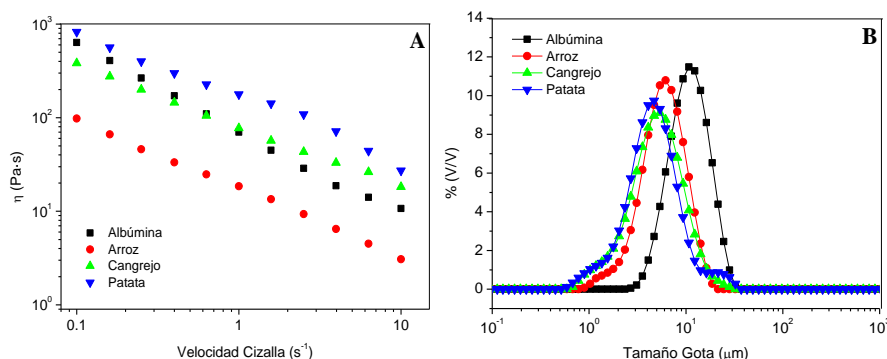


Figura 3: (A) Curvas de flujo y (B) Distribución de tamaño de gota de emulsiones preparadas con diferentes tipos de agente emulsionante (concentrados proteicos de albúmina, arroz, cangrejo y patata).

La Figura 3A muestra curvas de flujo para todas las emulsiones basadas en proteínas estudiadas (arroz, cangrejo, patata y albúmina). De forma general, cabe destacar el carácter viscoelástico de los sistemas estudiados, observándose en el descenso de la viscosidad con la velocidad de cizalla en el intervalo estudiado. En cuanto a la influencia de la naturaleza proteica, las emulsiones basadas en arroz son las menos viscosas. Por otra parte, la Figura 3B muestra la distribución de tamaño de gota para todas las emulsiones basadas en proteínas analizadas (albúmina, arroz, cangrejo y patata). Como norma general, las emulsiones a base de albúmina tienen los tamaños más altos y las emulsiones a base de patata los más bajos. Los resultados obtenidos de la viscosidad se pueden relacionar con el tamaño de gota ya que, en general, los valores de viscosidad más altos inducen tamaños de gota más pequeños.

Concentración de agente emulsionante

La Figura 4 muestra la evolución de la viscosidad de las emulsiones preparadas con diferente concentración de agente emulsionante (0,75; 1,50; 3,00 y 5,00 %).

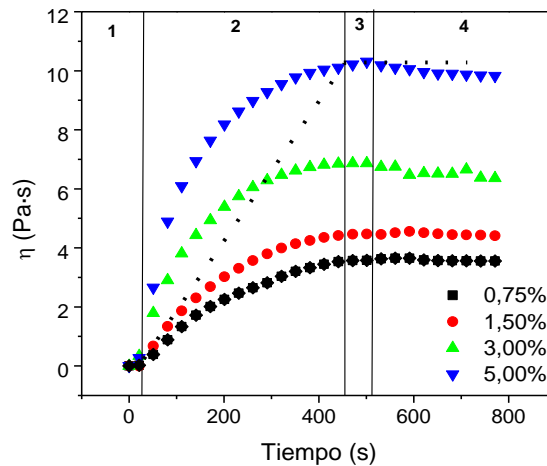


Figura 4: Evolución de la viscosidad a 0.8 rpm durante el proceso de emulsificación de emulsiones preparadas con diferentes concentraciones de agente emulsionante (0,75; 1,50; 3,00; 5,00 %). La línea de puntos corresponde con la evolución de fase oleosa durante el proceso.

El perfil es similar para todos los sistemas, mostrando una pendiente inicial alta (siendo más notable a mayor velocidad de agitación), relacionada con la adición de aceite y seguida por una disminución continua en la pendiente hacia un valor constante que corresponde al final de la adición de aceite. De acuerdo con los resultados mostrados en la Figura 4, la viscosidad de la emulsión depende de la concentración de proteína porque la emulsión obtenida con una concentración de proteína del 0,75% presenta una viscosidad final menor que la viscosidad obtenida con un 5,00% de proteína. Además, la viscosidad de la emulsión se estabiliza más claramente cuando el contenido de proteína es menor (0,75 y 1,50%).

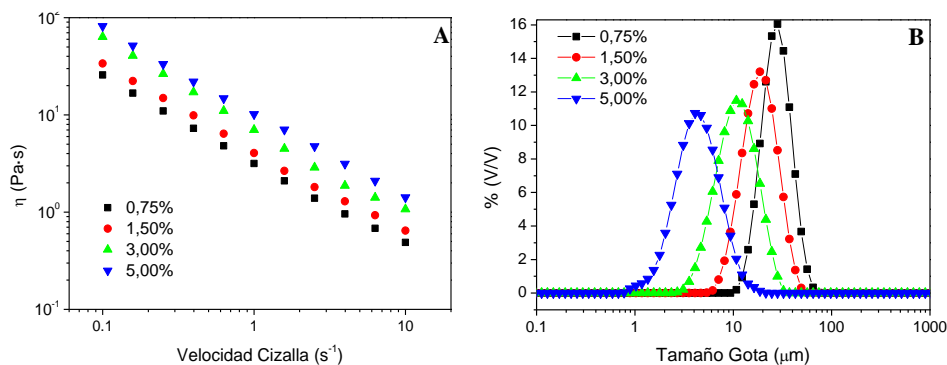


Figura 5: (A) Curvas de flujo y (B) Distribución de tamaño de gota de emulsiones preparadas variando la concentración de agente emulsionante (0,75; 1,50; 3,00 y 5,00 %).

Por otro lado, las propiedades de las emulsiones (viscosidad y distribución de tamaño de gota) se estudiaron y se muestran en las Figuras 5A y 5B. La viscosidad, que aparece en la Figura 5A, muestra una disminución a medida que aumenta la velocidad de cizalla. Comparando las diferentes emulsiones, la viscosidad fue más alta para las emulsiones con mayor concentración de proteínas (Nzihou, Bournonville, Marchal, Choplin, 2004). Por otro lado, la Figura 5B mostró las curvas de distribución de tamaño de gota con una forma unimodal, obtenidas para todas las emulsiones estudiadas, y mayores tamaños de gota cuando la concentración de proteína es menor.

Velocidad de agitación

La Figura 6 muestra la evolución de la viscosidad a 0.8 rpm durante el tiempo de emulsificación para emulsiones preparadas a diferente velocidad de agitación (5000, 10000, 15000 y 20000 rpm).

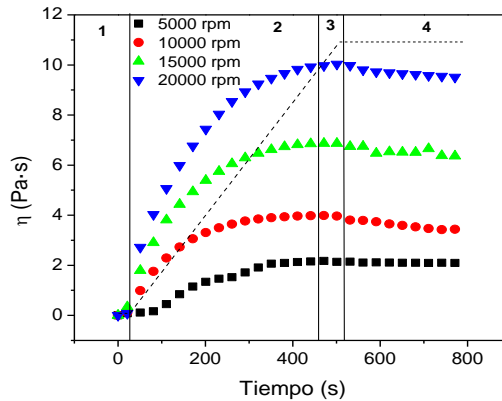


Figura 6: Evolución de la viscosidad (η) a 0.8 rpm durante el proceso de emulsificación de emulsiones preparadas a diferentes velocidades de agitación (5000, 10000, 15000 y 20000 rpm). La línea de puntos corresponde con la evolución de fase oleosa durante el proceso.

El perfil observado por todas las emulsiones es similar y consistente con el proceso de emulsificación explicado anteriormente. Además, la estabilización de la viscosidad de la emulsión se observa más claramente a velocidades bajas (5000 y 10000 rpm). La viscosidad final de las emulsiones estabilizadas aumenta conforme aumenta la velocidad, proporcionando mayor energía y aumentando considerablemente la viscosidad de la emulsión durante el proceso.

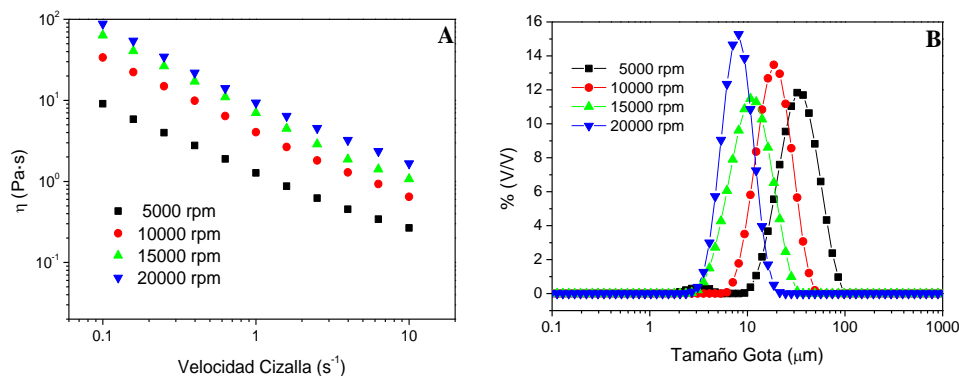


Figura 7: (A) Curvas de flujo y (B) Distribución de tamaño de gota de emulsiones preparadas a diferentes velocidades de agitación (5000, 10000, 15000 y 20000 rpm).

En la Figura 7A aparecen las propiedades de flujo de las emulsiones estabilizadas procesadas a diferentes velocidades de agitación. Todos los sistemas muestran una disminución continua de la viscosidad con la velocidad de cizalla aplicada (Cullen, 2009). Cuanto mayor sea la velocidad de agitación, mayor será la viscosidad, teniendo la misma secuencia en viscosidad que la que se muestra en la Figura 6.

Además, como se muestra en la Figura 7B, se observa una distribución unimodal en los perfiles de tamaño de gota para todas las emulsiones. En cualquier caso, se obtuvieron tamaños mucho más altos cuando las emulsiones se elaboraron a una velocidad de agitación menor, lo que se explica por un mecanismo de coalescencia que se produce cuando la velocidad de agitación es menor. En otras palabras, el proceso de formación de nuevas gotas se encuentra limitado frente a la coalescencia en los sistemas a menor velocidad de agitación.

CONCLUSIONES

Se ha validado un nuevo reómetro de mezclado para evaluar la viscosidad de las emulsiones durante el proceso de emulsificación. De hecho, se ha alcanzado una buena concordancia entre los datos obtenidos mediante el reómetro de mezclado y un reómetro convencional. Los resultados reflejan la importancia de controlar el proceso de emulsificación pues permite controlar las propiedades reológicas y microestructurales de la emulsión durante y al final del proceso.

Comparando las diferentes variables, se concluye que un aumento en la concentración de proteína y en la velocidad de agitación da lugar a sistemas con una mayor viscosidad y menores tamaños de partícula obteniéndose, por consiguiente, sistemas con una mayor estabilidad. Además, parece que las emulsiones estabilizadas con concentrado proteico de patata conduce a sistemas con mayor viscosidad y consecuentemente más estables.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación proporcionada por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte del Gobierno de España (JC2010-0117). Los autores también agradecen a la Universidad de Sevilla por la beca del V Plan Propio de Investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- Cullen, P.J. (2009). *Food Mixing: Principles and applications*. Dublin, Ireland: Wiley-Blackwell.
- Galus, S.; Kadzinska, J. (2015). Food applications of emulsion-based edible films and coatings. *Trends in Food Science & Technology*, 45, 273-283.
- Hebisy, E.; Buffa, M.; Guamis, B.; Blasco-Moreno, A.; Trujillo, A.J. (2015). Physical and oxidative stability of whey protein oil-in-water emulsions produced by conventional and ultra high-pressure homogenization: Effects of pressure and protein concentration on emulsion characteristics. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 32, 79-90.
- Melik, D.H.; Fogler, H.S. (1988). *Encyclopedia of emulsion technology, III*. Becher, P. (editor). New York, USA: Marcel Dekker.
- Nzihou, A.; Bournonville, B.; Marchal, P.; Choplin, L. (2004). Rheology and heat transfer during fly ash phosphatation in a rheo-reactor. *Chemical Engineering Research and Design*, 82, 637-641.
- Romero, A.; Cordobés, F.; Guerrero, A. (2009). Influence of pH on linear viscoelasticity and droplet size distribution of highly concentrated O/W crayfish flour-based emulsions. *Food Hydrocolloids*, 23, 244-252.

C12

CONTROL Y ESTUDIO DEL PROCESO DE EMULSIFICACIÓN EN EMULSIONES PROTEICAS DE ACEITE EN AGUA MEDIANTE UN REÓMETRO DE MEZCLADO

Romero, Alberto¹; Pérez-Puyana, Víctor²; Marchal, Paul³; Choplin, Lionel³; Guerrero, Antonio¹.

1. Tecnología y Diseño de Productos Multicomponentes (TEP-229). Departamento de Ingeniería Química. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Sevilla.
2. Tecnología y Diseño de Productos Multicomponentes (TEP-229). Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Química. Universidad de Sevilla.
3. GEMICO, ENSIC. Université de Lorraine.

RESUMEN

En el presente trabajo se evalúa la importancia de controlar el proceso de emulsificación ya que tendrá una marcada influencia en las propiedades que presenten las emulsiones finales. Dicho control se ha efectuado con un reómetro de mezclado utilizando una geometría helicoidal, demostrando la utilidad de dicha herramienta inusual para el control durante el proceso de formación de emulsiones. En el caso de estudio, se han seleccionados emulsiones alimentarias de aceite en agua utilizando proteínas como agentes emulsionantes. La caracterización de las diferentes emulsiones preparadas engloba tanto medidas de sus propiedades de flujo como la distribución de tamaño de gotas atendiendo tanto a la influencia de variables de procesado (velocidad de agitación, pH, etc.) como su composición (tipo y concentración de proteína, concentración de aceite, etc.). Los resultados obtenidos reflejan la influencia de dichos parámetros tanto sobre la viscosidad de la emulsión como sobre el perfil de la distribución de tamaño de gota.

Palabras clave: *Reómetro de mezclado, Emulsificación, Viscosidad, Distribución Tamaño Gota.*

ABSTRACT

In the present work the importance of controlling the emulsification process is evaluated, as it will strongly influence the properties of the final emulsions. The control has been carried out with a mixer-type rheometer using a helical geometry, showing the utility of that unusual tool for the control during the formation of emulsions. In the case of the study, oil-in-water food emulsions have been selected using proteins as emulsifying agents. Furthermore, the characterization of the different prepared emulsions includes both measurements of their flow properties and the distribution of particle size, taking into account the influence of processing variables (agitation speed, pH, etc.) and their composition (type and concentration of protein, oil concentration, etc.). The results obtained reflect the influence of the above mentioned parameters both on the viscosity of the emulsion and on the profile of the drop size distribution.

Keywords: *Mixer-type rheometer, Emulsification, Viscosity, Droplet Size Distribution.*

Abreviaturas: *DSD, distribución de tamaño de gotas; rpm, revoluciones por minuto; SDS, Sodium Docecyl, % o %(P/P), porcentaje en peso; %(V/V), porcentaje en volumen; η , viscosidad*

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Una emulsión es el resultado del mezclado de dos líquidos inmiscibles mediante la dispersión en forma de gotas de uno, denominado como fase dispersa, en otro (fase continua). Para conseguir la formación de una emulsión de manera estable es necesario que la tensión interfacial sea mínima, para lo que se requiere el uso de una sustancia denominada emulsionante. Las propiedades de una emulsión (estabilidad, propiedades reológicas, etc.) dependen no sólo de la presencia de un agente emulsionante sino también de la distribución del tamaño de gota (Galus and Kadzinska, 2015), por lo que el proceso de formación de la emulsión es esencial. Considerando este proceso de formación, el uso de reómetros de

tipo mezclador, presenta la ventaja de extraer información reológica durante el proceso de formación de la emulsión, así como del producto final (emulsiones ya estabilizadas).

Por otro lado, la estabilidad de una emulsión es un factor esencial a tener en cuenta para realizar una emulsión. Una emulsión es estable cuando el número, tamaño y distribución de gota no cambian con el tiempo. Por tanto, la desestabilización de las emulsiones depende principalmente del tamaño inicial de las gotas, la reología de la fase continua y las interacciones entre partículas. De ahí que la vida y la estabilidad de una emulsión final están fuertemente correlacionadas con la distribución del tamaño de gota y las interacciones entre estas partículas en la fase dispersa (Melik and Fogler, 1988), la reología de la fase continua y el pH final de la emulsión debido a que altera la superficie de la proteína y, por lo tanto, modifica las interfaces formadas previamente (Romero, Córdoba, Guerrero, 2009).

En definitiva, el objetivo principal es poner de manifiesto la utilidad de un reómetro de mezclado para controlar el proceso de emulsificación y, por ende, las propiedades de las emulsiones resultantes. Para ello, se ha procedido a caracterizar emulsiones, estudiando la influencia de diferentes variables como son la concentración y el tipo de agente emulsionante, así como la velocidad de agitación durante el proceso de emulsificación. Dichas variables repercutirán sobre las propiedades finales de las emulsiones obtenidas.

METODOLOGÍA

Proceso de emulsificación

El reómetro de mezclado consiste en un recipiente cilíndrico equipado con un sistema doble helicoidal instalado en un reómetro de esfuerzo controlado RF II (Rheometric Scientific, EEUU). Se preparan diferentes emulsiones aceite en agua en dicho reómetro (girando a 0,8 rpm) con un homogeneizador Ultra Turrax T-25 (IKA, Alemania). El proceso detallado de emulsificación consiste en 4 etapas principales: (1) agitación de una dispersión proteica durante 30s con Ultra Turrax (UT), (2) adición de aceite y agitación con Ultra Turrax durante 420s, seguido de (3) 60s con agitación Ultra Turrax sin adición de aceite y finalmente, (4) 290s finales sin agitación ni adición para estabilizar el valor de viscosidad.

Caracterización de emulsiones

Las emulsiones se caracterizaron en función de tres variables: el tipo de agente emulsionante utilizado (concentrado proteico de albúmina, patata, arroz y cangrejo), la concentración de emulsionante (0,75; 1,50; 3,00 y 5,00 % (P/P)) y la velocidad de agitación durante el proceso de emulsificación (5000, 10000, 15000 y 20000 rpm). La concentración de aceite y el pH utilizado se mantuvieron constantes para todos los estudios (65% (P/P) y 3, respectivamente). Las variables utilizadas para cada uno de los estudios aparecen resumidas en la siguiente tabla (Tabla 1):

Tabla 4: Parámetros establecidos para cada uno de los estudios llevados a cabo.

Variables	Concentración Aceite (%)	pH	Tipo Agente Emulsionante (Concentrados proteicos)	Concentración Agente Emulsionante (% (P/P))	Velocidad Agitación (rpm)
Tipo Agente Emulsionante	65	3	Albúmina Arroz Cangrejo Patata	3,00	15000
Concentración Agente Emulsionante	65	3	Albúmina	0,75 1,50 3,00 5,00	15000
Velocidad Agitación	65	3	Albúmina	3,00	5000 10000 15000 20000

- Ensayos reológicos:

Se realizaron curvas de flujo en un reómetro RF II (Rheometric Scientific, EEUU). Las medidas se realizaron a 25°C desde 0,1 a 10 Hz, utilizando una geometría tipo placa-placa (diámetro: 25 mm) con superficie rugosa, evitando así el deslizamiento de la muestra (gap: 1 mm).

- Distribución de Tamaño de Gota:

Medidas de la distribución del tamaño de gota (DSD) se realizaron en un equipo de dispersión de luz láser (Malvern Mastersizer 2000, Reino Unido). Se utilizó SDS como material de desagregación para facilitar la alteración de los flóculos (aglomeración de gotas), a menudo lograda por interacciones gota-gota (Hebshy, Buffa, Guamis, Blasco-Moreno, Trujillo, 2015).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calibración Reómetro de mezclado

En primer lugar se llevó a cabo la calibración del reómetro de mezclado. Para ello, se estudió un fluido Newtoniano de viscosidad conocida (glicerina) y una de las emulsiones estudiadas, utilizando tanto la geometría convencional (platos paralelos) como el sistema helicoidal acoplado al reómetro. Los resultados mostrados en la Figura 1 demuestran que existe una muy buena concordancia entre ambas geometrías. Estos resultados confirman la validez del método utilizado para controlar la viscosidad de las emulsiones.

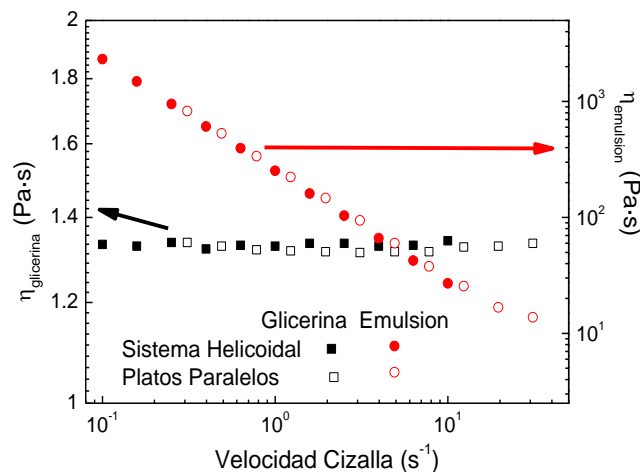


Figura 16: Valores de viscosidad (η) obtenidos en el reómetro de mezclado con el sistema helicoidal y la geometría convencional (platos paralelos) para la glicerina ($\eta_{glicerina}$) (fluido Newtoniano) y la emulsión ($\eta_{emulsion}$) de referencia (fluido no Newtoniano).

Evaluación del tipo de agente emulsionante

La Figura 2 muestra los resultados de la viscosidad obtenida del reómetro de tipo mezclador sobre el proceso de emulsificación para todos los sistemas de concentrados proteicos estudiados (arroz, cangrejo, patata y albúmina) a una concentración de aceite del 65% y a pH 3.

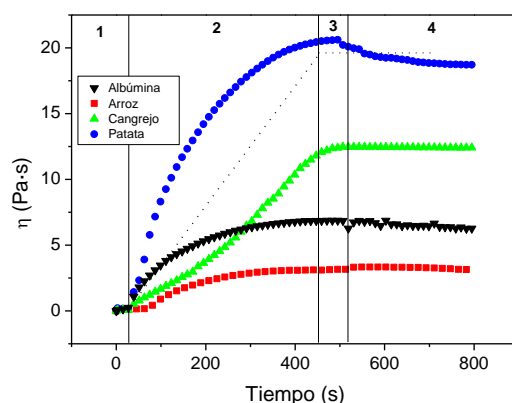


Figura 2: Evolución de la viscosidad a 0.8 rpm durante el proceso de emulsificación de emulsiones preparadas con diferentes agentes emulsionantes (concentrados proteicos de albúmina, arroz, cangrejo y patata). La línea de puntos corresponde con la evolución de fase oleosa durante el proceso.

Puede verse cómo la viscosidad de las emulsiones tiene una dependencia bastante marcada de la etapa de emulsificación. De ahí que, durante los primeros 30s (cuando el único componente es el concentrado proteico disperso en agua), la viscosidad no cambia durante el tiempo de mezclado. De hecho, no se encontraron diferencias significativas entre los distintos sistemas. Sin embargo, tras la adición de aceite (etapa 2), la viscosidad de los sistemas aumentó en cada caso hasta alcanzar un valor máximo. En esta etapa, se pueden encontrar dos comportamientos diferentes. Por un lado, las emulsiones basadas en arroz y albúmina alcanzaron un valor constante antes de terminar la adición de aceite. Por otro lado, las emulsiones de patata y cangrejo aumentan su viscosidad con la cantidad de aceite.

Por tanto, los perfiles de viscosidad revelan diferencias en función de la proteína utilizada. La viscosidad de la emulsión de patata es la más alta, mientras que la que se encuentra para las emulsiones usando arroz es la más baja. Las emulsiones basadas en cangrejo y albúmina mostraron un comportamiento intermedio.

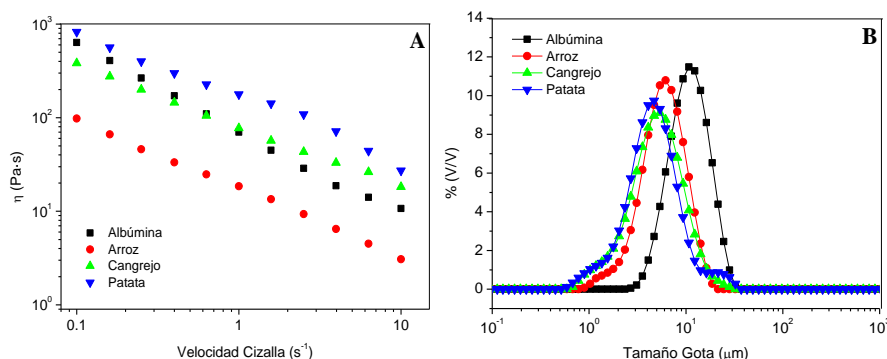


Figura 3: (A) Curvas de flujo y (B) Distribución de tamaño de gota de emulsiones preparadas con diferentes tipos de agente emulsionante (concentrados proteicos de albúmina, arroz, cangrejo y patata).

La Figura 3A muestra curvas de flujo para todas las emulsiones basadas en proteínas estudiadas (arroz, cangrejo, patata y albúmina). De forma general, cabe destacar el carácter viscoelástico de los sistemas estudiados, observándose en el descenso de la viscosidad con la velocidad de cizalla en el intervalo estudiado. En cuanto a la influencia de la naturaleza proteica, las emulsiones basadas en arroz son las menos viscosas. Por otra parte, la Figura 3B muestra la distribución de tamaño de gota para todas las emulsiones basadas en proteínas analizadas (albúmina, arroz, cangrejo y patata). Como norma general, las emulsiones a base de albúmina tienen los tamaños más altos y las emulsiones a base de patata los más bajos. Los resultados obtenidos de la viscosidad se pueden relacionar con el tamaño de gota ya que, en general, los valores de viscosidad más altos inducen tamaños de gota más pequeños.

Concentración de agente emulsionante

La Figura 4 muestra la evolución de la viscosidad de las emulsiones preparadas con diferente concentración de agente emulsionante (0,75; 1,50; 3,00 y 5,00 %).

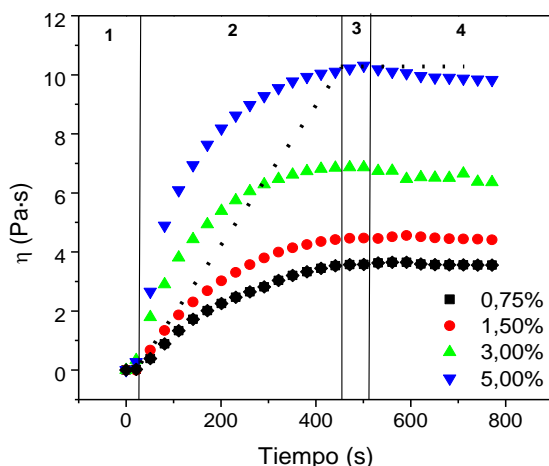


Figura 4: Evolución de la viscosidad a 0.8 rpm durante el proceso de emulsificación de emulsiones preparadas con diferentes concentraciones de agente emulsionante (0,75; 1,50; 3,00; 5,00 %). La línea de puntos corresponde con la evolución de fase oleosa durante el proceso.

El perfil es similar para todos los sistemas, mostrando una pendiente inicial alta (siendo más notable a mayor velocidad de agitación), relacionada con la adición de aceite y seguida por una disminución continua en la pendiente hacia un valor constante que corresponde al final de la adición de aceite. De acuerdo con los resultados mostrados en la Figura 4, la viscosidad de la emulsión depende de la concentración de proteína porque la emulsión obtenida con una concentración de proteína del 0,75% presenta una viscosidad final menor que la viscosidad obtenida con un 5,00% de proteína. Además, la viscosidad de la emulsión se estabiliza más claramente cuando el contenido de proteína es menor (0,75 y 1,50%).

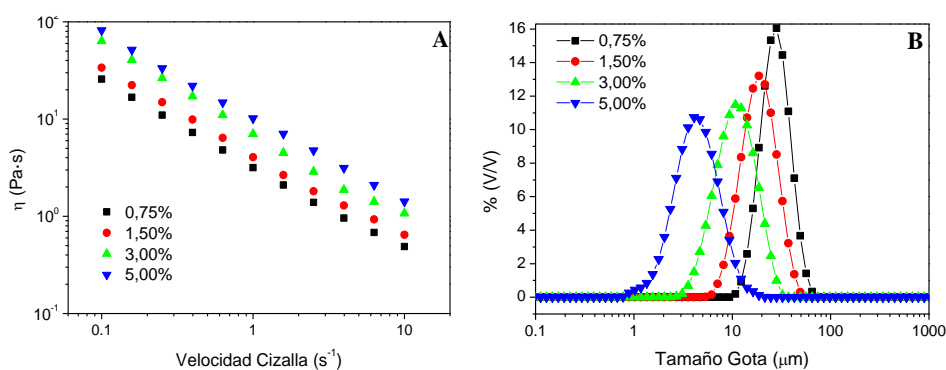


Figura 5: (A) Curvas de flujo y (B) Distribución de tamaño de gota de emulsiones preparadas variando la concentración de agente emulsionante (0,75; 1,50; 3,00 y 5,00 %).

Por otro lado, las propiedades de las emulsiones (viscosidad y distribución de tamaño de gota) se estudiaron y se muestran en las Figuras 5A y 5B. La viscosidad, que aparece en la Figura 5A, muestra una disminución a medida que aumenta la velocidad de cizalla. Comparando las diferentes emulsiones, la viscosidad fue más alta para las emulsiones con mayor concentración de proteínas (Nzihou, Bournonville, Marchal, Choplin, 2004). Por otro lado, la Figura 5B mostró las curvas de distribución de tamaño de gota con una forma unimodal, obtenidas para todas las emulsiones estudiadas, y mayores tamaños de gota cuando la concentración de proteína es menor.

Velocidad de agitación

La Figura 6 muestra la evolución de la viscosidad a 0.8 rpm durante el tiempo de emulsificación para emulsiones preparadas a diferente velocidad de agitación (5000, 10000, 15000 y 20000 rpm).

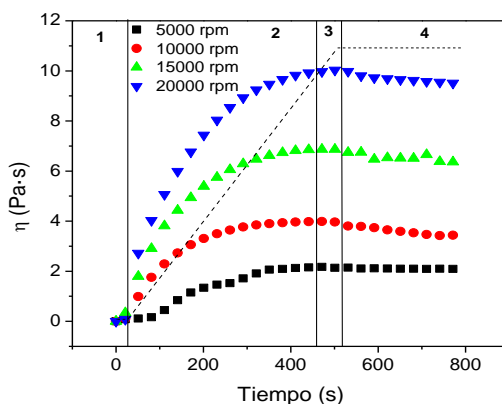


Figura 6: Evolución de la viscosidad (η) a 0.8 rpm durante el proceso de emulsificación de emulsiones preparadas a diferentes velocidades de agitación (5000, 10000, 15000 y 20000 rpm). La línea de puntos corresponde con la evolución de fase oleosa durante el proceso.

El perfil observado por todas las emulsiones es similar y consistente con el proceso de emulsificación explicado anteriormente. Además, la estabilización de la viscosidad de la emulsión se observa más claramente a velocidades bajas (5000 y 10000 rpm). La viscosidad final de las emulsiones estabilizadas aumenta conforme aumenta la velocidad, proporcionando mayor energía y aumentando considerablemente la viscosidad de la emulsión durante el proceso.

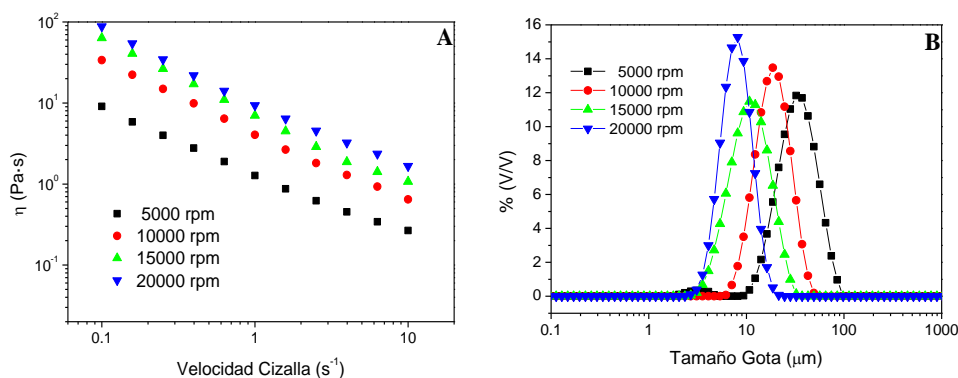


Figura 7: (A) Curvas de flujo y (B) Distribución de tamaño de gota de emulsiones preparadas a diferentes velocidades de agitación (5000, 10000, 15000 y 20000 rpm).

En la Figura 7A aparecen las propiedades de flujo de las emulsiones estabilizadas procesadas a diferentes velocidades de agitación. Todos los sistemas muestran una disminución continua de la viscosidad con la velocidad de cizalla aplicada (Cullen, 2009). Cuanto mayor sea la velocidad de agitación, mayor será la viscosidad, teniendo la misma secuencia en viscosidad que la que se muestra en la Figura 6.

Además, como se muestra en la Figura 7B, se observa una distribución unimodal en los perfiles de tamaño de gota para todas las emulsiones. En cualquier caso, se obtuvieron tamaños mucho más altos cuando las emulsiones se elaboraron a una velocidad de agitación menor, lo que se explica por un mecanismo de coalescencia que se produce cuando la velocidad de agitación es menor. En otras palabras, el proceso de formación de nuevas gotas se encuentra limitado frente a la coalescencia en los sistemas a menor velocidad de agitación.

CONCLUSIONES

Se ha validado un nuevo reómetro de mezclado para evaluar la viscosidad de las emulsiones durante el proceso de emulsificación. De hecho, se ha alcanzado una buena concordancia entre los datos obtenidos mediante el reómetro de mezclado y un reómetro convencional. Los resultados reflejan la importancia de controlar el proceso de emulsificación pues permite controlar las propiedades reológicas y microestructurales de la emulsión durante y al final del proceso.

Comparando las diferentes variables, se concluye que un aumento en la concentración de proteína y en la velocidad de agitación da lugar a sistemas con una mayor viscosidad y menores tamaños de partícula obteniéndose, por consiguiente, sistemas con una mayor estabilidad. Además, parece que las emulsiones estabilizadas con concentrado proteico de patata conduce a sistemas con mayor viscosidad y consecuentemente más estables.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación proporcionada por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte del Gobierno de España (JC2010-0117). Los autores también agradecen a la Universidad de Sevilla por la beca del V Plan Propio de Investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- Cullen, P.J. (2009). *Food Mixing: Principles and applications*. Dublin, Ireland: Wiley-Blackwell.
- Galus, S.; Kadzinska, J. (2015). Food applications of emulsion-based edible films and coatings. *Trends in Food Science & Technology*, 45, 273-283.
- Hebisy, E.; Buffa, M.; Guamis, B.; Blasco-Moreno, A.; Trujillo, A.J. (2015). Physical and oxidative stability of whey protein oil-in-water emulsions produced by conventional and ultra high-pressure homogenization: Effects of pressure and protein concentration on emulsion characteristics. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 32, 79-90.
- Melik, D.H.; Fogler, H.S. (1988). *Encyclopedia of emulsion technology, III*. Becher, P. (editor). New York, USA: Marcel Dekker.
- Nzihou, A.; Bournonville, B.; Marchal, P.; Choplin, L. (2004). Rheology and heat transfer during fly ash phosphatation in a rheo-reactor. *Chemical Engineering Research and Design*, 82, 637-641.
- Romero, A.; Cordobés, F.; Guerrero, A. (2009). Influence of pH on linear viscoelasticity and droplet size distribution of highly concentrated O/W crayfish flour-based emulsions. *Food Hydrocolloids*, 23, 244-252.

COMUNICACIONES ORALES. DEMOS

C13

SISTEMA INFORMÁTICO MÓVIL PARA EL APOYO AL CESE TABÁQUICO MEDIANTE MENSAJES MOTIVACIONALES PERSONALIZADOS

Luna-Perejon, Francisco, Dominguez-Morales, Juan Pedro, Civit Masot, Javier, Hors-Fraile, Santiago, Civit-Balcells, Anton. Robótica y Tecnología de Computadores Aplicada a la Rehabilitación. Departamento de Arquitectura y Tecnologías de Computadores. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática. Universidad de Sevilla.

RESUMEN

El proyecto SmokeFreeBrain estudia la efectividad de una variedad de intervenciones con el objetivo de dejar de fumar usando diferentes técnicas. Uno de los métodos consiste en la aplicación de un protocolo de intervención basado en terapia del comportamiento mediante el uso de aplicaciones móviles, gamificación y envío de mensajes motivacionales de apoyo al paciente en tratamiento para el cese tabáquico o al usuario que está intentando dejar de fumar. Se pretende aprovechar el uso generalizado de los dispositivos móviles en el día a día como una herramienta de control y apoyo, aplicando teoría de juegos al progreso del usuario en su cese tabáquico, y con el uso de un sistema recomendador para seleccionar mensajes motivacionales acordes al perfil del usuario. El sistema desarrollado contempla la creación de una aplicación móvil para llevar a cabo dicho protocolo de intervención, así como el servidor que gestione las peticiones de los usuarios, contenga el sistema recomendador diseñado, tenga la capacidad de mandar mensajes motivacionales a los usuarios y recoja información de uso sobre la aplicación para su futuro análisis.

Palabras clave: *sistema recomendador, tabaquismo, aplicación móvil.*

ABSTRACT

The SmokeFreeBrain studies the effectiveness of a variety of interventions with the goal of quitting smoking by using different techniques. One of the methods consists in the application of an intervention protocol based on behavioral therapy, applying mobile applications, gamification and sending motivational messages of support, both to the patient in treatment for smoking cessation and, to the user who is trying to quit smoking independently. It aims to take advantage of the widespread daily use of mobile devices as a tool for monitor and support, applying game theory to the user progress in their smoking cessation, and recommendation systems for the selection of motivational messages according to the user profile. The system developed for this purpose consists of a mobile application that allows carrying out the intervention protocol as well as the server that manages user requests, implements the recommender system, send motivational messages to users and register usage data to analyze effectiveness.

Keywords: *recommender system, smoking, mobile application.*

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Son muchas las patologías cuyo principal causante es el tabaquismo, y también es un factor muy importante en otras (WHO, 2013). Afecta principalmente a los pulmones y tal es la cantidad de personas que se ven afectadas (un tercio de la población mayor de 15 años) que ha pasado a ser la principal razón de invalidez y muerte en el mundo (Kaplan, 2013). Por lo tanto, es muy importante controlar y reducir el tabaquismo para la prevención de dichas enfermedades.

La adicción a la nicotina presente en el tabaco produce síntomas de abstinencia (Shiffman, 1979), lo que dificulta dejar de fumar (WHO, 2015). Existen fármacos y métodos basados en terapia psicológica para facilitar el hacer frente a los síntomas, donde los mejores resultados parecen lograrse con la combinación de técnicas y el tratamiento personalizado al paciente (Kotz, 2014).

Para crear una intervención adaptada, varios autores emplearon computadores (Swartz, 2006) (Oenema, 2008) puesto que permite llegar a los fumadores con poco coste (Cobb, 2005). Estudios han

demostrado que las recomendaciones de estilo de vida personalizadas usando aplicaciones móviles pueden ser efectivas (Paay, 2015). Por ello, las aplicaciones de apoyo para dejar de fumar también han sido un tema de estudio en el pasado (Hoepfner, 2015).

Los sistemas de recomendación de salud (HRS) pueden usarse para adaptar las recomendaciones de salud (Fernandez-Luque, 2009). Algunos autores han identificado características que los HRS futuros deberían poseer para maximizar su impacto (Schäfer, 2017). Sin embargo, una reciente revisión del alcance (Hors-Fraile, 2017) ha demostrado que hay muy pocos estudios que mencionen el uso de aspectos básicos para tales sistemas de salud.

En este contexto de recomendaciones para dejar de fumar adaptadas a la computadora móvil, el proyecto europeo SmokeFreeBrain (SmokeFreeBrain, 2015) está ejecutando dos intervenciones que usan m-Health y sistemas de recomendación como apoyo a los pacientes para dejar de fumar. Una de ellas, 3M4Chan, se está llevando a cabo en Taiwán, enviando mensajes personalizados basados en el modelo I-Change BCT utilizando un HRS que selecciona los más relevantes para cada usuario.

El objetivo de este artículo es presentar el diseño y el desarrollo del sistema informático empleado para la intervención 3M4Chan como apoyo para el cese tabáquico. Lo componen una aplicación móvil para smartphones con sistema operativo Android y un servidor que almacena los datos de los usuarios, aloja el HRS y se encarga de mandar los mensajes motivacionales.

METODOLOGÍA

Escenario

El sistema implementado está destinado a su uso en la intervención 3M4Chan con pacientes que desean dejar de fumar reclutados en el Taipei Medical University Hospital, y la Wellcome Clinic. El sistema fue realizado entre enero de 2017 y agosto de 2017 y comprende el sistema de recomendación que selecciona y envía mensajes motivacionales para ayudar a los pacientes a permanecer sin fumar, y una aplicación móvil Android que recibe esos mensajes y permite a los pacientes valorarlos. Esta aplicación se llama "有戒有", que significa "Salir y regresar" en mandarín. La aplicación tiene su nombre anglosajón "Quit and Return" de cara a países occidentales, QaR a partir de ahora.

Diseño del servidor

El servidor diseñado tiene como propósito satisfacer las funcionalidades que componen el sistema, que pueden clasificarse en tres bloques, a saber, el servicio a la aplicación móvil, el sistema de recomendación y el servicio de notificación.

El sistema recomendador es el encargado de seleccionar para los usuarios mensajes que más se adecuan en base a datos de perfil y la valoración de mensajes enviados previamente. El conjunto de mensajes fue diseñado, redactado y validado por investigadores expertos en teoría de cambio de comportamiento. Cada mensaje queda categorizado en base a la información de perfil que se recoge del usuario y siguiendo las recomendaciones de WHO (De Vries, 2017) y el modelo de cambio de comportamiento I-Change diseñado por de Vries (De Vries, 2003). Cada una de las características que poseen los mensajes reciben el nombre de meta-features.

El algoritmo, un sistema híbrido entre un sistema recomendación basado en conocimiento y un sistema de recomendación de filtro colaborativo, selecciona los mensajes válidos para cada usuario en función de las meta-features para posteriormente calcular qué mensaje tiene mayor relevancia. Este grado de relevancia se calcula en base a las valoraciones de los mensajes que han realizado otros usuarios con un perfil similar a quien va destinado el mensaje. Por último, los mensajes son personalizados usando el nombre de perfil que el usuario ha introducido en la aplicación. Los mensajes seleccionados se registran en el servidor y se envían a una hora adecuada.

El segundo bloque envía los mensajes y otras preguntas de seguimiento mediante el servicio de notificación push Firebase Cloud Message, soportado por Google. La verificación del servicio se realiza mediante huella digital SHA-1, que impide que la aplicación móvil reciba notificaciones de otras fuentes. El servidor se comunica con el servicio de Firebase mediante cifrado web SSL/TLS. La identificación de

cada dispositivo por parte del servicio de mensajería se realiza mediante el uso de tokens o claves temporales con caducidad, sin necesidad de aportar claves o nombres de usuario.

El tercer bloque contempla la comunicación directa con la aplicación siguiendo un esquema clásico cliente-servidor y en el que se está a la escucha continua de las peticiones de adición, modificación o recuperación de datos que pueda realizar la aplicación. Para ello, se ha empleado protocolo HTTP con peticiones post. Las peticiones al servidor en las que se solicita el acceso, adición o modificación requieren una autenticación del usuario, en el cual se emplea el método digest authentication propio de un protocolo HTTP.

Para la creación del servidor hemos escogido Mirth Connect. Mirth Connect es un motor de interoperabilidad de software libre y multiplataforma que soporta muchos estándares de interoperabilidad, incluyendo los más empleados en entornos clínicos y hospitalarios, como HL7 v2.6, HL7 v3, SDA, CCD, CCR y DICOM. Además, maneja gran cantidad de protocolos de comunicación, tales como LLP, TCP/IP, HTTP o web services con SOAP o JMS. Estas características hacen posible la intercomunicación con EHR que sigan los estándares y protocolos de comunicación más extendidos, agilizando la integración con estos sistemas. Mirth Connect es ampliamente usado para resolver pequeños casos de integración entre aplicaciones en entorno de la salud. Mirth Connect ofrece una implementación ágil gracias a su interfaz de monitorización Mirth Administrator y su arquitectura basada en canales, que permite desarrollar de forma estructurada y observando el resultado de cada una de las fases que componen el flujo de comunicación. Una vez listo para su uso real, el almacenamiento de información en cada fase se desactivó para cumplir con la privacidad de los datos. Otra de las características de Mirth Connect es que está basado en Mule ESB, un motor de mensajería de código abierto y robusto en el recibimiento y envío de información.

Para el almacenamiento de la información hemos seleccionado PostgreSQL, un sistema de gestión de bases de datos objeto-relacional. Está distribuido bajo licencia BSD y es de código abierto. PostgreSQL utiliza un modelo cliente/servidor y usa multiprocesos en vez de multihilos para garantizar la estabilidad del sistema. Un fallo en alguno de los procesos no afecta al resto, por lo que el sistema continúa funcionando.

Diseño de la aplicación móvil

La aplicación QaR fue diseñada partiendo de la aplicación Libre de Humos, en adelante LdH, una aplicación para sistemas operativos Android utilizada para el estudio social, local y móvil (SoLoMo) del mismo proyecto SmokeFreeBrain. La aplicación LdH posee varias funcionalidades en base a una revisión de la literatura, entrevistas con profesionales y el estudio de mercado de aplicaciones similares. Para la aplicación QaR tomamos las funcionalidades que más uso tuvo en la aplicación LdH y rediseñamos la organización y localización de éstas, para mejorar la accesibilidad y usabilidad de la aplicación.

Uno de los cambios principales entre las dos aplicaciones fue el requisito para QaR de ser abierto y accesible para usuarios que no fueran pacientes del hospital. La aplicación LdH extraía el perfil de usuario de los pacientes perteneciente a la intervención a partir de la conexión con datos clínicos del hospital Virgen del Rocío de Sevilla. Para la nueva aplicación, el usuario debería proporcionar sus datos de perfil desde la aplicación, por lo que era necesario establecer un modo de introducción que fuera ágil y no fuera complicado.

Respecto a los mensajes y el modo de valorarlo, se establecieron nuevos requisitos. Para obtener una puntuación más precisa, se debía modificar el sistema de puntuación en base a tres opciones: “me gusta”, “no me gusta”, “me da igual” por otro que pudiera presentar una mayor variación en las respuestas. Por otra parte, establecimos mejorar la configuración en el recibimiento de mensajes, de modo que el usuario pudiera escoger más opciones que sólo el rango de horas diario en el que le gustaría recibir los mensajes.

La aplicación QaR es una aplicación móvil nativa compatible con Android API v16 "Jelly Bean" o superior y a la que puede acceder cualquier usuario desde Google Play Store. Se escogió esta versión de sistema operativo porque es soportado por más del 95% de los smartphones Android en uso según las estadísticas de Google Play Store, y es la primera que admite el recibimiento de notificaciones personalizadas con botones de acción, requerido para hacer un seguimiento apropiado al usuario mediante preguntas de ágil respuesta. Se ha trabajado con librerías de compatibilidad oficiales para permitir su uso por la gran mayoría de los usuarios con móvil Android. De cara a la compatibilidad, se han

empleado recursos apropiados tales como imágenes de distinta resolución, puesto que versiones anteriores de Android no soportan el uso de imágenes vectoriales en algunas de sus componentes de interfaz.

Para la comunicación con el servidor, como ya se ha mencionado anteriormente, la aplicación se comunica como cliente y usamos protocolo HTTP con peticiones post. La información enviada queda encapsulada en formato XML. Las peticiones contienen las credenciales de usuario cifradas mediante protocolo Digest Authentication propio de HTTP para ser validadas en el servidor

Para obtener resultados más precisos, en el que se pudiera analizar el uso de la aplicación por perfil de usuario y grado de actividad, establecimos emplear algún método adicional al uso de estadísticas de uso de Flurry Analytics y ampliar los datos que se recogen. La opción acordada finalmente fue implementar la extracción de datos directamente desde la aplicación y comunicarla al servidor con peticiones HTTP añadidas, para su almacenaje en las tablas de la base de datos pertinentes, creadas para este propósito.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados sobre el servidor

El conjunto de funcionalidades implementadas en el servidor puede verse resumido en la Figura 2. Como ya se ha mencionado en el apartado de diseño, el servidor ha sido implementado mediante Mirth Connect, que organiza las funcionalidades programadas en unidades denominadas canales. La tabla 1 recoge los canales y sus funciones.

Uno de los canales que contiene nuestro sistema da servicio al cliente, es decir, la aplicación móvil mediante comunicación HTTP y con XML como cuerpos del mensaje que recogen la información principal de la petición. La petición puede ser de varios tipos, y según éste se comprueba que contenga todos los campos necesarios para que la petición sea válida. En caso afirmativo, se procede a realizar la acción pertinente. Las posibles peticiones HTTP quedan recogidas en la tabla 1. Las peticiones de adición de información abarcan la introducción de nueva información sobre el usuario y los mensajes recibidos. Las peticiones de modificación de información sobrescriben datos de usuario o sus mensajes motivacionales. El proceso es similar en todas las peticiones (Figura 1); en primer lugar, se procesa la petición HTTP y se extrae la información contenida en el cuerpo XML. Si la petición cumple con los requisitos de información necesaria, se realiza la operación en la base de datos PostgreSQL usando los datos aportados en la petición. Una vez se obtiene la información de la base de datos o se confirma que la operación ha sido realizada correctamente, se elabora una respuesta apropiada nuevamente en un cuerpo XML. Casos especiales son la recuperación de contraseña y registro en el sistema, que ante una petición válida elaboran un token aleatorizado y lo envían al correo del usuario en forma de enlace para seguidamente, usando dicho enlace se finaliza la acción correctamente; con esto se verifica la autenticidad del usuario a partir del correo.

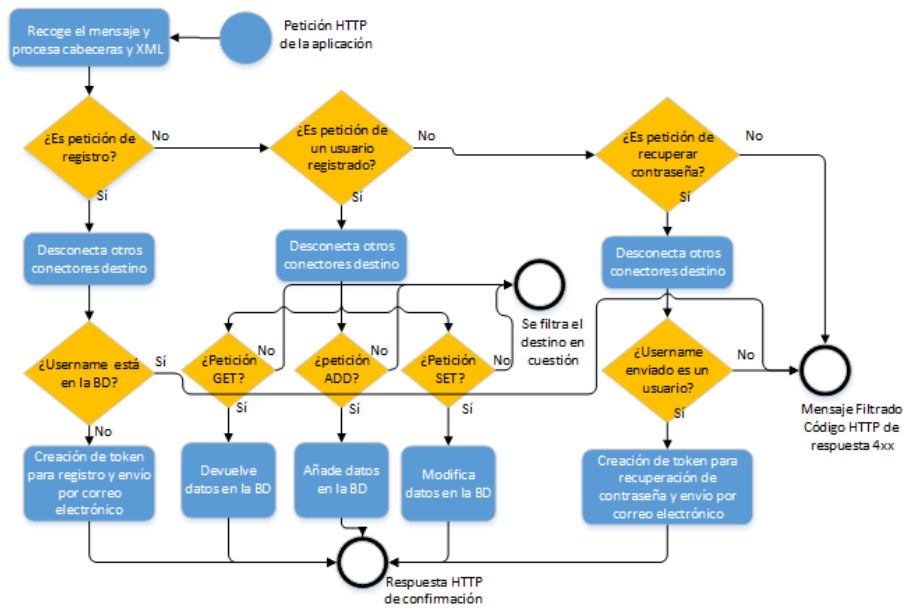


Figura 1: Diagrama de flujo del canal encargado de gestionar las peticiones de la aplicación, siguiendo un esquema cliente-servidor inspirado en peticiones CRUD.

El sistema recomendador se implementa en un canal independiente. Se estableció que se ejecutase una vez al día. El algoritmo que lo compone está compuesto de varias partes. Para cada usuario, en una primera instancia se seleccionan los mensajes que coinciden con el idioma del usuario y cuyas meta-features coinciden con su perfil. Algunos mensajes tienen metafeatures asociadas al día o a la hora de envío, por lo que se calcula la hora en la que se pretende mandar el mensaje y se toma el día de la semana para realizar el filtro de mensajes también en base a estos datos. Seguidamente, se hace una distinción entre usuarios. Con los usuarios que no son pacientes de la intervención les fue asignado el grupo control en el momento en que rellenan su perfil. Estos usuarios reciben uno de los mensajes que coinciden con su perfil, sin intervenir la segunda fase del sistema recomendador. Los pacientes de la intervención y el resto de usuarios no pertenecientes a él reciben un mensaje en función de las valoraciones realizadas por los usuarios con mayor similitud de perfil. Se escoge el mensaje con mayor puntuación siempre y cuando no ha sido mandado previamente al usuario. Si todos los mensajes disponibles han sido enviados, se tomaría el mensaje que solo se ha mandado una vez con mayor puntuación. Si se han mandado dos veces todos los mensajes disponibles, se elegirá el que haya sido mandado dos veces. Los mensajes no pueden ser mandados más de tres veces. Todo mensaje seleccionado se programa y registra en la base de datos con una fecha programada, a la espera de que sea mandado por el canal de envío mediante notificación push.



Figura 2: Diagrama de red del sistema desarrollado. En él se recogen las funciones que contempla el servidor.

El envío de notificaciones de seguimiento queda implementado en canales que se ejecutan dos veces al mes. En el canal correspondiente de selección de cuestionario se localizan en la base de datos los usuarios que están en un intento de dejar de fumar y la fecha en la que empezó. Con ello, se calcula la fecha a la que deba enviarse la notificación y se registra en la base de datos para su futuro envío. Estas notificaciones las hay de dos tipos. La primera pregunta al usuario si sigue sin fumar, para hacer un mejor seguimiento, y la segunda, si desea cambiar el número de mensajes que le llegan semanalmente, pudiendo elegir entre un mensaje semanal, tres mensajes semanales o uno diario.

La funcionalidad de envío de notificaciones mediante notificación push se realiza mediante un único canal. Este canal ejecuta un proceso cada cinco minutos y extrae de la base de datos aquellas notificaciones programadas para mandar en ese intervalo de tiempo. Las notificaciones que resultan ser mensajes motivacionales se manipulan para incluir el nombre del usuario en la parte del mensaje que corresponda usando expresiones regulares, que está marcado por una etiqueta identificativa “<name>”. También se añade un metadato para indicar si el mensaje ha sido enviado con anterioridad al mismo usuario. En caso de que sea una notificación a modo de cuestionario de seguimiento, el mensaje no es necesario procesarlo. El texto de la notificación, el tipo de notificación y un identificador único que representa en la base de datos al registro de notificación son mandados al servicio Firebase Cloud Message junto con un token que identifica al usuario en dicho servicio. Este token es suministrado por Firebase a la aplicación y es mandada por el cliente al servidor por petición HTTP.

Canales del servidor	Listado de funciones
Escucha HTTP	Atender a solicitudes de: <ul style="list-style-type: none"> - Registro - Recuperación de contraseña - Inicio de sesión y recuperación de datos - Editar datos - Añadir datos
Notificación de pregunta: ¿el usuario sigue sin fumar?	- Seleccionar una fecha para mandar la pregunta.
Notificación de pregunta: frecuencia de mensajes	
Notificación de mensaje motivacional: Sistema recomendador	- Filtro de mensajes por meta-feature - Selección de mensaje en base a valoraciones de usuarios de perfil similar
Selector de mensajes	- Localizar notificaciones a enviar - Adaptar mensajes motivacionales con el nombre del usuario - Comunicación con el servicio de notificación push

Tabla 5: Listado de canales y funciones de las mismas

Resultados sobre la aplicación

Del estudio del análisis de la aplicación LdH mencionado en la sección de diseño obtuvimos las secciones que más se utilizaron. Aproximadamente un 49% del tiempo de uso de la aplicación residía en tres secciones: la bandeja de mensajes, la sección de perfil de usuario y la de estadísticas. Dado este resultado, para dotar a la aplicación de una organización intuitiva y adaptada al usuario, se estableció dotar a la pantalla principal de la aplicación de una estructura de pestañas que permitiese un desplazamiento por las secciones ágil e intuitivo (Figura 4). Establecimos este diseño al analizar los resultados obtenidos en el informe de usabilidad MUSiC de la aplicación LdH, en el que destacó que gran parte de los usuarios encontraban dificultades para localizar el modo de navegar por la aplicación mediante un botón que abría un menú lateral desplegable.

Otras secciones se mantuvieron por su relevancia, como es el caso de la sección de preferencias y de introducción de credenciales para iniciar sesión. Además de estas secciones fue necesario crear secciones de introducción de formularios de registro e introducción de datos de perfil. La aplicación también puede mostrar cuestionarios puntuales cuando recibe notificaciones de preguntas de seguimiento y están pendientes de contestación. Otras funciones adicionales son los tutoriales adheridos a las secciones principales, que muestran información de uso de forma atractiva e interactiva, así como la

adquisición de datos de uso. La Figura 3 ilustra de forma resumida la organización y flujo de acceso a las secciones.

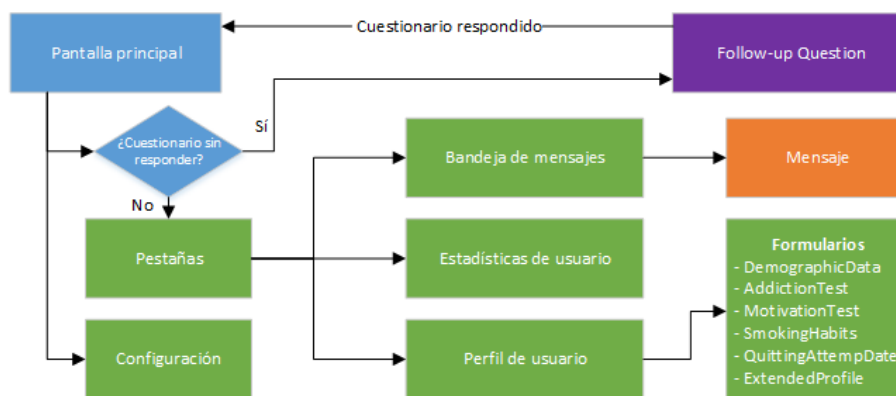


Figura 3: Diagrama de flujo de la aplicación Quit and Return. Los bloques “Pantalla principal” y “Pestañas” son contenedores de las secciones. Para simplificar, los formularios quedan reflejados en un único bloque, aunque en realidad son secciones independientes.

La sección de perfil de usuario muestra, una vez han sido introducidos, datos relacionados con los datos personales del usuario y datos relacionados con el intento de dejar de fumar. Desde la mencionada sección de perfil de usuario se puede acceder a todos los formularios para completar y modificar el perfil, así como establecer o eliminar un nuevo periodo de dejar de fumar. Estos formularios se apoyan en un código de colores para indicar si está incompleto (rojo o amarillo) o rellenado, siguiendo las concepciones sociales más extendidas. Cuando el usuario finalmente establece una fecha para dejar de fumar la sección pasa a mostrar un resumen de sus datos de perfil. Para esto, se diseñó la sección de forma modular, creando bloques de contenido que son visibles o no dependiendo del estado de completitud de la información. Cada vez que se guarda algún cambio en los datos, se comprueba el estado de completitud de la información y en base a esta se establece un estado de la aplicación. Este estado se comprueba para mostrar los bloques de contenido adecuados.

Todos los formularios aportan información al usuario en caso de fallo o éxito al rellenarlos para que sea más sencillo completarlos. Cuando el usuario rellena y guarda algún formulario, se comprueba junto al estado de completitud si los datos que se han introducidos son coherentes entre sí o con otra información que se haya incluido en otros formularios. Si se localiza algún error, se notifica por medio de un mensaje de error en la parte inferior de la pantalla y si procede se remarcan los campos del formulario donde se han introducido datos incorrectos o incoherentes cambiando el color de fondo a rojo.

Cuando se ha establecido la fecha para dejar de fumar, aparecerá junto con la información de perfil un formulario adicional con preguntas opcionales. Lo diseñamos de esta forma para reducir la barrera de entrada de los usuarios para comenzar a usar la aplicación. Las respuestas de los formularios permiten caracterizar al usuario y establecer sus meta-features, lo cual permite al sistema recomendador mandar los mensajes personalizados.

La sección de estadísticas sólo muestra un mensaje de texto hasta que el usuario comienza un intento de abandono en su sección de perfil. Cuando el usuario comienza a dejar de fumar, la sección de estadísticas contiene información sobre el número de horas de vida recuperadas al no fumar, la cantidad de cigarrillos que el usuario no ha fumado después de dejar de fumar, el dinero ahorrado al no comprar cigarrillos y el número días sin fumar del usuario. Estos valores se calculan a partir de los datos de fumador suministrados, estimando el número de cigarrillos no consumidos y gasto económico acumulado en base a sus hábitos diarios y semanales previos. Además de esto, la sección proporciona objetivos para cada uno de estos cuatro valores, que van incrementando al alcanzarse, en forma de barra de progreso.



Figura 4: Secciones principales de la aplicación. La pantalla principal contiene un menú de pestañas para navegar entre las secciones principales. En el borde superior de la pantalla se sitúan tres botones, de izquierda a derecha, el acceso al menú lateral desplegable, el acceso al tutorial de la aplicación para esta pantalla y el acceso a la configuración de la aplicación.

La sección de mensajes actúa como una bandeja de entrada para los mensajes que los usuarios reciben para ayudarlos a dejar de fumar. En esta bandeja de entrada, los usuarios pueden ver qué mensajes ya se han leído y también marcar los mensajes como no leídos. Los mensajes se muestran como un listado y son accesibles clicando en cada uno. Una vez se accede a uno, aparece una ventana emergente que muestra el mensaje completo y un formulario de valoración de tipo 5 estrellas. Se eligió esta opción de valoración porque da un mayor significado a las tasas en comparación con la opción de solo 3 de la aplicación LdH como se describe por Hors-Fraile et al. (Hors-Fraile, 2016), y porque representa un elemento internacional y fácil de entender. La implementación de la ventana emergente se realiza por medio de elementos de contenido denominados dialogs. La valoración con cinco estrellas se implementó usando una barra de progreso discretizada y editable proporcionada por la API oficial, denominada rating bar.

Cuando se valora el mensaje o se cambia la valoración, la respuesta es recogida y mandada al servidor junto con el tiempo de lectura y el tiempo transcurrido desde que el mensaje fue recibido hasta el momento de lectura. Ante una falla en la comunicación, la información recabada se almacena en la base de datos local, elaborada con SQLite, para mandarla posteriormente al servidor. Cada vez que el usuario accede a la aplicación, de forma transparente se hace una petición al servidor para mandar la información acumulada. Ante una respuesta de confirmación del servidor, los datos acumulados se eliminan de la base de datos local para procurar no mandarlos de nuevo en un futuro.

La sección de configuración tiene también su botón de acceso desde la pantalla principal de la aplicación. En ella se puede impedir que aparezcan notificaciones en la bandeja de notificaciones de Android temporalmente; además, la personalización del rango de tiempo en que quiere recibirse los mensajes ha sido ampliada para que sea configurable para cada día de la semana de forma individual.

Notificaciones de mensajes o de nuevas preguntas de seguimiento aparecen en la bandeja de Android cuando son recibidas desde el servicio de notificación push. Las notificaciones con preguntas de seguimiento aparecen con opciones de contestación, de modo que posibilita una respuesta ágil por parte del usuario sin tener que entrar en la aplicación. Este tipo de notificaciones son posibles desde la versión 4.1 “Jelly Bean” de Android, motivo por el cual se ha escogido esta versión. En caso de que no se conteste a una pregunta desde la bandeja de notificaciones en el momento en que se abra la aplicación aparecerá automáticamente un formulario, equivalente a la pregunta de la notificación, para solicitar la respuesta del usuario. Esto se logra estableciendo en la aplicación un estado de “pregunta sin responder” desde el momento en que se recibe la notificación, del que se sale únicamente al contestar dicha pregunta. El cuestionario, al poseer únicamente una pregunta y de tipo opción única, posee un grado de intrusión leve

en el flujo de uso de la aplicación. Además, este tipo de cuestionario son únicamente de dos tipos, definidos en el apartado de resultados del servidor, y son enviados al usuario dos veces al mes.

El menú desplegable mencionado que poseía la aplicación también se ha empleado en ésta, pasando a ser principalmente una alternativa de acceso a las secciones principales que ya hemos descrito.

Al igual que ocurre con la valoración de los mensajes, se registra información de uso de la aplicación, consistente en el tiempo transcurrido en una sección y la fecha de acceso. Estos datos se registran empleando tanto las funciones del servicio Flurry Analytics como en el servidor propio para futuros análisis. Cuando el usuario ha visitado varias secciones, la aplicación se comunica con el servidor para mandar los datos que ha almacenado hasta ese momento en la base de datos local. Al recibir una confirmación del servidor, los datos se borran en local para evitar reenviar la información.

DISCUSIÓN

Diseñamos una aplicación móvil y un servidor que contiene un innovador algoritmo de sistema híbrido de recomendación. Este sistema puede funcionar sin la necesidad de una estación clínica que proporcione datos de usuario. Aunque este hecho suele ser positivo (los datos del usuario de registros electrónicos de salud pueden ayudar a adaptar mejor las recomendaciones), podría impedir su reutilización en otros entornos en el que se carezca de acceso a un sistema de este tipo. Sin embargo, utilizamos la interfaz de comunicación Mirth, que es compatible con historiales clínicos digitales (HRS), por lo que garantizamos que se necesitan modificaciones mínimas si los futuros investigadores desean utilizar los datos del sistema recomendador para un HRS.

Los futuros investigadores podrán usar los siguientes datos para analíticas recogidos en nuestra base de datos para futuros análisis:

- Datos demográficos (género, edad, situación laboral), de hábito de fumar (cigarrillos diarios consumidos, gasto semanal en tabaco - cantidad y divisa -, fecha en que se comenzó a fumar, test de motivación y test de adicción) y perfil extendido que incluye información basada en el modelo de cambio de comportamiento I-Change.
- Centro médico en el que se ha asistido al paciente, y la fecha de registro.
- Comportamiento en la aplicación, obteniendo los accesos a las secciones de la aplicación, el momento en el que accede (fecha y hora) y la duración del acceso.
- Valoración de los mensajes, datos de lectura (fecha de envío, fecha de notificación, fecha de lectura, tiempo hasta la lectura y tiempo de lectura) e historial de valoración (las valoraciones que ha tenido el mensaje en cada lectura).
- Suma de todo el tiempo diario de actividad estimado por Google Fit
- Cantidad de descargas en el tiempo, tiempo de sesión promedio y cantidad de usuarios.

La aplicación QaR está disponible sólo para smartphones con sistema operativo Android. Los usuarios de tabletas Android y otros sistemas operativos como iOS (Apple) no son compatibles, y un gran segmento de la población puede quedar aislado del estudio. Además, para poder enviar todos los mensajes al usuario, el sistema necesita que respondan más de 60 preguntas, lo que representa una clara barrera de entrada para muchos usuarios.

Las recomendaciones de mensajes se envían con notificaciones automáticas a los teléfonos con Android. Sin embargo, cuando el QaR se cierra y se descarta, la ROM interna del teléfono inteligente maneja las notificaciones push de forma diferente. Por lo tanto, algunos teléfonos aún pueden mostrar la notificación en el teléfono del usuario, mientras que otros lo mantendrán silenciado hasta que el usuario abra la aplicación QaR cuando la aplicación se haya cerrado y descartado. Esta variación en el comportamiento puede afectar la manera en que los usuarios interactúan con la aplicación QaR y cambian su comportamiento de manera efectiva.

CONCLUSIONES

En este documento se ha descrito el diseño y desarrollo de un sistema informático para el apoyo a personas que intentan dejar de fumar, conformado por una aplicación móvil, un servidor y una base de datos. Se ha seguido una arquitectura cliente-servidor complementada con un servicio de terceros de notificación push.

Del lado del cliente, nos hemos enfocado en mejorar una aplicación móvil previa dotándola de mayor accesibilidad y usabilidad para que sea más atractiva, facilitando su manejo mediante información en forma de tutorial y explicación de posibles errores que puedan surgir durante el rellenado de los formularios, y permitiendo su uso general por cualquier usuario sin necesidad de pertenecer a un protocolo de intervención. La aplicación permite el seguimiento del usuario mediante preguntas, y recibir mensajes motivacionales personalizados mediante mensajería móvil.

Se ha elaborado un servidor con un HRS, inspirado en el modelo de teoría de cambio de comportamiento I-Change, que adapta el tratamiento seleccionando mensajes motivacionales personalizados según el perfil del usuario. El servidor tiene la capacidad de atender peticiones del cliente, haciendo uso de una base de datos, de programar el envío de mensajes seleccionados con el HRS y notificaciones para hacer preguntas de seguimiento al usuario, y de comunicarse con el servicio de mensajería móvil para que proceda al envío de los mensajes o preguntas en la hora programada.

El sistema está enfocado a estudiar este sistema de recomendación en la intervención 3M4Chan. El sistema recoge datos de uso y valoración de los mensajes a partir aplicación. Los resultados de la intervención, así como los datos de uso en base al perfil de usuario y el contexto quedarán a disposición de la comunidad científica para estudios futuros. Esperamos que este trabajo inspire otros estudios de apoyo en la salud tanto a través de sistemas informáticos como empleando técnicas de cambio de comportamiento.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los doctores Hein de Vries y Francine Scheneider su contribución como expertos en teorías de cambio de comportamiento para crear el HRS, así como a Luis Fernández-Luque por su colaboración en el diseño del sistema recomendador. Agradecemos a Haris Styliadis, Evdokimos Konstantinidis y Panagiotis Bamidis de la universidad Aristóteles de Salónica su apoyo en la creación y evaluación de la aplicación previa. Agradecemos a Shwetambara Kekade y a Syed Abdul Shabbir de la universidad Médica de Taipei su coordinación de la intervención en Taiwán, al doctor Chien-Tien Su del hospital Universitario de Taipei, y al doctor Weili-Li Jeng del Wellcome Clinic de Taiwan por validar los mensajes motivacionales. Además, agradecemos a Bryce Zhou su trabajo traduciendo la aplicación al mandarín, así como los mensajes motivacionales.

BIBLIOGRAFÍA

- World health organization (WHO). Tobacco-fact sheet no339. (2013). Obtenido el 19 de junio de 2017, de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs339/en/>
- Kaplan, W., Wirtz, V., Mantel, A., y Béatrice, P. S. U. (2013). Priority medicines for Europe and the world update 2013 report. *Methodology*, 2, 7.
- Shiffman, S. M. 1979. The tobacco withdrawal syndrome. *Cigarette smoking as a dependence process*, 23, 158-184.
- World Health Organization (WHO). (2015). Addiction to Nicotine. Consultado el 12 de octubre de 2017, de http://www.who.int/tobacco/publications/gender/en_tfi_gender_women_addiction_nicotine.pdf
- Kotz, D., Brown, J., & West, R. (2014). 'Real-world' effectiveness of smoking cessation treatments: a population study. *Addiction*, 109(3), 491-499.
- Swartz, L. H. G., Noell, J. W., Schroeder, S. W., & Ary, D. V. (2006). A randomised control study of a fully automated internet based smoking cessation programme. *Tobacco control*, 15(1), 7-12.
- Oenema, A., Brug, J., Dijkstra, A., de Weerd, I., & de Vries, H. (2008). Efficacy and use of an internet-delivered computer-tailored lifestyle intervention, targeting saturated fat intake, physical activity and smoking cessation: a randomized controlled trial. *Annals of Behavioral Medicine*, 35(2), 125-135.
- Cobb, N. K., Graham, A. L., Bock, B. C., Papandonatos, G., & Abrams, D. B. (2005). Initial evaluation of a real-world Internet smoking cessation system. *Nicotine & Tobacco Research*, 7(2), 207-216.

- Paay, J., Kjeldskov, J., Skov, M. B., Lichon, L., & Rasmussen, S. 2015, April. Understanding individual differences for tailored smoking cessation apps. *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1699-1708). ACM.
- Hoepfner, B. B., Hoepfner, S. S., Seaboyer, L., Schick, M. R., Wu, G. W., Bergman, B. G., & Kelly, J. F. (2015). How smart are smartphone apps for smoking cessation? A content analysis. *Nicotine & Tobacco Research, 18*(5), 1025-1031.
- Fernandez-Luque, L., Karlsen, R., & Vognild, L. K. (2009). Challenges and opportunities of using recommender systems for personalized health education. *MIE* (pp. 903-907).
- Schäfer, H., Hors-Fraile, S., Karumuri, R. P., Calero Valdez, A., Said, A., Torkamaan, H., ... & Trattner, C. (2017). Towards Health (Aware) Recommender Systems. *Proceedings of the 2017 International Conference on Digital Health* (pp. 157-161). ACM.
- Hors-Fraile, S., Rivera-Romero, O., Schneider, F., Fernandez-Luque, L., Luna-Perejon, F., Civit-Balcells, A., & de Vries, H. (2017). Analyzing recommender systems for health promotion using a multidisciplinary taxonomy: A scoping review. *International Journal of Medical Informatics*.
- Proyecto SmokeFreeBrain. Consultado en enero de 2017, de [http:// www.smokefreebrain.eu/](http://www.smokefreebrain.eu/)
- De Vries, H. (2017). An integrated approach for understanding health behavior; the I Change Model as an example. *Psychology and Behavioral Science International Journal, 2*(2), 555-585.
- De Vries, H., Mudde, A., Leijts, I., Charlton, A., Vartiainen, E., Buijs, G., ... & Prins, T. (2003). The European Smoking Prevention Framework Approach (EFSA): an example of integral prevention. *Health Education Research, 18*(5), 611-626.
- Hors-Fraile, S., Benjumea, F. J. N., Hernández, L. C., Ruiz, F. O., & Fernandez-Luque, L. (2016). Design of two combined health recommender systems for tailoring messages in a smoking cessation app. *arXiv preprint arXiv:1608.07192*.

C14

ESTIMACIÓN DE DISTANCIAS MEDIANTE UN SISTEMA DE ESTÉREO-VISIÓN BASADO EN RETINAS DVS

Domínguez-Morales, Manuel; Jiménez-Fernández, Ángel; Cerezuela-Escudero, Elena; Luna-Perejón, Francisco; Durán-López, Lourdes; Linares-Barranco, Alejandro. Grupo de Robótica y Tecnología de Computadores. Dpto. Arquitectura y Tecnología de Computadores, E.T.S. Ingeniería Informática, Universidad de Sevilla.

RESUMEN

La estimación de distancias es uno de los objetivos más importantes en todo sistema de visión artificial. Para poder llevarse a cabo, es necesaria la presencia de más de un sensor de visión para poder enfocar los objetos desde más de un punto de vista y poder aplicar la geometría de la escena con tal fin. El uso de sensores DVS supone una diferencia notable, puesto que la información recibida hace referencia únicamente a los objetos que se encuentren en movimiento dentro de la escena. Este aspecto y la codificación de la información utilizada hace necesario el uso de un sistema de procesamiento especializado que, en busca de la autonomía y la paralelización, se integra en una FGPA. Esta demostración integra un escenario fijo, donde un objeto móvil realiza un movimiento continuo acercándose y alejándose del sistema de visión estéreo; tras el procesamiento de esta información, se aporta una estimación cualitativa de la posición del objeto.

Palabras clave: *Visión artificial, Ingeniería Neuromórfica, AER, DVS, FPGA.*

ABSTRACT

Image processing in digital computer systems usually considers the visual information as a sequence of frames. Digital video processing has to process each frame in order to obtain a result or detect a feature. In stereo vision, existing algorithms used for distance estimation use frames from two digital cameras and process them pixel by pixel to obtain similarities and differences from both frames; after that, it is calculated an estimation about the distance of the different objects of the scene. Spike-based processing implements the processing by manipulating spikes one by one at the time they are transmitted, like human brain. The mammal nervous system is able to solve much more complex problems, such as visual recognition by manipulating neuron's spikes. The spike-based philosophy for visual information processing based on the neuro-inspired Address-Event- Representation (AER) is achieving nowadays very high performances. In this work, it is proposed a two-DVS-retina connected to a Virtex5 FPGA framework, which allows us to obtain a distance approach of the moving objects in a close environment. It is also proposed a Multi Hold&Fire algorithm in VHDL that obtains the differences between the two retina output streams of spikes; and a VHDL distance estimator.

Keywords: *Computer visión, Neuromorphic Engineering, AER, DVS, FPGA.*

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En los últimos años se han producido numerosos avances en el campo de la visión y el procesamiento de imágenes, ya que pueden aplicarse con fines científicos y comerciales a numerosos campos, como la medicina, la industria o el entretenimiento. Tratando de simular la visión de los seres humanos, los investigadores han experimentado con sistemas basados en dos cámaras, inspirados en la visión humana (8, 9). A partir de ahí se desarrolló una nueva línea de investigación centrada en la visión estereoscópica (1). En esta rama, los investigadores intentan obtener escenas tridimensionales utilizando dos cámaras digitales. Por lo tanto, tratamos de obtener cierta información que no se pudo obtener con una sola cámara como, por ejemplo, la distancia a la que un objeto se encuentra.

Mediante el uso de cámaras digitales, los investigadores han logrado un gran avance en este campo. Sin embargo, los sistemas digitales tienen algunos problemas que, incluso hoy en día, no se han resuelto (como el ajuste de visión estéreo en tiempo real, debido a la fase de extracción de características (10)).

Un objetivo importante en la visión estereoscópica es el cálculo de distancias entre el sistema de visión y el objeto en el que estamos enfocados, objetivo que aún está completamente abierto a la investigación. Los problemas relacionados con esto son el costo computacional necesario para obtener los resultados apropiados y los errores obtenidos después del cálculo de la distancia. Hay muchos algoritmos de alto nivel utilizados en la visión estereo digital que resuelven el problema de cálculo de distancia, pero esto implica la intervención del pc en el proceso al ser computacionalmente muy costoso. Esto hace que sea difícil desarrollar un sistema autónomo en tiempo real.

Los sistemas o circuitos inspirados en la biología son enfoques novedosos para resolver problemas reales (2). Los sistemas pulsantes son una de las alternativas de la neuro-informática para imitar las capas neuronales del cerebro en las etapas de procesamiento de la información. Estos sistemas procesan la información de forma continua, sin discretización en frames. Las implementaciones de hardware de estos sistemas generalmente se componen de varios pasos: sensores (6), filtros (13), convoluciones (3), actuadores (14), etc.

Un gran problema en estas implementaciones es la comunicación, porque se necesita comunicar miles de neuronas de un chip al siguiente chip, pero existe una limitación en el número de pines. La representación Address-Event-Representation resuelve este problema (4). Por lo general, estos circuitos AER se construyen usando una lógica asíncrona auto-temporizada. El éxito de estos sistemas dependerá en gran medida de la disponibilidad de herramientas robustas y eficientes de desarrollo, depuración e interconexión de herramientas AER (15).

En este trabajo, se presenta un nuevo enfoque sobre la estimación de distancia, utilizando un sistema de visión estereoscópica AER. También se presentan algunos resultados de estimación de distancia, y se comparan con la distancia real.

Los elementos que componen este sistema son los siguientes (de izquierda a derecha, según la Figura 1): dos retinas DVS128 (6), dos placas USB-AER, una placa FPGA Virtex-5, una placa USBAERmini2 (5) y un pc que monitoriza la salida del sistema mediante el software jAER (7).

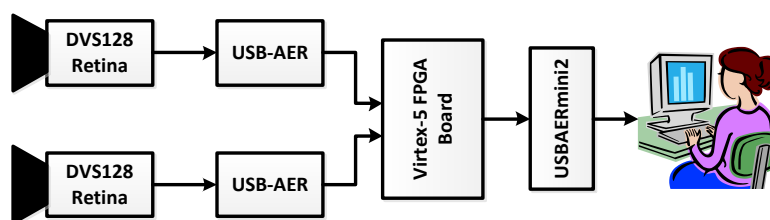


Figura 1. Componentes del Sistema e interconexiones entre ellos.

La placa USB-AER fue desarrollada en nuestro laboratorio durante el proyecto CAVIAR, y está basada en una FPGA Spartan II con dos megabytes de RAM externa y un microcontrolador cygnal 8051. Para comunicarse con el mundo exterior tiene dos puertos paralelos AER (conector IDE): uno de ellos se usa como entrada, y el otro es la salida. En el sistema, se han utilizado dos tarjetas USB-AER, una para cada retina. En estas placas se ha sintetizado en VHDL un filtro llamado Background-Activity-Filter, que nos permite eliminar el ruido del flujo pulsante producido por cada retina. Este ruido se debe a la naturaleza del píxel analógico de la retina. Así pues, a la salida de la USB-AER tenemos la información filtrada y lista para procesar.

La otra placa utilizada es una Xilinx Virtex-5, desarrollada por AVNET (12). Esta placa se basa en un FPGA Virtex-5 y tiene principalmente un gran puerto compuesto por más de ochenta GPIO (puertos de entradas/salidas de propósito general). Usando este puerto, hemos conectado una placa de expansión/prueba, que tiene pines estándar, y los hemos usado para conectar dos entradas AER y una salida. En dicha placa se implementa todo el procesamiento, que trabaja con los pulsos provenientes de cada retina, los procesa y obtiene las diferencias entre ambas retinas y la tasa de pulsos de esta diferencia. El diagrama de bloques del programa completo se muestra en la figura 3. El comportamiento del sistema y su funcionalidad se exponen en las siguientes secciones.



Figura 2. Sistema completo.

METODOLOGÍA

A. Algoritmo MULTI HOLD&FIRE

El tráfico procedente de ambas retinas se debe restar sobre la marcha para calcular las diferencias entre ellos. Para hacer eso, hemos utilizado la idea del bloque Hold&Fire (11) para obtener la diferencia de dos señales pulsantes. Este algoritmo resta dos pulsos, recibidos de dos puertos diferentes. Cuando recibe un evento, espera un corto periodo de tiempo para ver si recibe otro con la misma dirección. Si no recibe un segundo evento y el tiempo termina, dispara el pulso. De lo contrario, si recibe otro evento, dependiendo de su polaridad y su retina de procedencia, el algoritmo dispara un evento o no. Usando esta teoría en las retinas, si el segundo pulso recibido tiene la misma dirección, tenemos dos opciones: si el nuevo evento proviene de la otra retina, el evento se cancela y no se transmite ningún evento; pero si este segundo evento proviene de la misma retina, se envía el primer evento y este segundo evento asume el papel del primer evento y el sistema espera nuevamente el periodo de tiempo fijado. Esta operación Hold&Fire para restar o cancelar dos flujos de pulsos se describe en profundidad en (11).

En este trabajo, se ha extrapolado el bloque Hold&Fire al conjunto del sistema, teniendo un conjunto de 128x128 bloques (una para cada píxel de las retinas). Llamamos a esto el sistema Multi Hold&Fire, que nos permite calcular las diferencias entre dos flujos de eventos de salida de retinas.

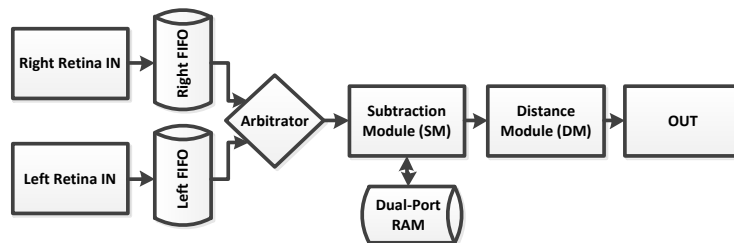


Figura 3. Bloques VHDL.

B. Sistema Completo

Nuestro algoritmo se basa en bloques múltiples Hold&Fire, como se comentó anteriormente (tiene un bloque H&F por cada dos píxeles equivalentes de las dos retinas). Trata cada píxel por separado y obtiene la diferencia entre este píxel en la retina izquierda y el mismo píxel en la retina derecha. Al final, tenemos un flujo de eventos que representa la diferencia de ambas retinas en la salida de nuestro sistema. El proyecto VHDL tiene estos bloques:

- Dos FIFOs: almacenan una gran cantidad de eventos de ambas retinas.
- Un arbitrador: selecciona los eventos de ambas FIFOs dependiendo de la ocupación de ellas.
- Módulo de resta: aplica el algoritmo Multi Hold&Fire a la secuencia de eventos recibidos.
- Módulo de distancia: estima la distancia. Lo profundizaremos en la siguiente sección.

C. Estimación de distancias

Como se explicó en la sección anterior, este sistema usa el módulo de distancia para obtener un acercamiento de la distancia donde se encuentra el objeto móvil. El algoritmo obtiene una estimación cualitativa de la distancia, al igual que la vista humana: no obtendremos un resultado cuantitativo. Este hecho no es un fracaso, porque la visión humana no puede calcular distancias, solo puede estimar distancias, en base a experiencias previas. Entonces, nuestro algoritmo está muy cerca del comportamiento de la visión humana.

En nuestro sistema, ambas retinas se posicionan con un cierto ángulo para obtener una distancia de enfoque de 1 metro. Para hacer eso, hemos puesto nuestras retinas en una base, separadas 13'5 cm entre ellas. Hemos obtenido el sistema que se muestra a continuación (Figura 4).

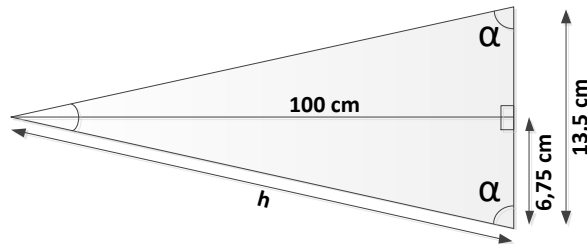


Figura 4. Posicionamiento de retinas.

Aplicando Pitágoras y reglas trigonométricas, podemos obtener:

$$h^2 = 6'75^2 + 100^2; h = 100'22755$$

$$\sin \alpha = \frac{100}{100'22755} = 0'99773$$

$$\arcsin 0'99773 = 86'1387^\circ$$

Lo cual equivale a 1'5 radianes aproximadamente.

Los algoritmos existentes en los sistemas digitales extraen características de ambas cámaras, las procesan y tratan de unir los objetos de ambas cámaras frame a frame (10). Este proceso tiene costos computacionales importantes y no funciona en tiempo real. Queremos hacer lo mismo en tiempo real usando AER. Como primer paso para lograr este objetivo, proponemos un algoritmo basado en la tasa de picos de la salida Multi Hold&Fire (17), pero no solo en él.

Si dos retinas se están enfocando en el mismo punto, el ancho de banda de AER de ambas salidas debería ser muy similar para un objeto en movimiento en el punto de enfoque. Por lo tanto, la diferencia de tráfico de ambas retinas debería ser la más baja posible. Si el objeto se mueve en la dirección de las retinas y está más cerca que el punto de enfoque, el tráfico en ambas retinas debería aumentar porque el objeto se hace más grande y hay más píxeles activos, pero la diferencia de tráfico no se puede cancelar porque el objeto no está centrado. Por lo tanto, la diferencia de tráfico debería aumentar considerablemente cuando el objeto está más cerca. Cuando el objeto está más lejos, ya que se estimulan menos píxeles de la retina y también son diferentes en ambas retinas, el tráfico también es más alto que en el punto de enfoque, pero debe ser menor que cuando el objeto se acerca. La frecuencia de pulsos de las diferencias de ambas retinas (salida Multi Hold&Fire) no es la misma para cada objeto. Un objeto más grande disparará más pulsos que uno pequeño. Para tener una estimación de distancia normalizada, debemos combinar la tasa de pulsos de la resta con la tasa de pulsos antes de las modificaciones Multi Hold&Fire. Por lo tanto, deberíamos obtener más precisión, mejores resultados y una estimación más real.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de los cálculos y calibraciones anteriores, las retinas se posicionan con un ángulo de 86'1387° entre ellas para obtener una distancia focal de un metro. Después de eso, se introducen trenes de pulsos al algoritmo Multi Hold&Fire usando un objeto en movimiento. Este estímulo se mueve a diversas distancias, cerca y lejos, de las retinas en varias ocasiones, por lo que se obtienen datos de diferentes

distancias; y se monitoriza la frecuencia de pulsos disparados durante este proceso. Se han utilizado estos datos con la tasa de pulsos anteriores del algoritmo MH&F, como se detalló anteriormente. La frecuencia de pulsos resultante se ha almacenado utilizando el software jAER (7). Después de las mediciones, se han registrado todos los resultados y se ha elaborado un gráfico con todos ellos. Este gráfico indica la cantidad de pulsos de media con respecto a la distancia del objeto (ver figura 5).

En el punto de coincidencia central de la distancia focal de cada retina, el MH&F funciona como un restador perfecto y disparará muy pocos pulsos, por lo que la tasa de pulsos en este punto es la más baja de todos los puntos de medición. Si nos acercamos a las retinas, la frecuencia de los pulsos aumentará porque el objeto se hace más grande y cada retina lo ve desde un punto de vista diferente, por lo que el restador no actuará de manera perfecta.

De lo contrario, si aumentamos la distancia del objeto respecto a las retinas (más allá del punto central de foco), la frecuencia de los pulsos aumentará un poco debido al resultado de la resta (diferentes puntos de vista de la retina), pero el objeto se vuelve más pequeño, por lo que compensa este error: a medida que el objeto se aleja, más pequeño es; y, por lo tanto, menor es la tasa de pulsos (se disparan menos, pero la resta actúa peor y dispara más pulsos). Es por eso que estos aspectos se equilibran entre sí, obteniéndose una tasa constante a mayor distancia.

Por lo tanto, se puede ver un gráfico donde la tasa de pulsos se incrementa mucho cerca de las retinas y aumenta ligeramente siempre que alejemos el objeto del punto de colisión focal. Se pueden apreciar los resultados experimentales en la figura 5. Hemos estimulado nuestro sistema utilizando dos objetos de diferentes tamaños, que producen diferentes tasas de eventos de salida en las retinas. Las mediciones se han tomado desde el punto de partida de 10 centímetros hasta los 150 centímetros. Fueron tomadas cada 10 centímetros.

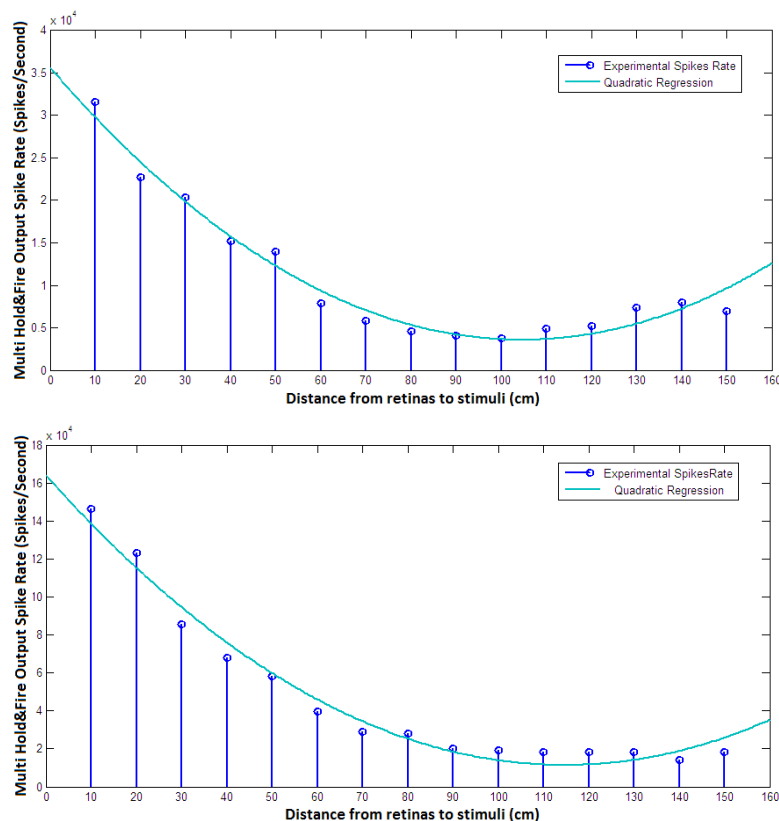


Figura 5. Tasa de eventos VS distancia con dos estímulos diferentes.

En la figura 5 se pueden ver los resultados experimentales obtenidos con dos estímulos diferentes: el primer gráfico corresponde a un péndulo y el segundo a una regla oscilatoria. Es interesante observar que, aproximadamente, a una distancia de 100 centímetros (colisión focal de ambas retinas) obtenemos la tasa de pulsos más baja. Si vemos que las mediciones se toman más cerca, se puede ver que la tasa de pulsos aumenta y, lejos del punto de colisión focal, la tasa de pulsos aumenta un poco. La distancia del objeto en movimiento se puede estimar con una regresión cuadrática (línea en azul que se muestra en la figura 5).

Nuestro sistema se comporta de forma bastante similar a la percepción humana: a priori, sin conocer el tamaño del objeto, no podemos proporcionar distancias exactas, solo una aproximación. Esta aproximación depende de nuestra experiencia, pero el sistema propuesto no aprende. Sin embargo, podemos medir la distancia de forma cualitativa e interactuar con un objeto en un entorno cercano.

Al relacionar la comparación entre este método y los métodos clásicos de visión por computador, tenemos que decir que este algoritmo es solo uno de los pasos implementados en un cálculo de distancia de visión por computadora. Para poder comparar la estimación de la distancia AER con la visión clásica de la computadora, necesitamos unirla a un proceso de adaptación previo y, en algunos casos, con un paso de calibración previa.

En relación con la visión clásica, el mecanismo proporcionado está relacionado de alguna manera con el método llamado "cálculo de distancia usando mapa de disparidad", que intenta determinar una estimación de primer acercamiento sobre la distancia de un objeto usando las disparidades entre ambas cámaras en un sistema de visión estéreo.

Estamos trabajando en mejoras a este sistema, utilizando varios filtros en cascada que agregan restricciones al sistema y mejoran la eficiencia: correspondencia en visión estéreo AER (10), correcciones espaciales (16) y seguimiento de objetos (10).

CONCLUSIONES

Se han expuesto las dificultades existentes para calcular distancias en sistemas de visión digitales. Es por ello que se ha introducido un enfoque biológico (AER) para trabajar, como un nuevo paradigma en Ingeniería Neuromórfica. Las ventajas de este método han sido expuestas y evaluadas.

Tras ello, se ha propuesto un método de estimación de distancias que contempla trabajar con objetos en movimiento utilizando Address-Event-Representation en un entorno cercano. Para lograr este objetivo, se ha utilizado un sistema de visión estereoscópica con dos retinas DVS, implementando el procesado en VHDL sobre hardware programable.

Se ha descrito y mostrado todo el sistema utilizado (y cada elemento de él) con el objeto de obtener la estimación de distancias. Con el sistema de hardware descrito, los algoritmos utilizados han sido explicados en detalle. El primer algoritmo usa un método para obtener diferencias de tasas de pulsos entre ambas retinas en tiempo real. Con estas diferencias se ha introducido el segundo algoritmo, que funciona con la tasa de pulsos obtenida en nuestro sistema después del cálculo de diferencias.

Con los resultados de estos dos algoritmos, hemos sido capaces de modelar la frecuencia de los pulsos con respecto a la distancia del objeto. Los resultados de la simulación son muy alentadores, ya que se puede observar en los gráficos que existe una relación entre la distancia y la velocidad de los picos después de nuestro procesamiento, y que este sistema funciona bastante similar a la percepción humana.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer la contribución de Tobias Delbruck y Raphael Berner, que han desarrollado herramientas que han sido utilizadas en este trabajo. Este trabajo ha sido financiado por el proyecto de investigación del MICINN del gobierno español COFNET (TEC2016-77785-P).

BIBLIOGRAFÍA

1. *Barnard, S.T. and Fischler M.A.: Computational Stereo. Journal ACM CSUR. Volume 14 Issue 4 (1982).*
2. *Shepherd, G. M.: The Synaptic Organization of the Brain. Oxford University Press, 3rd Edition (1990).*
3. *Linares-Barranco, A. et al: AER Convolution Processors for FPGA. ISCASS (2010).*
4. *Sivilotti, M.: Wiring Considerations in analog VLSI Systems with Application to Field-Programmable Networks. Ph.D. Thesis, Caltech (1991).*
5. *Berner, R.; Delbruck, T.; Civit-Balcells, A. and Linares-Barranco, A.: A 5 Meps \$100 USB2.0 Address-Event Monitor-Sequencer Interface. ISCAS, New Orleans, 2451 – 2454 (2007).*

6. Lichtsteiner, P.; Posch, C. and Delbruck, T.: A 128×128 120dB 15 us Asynchronous Temporal Contrast Vision Sensor. *IEEE Journal on Solid-State Circuits*, vol. 43, No 2, pp. 566-576, (2008).
7. jAER software: <http://sourceforge.net/apps/trac/jaer/wiki>
8. Benosman, R. and Devars, J.: Panoramic stereo vision sensor. *International Conference on Pattern Recognition, ICPR (1998)*.
9. Benosman, R. et al: Real time omni-directional stereovision and planes detection. *Mediterranean Electrotechnical Conference. MELECON (1996)*.
10. Dominguez-Morales, M. et al: *Image Matching Algorithms using Address-Event-Representation. SIGMAP (2011)*.
11. Jimenez-Fernandez, A. et al: *Building Blocks for Spike-based Signal Processing. IEEE International Joint Conference on Neural Networks, IJCNN (2010)*.
12. AVNET Virtex-5 FPGA board: <http://www.em.avnet.com/drc>
13. Serrano-Gotarredona, R. et al.: *AER Building Blocks for Multi-Layer Multi-Chip Neuromorphic Vision Systems, NIPS (2005)*.
14. Linares-Barranco, A. et al.: *AER Neuro-Inspired interface to Anthropomorphic Robotic Hand, IJCNN (2006)*.
15. Serrano-Gotarredona, R. et al.: *CAVIAR: A 45k-neuron, 5M-synapse AER Hardware Sensory-Processing-Learning-Actuating System for High-Speed Visual Object Recognition and Tracking. IEEE Trans. On Neural Networks, Volume 20, Issue 9, Sept. 2009*.
16. Jimenez-Fernandez, A. et al.: *Neuro-inspired system for real-time vision sensor tilt correction, ISCAS (2010)*.
17. Dominguez-Morales, M. et al.: *An Approach to Distance Estimation with Stereo Vision Using Address-Event-Representation. ICONIP (2011)*
18. Gómez-Rodríguez, F. et al.: *Real Time Objects Tracking Using a Bio-Inspired Processing Cascade Architecture. ISCAS 2010*

COMUNICACIONES POSTERS

P1

DESARROLLO DE MATERIALES POLIMÉRICOS POROSOS MEDIANTE ELECTROHILADO

Cabrera, L., Felix, M., Perez-Puyana, V., De la Fuente, J. Tecnología y Diseño de Productos Multicomponentes (TEP-229). Departamento de Ingeniería Química. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Sevilla.

RESUMEN

Si el diámetro de las fibras que forman una matriz de polímero se reduce desde una escala micrométrica a nanométrica, se produce una serie de características extraordinarias. Entre estas características se encuentran un gran aumento en el área superficial (del orden de 1000 veces mayor), una mayor flexibilidad de la funcionalidad de la superficie y una mejor resistencia mecánica (por ejemplo, rigidez, resistencia a la tracción). Estas propiedades hacen que las matrices de polímeros nanofibrilares sean excelentes candidatos en muchas aplicaciones de gran importancia, que incluyen aplicaciones químicas, alimentarias, farmacéuticas, electrónicas o biomédicas.

Hay varios parámetros que están íntimamente relacionados con las propiedades y características de las fibras obtenidas mediante electrospinning, por lo que su control durante la ejecución del proceso es indispensable. Juegan un papel importante en la formación y estructura de las fibras.

En el siguiente trabajo, procedemos a estudiar tres variables del proceso de electrohilado; en primer lugar, se estudiará el efecto de la concentración del disolvente; en segundo lugar, se estudiará cómo las nanofibras obtenidas afectan a un cambio en el valor de la diferencia de potencial aplicada; y, finalmente, se estudiará el efecto producido por la humedad en el ambiente.

Palabras clave: *Electrohilado, escala nanométrica, concentración de la disolución, diferencia de potencial, humedad.*

ABSTRACT

If the diameter of the fibers that form a polymer matrix is reduced from a micrometric to nanometric scale, a series of extraordinary features take place. Among these features are a huge increase in surface area (in the order of 1000 times higher), a greater flexibility of the surface functionality and a better mechanical resistance (e.g. rigidity, tensile strength). These properties make nanofibrillary polymer matrices excellent candidates in many applications of great importance, including chemical, food, pharmaceutical, electronic or biomedical applications.

There are several parameters that are intimately related to the properties and characteristics of the fibers obtained by means of electrospinning, so their control during the execution of the process is indispensable. They play an important role in the formation and structure of fibers.

In the following work we proceed to study three variables of the electrospinning process; firstly, the effect of the concentration of the solvent will be studied; secondly, it will be studied how the nanofibers obtained affect a change in the value of the applied potential difference; and, finally, the effect produced by humidity in the environment will be studied.

Palabras clave: *electrospinning, nanometric scale, concentration, potencial, humidity.*

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El proceso de electrohilado es relativamente innovador y permite la producción continua de fibras en un rango de diámetros que van de 3 nm a 1 μm . Este proceso se basa en la deformación uniaxial o elongación de una gota de líquido viscoelástico de un polímero (fundido o disuelto) para formar un filamento, que a diferencia del hilado mecánico, está formado por repulsiones electrostáticas inducidas por la aplicación de un campo eléctrico de alta tensión (del orden de 10-20 kV). La gota adopta una forma cónica (cono de Taylor) y se proyecta desde una aguja de jeringa en la dirección del colector, que permanece conectado a tierra y a una fuente de alimentación. La distancia entre los dos polos (la aguja

de la jeringa y el colector) se establece típicamente en 10-15 cm. Una membrana compuesta de fibras de diferentes diámetros entre 10 nm y unos pocos micrómetros se forma en la superficie del colector (Mogoşanu y col., 2016).

Hay varios parámetros que están íntimamente relacionados con las propiedades y características de las fibras obtenidas mediante electrospinning, por lo que su control durante la ejecución del proceso es indispensable. Juegan un papel importante en la formación y estructura de las fibras (Jacobs, Anandjiwala y Maaza, 2010). Por lo tanto, es difícil dar proporciones cuantitativas que puedan aplicarse en una amplia gama de polímeros y sistemas de disolventes. Habiendo aclarado esto, hay tendencias generales que son útiles para determinar las condiciones óptimas para un sistema dado:

Viscosidad: se ha demostrado que las fibras finas y continuas no pueden obtenerse con baja viscosidad porque la tensión superficial es el factor dominante y conduce a la formación de perlas, mientras que los niveles muy altos de viscosidad hacen que la inyección sea muy difícil. Un aumento en la viscosidad de la solución típicamente da lugar a un diámetro de fibra más grande y más uniforme.

Tensión superficial: se concluyó que la reducción de la tensión superficial de una solución de polímero podría generar fibras sin presencia de grumos (Reneker y Doshi, 1995). El coeficiente de tensión superficial depende del polímero y el disolvente. El uso de disolventes con menor tensión superficial implica una mejora en el flujo del proceso.

Conductividad de la disolución: las soluciones con alta conductividad tendrán una mayor capacidad para transportar cargas eléctricas que aquellas con baja conductividad. La adición de sales a la solución aumenta la conductividad y, por lo tanto, la fuerza eléctrica para estirar el chorro, lo que promueve una reducción en el diámetro de las fibras. Se ha encontrado que con el aumento en la conductividad eléctrica de la solución hay una disminución significativa en el diámetro de las fibras. Sin embargo, cuando la conductividad es baja, se observa un alargamiento insuficiente del chorro que impide la producción de fibras uniformes.

Voltaje: solo aplicando un voltaje por encima de un umbral es posible que las fibras salgan expulsadas del cono de Taylor. Los bajos voltajes implican que una gota está suspendida en la punta de la aguja y hay un goteo constante de gotas y gotas que pueden terminar en el colector por el efecto del campo eléctrico. El voltaje es uno de los parámetros más importantes en el proceso de electrohilado. Algunos autores afirman que la aplicación de altos voltajes hace que se transporte más fluido en el chorro, lo que da como resultado fibras con diámetros más altos (Ramakrishna et al., 2003), aunque otros afirman que un aumento en el voltaje disminuye el diámetro de las nanofibras (Correia Sencadas, 2012) y también aumenta la probabilidad de obtener fibras con cuentas. Por lo tanto, en la mayoría de los casos, un campo eléctrico fuerte permite un mayor estiramiento de la solución debido a la presencia de mayores fuerzas electrostáticas de tipo Coulomb en el chorro, lo que promueve una reducción en el diámetro de las fibras.

Parámetros ambientales: existen numerosos estudios que examinan los efectos de los parámetros ambientales en el proceso de electrohilado. Mit-Uppatham et al. (2004) encontraron que el aumento de la temperatura producía un diámetro de fibra más pequeño, atribuyendo este resultado a la relación inversa entre la viscosidad de la solución y la temperatura. En cuanto a la humedad, siendo un factor variable, Casper et al. (2004) informaron que la tasa de evaporación del solvente aumentó a una humedad reducida. Por el contrario, la alta humedad típicamente da lugar a diámetros gruesos de fibra porque las cargas del chorro pueden neutralizarse y las fuerzas de estiramiento se vuelven pequeñas. Otros estudios también revelaron que a medida que aumentaba la humedad, se observaba la producción de pequeños poros circulares en las fibras (Pham et al., 2006).

En la bibliografía se describen diversos métodos para electrohilar el óxido de polietileno (PEO), sin embargo en la mayoría de ellos no se hace un análisis exhaustivo de dicho proceso, obviando en muchos casos algunas de estas variables que tanta importancia tiene en el proceso de electrohilado.

En este trabajo se ha analizado los factores que influyen en la técnica de electrospinning de PEO, con el fin de obtener fibras de este material de dimensiones nanométricas. De este modo, se ha estudiado la influencia de la concentración de ácido, la diferencia de potencial eléctrico y la humedad relativa en el electrohilado de PEO. Para determinar la influencia de estas variables inicialmente se estudió el pH, la tensión superficial, la conductividad y la viscosidad de las disoluciones. Posteriormente se obtuvieron las membranas que fueron analizadas mediante microscopía óptica de barrido.

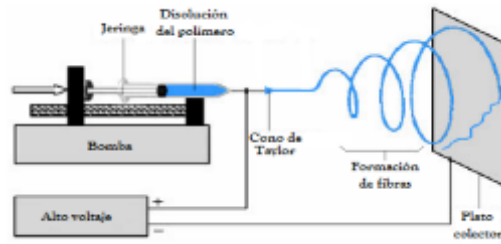


Figura 1: Dispositivo de electrohilado.

METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el proceso de electrohilado se han empleado disoluciones de óxido de polietileno en ácido acético:

PEO: El polietilenglicol (PEG), también conocido como macrogol, y como óxido de polietileno (PEO) o polioxietileno (POE), es un poliéter ampliamente empleado en la industria. En la Figura 4 puede verse de forma simplificada cual es el monómero que se repite en la cadena polimérica del polioxietileno. El óxido de polietileno utilizado es de la marca SIGMA-ALDRICH y posee un peso molecular medio 600 kDa.

Ácido acético: Para la elaboración de las disoluciones de ácido acético en las concentraciones de 10% y 50% en volumen (10%AA y 50%AA) se ha utilizado ácido acético glacial de la marca Panreac.

La primera caracterización básica llevada a cabo en este estudio ha estado basada en la determinación del pH, tensión superficial, densidad y viscosidad de las disoluciones. Para la determinación del pH se ha utilizado un pH-metro CyberScan pH1500. Por otra parte, el equipo utilizado para la realización de estas medidas de tensión superficial fue el tensiómetro Sigma 701 Tensiometer. Se utiliza una placa Wilhelmy de geometría rectangular perfectamente conocida, suspendida verticalmente de una balanza de precisión. La viscosidad de las disoluciones se ha medido haciendo uso del densímetro portátil Densito 30PX, mientras el valor de la conductividad se ha determinado haciendo uso del equipo Crison EC-Meter Basic 30+. Por otra parte, para las medidas de viscosidad se ha utilizado el reómetro AR-2000, este equipo estaba equipado con una geometría de placas paralelas que habían sido sometidas a un baño de arena para evitar el fenómeno de deslizamiento. La viscosidad de las disoluciones se determinó mediante curvas de flujo de 0.1 a 10 s⁻¹. La temperatura se mantuvo constante en todo momento a 25°C haciendo uso de un sistema peltier.

Una vez se llevó a cabo la caracterización de las disoluciones, éstas se electrospinaron. En cuanto al dispositivo de electrospinning, se eligió una disposición en horizontal, tal y como se muestra en la Figura 1. Con ello se consigue evitar la llegada al colector de pequeñas gotas de disolución procedentes de la punta de la jeringa. La aguja conectada a la jeringa utilizada en el dispositivo de electrohilado es del calibre 22, por lo que su diámetro interno es $D = 0.5$ mm, mientras que el caudal de circulación impuesto por la bomba de jeringas es de 0.4 mL/h. Para analizar cada una de las disoluciones se han determinado diversas propiedades: pH, tensión superficial, densidad, conductividad y viscosidad. Todas las magnitudes fueron medidas a una temperatura igual a 25°C y se llevaron a cabo cada una de las medias al menos por triplicado.

Una vez obtenidas las membranas, se procedió a caracterizarlas mediante la visualización de su estructura en un microscopio electrónico de barrido (SEM). El equipo utilizado para obtener las imágenes de SEM es el JEOL 6460LV. El voltaje utilizado para la obtención de las imágenes ha sido de 10 kV y se han adquirido imágenes a diferentes aumentos. Mediante las imágenes obtenidas en SEM se podrán seleccionar o descartar sistemas en función a la forma y tamaño de las fibras obtenidas. Además, a partir de estas imágenes se determinarán el diámetro medio de dichas fibras y su desviación típica mediante el análisis de imagen llevado a cabo con el uso del software Image J.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Entre los diversos parámetros que afectan al proceso de electrohilado, se procede a estudiar el efecto que tiene la concentración del disolvente, el voltaje utilizado en el proceso de electrohilado y la humedad ambiental en las nanofibras que son electrohiladas.

Estudio del efecto del disolvente

Para la elección del disolvente se estudian dos disoluciones de óxido de polietileno con la misma concentración (4.0%), modificando el disolvente. En la Tabla 1 podemos ver los resultados obtenidos. La disolución más concentrada también presenta mayores valores de densidad y conductividad eléctrica. La presencia de acético también contribuye a reducir la tensión superficial, con respecto a la del agua (desde un valor de 72.8 mN/m a 20°C), tanto más cuanto mayor es su concentración.

Concentración de acético	pH	Densidad (g/mL)	Tensión superficial (mN/m)	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Viscosidad a 10s^{-1} (mPa·s)
50%AA	1.7	$1.046 \pm 0,004$	43 ± 3	692 ± 3	2400 ± 170
10%AA	2.3	$1.019 \pm 0,001$	53 ± 3	625 ± 3	770 ± 10

Tabla 6: Propiedades de las disoluciones de 4.0% PEO con distinta concentración de ácido acético

El efecto del contenido en acético ha provocado diferencias significativas en la obtención de las fibras, como se ha podido observar al analizar las imágenes de SEM. En la Figura 2 se muestran las imágenes de SEM obtenidas para las disoluciones al 4.0% de PEO en ácido acético a distinta concentración. Analizando el diámetro de las fibras se obtienen valores de 163 ± 50 nm para las fibras que emplean como disolvente ácido acético al 50%, y 138 ± 11 nm para aquellas que utilizan como disolvente ácido acético al 10%. Por lo tanto, se elige la disolución de ácido acético al 10% como medio para disolver PEO.

Estudio del efecto de la diferencia de potencial eléctrico

Para determinar cuál es el voltaje idóneo para la realización del electrohilado se procede a examinar las imágenes obtenidas a partir de una disolución de óxido de polietileno al 3.5% en ácido acético al 10% utilizando diversos valores de voltaje. Las imágenes de SEM recogidas en la Figura 3 muestran la diferencia en la morfología de las fibras de una disolución de PEO al 3.5% como consecuencia de un cambio en el voltaje aplicado. En la Figura 3 se puede observar que una diferencia de potencial de 5kV no resulta suficiente para obtener nanofibras. Por tanto es necesario superar un voltaje mínimo para obtener membranas de nanofibras, como se observa para 10 y 15 kV. No obstante, un aumento del valor del voltaje produce una evolución hacia la formación de agregados no lineales (nano y micropartículas), que se aleja de la estructura de fibras de diámetro regular deseada. La elección del intervalo de diferencia de potencial se debe al análisis de estudios como el de Zonggang Chen y colaboradores (Chen y col., 2007), en el cual trabajan con voltajes de 10-15 kV.

El voltaje que se ha considerado idóneo para la realización del electrohilado de los sistemas estudiados es 10 kV dado que, como se ha explicado, las fibras presentan una menor formación de agregados en forma de esferoides oblatos.

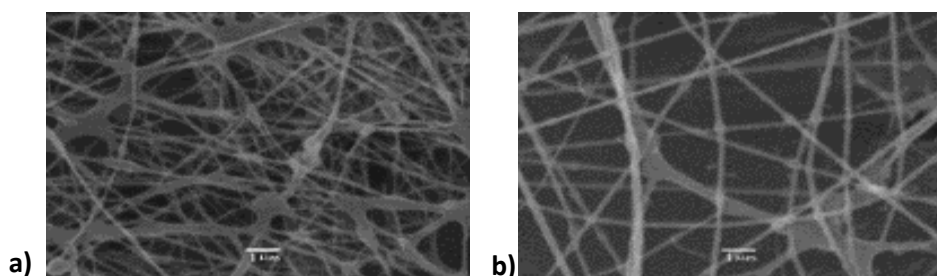


Figura 2: Imágenes de SEM (x10000) de disoluciones de PEO al 4.0% con distinta concentración de disolvente para dos aumentos: a) 50%AA; b) 10%AA. Barra de referencia 1 μm .

Estudio del efecto de la humedad

Para estudiar el efecto de la humedad, se ha estudiado un sistema, el C, que contiene un 3.5% de PEO en ácido acético al 10%. Se han realizado ensayos con humedades relativas que se encuentran por encima y por debajo del 44%, cuyas imágenes de SEM obtenidas tras electrohilado de la disolución C se presentan en la Figura 4.

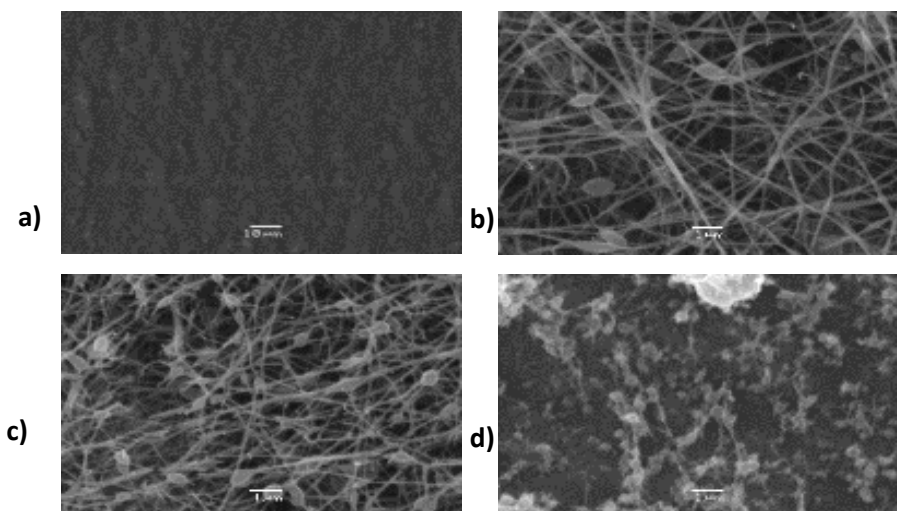


Figura 3: Imágenes de SEM (a:x2000; b,c,d:x10000) de una disolución de PEO al 3.5% a distintos voltajes: a) 5 kV; b) 10 kV; c) 15 kV; d) 20 kV. Barra de referencia a: 10 μ m; b, c, d: 1 μ m

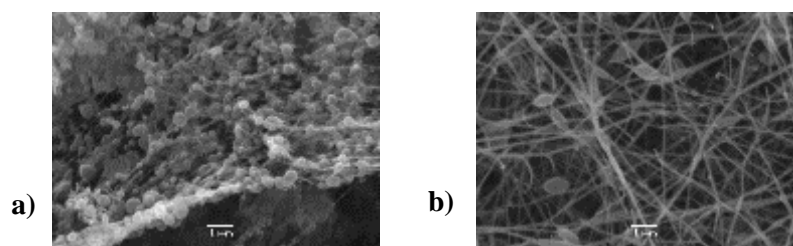


Figura 4: Imágenes de SEM (x10000) de fibras a partir de una disolución de PEO 3.5% en dos condiciones de humedades relativas distintas: a) >44%
b) <44%. Barra de referencia 1 μ m.

Como se puede observar en la Figura 4, un aumento de la humedad por encima de un 44% conduce a membranas formadas esencialmente por glóbulos, impidiendo que se formen las fibras, que si se obtienen por debajo de dicho valor de humedad relativa.

Por consiguiente la humedad relativa ambiental resulta determinante para el proceso de electrohilado, de tal forma que el proceso se ha realizado sólo cuando la humedad no ha sobrepasado el límite establecido.

Los resultados se asemejan a los obtenidos por Jan Pelipenko y colaboradores, los cuales muestran el efecto de la humedad en sistemas de PEO, PVA y otros (Pelipenko y col., 2013).

CONCLUSIONES

Entre otros parámetros, se ha descubierto que la humedad relativa (HR), el campo de potencial eléctrico y la viscosidad son esenciales para obtener esteras de nanofibras electrospun adecuadas:

Por encima del 44% de HR, se promueve la formación de ritmos en lugar de nanofibras. Por debajo del 44% de humedad relativa, se pueden obtener esteras de nanofibras electrospun bastante homogéneas.

Un valor de bajo potencial (por ejemplo, 5 kV) no conduce a la formación adecuada de filamentos, mientras que un valor alto (por ejemplo, 20 kV) promueve la formación de perlas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al ministerio de economía y competitividad la financiación otorgada a través del proyecto CTQ2015-71164-P. Además, los autores también agradecen al Servicio de Microscopía de la Universidad de Sevilla por el acceso al microscopio SEM JEOL 6460LV.

BIBLIOGRAFÍA

- Chen, Z., Mo, X., Qing, F. (2006). Electrospinning of collagen-chitosan complex. *Elsevier*. 61, 3490-3494.
- Correia, DM., Sencadas, V. (2012). Determination of the parameters affecting electrospun chitosan fiber size distribution and morphology. *Carbohydrate Polymers*, 87,1295-1301.
- Jacobs, V., Anandjiwala, R. D., & Maaza, M. (2010). The influence of electrospinning parameters on the structural morphology and diameter of electrospun nanofibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 115(5), 3130-3136.
- Mit-uppatham, C., M. Nithitanakul, & Supaphol, P. (2004). Ultrafine Electrospun Polyamide-6 Fibers: Effect of Solution Conditions on Morphology and Average Fiber Diameter. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 205(17), 2327-2338.
- Mogoșanu, G.D., Grumezescu, A.M., Mogoantă, L., Bejenaru, L.E., Bejenaru, C. (2016). Chapter 4 - Applications of nanobiopolymers for soft tissue engineering. in: *Nanobiomaterials in Soft Tissue Engineering*, William Andrew Publishing, pp. 83-109.
- Pham, Q.P., Sharma, U. and Mikos, A.G. (2006). Mikos, Electrospinning of polymeric nanofibers for tissue engineering applications: a review. *Tissue Engineering*, 12(5), 1197-1211.
- Pelipenki, J., Kristl, J., Jankovic, B., Baumgartner, S., Kocbek, P. (2013). The impact of relative humidity during electrospinning on the morphology and mechanical properties of nanofiber. *International Journal of Pharmaceutics*, 456, 125-13
- Ramakrishna, S., Huang, Z.M., Kotaki, M. (2003). A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. *Composite Science Technology*, 63 (15):2223-2253.

COMPUESTOS PERFLUORADOS EN EQUINODERMOS MARINOS: METODOLOGÍA ANALÍTICA PARA SU DETERMINACIÓN Y MONITORIZACIÓN

Martín, Julia¹; Santos, Juan Luis¹; Aparicio, Irene¹; Alonso, Esteban¹; Zafra-Gómez, Alberto²; Vílchez, José Luis².

¹Análisis Químico Industrial y Medioambiental (FQM-344). Departamento de Química Analítica. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Sevilla.

²Química Analítica y Ciencias de la Vida (FQM-338). Departamento de Química Analítica. Facultad de Ciencias. Universidad de Granada.

RESUMEN

Los disruptores endocrinos están en el punto de mira de estudios ambientales y ecotoxicológicos. Entre ellos destacan los compuestos perfluorados, tanto por su amplio uso industrial y doméstico como por su elevada actividad estrogénica. Se descargan al medio ambiente a través de efluentes industriales y de estaciones depuradoras de aguas residuales afectando principalmente a la biota donde pueden bioacumularse.

En este trabajo se propone un método analítico para la determinación de seis compuestos perfluorados en organismos marinos (*Holothuria tubulosa*) y se lleva a cabo un programa de monitorización ambiental para el seguimiento de estos compuestos.

El análisis de las muestras se realizó mediante extracción con disolventes, limpieza del extracto por extracción en fase sólida dispersiva y posterior determinación mediante cromatografía de líquidos con detección de espectrometría de masas en tándem. Las recuperaciones obtenidas se situaron en el rango de 84 a 101 % y límites de cuantificación inferior a 0,03 ng/g (peso seco (ps)).

Todas las muestras dieron positivas en el análisis de los contaminantes con concentraciones entre 667 ng/g (ps) para el ácido perfluorooctanoico y 0,81 ng/g (ps) para el ácido perfluoropentanoico. Además, se observaron concentraciones más elevadas para los compuestos perfluorados de mayor cadena fluorocarbonada.

Palabras clave: *Disruptores endocrinos, Compuestos perfluorados, Holothuria tubulosa, Metodología analítica, Monitorización.*

ABSTRACT

In recent years endocrine disruptors have come into the spotlight of environmental and ecotoxicological studies. Among them, perfluorinated compounds stand out, both, for their wide industrial and domestic use and for their elevated estrogenic activity, showing adverse effects at trace level. They are released into the environment through industrial waste and wastewater discharges affecting to marine organisms, where they can accumulate.

To contribute to this goal, this work proposes an analytical method for the simultaneous determination of six perfluorinated compounds in marine organisms (*Holothuria tubulosa*) and an environmental monitoring program is carried out in these organisms.

The sample treatment involve steps of solvent extraction and clean-up of the extracts with dispersive sorbents prior to liquid chromatography–tandem mass spectrometry analysis. Recoveries between 84 and 101 %, precision (RSD < 9 %) and limits of quantification below 0.03 ng/g dry weight (d.w.) were achieved.

All tested samples were positive in the analysis of contaminants with concentrations between 667 ng/g (dw) for perfluorooctanoic acid (PFOA) and 0.81 ng/g (dw) for perfluoropentanoic acid (PFPeA). In

general, perfluorinated compounds of larger fluorocarbonated chain were quantified at higher concentration levels than those of shorter one.

Keywords: *Endocrine disruptors, perfluorinated compounds, Holothuria tubulosa, Analytical methodology, Monitoring program.*

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Cuanta más capacidad tenemos de analizar el mundo que nos rodea, apreciamos mucho mejor nuestra huella en él. El desarrollo y avance de nuestra sociedad ha traído consigo nuevos problemas de contaminación ambiental como es el caso de los contaminantes emergentes, sustancias previamente desconocidas o no reconocidas como tales, cuya presencia en el medio ambiente no es necesariamente nueva, pero sí la preocupación por las posibles consecuencias de la misma. Dentro de este grupo de compuestos se engloban un gran número de sustancias utilizadas en el ámbito industrial y doméstico como productos de higiene personal, aditivos de plásticos, detergentes, pesticidas, etc (Kiyama y Wada-kiyama, 2015).

En este trabajo nos centramos en el grupo de los compuestos perfluorados (PFCs, perfluoroalkyl compounds). El enlace flúor-carbono tiene una profunda influencia sobre las propiedades físicas y químicas, aumentando extremadamente la estabilidad química y térmica de estos compuestos haciéndolos más hidrofóbicos, oleofóbicos y tensioactivos. No son compuestos combustibles, resisten adecuadamente a la acción de ácidos fuertes o compuestos con pH básico, además de ser agentes oxidantes y propensos a la fotólisis. Todas estas propiedades han facilitado su utilización desde los años 50 en numerosas aplicaciones industriales y comerciales, empleándose como repelentes de aguas, grasas y aceites en tableros y productos de papel; pinturas, adhesivos y productos de limpieza e higiene personal; también se han utilizado como protectores superficiales antimanchas de alfombras y materiales textiles; antiadherentes en utensilios de cocina; materiales empleados en la fabricación de semiconductores, fluidos hidráulicos para aviación, espumas contra incendios, insecticidas, herbicidas y materiales de uso médico y odontológico.

Los compuestos perfluorados (PFC) han captado recientemente la atención de la comunidad científica debido a las características de persistencia, bioacumulación y toxicidad que presentan (Armstrong y cols., 2016). Se han catalogado como contaminantes hormonales o EDCs porque son capaces tanto de mimetizar como de inhibir, la acción natural de las hormonas, provocando efectos adversos a bajas concentraciones principalmente en el desarrollo de los individuos y en su capacidad reproductiva (Benigni y cols., 2017). Estudios con animales han detectado efectos en el hígado, el sistema inmune, el desarrollo y los órganos sexuales, entre otras cosas.

Hoy día se producen miles de toneladas de PFCs al año que se descargan al medio ambiente por emisión directa o a través de los efluentes de las estaciones depuradoras de aguas residuales, donde no se eliminan totalmente. Aunque el agua es el compartimento ambiental más afectado, estos contaminantes pueden adsorberse a sedimentos y bioacumularse en organismos (Figura 1).

La escasez de estudios relativos a este tipo de contaminantes hace necesario el desarrollo de metodologías analíticas que permitan su determinación en una amplia variedad de muestras bióticas y abióticas, para conseguir caracterizar su comportamiento y distribución global en el medio ambiente, así como para evaluar la toxicidad que provocan en los seres vivos (Martín y cols., 2017; Rahman Kabir y cols., 2015).

Para contribuir a este fin, en este trabajo se propone un método analítico para la determinación simultánea de seis compuestos perfluorados en organismos marinos (*Holothuria tubulosa*) y se lleva a cabo un programa de monitorización ambiental para el seguimiento de estos compuestos en organismos procedentes de la costa Granadina. La selección de los PFCs (ver Tabla 1) se llevó a cabo conforme a la información encontrada en la literatura, atendiendo a su consumo, su comportamiento durante el tratamiento de aguas residuales, su persistencia en los procesos convencionales de depuración y las concentraciones encontradas en diversas matrices medioambientales.

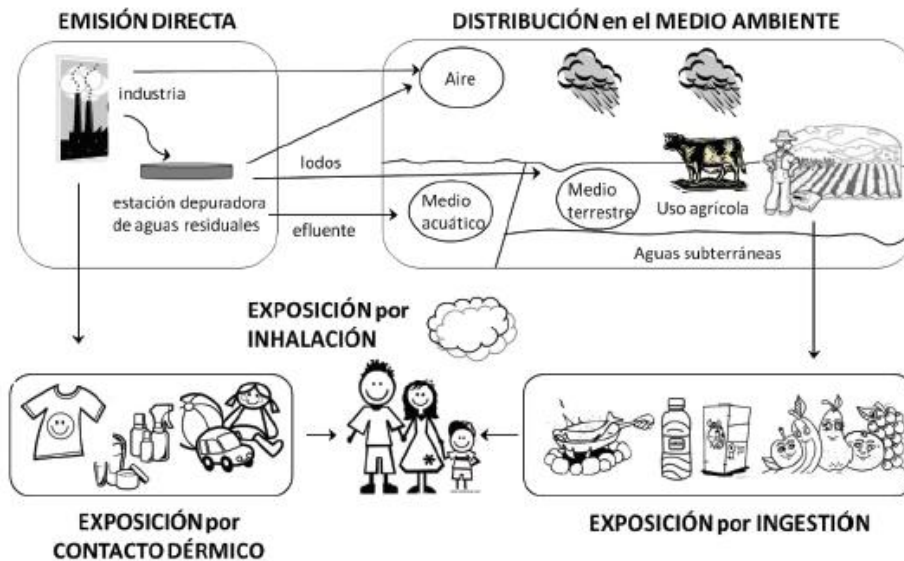


Figura 1. Origen y posible distribución de los PFCs en el medio ambiente (Salgueiro González, 2015).

METODOLOGÍA

Organismos de ensayo

Las holoturias u holoturoideos, conocidos vulgarmente como pepinos de mar o carajos de mar, son una clase del filo Equinodermos que incluye animales de cuerpo vermiforme alargado y blando que vive en casi todos los ambientes marinos, pero son más diversos en las aguas saladas poco profundas de los arrecifes coralinos. Habitan desde el medio intersticial, donde pueden quedar expuestos en la marea baja, hasta las profundas fosas oceánicas. Muchas especies viven enterradas en sedimentos blandos, siendo por tanto bentónicas; pero muchas pueden nadar, y algunas incluso son miembros del plancton, flotando a merced de las corrientes. Se conocen unas 1.400 especies.

De acuerdo con algunos autores, estos organismos pueden servir como buenos centinelas para controlar los microcontaminantes orgánicos en el medio marino. Son un componente esencial de los ecosistemas marinos, pues son limpiadores del fondo y liberadores de nutrientes a partir de restos orgánicos. Son funcionalmente importantes en la transferencia de estos contaminantes a niveles tróficos superiores ya que son una fuente importante de alimentos para peces y aves acuáticas. Además, a pesar de que su aspecto y tacto nos puedan parecer un poco repulsivo son considerados un manjar en la cocina asiática. En estudios previos, estos animales han sido objeto de estudio principalmente de metales y compuestos orgánicos como bifenilos policlorados, hidrocarburos aromáticos policíclicos y algunos disruptores endocrinos (alquilfenoles, especies derivadas del estaño o bisfenol A) pudiendo comprobarse que, efectivamente, sus órganos muestran tendencia a la bioacumulación (Goutte y cols., 2013; Arslan y cols., 2007; Bellas y cols., 2005; Novelli y cols., 2002). Sin embargo, y según la extensa bibliografía consultada, ninguno de estos estudios se centra en los contaminantes seleccionados en la presente propuesta.

Toma de muestra

Los especímenes de *Holoturia tubulosa* (n = 10) fueron tomados a mano por buceadores en ubicaciones aleatorias bajo el agua (modo de buceo subacuático en el que el buzo utiliza un aparato de respiración submarina con contenedor propio para bucear), completamente independiente del suministro superficial), a lo largo de un transecto de 50 m de largo y 7-13 m de profundidad en la zona infralitoral de la playa de Marina del Este (Almuñecar, sur de España, coordenadas: 36.720528, -3.728383) en el mes de Marzo de 2017. Las muestras fueron de tamaño similar (promedio de 100 g). Una descripción más detallada de la toma de muestra se recoge en Martín et al., 2017.

Una vez en el laboratorio, antes de la disección con bisturí, las holoturias se lavaron con agua destilada para eliminar la materia extraña y la suciedad. Para los análisis, se utilizaron los tractos digestivos y respiratorios y las gónadas (Figura 2). Las vísceras fueron liofilizadas, homogeneizadas y tamizadas. Cada muestra se transfirió a un frasco de vidrio y se almacenó en la oscuridad hasta la extracción y el análisis.



Figura 2. Disección con bisturí de una ría.

Procedimiento analítico

El análisis de las muestras se realizó mediante extracción con disolventes, limpieza del extracto por extracción en fase sólida dispersiva y posterior determinación mediante cromatografía de líquidos con detección de espectrometría de masas de triple cuádruplo (LC-MS/MS). La optimización de la metodología se realizó sobre las dos etapas fundamentales en las que se divide el procedimiento analítico: la determinación cromatográfica y el tratamiento de la muestra.

Determinación cromatográfica

La determinación de los PFCs se llevó a cabo empleando un cromatógrafo de líquidos de alta resolución de la marca Agilent con bomba binaria de alta presión, inyector automático y compartimento termostatzado para la columna.

Para la separación de los compuestos, se optó por una columna de octadecilsilano HALO (50 mm × 2.1 mm; 1.6 μm de tamaño de partículas) y una disolución acuosa de acetato amónico (10 mM) y metanol como fase móvil. Se siguió un programa de elución en gradiente, comenzando con una pequeña proporción de metanol (20 %) junto con la fase acuosa, aumentando, posteriormente, la proporción de fase orgánica hasta el 100 % en 5 minutos.

El cromatógrafo de líquidos está acoplado a un detector de espectrometría de masas triple cuádrupolo equipado con una fuente de ionización por electrospray trabajando en modo negativo. Para cada analito se seleccionan las dos transiciones más abundantes tras la rotura del ion precursor. En la Tabla 1 se muestran los parámetros optimizados empleados en el espectrómetro de masas. En la Figura 3 se muestra un cromatograma para una mezcla patrón de 50 ng/mL de los PFCs objeto de estudio en las condiciones descritas.

Tabla 1. Parámetros LC-MS/MS.

Nombre	Sigla	Ion Precursor (m/z)	MRM 1 (m/z)	MRM 2 (m/z)
Ácido perfluoropentanoico	PFPeA	263	219	89,7
Ácido perfluorohexanoico	PFHxA	313	269	119
Ácido perfluoroheptanoico	PFHpA	363	319	333
Ácido perfluorooctanoico	PFOA	413	369	194
Sulfonato de perfluorooctano	PFOS	499	80	51
Ácido perfluoro-n-[1,2,3,4- ¹³ C ₄]octanoico	I.S PFOA	417	371	168

MRM 1: Transición utilizada para la cuantificación; MRM 2: Transición utilizada para la confirmación.

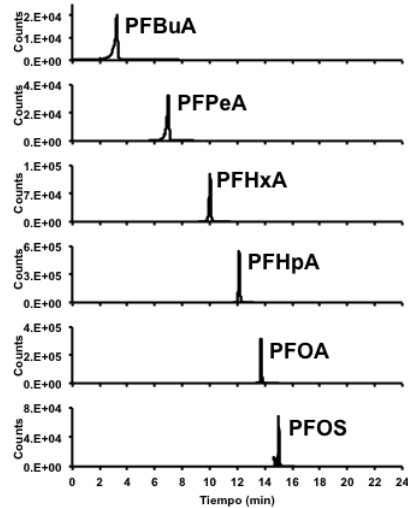


Figura 3. Separación cromatográfica de los compuestos objeto de estudio por LC-MS/MS.

Tratamiento de la muestra

Para la extracción de los PFCs se pesaron 0,5 g de vísceras de holoturias, previamente liofilizada y tamizada a un tamaño de partícula de 0,1 mm, un tubo de ensayo y se añadió 0,1 mL de patrón interno (200 ng/mL). La extracción se realizó empleando de 7 mL de acetonitrilo. Para cada extracción, se añadió el disolvente, se agitó en vortex durante 2 minutos y se centrifugó a 4050 x g durante 10 min. El líquido sobrenadante se retiró a un tubo de ensayo y la fracción sólida se sometió de nuevo al proceso de extracción. Una vez reunidas las fracciones líquidas, se realizó una etapa de limpieza sobre el extracto mediante extracción en fase sólida dispersiva. Para ello, se añadieron 800 mg de C18, se agitó la mezcla durante 2 min y se centrifugó a 4050 x g durante 5 min. La fase orgánica se retiró a un tubo de ensayo y se evaporó a sequedad empleando corriente de nitrógeno. El extracto seco se reconstituyó con 0,25 mL de una mezcla metanol:agua 1:1 (v/v) y se filtró a 0,22 µm. En la Figura 4 se muestra un esquema del procedimiento analítico seguido para la cuantificación de PFCs en holoturias.



Figura 4. Procedimiento analítico para el análisis de PFCs en muestras de holoturia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Validación del método

Recuperación

La recuperación del método se evaluará sobre muestras de biota dopadas. Se prepararan por triplicado muestras dopadas y blancos y se compararan las áreas de pico obtenidas en las muestras dopadas con las obtenidas en extractos de muestras, dopados tras el proceso de extracción. Las recuperaciones obtenidas se muestran en la Tabla 2.

Precisión

Se realizará por triplicado sobre muestras de biota dopadas. La precisión se expresará como desviación estándar relativa de las medidas realizadas. Los datos de precisión obtenidos para los distintos compuestos se muestran en la Tabla 2.

Límites de detección y cuantificación

Límite de detección (LD): Se expresará como la concentración para la cual la relación señal-ruido tiene un valor de 3. Los límites de detección de los distintos compuestos se muestran en la Tabla 2.

Límite de cuantificación (LC): Se expresará como la concentración para la cual la relación señal-ruido tiene un valor de 10. Los límites de cuantificación de los distintos compuestos se muestran en la Tabla 2.

Rango de linealidad

Se prepararán por triplicado nueve patrones de diferente concentración en los rangos de concentración indicados en la sección de calibración. Se representará la relación entre el área de pico del analito y el área de pico del patrón interno frente a la concentración. Se evaluará la linealidad a partir del valor de coeficiente de correlación de la recta de calibrado obtenida por el método de los mínimos cuadrados. El valor del coeficiente de correlación deberá ser superior a 0,990.

Tabla 2. Recuperación, precisión, linealidad y límites de detección (LD) y cuantificación (LC) del método.

PFCs	Recuperación (%)	Precisión (% RSD)	Linealidad R ²	LD (µg/kg ps)	LC (µg/kg ps)
PFBuA	101	0,2	0,998	0,01	0,03
PFPeA	99	8,0	1,000	0,01	0,03
PFHxA	94	8,5	0,999	0,01	0,03
PFHpA	92	5,7	0,999	0,01	0,03
PFOA	84	1,8	0,999	0,01	0,03
PFOS	85	9,4	0,995	0,01	0,03

Monitorización de PFCs en holoturia tubulosa

Tras la validación del método, las muestras fueron tratadas como se describe en la sección 6 y se determinó la concentración de los analitos de interés bajo las condiciones establecidas. El análisis se realizó en todos los casos por duplicado. En la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos y en la Figura 5 un cromatograma de una muestra de holoturia.

Tabla 3. Concentraciones de PFCs (ng/g (ps)) medidas en holoturias.

Holoturia	PFBuA	PFPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFOS
H1	9,19	5,07	32,7	162	179	25,0
H2	7,58	4,81	31,6	159	172	23,1
H3	5,22	0,81	11,7	56,6	51,4	3,01
H4	4,61	1,41	11,6	53,1	51,3	2,41
H5	1,59	<LC	2,60	11,4	25,0	10,1
H6	1,99	<LC	2,60	11,0	24,4	9,84
H7	37,2	31,8	6,52	17,3	65,5	72,7
H8	34,7	31,1	6,69	17,3	64,6	72,9
H9	55,4	26,3	141	270	667	95,1
H10	48,9	78,0	174	484	150	21,3

Los resultados demuestran la incorporación de estos contaminantes emergentes en dichos organismos. Todas las muestras dieron positivos en el análisis de los contaminantes con concentraciones desde 0,81 ng/g (ps) para el PFPeA hasta 667 ng/g (ps) para el PFOA. De manera general, los compuestos perfluorados de mayor cadena fluorocarbonada fueron cuantificados a concentraciones más elevadas que los de cadena corta, fundamentalmente PFOS y PFOA. Ambos compuestos, según estudios recientes, son tóxicos y persistentes, el PFOA es además carcinogénico, y el PFOS presenta una fuerte tendencia a la bioacumulación.

Existen dos razones que podrían explicar las concentraciones encontradas para estos compuestos: La primera es que desde hace 60 años estos compuestos se han utilizado en productos tan cotidianos como las sartenes antiadherentes (el famoso Teflón), en la ropa “waterproof”, en cosméticos, en cajas de pizza o en los envases de palomitas de maíz. Los PFCs migran desde estos productos al aire, al polvo de casa, la comida o el agua potable. La segunda razón de su ubicuidad es que los PFCs son compuestos orgánicos persistentes, es decir, son compuestos que no se degradan fácilmente por lo que permanecen en el entorno años y que, además, se acumulan a lo largo de la cadena alimentaria.

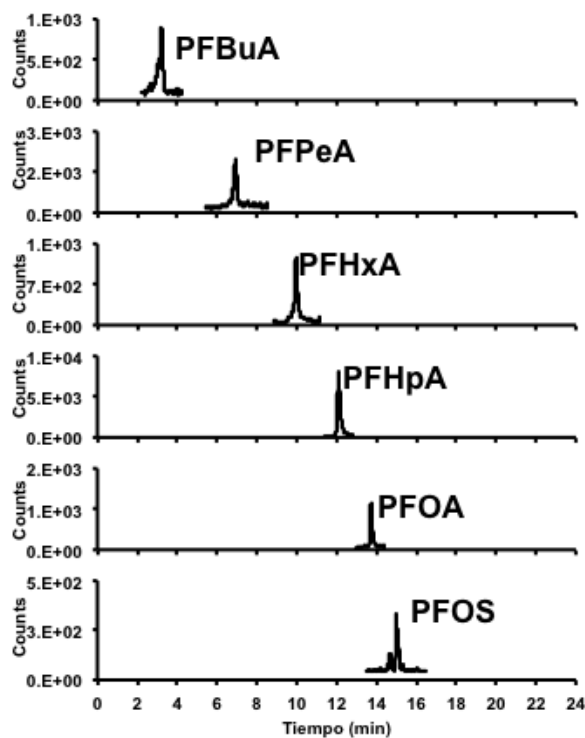


Figura 5. Cromatograma de una muestra de holoturia.

CONCLUSIONES

Los EDCs están en el punto de mira de estudios ambientales y ecotoxicológicos. Entre ellos destacan los PFCs, tanto por su amplio uso industrial y doméstico como por su elevada actividad estrogénica demostrando efectos adversos a niveles traza. Se descargan al medio ambiente a través de efluentes industriales y de estaciones depuradoras de aguas residuales afectando principalmente a organismos marinos donde pueden acumularse si se produce una exposición a largo plazo.

Debido a la complejidad de las muestras ambientales y a que estas sustancias se encuentran a niveles de trazas, es necesario el desarrollo de métodos analíticos sensibles y selectivos, que permitan la determinación de estas sustancias a las concentraciones en que se encuentran en el medio. En este trabajo, se puso a punto una metodología analítica para la determinación simultánea de seis PFCs en *Holothuria tubulosa* consistente en la extracción de los contaminantes mediante disolventes, limpieza del extracto por extracción en fase sólida dispersiva y posterior determinación mediante cromatografía de líquidos con detección de espectrometría de masas de triple cuadrupolo.

Se validó la metodología obteniendo parámetros analíticos satisfactorios. Las recuperaciones obtenidas se situaron en el rango de 84 a 101 % con desviaciones estándar relativas inferior a 9 % y límites de cuantificación inferior a 0,03 ng/g (ps).

Todas las muestras dieron positivas en el análisis de los contaminantes. Los resultados obtenidos muestran concentraciones entre 667 ng/g (ps) para el PFOA y 0,81 ng/g (ps) para el PFPeA. De manera general, los compuestos perfluorados de mayor cadena fluorocarbonada fueron cuantificados a concentraciones más elevadas que los de cadena corta. Estos resultados preliminares muestran la necesidad de futuros estudios para conocer su comportamiento y sus efectos, a fin de preservar la biodiversidad y proteger la salud pública.

BIBLIOGRAFÍA

- Armstrong, DL; Lozano, N; Rice, CP; Ramirez, M; Torrents, A. (2016). Temporal trends of perfluoroalkyl substances in limed biosolids from a large municipal water resource recovery facility. *Journal of Environmental Management*, 165. 88-95.
- Arslan, AC; Parlak, H; Oral, R; Katalay, S. (2007). The effects of nonylphenol and octylphenol on embryonic development of sea urchin (*Paracentrotus lividus*). *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 53. 214–219.
- Bellas, J; Beiras, R; Maríño-Balsa, JC; Fernández, N. (2005). Toxicity of organic compounds to marine invertebrate embryos and larvae: a comparison between the sea urchin embryogenesis bioassay and alternative test species. *Ecotoxicology*, 14, 337–353.
- Benigni, R; Battistelli, CL; Bossa, C; Giuliani, A; Tcheremenskaia, O. (2017). Endocrine Disruptors: Data-based survey of in vivo tests, predictive models and the Adverse Outcome Pathway. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 86. 18-24.
- Goutte, A; Chevreuril, M; Alliot, F; Chastel, O; Cherel, Y; Eléaume, M; Massé, G. (2013). Persistent organic pollutants in benthic and pelagic organisms off Adélie Land, Antarctica. *Marine Pollution Bulletin*, 77. 82–89.
- Kiyama, R; Wada-Kiyama, Y. (2015). Estrogenic endocrine disruptors: Molecular mechanisms of action. *Environmental International*, 83. 11-40.
- Martín, J; Zafra-Gómez, A; Hidalgo, F; Ibáñez-Yuste, AJ; Alonso, E; Vílchez, JL. (2017). Multi-residue analysis of 36 priority and emerging pollutants in marine echinoderms (*Holothuria tubulosa*) and marine sediments by solid-liquid extraction followed by dispersive solid phase extraction and liquid chromatography–tandem mass spectrometry analysis. *Talanta*, 166. 336-348.
- Novelli, A; Losso, C; Ghetti, PF; Ghirardini, AV. (2002). Toxicity of tributyltin and triphenyltin to early life-styles of *Paracentrotus lividus* (Echinodermata: Echinoidea). *Environmental Toxicology and Chemistry*, 21. 859–864.

- Rahman-Kabir, E; Sharfin-Rahman, M; Rahman-Rahman, I. (2015). A review on endocrinedisruptors and their possible impacts on human health. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 40, (1). 241-58.
- Salgueiro González, N. (2015). *Estudio de disruptores endocrinos en el medio ambiente*. Tesis Doctoral. Universida de la Coruña.

P3

ESTUDIO DE LA ETAPA DE MEZCLADO EN EL DESARROLLO DE BIOPLÁSTICOS A BASE DE PROTEÍNA DE GUISANTE

Perez-Puyana, Víctor; Ramos, María; Carvajal, Juan María; Felix, Manuel; Bengoechea, Carlos.

Tecnología y Diseño de Productos Multicomponentes (TEP-229). Departamento de Ingeniería Química. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Sevilla

RESUMEN

El desarrollo de bioplásticos podría ayudar a combatir el problema medioambiental derivado del uso masivo de plásticos procedentes del petróleo, contribuyendo a la producción de materiales de mayor degradabilidad. Todos los bioplásticos objeto de estudio del presente trabajo poseen una relación proteína/plastificante igual a 60/40. Los bioplásticos se obtuvieron en un proceso que consta de una primera etapa de mezclado, resultando una masa homogénea que fue sometida posteriormente a una segunda etapa de moldeo por inyección. El adecuado control de estas etapas es una parte fundamental en el proceso de elaboración de bioplásticos, por lo que el objetivo principal de este trabajo ha sido explorar la influencia de la velocidad de mezclado sobre las masas y los bioplásticos resultantes. Para ello, se realizó una caracterización de los mismos mediante el estudio de su capacidad de absorción de agua, ensayos mecánicos de tracción, y ensayos reológicos en modo dinámico. Entre los resultados obtenidos, puede destacarse que a bajas velocidades de mezclado resultan masas heterogéneas con variabilidad en sus propiedades.

Palabras claves: *proteína de guisante, moldeo por inyección, bioplásticos, capacidad de absorción de agua.*

ABSTRACT

The development of bioplastics could avoid the environmental problem derived from the huge use of petroleum-based plastics and contribute to the production of more degradable materials. In this study, bioplastics have a protein/plasticizer ratio of 60/40 from pea protein and glycerol, respectively. They were manufactured in two stages. Firstly, a mixing stage, in which the resulting dough was use in the second stage, an injection molding. The control of these stages is a fundamental part in the process. The main objective of this work is to explore the influence of the speed of mixing on the dough and bioplastics. The characterization of bioplastics was performed by means of water absorption capacity and rheological dynamic tests. Among the results, it can be highlighted that a heterogeneous dough with variability in their properties appears at low mixing speeds.

Keywords: *pea protein, injection moulding, bioplastics, water uptake capacity.*

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En los años 50 el mercado de los materiales plásticos comenzó a crecer y debido a sus propiedades, versatilidad y precio, su uso sigue siendo elevado en la actualidad (Plastics Europe, 2008). Sin embargo, estos materiales están involucrados en los grandes problemas ambientales existentes ya que proceden de una fuente no renovable, como el petróleo, y de su utilización se obtienen una gran cantidad de residuos. Actualmente existe una mayor conciencia ambiental que hace necesario que aparezcan otras alternativas más respetuosas con el medio ambiente (Kurt y col., 2006; Tummala y col., 2006). Una prometedora solución son los bioplásticos, que provienen de fuentes renovables, son degradables, han demostrado tener excelentes cualidades físicas, así como, reducir los costes de producción. Para su fabricación, lípidos, polisacáridos o proteínas han sido objeto de estudio por muchos años. Se han utilizado proteínas animales, como las proteínas de la leche o el colágeno y en los últimos años especial atención han recibido las vegetales como maíz, gluten o soja. Otra posible materia prima es la proteína de guisante, la cual presenta un menor precio. Sin embargo, los concentrados de proteína generalmente se mezclan con un plastificante debido a las interacciones de enlaces disulfuro, enlaces de hidrógeno,

interacciones hidrofóbicas y fuerzas electrostáticas entre cadenas de proteínas que típicamente conducen a estructuras frágiles (Jerez y col., 2005), mejorando así su movilidad y reduciendo la temperatura de transición vítrea (Irissin-Mangata y col., 2001; Matveev y col., 2000). Los más comunes son el agua, la glicerina o una mezcla de ambos (Gómez-Martínez y col., 2011; Marie y col., 1999).

Entre las técnicas termomecánicas de procesado, el moldeo por inyección es una de las más apropiadas para los bioplásticos (González-Gutiérrez y col., 2011; Jerez y col., 2007). Pero previamente se necesita una etapa de mezclado en la que la mezcla de proteína y plastificante resulte homogénea. Tanto la proporción de proteína y plastificante como las condiciones de mezclado e inyección deben de ser estudiadas a depender de las características deseadas de los bioplásticos resultantes. Es decir, un control de ambas etapas es fundamental en el proceso de elaboración de bioplásticos.

El objetivo principal de este trabajo fue explorar la influencia de la velocidad de mezclado sobre las masas y los bioplásticos resultantes. Para ello, se realizó una caracterización de los mismos mediante el estudio de su capacidad de absorción de agua, ensayos mecánicos de tracción, y ensayos reológicos en modo dinámico. Entre los resultados obtenidos, puede destacarse que a bajas velocidades de mezclado resultan masas heterogéneas con variabilidad en sus propiedades.

METODOLOGÍA

Materiales empleados

En este trabajo se ha utilizado proteína de guisante procedente de ROQUETTE (Lestrem, Francia). Se trata de un aislado proteico según la clasificación de Pearson (Pearson, 1983), ya que presenta un 89,5% de proteínas. Hasta completar el 100%, el aislado se compone además de lípidos (1,4%), cenizas (3,5%), humedad (5,1%) y pequeñas cantidades de carbohidratos, generalmente almidón que no pudo separar durante el proceso de desarrollo del aislado (0,5%) (Pérez y col., 2016). El plastificante, glicerina, fue suministrado por Panreac Química, S.A. (España).

Preparación de los bioplásticos

Todos los bioplásticos objeto de estudio del presente trabajo presentaron una relación proteína/plastificante igual a 60/40 (Felix y col., 2017). Para su fabricación una primera etapa de mezclado fue realizada, utilizando un equipo de mezclado HAAKE PolyLab. Las distintas condiciones de mezclado fueron estudiadas (10, 30 y 50 rpm durante 10 minutos) en condiciones isotérmicas (25 °C). Durante el mezclado, se obtuvieron y controlaron el torque y la temperatura de las masas. Éstas fueron sometidas a una posterior etapa de moldeo por inyección usando el equipo Minijet (ThermoHaake). Para la obtención de los bioplásticos, la temperatura de la cámara de preinyección fue de 130 °C y la del molde de 50 °C. El tiempo de inyección fue de 20 segundos a 500 bar de presión, mientras que el tiempo de molde fue de 200 segundos a 200 bar de presión (Perez y col., 2015).

Un parámetro a tener en cuenta a la hora de seleccionar la masa idónea fue la energía mecánica específica (*SME*), que es la energía proporcionada por la mezcladora por unidad de masa durante el tiempo de mezclado (*t*):

$$SME = \frac{W}{m} \int_0^{t_{min}} M(t) dt \quad (1)$$

Donde *W* representa la velocidad de rotación (en rad/s) de la mezcladora, *m* es la masa total que se introduce (en kg) y el par de Torsión (*M*) que varía con el tiempo (*t*) hasta el tiempo seleccionado (*t_{min}*).

Caracterización de masa

- Ensayos reológicos

Un equipo de deformación controlada RSA3 (TA instruments, EEUU) se utilizó para medir las propiedades viscoelásticas de las masas y obtener los módulos elástico (*E'*) y viscoso (*E''*), así como la tangente de pérdidas ($\tan \delta$). Los sistemas sensores utilizados fueron de tipo compresión, con dos platos cilíndricos con un diámetro de 15 mm y una distancia entre placas (*gap*) de 2,5 mm. Barridos de frecuencia (0,02-20 Hz) fueron realizados, dentro del intervalo viscoelástico lineal a temperatura ambiente.

- *Capacidad de absorción de agua (wic)*

La capacidad de absorción de agua (wic, siglas en inglés de water imbibing capacity) de la mezcla de proteína de guisante con glicerina fue determinado usando una modificación del sistema Baumann (Torgensen y col., 1977). Este dispositivo lo forma un embudo conectado a un tubo horizontal graduado. Se usó dos gramos de muestra en forma de polvo sobre un papel de filtro mojado unido a un filtro de vidrio, el cual estaba colocado encima del tubo horizontal lleno de agua. El método fue llevado a cabo a temperatura ambiente (20°C). La absorción de agua por parte de la muestra en equilibrio se podía medir en el tubo graduado y se expresó en milímetros de agua. Las mediciones se realizaron por duplicado.

Caracterización de bioplásticos

- *Análisis mecánico dinámico (DMA)*

La caracterización reológica de los bioplásticos fue llevada a cabo con el RSA3 (TA instruments, EEUU). En este caso se empleó la geometría “*three point bending*”. Estos ensayos siguen la norma ASTM D5023 (ASTM, 2017) llevándose a cabo por triplicado empleando probetas de bioplásticos con dimensiones de 60×10×1 mm. Los barridos de frecuencia fueron realizados, dentro del intervalo viscoelástico lineal, con un intervalo de frecuencias que va desde 0,02 a 20 Hz y a temperatura ambiente.

- *Ensayo de tracción*

Para los ensayos de tracción hasta la ruptura se usó el equipo Insight 10kN (MTS, EEUU) se usó, de acuerdo a la norma ISO 527-2:1999 (ISO 527-2, 2012). Se analizaron al menos 4 especímenes por sistema. La velocidad extensional fue de 10 mm/min a temperatura ambiente. Se obtuvieron valores de deformación en la rotura ($\varepsilon_{máx}$), el módulo de Young (E) y el esfuerzo máximo ($\sigma_{máx}$).

- *Absorción de agua*

La capacidad de absorción de agua de los bioplásticos se midió de acuerdo con la norma ASTM D570, 2001 (ASTM, 2005) método estandarizado para la determinación de absorción de agua en plásticos. Para tal fin se utilizaron probetas rectangulares de 60×10×1 mm. Éstas fueron sometidas a secado (acondicionamiento) en estufa a $50 \pm 2^\circ\text{C}$ durante unas 2 horas y media para determinar su peso en seco, para a continuación ser introducidas en agua destilada. Su pesaje se realizó tras 2 y 24 horas de inmersión. Por último, se volvieron a someter a secado (re-acondicionamiento) y pesado para determinar la pérdida de material soluble, tras 21 horas en el horno. Todos los ensayos realizaron por triplicado a temperatura ambiente. La capacidad de absorción de agua y la pérdida de material soluble se determinaron mediante las siguientes ecuaciones:

$$\% \text{ Absorción Agua} = \frac{\text{Peso Húmedo} - \text{Peso Seco Inicial}}{\text{Peso Seco Inicial}} \cdot 100 \quad (2)$$

$$\% \text{ Pérdida Soluble} = \frac{\text{Peso Seco Inicial} - \text{Peso Seco Final}}{\text{Peso Seco Inicial}} \cdot 100 \quad (3)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mezclas

- *Mezclado*

La Figura 1 muestra la evolución del par de torsión y temperatura frente al tiempo para las distintas velocidades de mezclado a estudiar, 10, 30 y 50 rpm. Puede observarse como las subidas más pronunciadas se presentaron cuando la velocidad de mezclado fue mayor (30 y 50 rpm.), mientras que la disminución de revoluciones necesitó más tiempo para conseguir los mismos valores en el par de torsión (10 rpm.), hasta 3 horas para apreciar la mencionada subida sin llegar a reconocer el máximo. Los perfiles de temperatura mostraron el mismo comportamiento, de manera que superponiendo ambas gráficas, los incrementos de par de torsión y temperatura, son coincidentes. Esto indica que el tiempo y la velocidad de mezclado están altamente relacionados y son difíciles de separar.

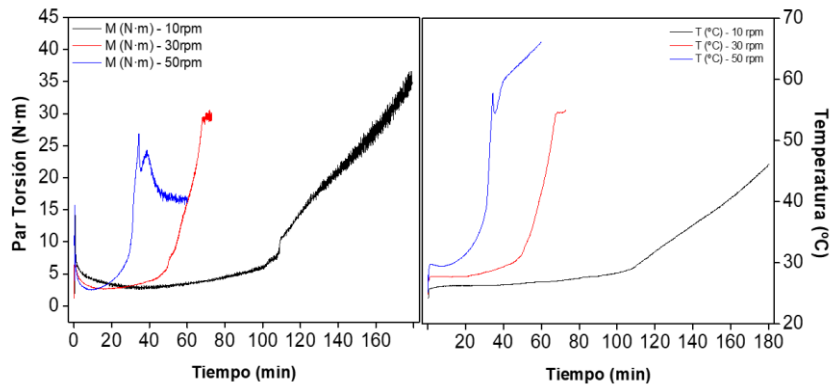


Figura 17: Evolución para los sistemas de 10, 30 y 50 rpm de (A) par de torsión en función del tiempo y (B) temperatura en función del tiempo.

A continuación, se calculó la Energía Mecánica Específica (SME) del proceso de mezclado, la cual se presenta en la Tabla 1. A mayores velocidades de mezclado se obtuvo mayor valor de SME. Para que el consumo energético no sea muy elevado se debería de evitar tiempos largos si fuesen necesario altas velocidades de mezclado.

Tabla 7: Valores de la energía mecánica específica en función de la velocidad de mezclado.

Velocidad de mezclado (rpm)	SME (kJ/kg)
10	53
30	368
50	3895

- **Absorción de agua (wic)**

En la Figura 2A se muestra la cinética de absorción de agua de las masas obtenidas. Como se puede observar, entre los sistemas de 10 y 30 rpm no existieron diferencias a tiempo iniciales, existiendo un pequeño descenso de la masa obtenida a 10 rpm tras 300 segundos. Para la obtenida a 50 rpm, esta cinética de absorción obtuvo valores inferiores alcanzando el mismo valor a los 450 segundos. En la Figura 2B aparecen los valores máximos de absorción para cada sistema, obteniéndose valores similares para los tres sistemas. Por lo tanto, la absorción de las masas no presentó diferencias si se varía la velocidad de mezclado.

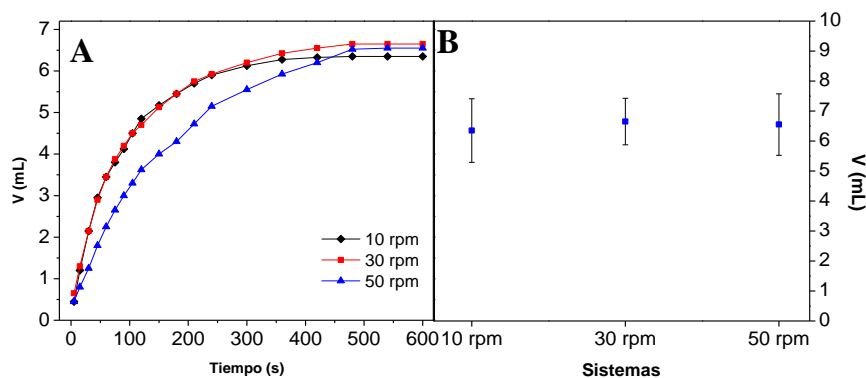


Figura 18: (A) Cinética de absorción de agua. (B) Valor máximo obtenido (mL).

- **Propiedades reológicas**

Los valores del módulo elástico (E') obtenidos a 1 Hz aparecen en la Figura 3. Como puede observarse, los valores más elevados de E' se obtuvieron a la mayor velocidad de mezclado (50 rpm). En los sistemas de 10 rpm 10 min y 30 rpm 10 min se obtuvieron valores similares entre sí, pero inferiores al de 50 rpm 10 min ($2,5 \cdot 10^8$, $6,0 \cdot 10^8$ y $6,4 \cdot 10^8$ respectivamente). Por tanto, a mayores velocidades de mezclado se obtuvieron mayores valores de módulos elástico en las masas.

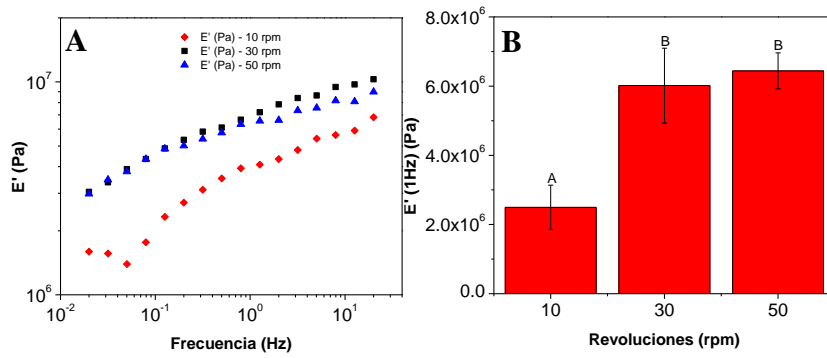


Figura 19: Estudio del módulo elástico: (A) Evolución del módulo elástico con la frecuencia y (B) Valor máximo a 1Hz.

Bioplásticos

- Propiedades reológicas

La Figura 4 muestra los valores del módulo elástico (E') a 1 Hz. En este caso, valores más elevados de E' se obtuvieron a la mayor velocidad de mezclado (50 rpm). En los sistemas de 10 rpm 10 min y 30 rpm 10 min se obtuvieron valores similares entre sí, pero inferiores al de 50 rpm 10 min ($3,4 \cdot 10^8$, $3,0 \cdot 10^8$ y $5,1 \cdot 10^8$ respectivamente). En este caso, para obtener unas mejores propiedades reológicas fue necesario una mayor velocidad de mezclado.

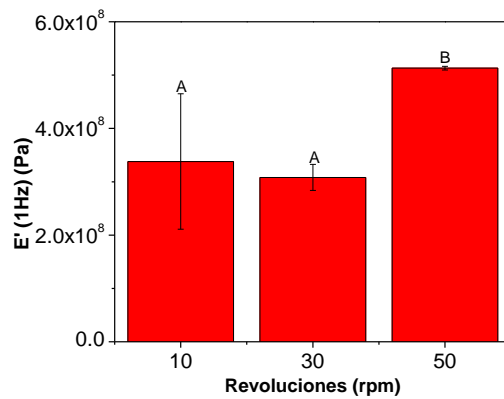


Figura 20: Ensayos dinámicos de flexión. Evolución del módulo de almacenamiento a 1 Hz con la velocidad de mezcla

- Tracción

En la Figura 5 se presentan los resultados tras el ensayo de tracción. Los valores obtenidos para el esfuerzo máximo y para la deformación a la rotura fueron muy similares. En cambio, para el Módulo de Young destacó ligeramente el sistema a 30 rpm 10 min. Por tanto, no existieron diferencias significativas en las propiedades de tracción de las probetas desarrolladas.

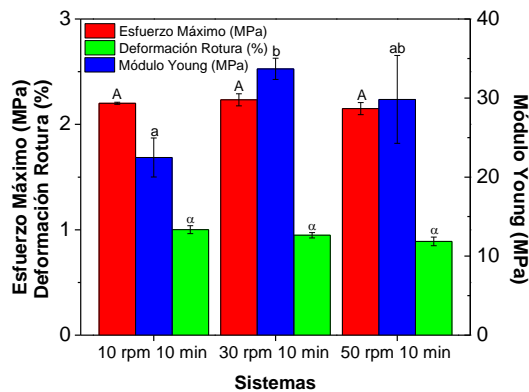


Figura 21: Valores de Esfuerzo Máximo, deformación a la Rotura y Módulo de Young de los bioplásticos obtenidos a las diferentes velocidades de mezclado.

- Absorción de agua

En la Figura 6 se representa los resultados con respecto a la absorción de agua (tras 2 y 24 h.), y la pérdida de material soluble de los bioplásticos obtenidos. A las 2h., las probetas absorbieron aproximadamente un 120% de agua, mientras que tras 24 horas disminuyó hasta 110%. Por último, la pérdida de material soluble también se mantuvo constante (51% aprox.). Por tanto, no existen diferencias significativas para la absorción de agua de los distintos sistemas, de forma que la velocidad de mezclado no influye sobre la absorción de agua como en la pérdida de material soluble.

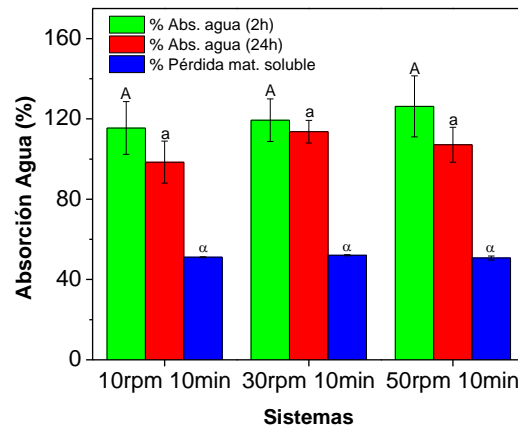


Figura 22: Absorción de agua (tras 2 y 24 horas) y pérdida de material soluble de los bioplásticos para las diferentes velocidades de mezclado.

CONCLUSIONES

- La velocidad de mezclado no influyó de manera significativa sobre la cinética de absorción de las masas, alcanzándose en todos los casos el estado estacionario a las 8 horas, con un valor máximo de absorción similar.
- El aumento de la velocidad de mezclado de 10 a 30 rpm resulta en un aumento proporcional de las propiedades viscoelásticas de las masas resultantes, aunque esas propiedades permanecen prácticamente invariables tras un mayor aumento de la velocidad de mezclado (50 rpm).
- La velocidad de mezclado no afecta ni a la absorción de agua ni a la pérdida de material soluble de los bioplásticos procesados a una temperatura de moldeo igual a 130°C.
- En cuanto a las propiedades mecánicas, tan sólo el módulo de Young se ve influido por la velocidad de mezclado en las condiciones de estudio, siendo mayor cuanto mayor sea ésta.
- El módulo de almacenamiento permanece constante a las menores velocidades de mezclado, aumentando cuando se procesa a 50 rpm.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero del proyecto recibido por parte del ministerio de economía, industria y competitividad (Ref: CTQ2015-71164P, MINECO/FEDER, UE), y a la Universidad de Sevilla por la beca predoctoral del V Plan Propio de Investigación (VPPI-US).

BIBLIOGRAFÍA

- ASTM (American Society for Testing and Materials). (2017). "Standard Test Method for Measuring the Dynamic Mechanical Properties: In Flexure (Three-Point Bending)".
- ASTM (American Society for Testing and Materials). (2005). "Standard Test Method for Plastic", Annual

Book of ASTM Standards Philadelphia. PA: American Society for Testing and Materials.

- Gómez-Martínez, D., Barneto, A.G., Martínez, I. and Partal, P. (2011). "Modelling of Pyrolysis and Combustion of Gluten–Glycerol-Based Bioplastics." *Bioresource Technology*. 102, (10). 6246–53.
- Felix, M., Perez-Puyana, V., A. Romero y Guerrero, A. (2017). "Production and Characterization of Bioplastics Obtained by Injection Moulding of Various Protein Systems." *Journal of Polymers and the Environment*. 25, (1). 91–100.
- González-Gutiérrez, J., Partal, P., García-Morales, M. y Gallegos, C. (2011). "Effect of Processing on the Viscoelastic, Tensile and Optical Properties of Albumen / Starch-Based Bioplastics." *Carbohydrate Polymers*. 84, (1). 308–15.
- Marie, He., Guilbert, A. y Ensa, M. (1999). "Rheological Properties of Gluten Plasticized with Glycerol: Dependence on Temperature, Glycerol Content and Mixing Conditions." *Rheol Acta*. 38, (4). 311–20.
- Irissin-Mangata, J., Bauduin, G., Boutevin, B. y Gontard, N. (2001). "New Plasticizers for Wheat Gluten." *European Polymer Journal*. 37, (8). 1533–1541.
- "ISO 527-2. (2012). *Plastics—Determination of Tensile Properties-Part 2: Test Conditions for Moulding and Extrusion Plastics*." 527–532.
- Jerez, A., Partal, P., Martínez, I., Gallegos, C. y Guerrero, A. (2005). "Rheology and Processing of Gluten Based Bioplastics." *Biochemical Engineering Journal*. 26, (2-3). 131–38.
- Jerez, A., Partal, P., Martínez, I., Gallegos, C. y Guerrero, A. (2007). "Protein-Based Bioplastics: Effect of Thermo-Mechanical Processing." *Rheol Acta*. 46, (5). 711–20.
- Matveev, Yu.I., Grinberg, V.Ya y Tolstoguzov, V.V. (2000). "The Plasticizing Effect of Water on Proteins, Polysaccharides and Their Mixtures. Glassy State of Biopolymers, Food and Seeds." *Food Hydrocolloids*. 14, (5). 425–37.
- Pearson, A.M. (1983). "Soy Proteins." *En Developments in Food Proteins*. Applied. Essex (England): Science Publishers LTD.
- Perez, V., Felix, M., Romero, A. y Guerrero, A. (2015). "Food and Bioproducts Processing Characterization of Pea Protein-Based Bioplastics Processed by Injection Moulding." *Food and Bioproducts Processing*. 97. 100–108.
- "Plastics Europe. (2008). *Safeguarding the Planet By, Reaching Out*." www.plasticseurope.org.
- "Plastics Europe, EUPC (the European Plastics Converters), EPRO (European Association of Plastics Recycling and Recovery Organisations) y EuPr (the European Plastics Recyclers). 2008. *The Compelling Facts about Plastics. An Analysis of Plastics Production*."
- Kurt, A., Rosentrater, y Otieno AW. (2006). "Considerations for Manufacturing Bio-Based Plastic Products." *Polymers of Polymers and the Environment*. 14, (4). 335–46.
- Torgersen, H., y Toledo, R. T. (1977). "Physical properties of protein preparations related to their functional characteristics in comminuted meat systems." *Journal of Food Science*. 42, (6). 1615–20.
- Tummala, P., Liu, W. Mohanty, A. y Misra, M. (2006). "Influence of Plasticizers on Thermal and Mechanical Properties and Morphology of Soy-Based Bioplastics." *Ind. Eng. Chem. Res*: 45, (22). 7491–96.

P4

USO DE BIOPOLÍMEROS PARA LA ELABORACIÓN DE ANDAMIOS CON APLICACIÓN EN INGENIERÍA TISULAR

Perez-Puyana, Víctor. Carreño-Carmona Isabel. Romero García, Alberto. Guerrero Conejo, Antonio.

Tecnología y diseño de Productos Multicomponentes (TEP-229). Departamento de Ingeniería Química. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Sevilla.

RESUMEN

El objetivo de la ingeniería tisular es reparar órganos y/o tejidos dañados. Se basa en tres pilares importantes: células, factores de crecimiento y andamios. Los andamios son matrices porosas que sirven de plataforma de anclaje para la adhesión de las células y ofrecen el ambiente idóneo para la liberación de células y sus moléculas iniciadoras y con ello su crecimiento. Además, el andamio debe mantener su integridad hasta que el tejido formado tenga suficiente integridad mecánica para sostenerse. Entre el material usado para el desarrollo de andamios destacan los biopolímeros: una proteína como el colágeno y un polisacárido como el quitosano, que aportan enorme biocompatibilidad. Uno de los retos en estos andamios es proporcionar las adecuadas propiedades mecánicas durante su utilización. Para ello, se lleva a cabo un proceso de entrecruzamiento, es decir, la unión de cadenas biopoliméricas entre sí. Estas uniones pueden realizarse mediante diferentes vías de entrecruzamiento: físicas, químicas y enzimáticas.

Palabras clave: *andamios, entrecruzamiento, biopolímeros, ingeniería tisular, propiedades mecánicas.*

ABSTRACT

The goal of tissue engineering is to repair damaged tissues. It is based on three important factors: cells, growth factors and scaffolds. The scaffolds are porous matrices which serve as platform for cell adhesion and offer the ideal environment for the release of cells and their primers and so, their growth. In addition, the scaffold must keep their integrity until the tissue formed has enough mechanical integrity. Among the possible material used for the development of scaffolds, biopolymers can be highlighted the biopolymers: a protein such as collagen and a polysaccharide such as chitosan, which provide enormous biocompatibility. One of the challenges in these scaffolds is to provide the appropriate mechanical properties during their use. To achieve it, an additional crosslinking process is carried out, so, the bond of different biopolymer chains. These bonds can be produced by different ways: physical, chemical and enzymatic pathways.

Keywords: *scaffolds, crosslinking, biopolymers, tissue engineering, mechanical properties.*

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La ingeniería tisular tiene como objetivo desarrollar tejidos biológicos. Es un campo interdisciplinario que aplica los principios y métodos de la bioingeniería, la ciencia de los materiales, la química y la medicina con el fin de desarrollar tejidos biológicos que restablecerán, mantendrán y mejorarán las funciones tisulares después del daño debido a una enfermedad o accidente por procesos traumáticos (Lin et al,2015). Los principios generales de la ingeniería de tejidos involucran la combinación de células vivas con un soporte natural / sintético o andamio para construir una matriz tridimensional que sea funcional, estructural y mecánicamente igual o mejor que el tejido que se reemplazará. En general, la ingeniería de tejidos se puede subdividir en tres pilares principales: inyección o trasplante de células aisladas, suministro de biomoléculas inductoras de tejido (por ejemplo, factores de crecimiento), y andamios tridimensionales (3D) (Jana et al, 2014). Se ha avanzado mucho en el campo de la ingeniería de tejidos, pero se necesita más trabajo para reemplazar órganos y tejidos. La fuente celular óptima, el diseño de andamios y biorreactores in vitro, así como el uso y desarrollo de tecnología de microfabricación para crear tejidos y órganos vascularizados están siendo investigados actualmente. La búsqueda de una célula madre multipotente o pluripotente adecuada en ingeniería tisular es un concepto emergente. Ciertamente, muchas áreas de investigación con células madre y sus aplicaciones clínicas potenciales

están asociadas con controversias; por lo tanto, es importante abordar claramente los problemas éticos, legales y sociales (Kim et al, 2005).

El andamio ideal para ingeniería tisular debe tener propiedades específicas durante todo el tiempo de su operación. En este sentido, deben proporcionar un soporte mecánico biocompatible, que no induzca una respuesta tisular adversa y que pueda soportar temporalmente la carga mecánica del tejido que se va a agregar. También debe tener una tasa de degradación apropiada, equivalente a la del proceso de regeneración tisular, y una porosidad interconectada con una distribución de tamaño de poro adecuada para promover la invasión celular y tisular, el tráfico de metabolitos y un área superficial específica alta para el anclaje celular (Van Vlierberghe et al, 2011). Por supuesto, debe promover el reconocimiento biológico, de una manera que apoye y promueva la adhesión celular, la migración, la proliferación y la diferenciación. Deben poseer estabilidad física a lo largo del tiempo en que están en contacto con el organismo. Estos requisitos de estabilidad deben mantenerse durante la esterilización o el almacenamiento y su implantación.

Los andamios se pueden desarrollar usando polímeros naturales o sintéticos. Hoy en día, los polímeros naturales (o biopolímeros) son ampliamente utilizados para la regeneración de órganos y tejidos ya que facilitan la adhesión y diferenciación de las células (Pich et al, 2012). Debido a su amplio uso, los biopolímeros se consideran una excelente subcategoría para el desarrollo de estas estructuras. Los biopolímeros pueden ser polinucleótidos (tales como los ácidos nucleicos ADN y ARN), polipéptidos (es decir, proteínas) o polisacáridos. Estos materiales poliméricos consisten en cadenas largas hechas de unidades repetitivas, unidas covalentemente, tales como nucleótidos, aminoácidos o monosacáridos.

Las materias primas en este estudio han sido colágeno y quitosano, ambas biopolímeros. Como estas materias primas tienen origen biológico no aportan mucha resistencia mecánica por lo que una posible solución es el uso de algún proceso de reticulación. Existen varios tipos tales como reticulación física (a través de luz ultravioleta o tratamiento deshidrotérmico) (Jana et al, 2014), reticulación física (aldehídos, carboimidias, etc.) (Bae et al, 2013) o reticulación enzimática (por ejemplo, con transglutaminasa) (Teixeira et al, 2012).

METODOLOGÍA

Materiales

La materia prima utilizado ha sido colágeno de origen porcino (proteína) (CG) y quitosano (polisacárido) (CH). El disolvente usado es ácido acético 0,05M. Como agentes reticulantes que actúan sobre el colágeno se han usado glutaraldehído (GA) y enzima comercial transglutaminasa (Tgasa).

Procesado de andamios

La obtención de estas matrices biopoliméricas (andamios) ha sido mediante el proceso de separación de fases, que consiste en la congelación (-40°C) de una disolución previamente preparada seguida de un proceso de liofilización durante 24 h (-80°C, <15Pa). La mayoría de andamios se han elaborado con el mismo protocolo excepto en el caso de añadir trasglutaminasa como agente reticulante que este procesado sufre una ligera modificación debido a que esta enzima tiene unas condiciones óptimas de actuación (50°C y agitación). Se han procesado andamios siguiendo una formulación colágeno-quitosano 50-50 (1% en peso). El esquema del proceso llevado a cabo puede verse en la Figura 1.



Figura 23: Esquema del procesado de andamios llevado a cabo con los distintos métodos de entrecruzamiento

Caracterización de andamios

- Ensayos Reológicos: Para ello, se han realizado ensayos de compresión dinámica para el estudio de las propiedades mecánicas de los andamios con un reómetro RSA3 (TA Instruments, USA). Se han llevado a cabo barridos de deformación (0.002-2%) para determinar el rango viscoelástico lineal y obtener así la deformación crítica de los andamios. A continuación, se han realizado barridos de frecuencia (0.02-20Hz) a una deformación específica para cada sistema dentro del intervalo lineal previamente obtenido.

- Porosidad (ϵ): La porosidad de los andamios se ha calculado a partir de la siguiente ecuación (Al-Munajjed et al, 2008):

$$\epsilon (\%) = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_m}\right) \cdot 100$$

siendo ρ_s la densidad del andamio (obtenida pesando por triplicado andamios de los diferentes sistemas y calculando su volumen) y ρ_m la densidad de la materia prima (colágeno y quitosano en función a su relación).

- Porosimetría de Mercurio: Se caracteriza el tamaño, densidad de poros e incluso su interconectividad mediante la aplicación de mercurio a baja presión en un porosímetro Pore Master 60 GT.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 muestra la morfología de los andamios procesados con cada uno de los tres métodos de entrecruzamiento utilizados (físico, químico y enzimático).

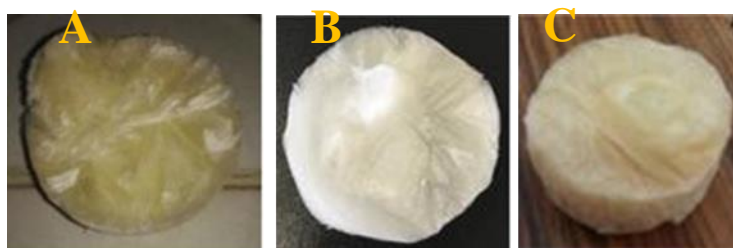


Figura 2: Imágenes macroscópicas de los andamios elaborados por diferentes métodos de entrecruzamiento.

Todos estos andamios tienen la misma formulación colágeno-quitosano 50-50, diferenciándose en la vía de reticulación usada: (A) reticulación física, (B) reticulación enzimática y, por último, (C) reticulación química.

Tabla 8: Porcentaje de porosidad y tamaño medio de poro de andamios por diversas vías de reticulación: física, química y enzimática.

Experimento	Porosidad (%)	Tamaño medio de poro (μm)
Reticulación Física	99,3 \pm 0,1	87,1
Reticulación Química	98,9 \pm 0,1	45,0
Reticulación Enzimática	99,4 \pm 0,1	38,6

Los datos obtenidos sobre la porosidad de los distintos sistemas elaborados se recogen en la tabla 1. El porcentaje de porosidad se mantiene ligeramente estable pero el tamaño de poro medio varía bastante según la vía de reticulación, siendo de mayor tamaño los poros producidos en la reticulación térmica. Este tamaño estará muy vinculado al tipo de célula que se quiera cultivar y sus factores de crecimiento.

Otra de las propiedades a tener en cuenta en los andamios son sus propiedades mecánicas que se observan en la Figura 3. En esta figura se observa el carácter elastomérico de los andamios sintetizados. Todos ellos presentan un comportamiento elástico por encontrarse E' por encima que E'' , teniendo la mayor constante de elasticidad el sistema con reticulación física y la menor el sistema con reticulación química.

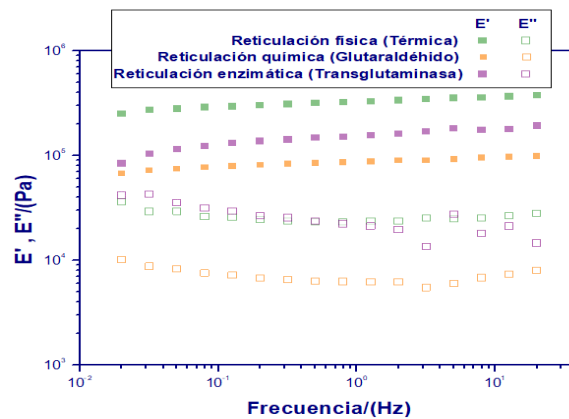


Figura 3: Evolución del módulo elástico (E') y viscoso (E'') de los andamios (1% en peso, relación 50:50 de CG:CH) obtenidos con diferentes métodos de entrecruzamiento: Físico, Químico y Enzimático.

En la Figura 4 se presenta la deformación crítica de cada uno de los sistemas. Este parámetro resulta interesante, ya que es la máxima deformación que podría experimentar sin llegar a romperse. En el momento de cultivar las células en estos soportes este parámetro es crucial. El andamio junto con el cultivo de células y sus factores de crecimiento se introducirán en un biorreactor, en el que se produce una cierta deformación sobre los andamios y, por este motivo, los andamios deben presentar cierta resistencia mecánica y alta deformación crítica. Como puede observarse, el sistema con mayor deformación crítica es el producido con un entrecruzamiento enzimático, duplicando el valor de deformación crítica si lo comparamos con el caso de reticulación física.

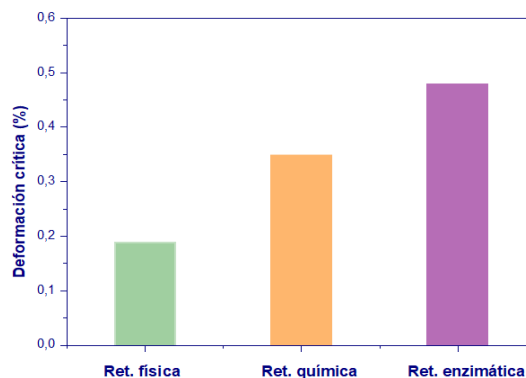


Figura 4: Deformación Crítica de los andamios estudiados (1% en peso, relación 50:50 de CG:CH) procesados con diferentes métodos de entrecruzamientos: Reticulación (Ret.) Física, Química y Enzimática.

CONCLUSIONES

Tras este estudio se demuestra la posibilidad de desarrollar andamios con 1% de colágeno (CG) y quitosano (CH) (relación CG:CH de 50:50), con adecuadas propiedades mecánicas y morfológicas.

La adición de agentes de reticulación (entrecruzamiento) químico o enzimático confiere a los andamios un mayor carácter elastomérico, como refleja el incremento en la deformación crítica. Aunque este incremento conduce a una moderada reducción en el módulo elástico y tamaño de poro medio, el incremento de la deformación puede que sea beneficioso en el uso del biorreactor donde una deformación dinámica se aplica durante el cultivo de las células.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte del proyecto financiado por el “Ministerio de Economía y Competitividad” del Gobierno Español (Ref. CTQ2015-71164-P, MINECO/FEDER, UE). Los autores agradecen a la Universidad de Sevilla la beca predoctoral de Víctor M. Pérez Puyana dentro del V Plan Propio de Investigación.

BIBLIOGRAFÍA

1. Lin, D., Yang, K., Liu, Y., Yuan, Y., Liu, C. (2015). A poly(glycerol sebacate)-coated mesoporous bioactive glass scaffold with adjustable mechanical strength, degradation rate, controlled-release and cell behavior for bone tissue engineering. *Colloids Surf. B. Biointerfaces*, 131, 1-11.
2. Jana, S., Tefft, J., Spoon, B., Simari, R. (2014). Scaffolds for tissue engineering of cardiac valves. *Acta Biomaterialia*, 10, 2877-2893.
3. Kim, K., Evans, G. (2005). The Future of Stem Cells. *Topics in Tissue Engineering*. 2, Capítulo 11.
4. Van Vlierberghe, S., Dubruel, P., Schacht, E. (2011). Biopolymer-based hydrogels as scaffolds for tissue engineering applications: A review. *Biomacromol.*, 12(5), 1387-1408.
5. Pich, A., Richtering, W. 2012. Polymer Nanogels and Microgels. *Polymer Science*, 6, 309-350.
6. Bae, H., Wang, L., Kurisawa M. (2013). Injectable biodegradable hydrogels: progress and challenges. *Journal of Materials Chemistry B*, 40, 5371-5388.
7. Teixeira, L., Feijen, J., Van Blitterswijk, C., Dijkstra, P., Karperien, M. (2012). Enzyme-catalyzed crosslinkable hydrogels: Emerging strategies for tissue engineering. *Biomaterials*, 33, 1281-1290.
8. Al-Munajjed, AA., Hien, M., Kujat R., Gleeson, JP., Hammer, J. (2008). Influence of pore size on tensile strength, permeability and porosity of hyaluronan-collagen scaffolds. *J. Mater. Sci. Mater. Med.*, 19, 2859–2864.

P5

ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD FÍSICA, PROPIEDADES REOLÓGICAS Y MICROESTRUCTURA DE SISTEMAS AEROSIL 200/AGUA. INFLUENCIA DE UN TENSIOACTIVO NO IÓNICO

Santos, Jenifer; Calero, Nuria; Trujillo-Cayado, Luis A.; Alfaro, Maria del Carmen; Muñoz, José.

Reología Aplicada. Tecnología de Coloides. Escuela Politécnica Superior, Universidad de Sevilla, C/ Virgen de África, 7, 41011, Sevilla, España.

RESUMEN

Se han estudiado las propiedades reológicas, la estabilidad física y la microestructura de suspensiones de una sílice hidrofílica (Aerosil 200) en agua con potencial aplicación como fase continua de emulsiones ecológicas. Además, se analizó la influencia de la adición de Amidet N, un tensioactivo no iónico derivado del aceite de Colza, en las propiedades viscoelásticas y la microestructura de las dispersiones. Se muestran diferentes comportamientos reológicos dependiendo de la concentración de Aerosil 200 en los sistemas binarios. Existe un aumento importante del carácter gel del 8% al 9% de Aerosil 200 mejorando la estabilidad física. Este cambio está relacionado con el grado de interacción de las partículas, como se muestra en la microscopía electrónica de barrido (Cryo-SEM). La adición de Amidet N a la suspensión provocó un incremento de los módulos viscosos y elásticos mostrándose una estructura más compacta. El sistema que contiene 6% de Aerosil 200 y 3% de Amidet N mostró adecuadas propiedades reológicas para su uso como fase continua de emulsiones que respetan el medio ambiente. Finalmente, cabe destacar el interés del estudio de este tipo de sistemas intermedios como punto de partida para el desarrollo de emulsiones.

Palabras clave: *Aerosil 200, sílice, reología aplicada, fases continuas, tensioactivo.*

ABSTRACT

Aerosil 200/water dispersions and Aerosil 200/water/Amidet N were studied by means of rheological, microstructural and multiple light scattering techniques. These systems can find application as continuous phase in emulsions. Rheological tests such as flow curve and small amplitude oscillatory shear tests detected an abrupt change of behaviour related to microstructural interaction grade reflected through the Cryo-SEM micrographs. The most concentrated systems turned out to be more physically stable. An increase of viscoelastic properties was detected as a consequence of addition of Amilet N, which led to more compact microstructure. Finally, it is worth noting the interest of studying this type of intermediate systems as a starting point for the development of emulsions

Keywords: *Applied rheology, Aerosil 200, fumed silica, continuous phase, gel.*

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La microestructura de la fase continua de una emulsión juega un papel muy importante, por ejemplo reduciendo o inhibiendo mecanismos de desestabilización como el cremado o la coalescencia. La incorporación de un espesante a la fase continua es una de las estrategias más usadas para mejorar las propiedades reológicas y la estabilidad física. Los polisacáridos, arcillas o geles oxidadas son los materiales más comunes para controlar la reología de la fase continua. Los geles óxidos más usados están basados en óxidos de silicio, y pueden dividirse en sílices precipitadas o pirógenas. Las sílices pirógenas (por ejemplo, Aerosil 200) son producidas por la reacción del tetracloruro de silicio con vapor de agua. La superficie de la sílice pirógena está compuesta por grupos silanoles y enlaces siloxanos (O-Si-O) y siempre existe un equilibrio entre SiO⁻ y SiOH. Aerosil 200 es la sílice más hidrofílica y es extraordinariamente versátil: usado en plásticos, gomas, adhesivos, cementos y como modificador reológico. Sus principales características incluyen: escala nanométrica, estructura de cadenas y alto grado de adsorción de agua.

Pero la propiedad mas importante para su uso en emulsiones es su capacidad para formar redes 3D con comportamiento gel con un valor umbral debido a la formación de enlaces de hidrogeno. Estos enlaces son producidos por la interacción ácido-base entre los grupos silanoles y los Si-O⁻ disociados (Amiri et al., 2009). En medio acuoso, es muy importante controlar el pH, la fuerza iónica y la concentración de partículas.

AMIDET® N (HLB=11) es un derivado de ácido graso que contiene principalmente C18 insaturado que proviene del aceite de colza renovable. AMIDET® N muestra buena biodegradabilidad e insignificante toxicidad acuática. Además, puede ser dispersado a temperatura ambiente. Este tensioactivo satisface los nuevos requerimientos de las leyes medioambientales europeas y los principios de la ingeniería verde. Además ha sido usado recientemente en formulaciones ecológicas (Trujillo-Cayado et al., 2017).

En este estudio, una nueva fase continua con potencial aplicación en emulsiones ha sido desarrollada paso a paso. La estabilidad, comportamiento viscoelástico y microestructura de las dispersiones de Aerosil 200/agua han sido estudiadas a pH 7 en función de la concentración de Aerosil. Además, se ha explorado la incorporación de un nuevo tensioactivo para completar la fase continua. Este trabajo demuestra la idoneidad del sistema Aerosil 200/Amidet N/agua para ajustar las propiedades reológicas y estabilidad física en emulsiones.

METODOLOGÍA

Materiales

La sílice pirógena (Aerosil 200) fue suministrada por EVONIK Industries. Las partículas eran de 12 nm y tienen un área específica de 200 m² g⁻¹ y una densidad de 2.2 g cm⁻³. El tensioactivo utilizado fue Amidet N (Kao Chemicals). Todas las emulsiones se prepararon utilizando agua mili-Q.

Preparación de suspensiones

Las suspensiones se prepararon al 6, 8, 9, 10 y 12% p/p de Aerosil 200. El tensioactivo ecológico fue añadido al 3% p/p en las dispersiones al 6 y al 10% de Aerosil. Las dispersiones se prepararon por agitación magnética durante dos horas. Luego se ajustó el pH con NaOH diluida hasta pH 7. Finalmente, la incorporación del tensioactivo se llevó a cabo utilizando agitación magnética a 1000 rpm durante 1 minuto.

Caracterización reológica

Todas las medidas se hicieron con un reómetro de esfuerzo controlado Haake MARS II. Las suspensiones se midieron usando diferentes geometrías como doble cono de 60 mm de diámetro y 1 ° o placa-placa rugosa, según las viscosidades de las muestras. Las curvas de flujo se realizaron mediante un protocolo multipaso. Los barridos de esfuerzo se llevaron a cabo a 1 Hz para estimar el rango viscoelástico lineal. Finalmente, se condujeron ensayos SAOS de 20 rad/s a 0,05 rad/s.

Estabilidad física

La cinética de desestabilización de las dispersiones fue estudiada mediante la técnica de Multiple Light Scattering (Turbiscan Lab Expert). Estas medidas fueron llevadas a cabo durante 40-60 días a 20°C.

Microscopia electrónica de barrido (Cryo-SEM)

Se observa la microestructura de las dispersiones y las fases continuas usando un microscopio electrónico de barrido Zeiss EVO a 8-10 kV. Las muestras fueron criofijadas a -120 °C con nitrógeno líquido. Luego se recubrieron con oro y se observaron al microscopio electrónico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1 muestra la tangente de delta en función de la concentración de Aerosil 200 para todas las suspensiones estudiadas. Una disminución de este parámetro lleva asociado el incremento del módulo elástico o módulo de almacenamiento (G'). Por lo tanto, existe un incremento de G' al aumentar la concentración de Aerosil 200. Este proceso se conoce como gelificación y es debido a la agregación de partículas de la suspensión. Al aumentar la concentración, las partículas tienden a agregarse. Además, este incremento es muy llamativo desde el 8% de Aerosil al 9% de Aerosil. Previamente, algunos estudios

ya mencionaban la concentración crítica de Aerosil 200 para formar estructuras tipo gel (Heath & Tadros, 1983).

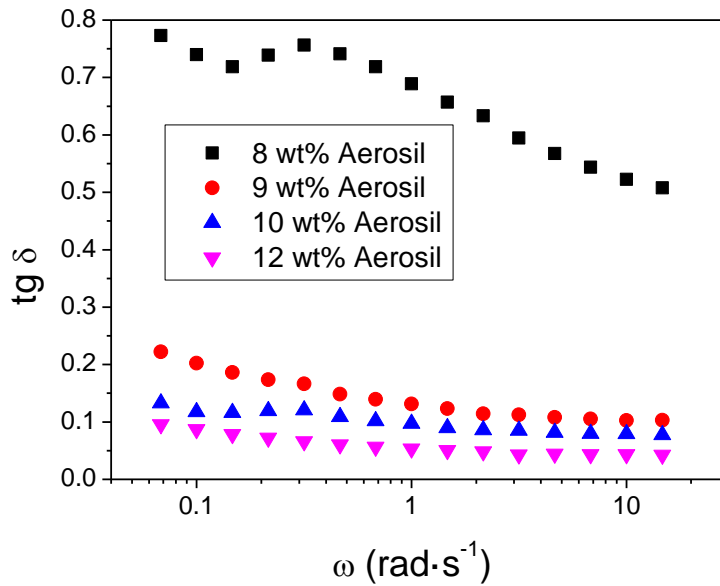


Figura 24: Tangente de delta en función de la concentración de Aerosil 200 para todos los sistemas estudiados.

Estas suspensiones mostraron procesos de desestabilización con el tiempo de envejecimiento. La cinética de desestabilización fue estudiada mediante la técnica de Multiple Light Scattering. Las suspensiones mostraron un incremento de la transmisión con el tiempo de envejecimiento en la zona alta de la célula de medida. Este hecho está relacionado con un proceso de sedimentación. Para poder cuantificar el proceso de desestabilización se ha utilizado un parámetro llamado “Turbiscan Stability Index” (TSI) en la zona alta del vial a los 20 días. Este parámetro viene determinado por la fórmula:

$$TSI = \sum_j |scan_{ref}(h_j) - scan_i(h_j)| \quad (Ec. 1)$$

donde $scan_{ref}$ y $scan_i$ son los valores iniciales y a 20 días del tiempo de envejecimiento de la transmisión, respectivamente y h_j es la altura de 40 mm en el vial.

Teniendo en cuenta esta fórmula, un valor elevado de TSI conlleva una estabilidad pobre de la suspensión. Por lo tanto, existe un incremento de la estabilidad de las suspensiones con la concentración de Aerosil 200. Al aumentar el carácter gel de las suspensiones, las partículas tienen mayor resistencia al movimiento y a su sedimentación. Además el parámetro TSI tiende a estabilizarse a partir de la concentración de 10% de Aerosil, por lo que ya el sistema parece que no podría estructurarse más. Este hecho también se ve reflejado en la tangente de delta (Figura 1) ya que cada vez la disminución de ella con la concentración de Aerosil parece menor.

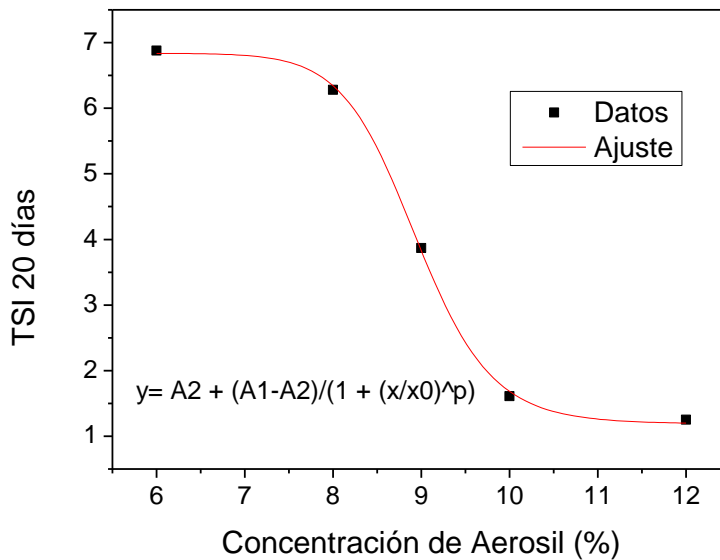


Figura 2: TSI (Turbiscan Stability Index) a los 20 días en función de la concentración de Aerosil 200. La línea roja ilustra el ajuste.

La figura 3A muestra la estructura de la dispersión de 10% de Aerosil en agua. Se muestra una estructura de aglomerados medianamente interconectados. Las dispersiones de Aerosil se prepararon a pH 7, muy por encima de su punto isoeléctrico (pI=3). Por lo tanto, las partículas de Aerosil están cargadas negativamente en su superficie (SiO⁻) (Amiri et al.,2009). Este hecho provoca que no se puedan agregar más. Sin embargo, al añadir Amidet N a la dispersión se crea una estructura muy aglomerada (figura 3B) y con altos valores de G' y G'' (datos no mostrados). Este comportamiento es bastante similar a cuando se ha añadido Polivinilalcohol (PVA) o Polietilenglicol (PEG) a dispersiones de Aerosil (Heath & Tadros, 1983; Fijan, 2009). Estos autores atribuyen este hecho a la formación de enlaces de hidrogeno entre grupos éter de los polímeros y grupos silanoles (SiOH). Además también comentan la posible interacción hidrofóbica entre las cadenas de hidrocarburos y el grupo siloxano. Amidet N también posee grupos éter y cadenas de hidrocarburos que podrían desempeñar el mismo papel que en el PVA o PEG. Por lo tanto, el Amidet N se adsorbe de esta manera creando una estructura mucho mas compacta.

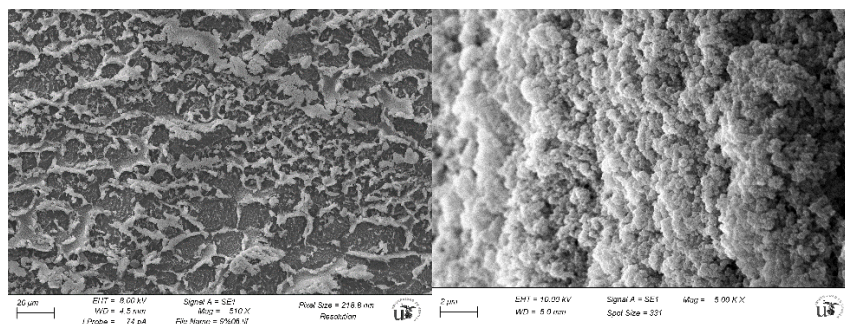


Figura 3A,B: Microfotografías de A) la dispersión de Aerosil al 10% y B) la dispersión de Aerosil al 10% y 3% de Amidet N tras su preparación.

CONCLUSIONES

Fases continuas estables y reologicamente adecuadas fueron desarrolladas usando Aerosil 200 como espesante y amidet N como emulsionante. Los sistemas Aerosil/agua por encima del 6% mostraron propiedades viscoelásticas, las cuales fueron mas acentuadas con la concentración de Aerosil. De hecho, la dispersión con 8% de Aerosil mostró una tendencia a un punto de cruce a baja frecuencia en el espectro mecánico revelando una estructura muy débil. Mayores concentraciones de Aerosil provocaron sistemas con estructuras algo mas Fuertes mostrando una zona plateau en el espectro mecánico. La observación

por Cryo-SEM mostró detalles de la estructura manifestando un sistema menos compacto para la dispersión al 6% y un sistema más estructurado con cadenas interconectadas para la dispersión al 10%. Los sistemas binarios Aerosil/agua exhibieron comportamiento pseudoplástico que se ajusta al modelo de Cross. Los valores de la viscosidad Newtoniana calculados por el mencionado modelo variaron desde 0,95 al 45800 Pa-s, lo cual demuestra la habilidad del Aerosil como modificador reológico. Los sistemas poco concentrados presentaron un proceso de desestabilización por sedimentación, claramente detectado por medidas de transmisión mediante la técnica de "Multiple Light Scattering". Sin embargo, sistemas con altas concentraciones de Aerosil (> 9%) fueron estables durante el tiempo de estudio.

La incorporación de Amidet N al Sistema del 6% de Aerosil provocó valores de G' y G'' similares a aquellos obtenidos para la dispersión del 10% Aerosil. Esto es debido a la interacción química resultante del Amidet N con el Aerosil 200, la cual es evidente observando la matriz formada mediante Cryo-SEM. Este hecho permite reducir la concentración de modificador reológico, lo cual satisface los principios de la ingeniería del producto.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte de los resultados obtenidos en el proyecto CTQ2015-70700-P, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España y por la Comisión Europea (Programa FEDER).

BIBLIOGRAFÍA

- Amiri, A., Øye, G., & Sjöblom, J. (2009). Influence of pH, high salinity and particle concentration on stability and rheological properties of aqueous suspensions of fumed silica. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 349(1), 43-54.
- Heath, D., & Tadros, T. F. (1983). Influence of pH, electrolyte, and poly (vinyl alcohol) addition on the rheological behavior of aqueous silica (Aerosil) dispersions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 93(2), 320-328.
- Fijan, R., Basile, M., Lapasin, R., & Šostar-Turk, S. (2009). Rheological properties of printing pastes and their influence on quality-determining parameters in screen printing of cotton with reactive dyes using recycled polysaccharide thickeners. *Carbohydrate polymers*, 78(1), 25-35.
- Trujillo-Cayado, L. A., Alfaro, M. C., & Muñoz, J. (2017). Effects of ethoxylated fatty acid alkanolamide concentration and processing on d-limonene emulsions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*.

DESARROLLO DE GELES BIOACTIVOS BASADOS EN RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DEL ARROZ

Felix, M., Perez-Puyana, V., Romero, A., Guerrero, A. Tecnología y Diseño de Productos Multicomponentes (TEP-229). Departamento de Ingeniería Química. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Sevilla.

RESUMEN

La industria arrocera produce aproximadamente unos 100 millones de toneladas de residuos cada año. Aunque estos residuos tengan un alto contenido proteico, habitualmente se incineran debido a su alto poder calorífico. Sin embargo, existe una continua y creciente demanda de fuentes de proteína con el fin de poder satisfacer las necesidades de alimentación de la creciente población mundial. Una alternativa interesante sería el uso de concentrados proteicos provenientes de estos residuos para desarrollar productos alimentarios. En este sentido, se ha comprobado que la obtención de hidrolizados proteicos a partir de los concentrados proteicos puede ser una vía altamente interesante, aumentando la funcionalidad de estos sistemas. Por otra parte, en el caso de los productos alimentarios, las propiedades mecánicas no son las únicas que importan. De especial relevancia son las propiedades antioxidantes de estos productos. La evaluación de la capacidad antioxidante de estos sistemas puede llevarse a cabo mediante el empleo de diferentes técnicas. La presente contribución hace uso de un concentrado proteico de arroz (RPC) y dos hidrolizados (RPHA and RPHB) para el desarrollo de geles alimentarios. La caracterización llevada a cabo comprende tanto a la estructura de los sistemas, como a las de las propiedades antioxidantes de los mismos.

Palabras clave: *Geles alimentarios, Arroz, Reología, Antioxidante.*

ABSTRACT

Rice industry produces around 100 million tons of wastes every year. Although, these wastes generally exhibits a high protein content, they are burned due to its high calorific value. However, scientific community claims continuously for new protein sources in order to satisfy worldwide food requirements. In this sense, one alternative could be the use of protein concentrates from protein surpluses and wastes to develop new food products. Additionally, the use of protein hydrolysates could be very relevant since the functionality of protein may increase. Otherwise, not only the functionality of proteins is relevant in food products, but also the bioactive properties of them is a key factor. Among these bioactive properties, the evaluation of antioxidant properties of food products could involve the increase in value of these by-products. This work deals with the evaluation of a protein concentrate (RPC) and two different protein hydrolysates (RPHA and RPHB) in order to develop food-grade gels. The characterisation carried out include mechanical properties and antioxidant activity of the final gels.

Keywords: *Food Gels, Rice, Rheology, Antioxidants.*

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La proteína de arroz, presente en la cascara de arroz, es uno de los mayores subproducto de la industria arrocera. La cascarilla de arroz es un residuo agrícola que se producen en grandes cantidades, aproximadamente de cada 100 kg de arroz se obtienen 20 kg de cascarilla. Los mayores productores mundiales son la India, China, Tailandia y Bangladesh (Ferrero y Tinarelli, 2007). En Europa, España junto con Italia son los mayores productores, generándose en España unas 100.000 Tm de cascarilla de arroz. Actualmente la cascarilla de arroz se trata como residuo de la producción, y es incinerada con fines energéticos. El cultivo del arroz en España está muy concentrado, entre cinco comunidades se reparte el 97% del total. Andalucía es la comunidad que produce mayor cantidad con el 40% del total, le sigue Extremadura, con el 23%, la Comunidad Valenciana, con el 15,5%, Cataluña, con el 15%, y Aragón 5,75%. En Andalucía, Sevilla es la primera provincia española en producción de arroz, con 35.000 hectáreas, y especialmente se concentra en las marismas del Guadalquivir, concretamente en los municipios de Isla

Mayor, Puebla del Río, Coria del Río, Los Palacios y Villamanrique de la Condesa. Debido a la importancia del sector del arroz en Andalucía, es de gran utilidad darle un valor añadido a la cascara de arroz. Una de las más interesantes alternativas de estos productos es la producción de productos alimentarios resolviendo un problema de contaminación ambiental (Li, Liu, Liao y Yan, 2010). Si se compara el comportamiento de la proteína de arroz, con otras tradicionalmente utilizadas, se demuestra que la proteína de arroz es una materia prima adecuada para este uso (Romero y col., 2012).

Por otra parte, el uso de este tipo de proteínas podría ser altamente interesante para el desarrollo de productos alimentarios tipo gel (Gosal y Ross-Murphy, 2000). La gelificación proteica es un proceso altamente conocido en el que las proteínas de un sistema se entrelazan mediante interacciones químicas y/o físicas para formar una estructura tridimensional en la que una gran parte de agua queda ocluida en su interior (Clark, Kavanagh y Ross-Murphy, 2001). Para conseguir este fenómeno, se han descrito diversos procedimientos que van desde el cambio de la concentración de sal en el sistema, hasta la modificación de pH o un tratamiento térmico. En cualquier caso, la desnaturalización proteica, y el desarrollo de interacciones proteicas tienen lugar. Entre los procedimientos anteriormente mencionados, el tratamiento térmico ha sido uno de los más empleados tradicionalmente, ya que es bastante versátil y permite una reordenación previa de las cadenas proteicas antes de su posterior desarrollo de interacciones (Sano, Noguchi, Matsumoto y Tsuchiya, 1990).

Además de las propiedades funcionales de las proteínas, las cuales permiten el desarrollo del sistema tipo gel anteriormente mencionado, las proteínas también son conocidas por tener una gran actividad bioactiva (Foegeding y Davis, 2011). Así, las proteínas son conocidas por su capacidad antihipertensiva, hipocolesterémica o antioxidante. Entre ellas, las propiedades antioxidantes de los alimentos no solamente están relacionadas con su conservación, sino que también han sido relacionadas con su capacidad de prevenir el daño celular, el cual está relacionado con el envejecimiento y con el desarrollo de enfermedades graves (Elias, Kellerby y Decker, 2008).

El objetivo del presente trabajo es el estudio y caracterización de geles alimentarios obtenidos a partir de un concentrado proteico procedente de la cascarrilla de arroz (RPC), así como de dos hidrolizados provenientes de dicho concentrado (RPHA y RPHB). Para la evaluación de estos geles, se han empleado técnicas reológicas, para determinar la estructura y análisis químicos que han permitido determinar las interacciones entre las distintas proteínas, así como la capacidad antioxidante de estos compuestos.

METODOLOGÍA

Para desarrollar los geles a partir de la proteína proveniente de la cascarrilla de arroz, se empleó un concentrado proteico de arroz suministrado por industrias Remy (Lovaina, Bélgica). Además de este sistema proteico, se desarrollaron dos hidrolizados. Para la obtención de hidrolizados se empleó tripsina pancreática en un ratio 1:10 (E/S) durante 10 y 120 minutos a 50°C, obteniendo dos grados diferentes de hidrólisis (RPHA y RPHB, respectivamente). La enzima fue inactivada mediante el sometimiento de la dispersión proteica en un baño de agua a 80°C durante 15 min.

Los geles fueron obtenidos mediante un procesado térmico de dispersiones proteicas al 10%. De este modo, dichas dispersiones se sometieron a una rampa de calentamiento desde 20 °C hasta 90 °C a una velocidad de 5°C/min. Posteriormente, el sistema se mantuvo a 90 °C durante 30 min. Finalmente, se produjo el enfriamiento de las dispersiones hasta 20 °C a una velocidad de 5°C/min.

Distintas técnicas fueron empleadas para la caracterización de los geles. Por una parte, el proceso de gelificación fue simulado in-situ en un reómetro. De este modo se pudo obtener el cambio de estructura de dichos sistemas mediante el seguimiento de la evolución de los módulos viscoelásticos en función de la temperatura. Para llevar a cabo este proceso se empleó un reómetro Kinexus (Inglaterra, Malvern) equipado con una geometría de platos paralelos de 60 mm a una frecuencia constante de 1 Hz y esfuerzo dentro del intervalo viscoelástico lineal. El sistema se equipó de una trampa de disolvente para evitar cualquier la evaporación de agua.

Tras la caracterización de la estructura desarrollada durante estos ensayos, se procedió a determinar tanto las interacciones proteicas más relevantes, como la capacidad antioxidante que muestra estos geles. La primera caracterización se llevó a cabo mediante la medida de solubilidad proteica en 5 disoluciones tampón diferentes. Las disoluciones fueron: (A) 0,05 M NaCl; (B) 0,6 M NaCl; (C) 0,6 M NaCl + 1,5 M Urea; (d) 0,6 M NaCl + 8 M Urea; (e) 0,6 M NaCl + 8 M Urea + 0,5 M β -Mercaptoetanol. De este

modo, la diferencia de solubilidad observada entre las disoluciones a y b estaría relacionada con las interacciones iónicas, entre b y c con los puentes de hidrógeno, entre c y d con interacciones hidrofóbicas y entre d y e con puentes de disulfuro.

Seguidamente a la determinación de las interacciones proteicas, se llevó a cabo la determinación de la capacidad antioxidante mediante el empleo de 2,2-difenil-1-picrilhidrazil (DPPH). Este reactivo se caracteriza por tener forma de radical en disolución acuosa, y por cambiar de color cuando este radical se protona. Así, de acuerdo con el método de Brand-Williams y col. (1995), el día antes del ensayo se preparó una disolución 0,1 M de este compuesto, la cual se mantuvo agitando en oscuridad durante toda la noche a 4°C. 0,1 mL de las dispersiones acuosas de la muestra se hicieron reaccionar dentro del intervalo de concentraciones adecuado con 2,9 mL de reactivo. Como estándar se empleó propil galato, el cual es un antioxidante ampliamente utilizado en la industria. La absorbancia de las mezclas DPPH/dispersiones proteicas se midieron a 515 nm.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 1 se muestra la evolución del módulo elástico para los tres sistemas proteicos estudiados (RPC, RPHA y RPHB) durante el tratamiento térmico aplicado a las dispersiones proteicas. De manera general, puede observarse el siguiente comportamiento: inicialmente puede los módulos disminuyen como consecuencia de la agitación térmica que tiene lugar. En este caso, la movilidad de las cadenas proteicas aumenta y por tanto disminuyen las interacciones físicas. Tras esta primera etapa, la subida de temperatura conlleva el desarrollo de nuevas interacciones, que tiene lugar como consecuencia de la desnaturalización de la proteína. Dicha desnaturalización conlleva la apertura de la misma, la exposición de grupos hidrofóbicos y por tanto la posibilidad que nuevas interacciones tengan lugar. El incremento de la temperatura tiene como consecuencia el desarrollo de interacciones covalentes fuertes, que dan lugar a los mayores valores de módulos. Por último el descenso en temperatura tiene como consecuencia el desarrollo de nuevas interacciones físicas que dan lugar a un incremento del módulo elástico. Esta respuesta del módulo elástico ha sido anteriormente observadas para proteínas miofibrilares (Acton y Dick, 1988).

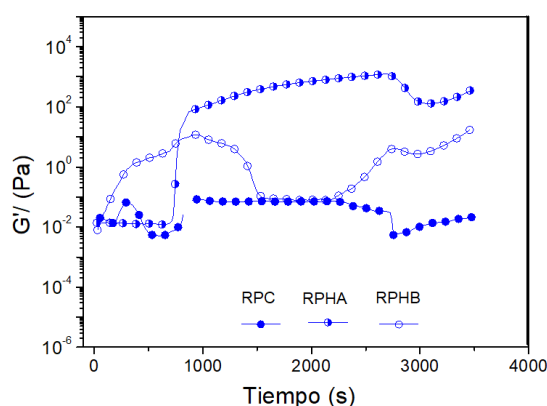


Figura 25: Evolución del módulo elástico en función del tratamiento térmico aplicado.

Además de la tendencia general observada para todos los módulos independientemente del sistema proteico empleado, es importante destacar el efecto del grado de hidrólisis. De este modo, puede observarse cómo los valores más bajo del módulo se obtuvieron para la proteína sin hidrolizar, mientras que los valores más altos se obtuvieron para el sistema proteico con un grado de hidrólisis intermedio (RPHA). Estos resultados pueden deberse a que por lo general la hidrólisis proteica conlleva un aumento de la funcionalidad de la proteína, permitiendo la desagregación de la misma y promoviendo el desarrollo de nuevas interacciones ya sean de tipo físico o covalente. Sin embargo, un elevado grado de hidrólisis, puede conllevar a una pérdida de la funcionalidad de la misma, debido a la elevada reducción del peso molecular de las cadenas polipeptídicas que tiene lugar (Chotikachinda y col., 2013.).

La figura 2 muestra las interacciones proteicas obtenidas para estos sistemas tipo gel en función del grado de hidrólisis. Como puede ser observado, las interacciones cambian en intensidad y en naturaleza dependiendo del tipo del tipo de sistema proteico empleado.

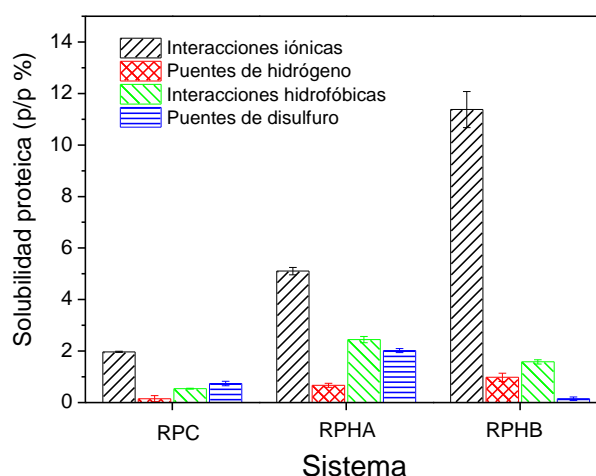


Figura 2: Evolución del módulo elástico en función del tratamiento térmico aplicado.

Esta figura muestra que las interacciones iónicas aumentan su valor conforme aumenta el grado de hidrólisis. Este resultado es esperable ya que la hidrólisis aumenta el número de cadenas terminales cargadas. Del mismo modo, esta figura también confirma que los mayores valores del módulo elástico observados en la figura anterior se corresponden con el desarrollo de un mayor número de puentes de disulfuro. Este tipo de interacciones hidrofóbicas se han relacionado precisamente con el desarrollo de una estructura permanente más fuerte. Por último, en relación a las interacciones hidrofóbicas es destacable señalar que las interacciones hidrofóbicas alcanzan su máximo nivel para un grado bajo de hidrólisis. Este proceso puede estar relacionado con una apertura inicial de la proteína, como consecuencia de un bajo grado de hidrólisis. Esta apertura permite el desarrollo de interacciones hidrofóbicas. No obstante, un excesivo grado de hidrólisis podría conllevar a un aumento de la hidrofilia de la proteína, por lo que las posibles interacciones hidrofóbicas disminuirían.

Finalmente, la Tabla 1 muestra los valores obtenidos para los ensayos de actividad antioxidante medidos con el reactivo DPPH.

Sistema	mmoles Eq. propil galato
RPC	417,1 ± 16,3
RPHA	547,1 ± 37,8
RPHB	466,1 ± 13,6

Tabla 9: Actividad antioxidante de los geles obtenidos medidas con DPPH y expresada como mmoles Eq. propil galato.

Como puede observarse, la actividad antioxidante de estos geles alcanza unos valores elevados en todos los casos, indicando que la proteína tiene una elevada capacidad para donar un protón al radical formado. En este caso habría que considerar que el sistema proteico se encuentra próximo al punto isoeléctrico (Souza y col., 2016), por lo que a este valor de pH el gel estabilizado por el sistema proteico empleado tiene suficiente capacidad para donar protones. Además es interesante observar que si bien es cierto que a un valor intermedio de hidrólisis, la actividad antioxidante es ligeramente superior, ésta es elevada en todos los casos y las diferencias pueden deberse principalmente a la diferente exposición de los grupos hidrofóbicos de la proteína como consecuencia de la hidrólisis llevada a cabo. En este caso, la actividad antioxidante no se ve afectada por la aparición de péptidos debido a que el mecanismo predominante es la donación de protones, el cual no está ligado a la aparición de estas especies.

CONCLUSIONES

Este trabajo muestra cómo a partir de los residuos provenientes de la cascarilla de arroz es posible desarrollar geles alimentarios con propiedades bioactivas. Además, es especialmente interesante la obtención de hidrolizados, ya que un adecuado grado de hidrólisis conlleva la formación de geles con un módulo elástico deseable. Por otra parte, la estructura reológica observada se corresponde con las interacciones fisicoquímicas observadas, ya que el mayor número de interacciones se obtiene para el sistema con un mayor módulo elástico. Finalmente, la caracterización relacionada con la capacidad antioxidante de estos geles refleja que todos ellos tienen unos valores adecuados para el tipo de sistema con el que se está trabajando, donde además el desarrollo de hidrolizados no afecta negativamente a dicha capacidad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Sevilla la contribución económica llevada a cabo mediante la ejecución de un contrato de acceso perteneciente al V Plan propio.

BIBLIOGRAFÍA

- Acton, J.C., Dick, R.L. (1988). Functional roles of heat induces protein gelation in processed meat. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 65, 497.
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M.E., Berset, C. (1995). Use of a free-radical method to evaluate antioxidant activity. *Food Sci. Technol.* 28, 25–30.
- Clark, A.H., Kavanagh, G.M., Ross-Murphy, S.B. (2001). Globular protein gelation - theory and experiment. *Food Hydrocoll.* 15, 383–400.
- Chotikachinda, R., Tantikitti, C., Benjakul, S., Rustad, T., Kumarnsit, E. (2013). Production of protein hydrolysates from skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) viscera as feeding attractants for Asian seabass (*Lates calcarifer*). *Aquac. Nutr.* 19, 773–784.
- Elias, R.J., Kellerby, S.S., Decker, E.A. (2008). Antioxidant activity of proteins and peptides. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 48, 430–441.
- Ferrero, A., Tinarelli, A. (2007). Chapter 1 - Rice Cultivation in the E.U. Ecological Conditions and Agronomical Practices, in: Karpouzias, E.C. (Ed.), *Pesticide Risk Assessment in Rice Paddies*. Elsevier, Amsterdam, pp. 1–24.
- Foegeding, E.A., Davis, J.P. (2011). Food protein functionality: A comprehensive approach. *Food Hydrocoll.* 25, 1853–1864.
- Gosal, W.S., Ross-Murphy, S.B. (2000). Globular protein gelation. *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* 5, 188–194.
- Li, J., Liu, J., Liao, S., Yan, R. (2010). Hydrogen-rich gas production by air–steam gasification of rice husk using supported nano-NiO/ γ -Al₂O₃ catalyst. *Int. J. Hydrogen Energy* 35, 7399–7404.
- Romero, A., Beaumal, V., David-Briand, E., Cordobes, F., Guerrero, A., Anton, M. (2012). Interfacial and emulsifying behaviour of rice protein concentrate. *Food Hydrocoll.* 29, 1–8.
- Sano, T., Noguchi, S.F., Matsumoto, J.J., Tsuchiya, T. (1990). Thermal Gelation Characteristics of Myosin Subfragments. *J. Food Sci.* 55, 55–58.
- Souza, D. de, Sbardelotto, A.F., Ziegler, D.R., Marczak, L.D.F., Tessaro, I.C. (2016). Characterization of rice starch and protein obtained by a fast alkaline extraction method. *Food Chem.* 191, 36–44.

P7

METHODOLOGY FOR THE DEVELOPMENT OF ECOLOGICAL EMULSIONS FORMULATED WITH GREEN SOLVENTS OR ESSENTIAL OILS

Trujillo-Cayado, Luis A; Alfaro, María del Carmen; Santos, Jenifer; Calero, Nuria; Muñoz, José.

Departamento de Ingeniería Química. Escuela Politécnica Superior, Universidad de Sevilla, C/ Virgen de África, 7, 41011, Sevilla, España.

RESUMEN

Las emulsiones ecológicas se formulan y preparan idealmente siguiendo los principios del desarrollo sostenible o la química verde. Estas emulsiones verdes poseen un gran número de aplicaciones, ya que por ejemplo son utilizadas en la industria alimentaria. La industria química está mostrando especial atención a la sustitución de los disolventes sintéticos por disolventes ecológicos en el desarrollo de emulsiones aceite-en-agua para usos agroquímicos, como pinturas, tintas de impresión, desengrasantes y como limpiadores. Los disolventes ecológicos se utilizan cada vez más como consecuencia de la prohibición de algunos disolventes orgánicos tradicionales y sintéticos. Por este motivo, los científicos e ingenieros responsables del desarrollo de productos están afrontando el desafío de formular emulsiones que contienen nuevos disolventes, tensioactivos o aditivos obtenidos a partir de fuentes renovables y con buenas propiedades ecológicas. En este capítulo se desarrolla una metodología para el desarrollo de emulsiones ecológicas con componentes obtenidos a partir de fuentes renovables, de nula toxicidad y biodegradables como una alternativa sostenible a aquellos productos que contienen disolventes orgánicos tradicionales.

Palabras clave: *Disolvente verde, emulsión, reología, química verde, tensioactivo.*

ABSTRACT

Green emulsions are formulated and ideally prepared under the principles of the so-called sustainable development or green chemistry and find a great variety of applications. These systems are increasingly used by the food industry insofar as there is an increasing tendency to reduce the number of synthetic additives and to increase the use of biomaterials and ingredients with functional properties. For similar reasons they are more and more used by the pharmaceutical and cosmetic industries. The chemical industry is also paying attention to the substitution of synthetic solvents by green solvents in water-based emulsions used as agrochemicals, paints, printing inks, fat removers and all-purpose cleaners. Green solvents are increasingly used since many synthetic solvents have been banned due to their carcinogenic or toxic properties and to their poor biodegradability. For this reason, scientists and engineers responsible for product development face the challenge to formulate emulsions containing new solvents, surfactants and additives obtained from renewable raw materials and exhibiting enhanced ecological properties.

Keywords: *Emulsion, green solvent, green chemistry, rheology, surfactant.*

INTRODUCTION

The objective of green chemistry is to achieve sustainability through science and technology. The 3rd, 7th and the 10th principles of Green Chemistry are related to the use of safer and eco-friendly formulations. The use of traditional organic solvents in agrochemical formulations has been restricted since they posed health hazards for farmers and because of its harmful effects on the environment (Anastas et al., 1998). Therefore, the chemical industry is paying more and more attention to eco-friendly or better, green solvents. These solvents not only must derive from renewal resources and exhibit enhanced biodegradability but also must possess the expected functional properties. Water-based formulations are by far preferred to oil-based ones for ecological reasons. The non-polar character of most organic solvents prevents their incorporation into aqueous homogeneous solutions due to

thermodynamic incompatibility. Thus, they first have to be converted into a colloidal dispersion consisting for instance of an oil phase dispersed as small droplets within an aqueous phase.

This work highlights that rheology is a powerful tool for emulsion engineering if used cooperatively with different techniques, such as optical microscopy (bright field, polarising microscopy, phase contrast), confocal scanning laser microscopy (CSLM) and scanning electron microscopy (SEM, cryo-SEM), laser diffraction, and multiple light scattering. Therefore, the role of rheology to detect and control destabilization by creaming as well as to understand oil flocculation, coalescence and Ostwald ripening will be assessed.

METHODOLOGY

The scope of this work involves formulations based on different green solvents, eco-label surfactants, copolymers, hydrocolloids and clays. The composition of the oil phase has a major influence on the formation and stability of emulsions. N,N-dimethyldecanamide (Agnique[®] AMD-10, BASF) is considered as an eco-friendly solvent which may find applications in matrices for agrochemical products (Bigorra, 2010). D-Limonene, a natural hydrocarbon, is a biosolvent derived from the rinds of citrus fruits such as grapefruit, lemon, lime, and, in particular, oranges. Another monoterpene susceptible to be an interesting alternative solvent is α -pinene. It represents the major constituent of turpentine oils from most conifers and a component of the wood and leaf oils obtained from plants such as rosemary or parsley. Thyme oil has antiseptic and antibacterial properties so that it may be used in cleansing and cosmetic formulations. Sweet fennel oil can be used in food systems.

Ecological surfactants have attracted much attention recently. We report here results of emulsions formulated with surfactants that exhibit the European eco-label; namely, a) an alkyl (C14-C18) poly-pentoside (Apyclean[™] 6548, Wheatoleo) derived from wheat biomass and b) a polyoxyethylene glycerol ester (Levenol[™] C-201, KAO) derived from coconut oil. In addition, results of emulsions formulated with amphiphilic copolymers (Atlas[™] G-5000 and Atlox[™] 4913, Croda) are also reported.

Organic (gum polysaccharides) and inorganic (clays) stabilizers have been used to extend the shelf-life of emulsions studied. Their ability to increase the viscosity of a solution depends principally on their molecular characteristics (molecular weight, conformation, etc.).

We have used several microbial polysaccharides, Welan, Rhamsan, Xanthan, Gellan and Diutan gums, kindly provided by CP-Kelco. In addition, a fumed silica (Aerosil[™] 200, Evonik) and a clay based on sepiolite (Pangel[™] S9, Tolsa) were used as inorganic stabilizers.

RESULTS AND DISCUSSION

The rheology of emulsions from both a fundamental and an applied point of view is an important tool to characterize green emulsions. A huge amount of emulsions must be formulated and processed such that they are classified as “flowable materials” showing submicron mean droplet sizes. For this reason, the scope of this work involves the use of formulations based on different green solvents, eco-label surfactants, copolymers, hydrocolloids and clays.

Rheology is directly related to the structure of dispersed systems. For instance, an analysis of flow curves in emulsions formulated with Agnique[®] AMD-10 and d-limonene or α -pinene with very similar droplet size distributions allowed different flocculation grades to be detected (Santos et al., 2016a; Trujillo-Cayado et al., 2016a). In addition, this fact could be checked by analysing the corresponding mechanical spectra detected (Santos et al., 2015; Trujillo-Cayado et al., 2017a). The “flowable” properties of these emulsions, formulated with mixtures of green solvents, were supported by their apparent viscosity values. The study of zero shear viscosity is a great tool to differentiate between destabilization mechanisms in emulsions. The drop of zero shear viscosity with aging time is a clear indication of droplet size increase for emulsions detected (Santos et al., 2014; Santos et al., 2015; Trujillo-Cayado et al., 2016a; Trujillo-Cayado et al., 2017b). In addition, an analysis of the evolution of the plateau modulus can detect coalescence in dispersed systems. In fact, a decrease in this parameter with aging time was shown by concentrated green emulsions undergoing coalescence, as indicated by laser diffraction (Santos et al., 2016b). By contrast, the creaming process involves an increase in zero shear viscosity and a decrease in

the flow index with aging time, provided sampling is made from the middle or upper part of the container (Trujillo-Cayado et al., 2017b). Creaming occurs when gravitational separation outweighs the free movement of droplets. Rheology was an important tool to study the influence on emulsion properties and physical stability of several formulation variables like ratio of solvents (Santos et al., 2014), surfactant concentration (Pérez-Mosqueda et al., 2014; Santos et al., 2015; Trujillo-Cayado et al., 2017) or dispersed phase concentration (Santos et al., 2015; Trujillo-Cayado et al., 2017b). Furthermore, rheology was able to distinguish between different processing variables (Santos et al., 2016b) and emulsification methods (Trujillo-Cayado et al., 2016a). On top of that, the analysis of the viscoelastic properties can suggest the occurrence of different structures in emulsions formulated with different eco-friendly surfactants and detect destabilization mechanisms like depletion flocculation. An excess of free micelles in the continuous phase is expected to trigger depletion flocculation, influencing the rheological properties of the emulsion. This rheological change may be due either to an increase in viscosity of the continuous phase and/or the formation of a stronger oil network due (Pérez-Mosqueda et al., 2014; Santos et al., 2015; Trujillo-Cayado et al., 2017b). In addition, longer relaxation times may be associated to stronger droplet-droplet interactions, which can be correlated with longer macroscopic stability against creaming in emulsions.

Given that the rheology of many “flowable” emulsions is controlled by the rheology of the continuous phase, different case studies will be discussed. In this way, relevant examples of the rheology of polysaccharide solutions, weak gels, fluid (sheared) gels and suspensions of clays will be analysed. Fluid gels prepared with low-acyl gellan gum and either Na^+ or Ca^{2+} can be used as dispersion stabilizers due to the fact they show a high zero-shear viscosity and a dominant elastic response when linear viscoelastic behavior is guaranteed. As a consequence, in the quiescent state, fluid gels exhibited a structural network. Fluid gel microstructure tends to break progressively down as shear stress increases. Thus, these materials exhibited time-dependent flow properties before reaching steady state response. For this reason, their thixotropic properties must be assessed in order to evaluate their role as dispersion stabilizer. Rheological properties of low-acyl gellan gum samples with promising applications as emulsions stabilizers have been reported in several fairly recent articles (García et al., 2011; García et al., 2015; García et al., 2016).

Biopolymers are frequently used to stabilize aqueous suspensions or O/W emulsions. These polymers can stabilize emulsions through different mechanisms. Thus, the formation of an extended hydrated polymer network results in high viscosity of the continuous phase at low shear, thus slowing down the droplet motion. In addition, polymeric material may surround the oil droplets, ensuring effective steric hindrance of droplet coalescence. A combination of Gellan and Xanthan gums was utilized to achieve O/W emulsions containing α -pinene and two amphiphilic copolymers (Atlas™ G-5000 and Atlox™ 4913) (García et al., 2014). Small amplitude oscillatory shear results supported the likely occurrence of three different relaxation mechanisms and microstructures, which were dependent on hydrocolloid system used. The relaxation spectrum of the emulsion containing both polysaccharides indicated the existence of thermodynamic incompatibility between both polysaccharides. Flow curves fitted the Carreau-Yasuda model and highlighted the occurrence of negative synergism between Gellan and Xanthan gums. Furthermore, the influence of different ratios of amphiphilic copolymers (Atlas™ G-5000 and Atlox™ 4913) in emulsions formulated with Gellan gum and d-limonene or α -pinene as dispersed phase was studied. Results of these investigations indicated that the ratio of emulsifiers had significant effects on the physical stability, droplet size, viscoelasticity, and viscosity of these emulsions. An increase in Atlas™ G-5000 enhanced both the G' and G'' values and also the viscosity, providing higher stability to emulsions. Adding Gellan gum yielded viscoelastic spectra with a weak frequency dependence of G' and G'' , according to the formation of a faint gel-like matrix.

The rheological properties of concentrated welan gum aqueous solutions with different polymer concentration have been studied at 20°C. Flow curves and mechanical spectra were determined at several gum concentrations by step-wise and SAOS tests. The results showed shear thinning behavior and weak gel-like viscoelastic behavior in the range of concentrations studied (0.1-0.6 wt%). Another interesting technique used was the parallel superposition rheology, which consists of applying steady shear in parallel with oscillatory shear. Thus, a change from weak gel-like viscoelastic behavior to fluid like viscoelastic behavior was observed when the steady shear increased. The frequency locating the G' and G'' crossover shifted to higher frequencies values as the steady-state shear stress applied was increased. In other words, increasing shear stress values resulted in decreasing terminal relaxation times, congruently with a weaker and weaker microstructure. This technique allowed obtaining linear viscoelastic snapshots while the sample microstructure was progressively disrupted.

A detailed study of the rheological properties of mixtures of Rhamsan gum and Welan gum solutions containing an eco-friendly surfactant has been reported elsewhere (Trujillo-Cayado et al., 2016b). By using a response surface methodology, the effects of surfactant concentration, Rhamsan/Welan mass ratio and total concentration of polysaccharides were investigated. A second order polynomial equation fitted the influence of surfactant concentration, Rhamsan/Welan mass ratio and total concentration of polysaccharides, the latter being the most significant variable. Systems containing blends of Rhamsan and Welan did not show synergism but made it possible to adjust the linear viscoelastic and low shear rate flow properties in order to achieve values in between those of systems containing either Rhamsan or Welan as the only polysaccharide. All the systems studied exhibited weak gel rheological properties as the mechanical spectra displayed the plateau or rubber-like relaxation zone, the linear viscoelastic range was rather narrow and flow curves presented shear thinning behavior, which fitted the power-law equation. Furthermore, the influence of total gum concentration and Rhamsan/Welan gum ratio on rheological properties, droplet size distribution and physical stability of eco-friendly O/W emulsions formulated with α -pinene and stabilized by an ecological surfactant were studied. Rheological properties of emulsions showed an important dependence on the two studied variables. Flow curves were fitted to the power-law model and no synergistic effect between Rhamsan and Welan gums was demonstrated. Multiple light scattering illustrated that creaming was practically eliminated by the incorporation of polysaccharides. The use of Rhamsan and Welan gums as stabilizers improved the emulsion rheology and physical stability in comparison with the formulation without gum.

Small amplitude oscillatory shear (SAOS) is a useful tool to study the viscoelasticity of a wide range of materials. This technique requires that tests are conducted within the linear viscoelastic range (LVR), which guarantees the material microstructure is not destroyed by shear. In the LVR the properties of materials can be defined by two properties storage modulus in phase with the strain G' and viscous modulus out phase 90° with strain G'' . Although this conditions of low deformation are not near real flow conditions, such as those typical of processing and transport. When the strain increases above a critical value the classic linear viscoelastic approach is no longer valid. This is due to the fact that the response is not a simple sinusoidal function and it is necessary to use another method like that proposed by We have reported the applications of LAOS for xanthan gum aqueous dispersions at different NaCl concentrations (Carmona et al., 2014) and different polymer concentration (Carmona et al., 2015). LAOS was demonstrated to be much more sensitive than small amplitude oscillatory shear (SAOS) when studying the influence of NaCl concentration. This technique allows gaining a deeper insight into the viscoelastic properties of materials under non-linear conditions, which is closer to real flow conditions. The rheological LAOS characterization was carried out by means of both full-cycle (average elastic modulus and dynamic viscosity) and local methods (strain-hardening and shear-thickening ratios) (Carmona et al., 2014). The plot of the maximum value of the local shear-thickening parameter (T) obtained by LAOS against concentration showed a change of the viscoelastic behavior associated to the modification of the gum structure.

Pangel™ S9 sepiolite and Aerosil™ 200 fumed silica are good examples of inorganic stabilizers. The former is able to form a viscous suspension at 3 % (m/m) exhibiting gel-like viscoelasticity and very shear thinning behavior, such that the values of the dynamic viscoelastic functions, the zero-shear viscosity and the apparent yield stress can be tuned by adding either a cationic or an anionic surfactant. Aerosil™ 200 /water dispersions show gel properties at pH 7 from 8 wt% fumed silica. These dispersions can be used as stabilizers even in emulsions with large droplets (>5 microns). 7 wt% fennel oil/W emulsions containing just 4 wt% of Aerosil™ 200 showed an apparent yield point and gel behavior in SAOS.

CONCLUSIONS

This chapter reports on the procedure for the development of ecological emulsions formulated with renewable components as a sustainable alternative to products containing traditional organic solvents. Results obtained with different ecological formulations and emulsification methods are interesting for the applications of green O/W emulsions formulated with several eco-friendly ingredients.

ACKNOWLEDGEMENTS

The financial support received (Projects CTQ2011-27371 & CTQ2015-70700) from the Spanish Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) and from the European Commission (FEDER Programme) is kindly acknowledged.

REFERENCES

- Anastas, P. T., & Warner, J. C. (1998). Principles of green chemistry. *Green chemistry: Theory and practice*, 29-56.
- Bigorra, J. (2010). Innovative solvents based on renewable raw materials. Proceedings of 40th Annual Meeting of CED. Barcelona, Spain.
- Carmona, J. A., Ramirez, P., Calero, N., & Munoz, J. (2014). Large amplitude oscillatory shear of xanthan gum solutions. Effect of sodium chloride (NaCl) concentration. *Journal of Food Engineering*, 126, 165-172.
- Carmona, J. A., Lucas, A., Ramírez, P., Calero, N., & Muñoz, J. (2015). Non-linear and linear viscoelastic properties of a novel type of xanthan gum with industrial applications. *Rheologica Acta*, 54 (11-12), 993-1001.
- García, M. C., Alfaro, M. C., Calero, N., & Muñoz, J. (2011). Influence of gellan gum concentration on the dynamic viscoelasticity and transient flow of fluid gels. *Biochemical engineering journal*, 55(2), 73-81.
- García, M. C., Alfaro, M. C., & Muñoz, J. (2015). Yield stress and onset of nonlinear time-dependent rheological behaviour of gellan fluid gels. *Journal of Food Engineering*, 159, 42-47.
- García, M.C., Alfaro, M.C., Calero, N., Muñoz, J. (2014). Influence of polysaccharides on the rheology and stabilization of α -pinene emulsions. *Carbohydrate Polymers*, 105, 177-183.
- García, M. C., Alfaro, M. C., & Muñoz, J. (2016). Creep-recovery-creep tests to determine the yield stress of fluid gels containing gellan gum and Na⁺. *Biochemical Engineering Journal*, 114, 257-261.
- Pérez-Mosqueda, L. M., Ramírez, P., Trujillo-Cayado, L. A., Santos, J., & Muñoz, J. (2014). Development of eco-friendly submicron emulsions stabilized by a bio-derived gum. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 123, 797-802.
- Santos, J., Trujillo-Cayado, L. A., Calero, N., & Muñoz, J. (2014). Physical characterization of eco-friendly O/W emulsions developed through a strategy based on product engineering principles. *AIChE Journal*, 60(7), 2644-2653.
- Santos, J., Calero, N., & Muñoz, J. (2015). Influence of the concentration of a polyoxyethylene glycerol ester on the physical stability of submicron emulsions. *Chemical Engineering Research and Design*, 100, 261-267.
- Santos, J., Trujillo-Cayado, L. A., Calero, N., Alfaro, M. C., & Muñoz, J. (2016a). Development of eco-friendly emulsions produced by microfluidization technique. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 36, 90-95.
- Santos, J., Calero, N., & Muñoz, J. (2016b). Optimization of a green emulsion stability by tuning homogenization rate. *RSC Advances*, 6(62), 57563-57568
- Trujillo-Cayado, L. A., Santos, J., Alfaro, M. C., Calero, N., & Muñoz, J. (2016a). A further step in the development of oil-in-water emulsions formulated with a mixture of green solvents. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55(27), 7259-7266.
- Trujillo-Cayado, L. A., Alfaro, M. C., Raymundo, A., Sousa, I., & Muñoz, J. (2016b). Rheological behavior of aqueous dispersions containing blends of rhamnan and welan polysaccharides with an eco-friendly surfactant. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 145, 430-437.
- Trujillo-Cayado, L. A., Alfaro, M. C., García, M. C., & Muñoz, J. (2017a). Physical stability of N, N-dimethyldecanamide/ α -pinene-in-water emulsions as influenced by surfactant concentration. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 149, 154-161.

Trujillo-Cayado, L. A., Garcia, M. C., Santos, J., Carmona, J. A., & Alfaro, M. C. (2017b). Progress in the Formulation of Concentrated Ecological Emulsions for Agrochemical Application Based on Environmentally Friendly Ingredients. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(5), 4127-4132.

DISEÑO NEURO-FRACTAL DEL CURRÍCULUM Y PROCESOS DE ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE EN TECNOLOGÍA Y PROCESOS INDUSTRIALES

Suárez Fernández-Miranda, S.; Aguayo González, F.; Lama Ruiz, J.R. Diseño Industrial e Ingeniería del Proyecto y la Innovación (TEP-022). Departamento de Ingeniería del Diseño. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Sevilla.

RESUMEN

En este trabajo se define un paradigma innovador de diseño del currículum y los procesos de aprendizaje y enseñanza asociados a las demandas actuales de perfiles profesionales en el ámbito de la tecnología y los procesos industriales aplicados a Industria 4.0 e ICT (Information and communication technology). Dicho paradigma viene sustentado mediante los conocimientos actuales que aporta la neurociencia cognitiva al campo de la educación. Para este diseño, se tiene en cuenta la teoría de la actividad y un desarrollo fractal a lo largo de todo el proceso de diseño. Además, ya que esos perfiles profesionales se encuentran inmersos en la sociedad del conocimiento y la información, se hace uso del conectivismo. Insertándose la aportación realizada en el enfoque de aprendizaje a lo largo de la vida.

Palabras clave: *Educación; Neurociencia; Fractal; Actividad; Social.*

ABSTRACT

In this work, an innovative paradigm of curriculum design and learning- teaching processes is defined. It is associated with current demands of professional profiles in the field of technology and industrial processes applied to Industry 4.0 and ICT. This paradigm is supported by the current knowledge that cognitive neuroscience brings to the field of education. For this design the activity theory is taken into account. It is self-replicated in a fractal way throughout the design process. In addition, as these professional profiles are immersed in the knowledge and information society, connectivism is used. Taking into account the approach of learning throughout life.

Keywords: *Education; Neuroscience; Fractal; Activity; Social.*

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Se está produciendo una transformación de la demanda de perfiles profesionales asociados a las enseñanzas técnicas. Las competencias de los egresados, necesarias para una adaptación continuada al sistema de producción, es el factor crítico de éxito en la sociedad actual. Las organizaciones y por ende los egresados, deben ser capaces de adaptar sus operaciones permanentemente a los requerimientos de productos cambiantes en mercados dinámicos y con tecnologías cada vez más innovadoras. Se requieren egresados con capacidad creativa y toma de decisiones, así como el dominio de conocimientos técnicos adaptados a las mejores técnicas disponibles [1].

A lo largo de las últimas décadas, se ha venido produciendo una progresiva adaptación de la sociedad industrial hacia una sociedad de la información y el saber, que ha generado un incremento en las expectativas del rol desempeñado por el sistema educativo en el progreso de los egresados y en su capacidad de adaptación a este nuevo contexto [2]. En este escenario, la calidad y el rendimiento académico se han convertido en objetos de atención preferente por parte de la sociedad, poniéndose un gran empeño en mejorar el sistema educativo y sus prácticas.

La educación tiene que ver con el individuo, con su desarrollo personal y su autonomía lograda a través del conocimiento [3]. Aportando valor añadido para su propio bienestar y mejorando su integración social. Todo ello, sin dejar de percibir lo que la sociedad recibe a cambio, ya que ese individuo interviene en la mejora de la sociedad a la cual pertenece como animal social que es. Es por ello que, la revalorización del papel de la mente humana como capacitador y generador de conocimientos nuevos para incorporarlos con éxito a los procesos productivos, hace de la educación una herramienta imprescindible.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que ya no resulta suficiente acumular una serie de conocimientos y destrezas en un periodo de tiempo determinado, a fin de aprovecharlo posteriormente de forma indefinida. En la sociedad del conocimiento y la información, se ha de actualizar, profundizar y enriquecer ese saber, adaptándolo a un mundo en permanente cambio. Siendo necesario contar con una amplia cultura general, pero también, capaz de profundizar en algunas materias en particular [4].

Esta cuarta revolución industrial en la que nos encontramos, está siendo impulsada por las nuevas generaciones de tecnologías digitales, tales como sistemas ciber-físicos, big data, cloud y sensórica entre otras. Este progreso de las tecnologías digitales está cambiando la forma de diseñar, producir, comercializar y generar valor a partir de los productos y de sus servicios asociados [5]. Por tanto, también están modificando la forma de “*aprender a hacer*” y esto ha de tenerse en cuenta para que los egresados cuenten con las herramientas necesarias para enfrentarse a estas nuevas generaciones de tecnologías digitales con éxito. Si se quiere considerar al egresado como agente de cambio, las cualidades que definen el “*saber ser*”, hacen necesario que se tengan en cuenta en educación la capacidad de saber comunicarse, de saber trabajar con los demás, de afrontar y solucionar problemas. Además, se ha tendido a privilegiar el espíritu de competencia y de éxito a nivel individual, dejándose de lado formular objetivos y proyectos comunes en contextos de igualdad que conllevan sinergias mayores. Los docentes, pueden influir significativamente en su alumnado, avivando su espíritu crítico y su curiosidad. Es por ello que resulta vital mostrar sensibilidad ante estos temas para poder hacer surgir lo mejor de cada discente [6].

El gran reto para las actuales prácticas de enseñanza y aprendizaje, consiste en adaptarse a las nuevas situaciones que se están experimentando, en relación a los grandes cambios tecnológicos producidos, con las nuevas estructuras mentales de los seres humanos que llenan las aulas y que exigen una revisión de los marcos y parámetros establecidos hasta ahora.

Esta aportación y las que vendrán posteriormente, tienen como objetivo el diseño neurofractal del currículo y de los procesos de aprendizaje y enseñanza asociados en el ámbito de la tecnología y los procesos industriales. Sustentándose para ello en un enfoque sistémico-complejo de la educación, posible a partir de las aportaciones primero de Vigotsky [7],[8] y posteriormente de Yrjö Engeström [9], permitiendo la creación de un modelo teórico-conceptual capaz de describir la estructura, componentes y relaciones de la actividad humana en sistemas de aprendizaje y enseñanza, que se explica a partir de la capacidad de aprender de nuestra especie. Todo ello fundamentado en los últimos descubrimientos en neurociencia cognitiva y teniendo en cuenta desarrollar la fractalidad mediante un caso práctico con enfoque conectivista.

METODOLOGÍA

Y es aquí donde entran en juego modelos efectivos de producción y consolidación del conocimiento y de los procesos de aprendizaje y enseñanza. El aprendizaje se desarrolla dentro de sistemas de actividad entendidos como “espacios” donde el ser humano adquiere patrones propios de la comunidad. Esta característica hace que estos sistemas sean inseparables del concepto de cultura y que las actividades desarrolladas en ellos sean consideradas como una formación sistémica y colectiva que posee una estructura mediacional compleja [10].

El aprendizaje bajo el enfoque de la psicología cognitiva es el resultado de la interacción de tres componentes, lo que los discentes ya saben, la información que reciben y lo que realizan mientras aprenden [11]. Por tanto este proceso no se limita a la adquisición de conocimientos e incluso destrezas, sino también y más importante, a la construcción de significado por parte del discente.

El aprendizaje es un proceso constructivo y los procesos automatizados en la percepción, la atención, la resolución de problemas y la memoria permiten realizar tareas cognitivas complejas. El desarrollo de la auto-conciencia y la auto-regulación son factores a tener en cuenta en el proceso de aprendizaje. Investigaciones llevadas a cabo sobre metacognición establecen dos dimensiones del pensamiento:

- El conocimiento de los discentes sobre su propio pensamiento.
- Su habilidad para emplearlo en regular sus procesos cognitivos.

Con lo que consiguen llegar a ser más conscientes de sus propias habilidades para aprender, recordar y resolver problemas. Controlando así su propio aprendizaje.

Las primeras investigaciones cognitivas se centraban en el pensamiento, la memoria y los procesos de resolución de problemas para ser aplicados en Educación. Pero las actuales líneas de investigación establecen la importancia de los sistemas de motivación y creencias de los discentes, por lo que la motivación y las creencias forman parte actualmente del proceso cognitivo. Aprender no solo implica adquirir ciertos conocimientos, sino también aprender a ser activo, reflexivo, saber auto-regularse y motivarse.

Un fractal es un ente matemático que se caracteriza por una propiedad de invariancia en presencia de “cambios de escala”. Esta propiedad se denomina “auto- semejanza” y puede presentarse de maneras y formas muy diversas. En algunos casos, la auto- semejanza es matemática exacta y entonces se habla de “fractales deterministas”, mientras que en otros casos, la auto- semejanza es aproximada, tal es el caso, por ejemplo, de los fractales que se encuentran en la naturaleza. Los fractales deterministas constituyen un nuevo tipo de geometría, la fractal. El fractal al ser una figura auto- semejante, contiene copias de sí misma y puede ser definida de forma recursiva. Permitiendo simular la evolución de sistemas complejos [12].

El propósito inicial de la enseñanza mediante enfoque fractal, desarrollada por Herold & Landherr, fue crear un modelo didáctico para emplearlo en los últimos tres años de la enseñanza media, en la formación profesional y en las enseñanzas de adultos. Pudiendo hacer uso del principio “sándwich” de Wahl (2005) para el ritmo de trabajo, encontrándose fases de aprendizaje centrado en el profesor y fases de aprendizaje autónomo según diversos modos. Apuntando los discentes sus experiencias, observaciones y evaluaciones en un diario de aprendizaje con el propósito de reflexionar a nivel individual y en grupo [2].

Al aplicar el enfoque fractal, se van a emplear métodos de aprendizaje activo lo que supone no solo tener en cuenta los aspectos meramente de conocimiento sino también tener en cuenta las competencias generales o competencias clave como por ejemplo las que suponen trabajo en equipo y la de comunicar, entre otras. Lo que conlleva conseguir aprendizajes activos y transdisciplinarios, del mundo del trabajo y de la sociedad de la información y la comunicación.

En esta nueva sociedad, en la que las redes adquieren una importancia enorme en un entorno digital en rápida expansión, la teoría conectivista de Stephen Downes y George Siemens, establece que el aprendizaje ya no es una actividad que se realice a nivel individual, sino que consiste en el proceso de conectar nodos especializados o fuentes de información [13]. Así, el conocimiento pasa a distribuirse a través de las redes, por lo que ya no es necesario que el conocimiento resida únicamente en los seres humanos.

La neurociencia cognitiva se basa en la integración de conceptos y estrategias de estudio procedentes de los modelos cognitivos, de la neurociencia y de la computación artificial [14]. Mediante los modelos cognitivos se llegan a conocer las reglas que explican el funcionamiento de un determinado sistema funcional, como por ejemplo la memoria. La neurociencia proporciona información sobre la neuroanatomía y la neurofisiología del cerebro. La computación artificial elabora modelos artificiales que tienen en cuenta las restricciones que los datos neurobiológicos imponen a las teorías computacionales.

Las aportaciones de la neurociencia cognitiva están abriendo nuevas perspectivas a la implementación neuronal de las funciones psicológicas. Existiendo una especialización local en el procesamiento de información de aspectos funcionales concretos dentro de una función dada, estando al mismo tiempo esa especialización segregada a nivel anatómico en diferentes regiones cerebrales. Lo que permite trabajar a nivel de sistemas funcionales. Unas regiones cerebrales realizan ciertas operaciones dentro del sistema, de forma especializada, que no las desarrollan otras regiones cerebrales. El resultado final del funcionamiento del sistema depende del contexto neuronal en el que cada región especializada realiza ciertas operaciones dentro del sistema en cada momento, algo que cambia constantemente por lo que las interacciones entre los distintos componentes del sistema son dinámicas. El carácter dinámico del funcionamiento del cerebro favorece su riqueza y flexibilidad permitiendo rentabilizar al máximo las capacidades adaptativas del cerebro y por ende de los discentes, lo que abre un mundo de nuevas posibilidades en educación.

El cerebro está formado por dos mitades simétricas, siendo los hemisferios cerebrales las partes más importantes del cerebro. Estas dos partes quedan conectadas mediante un conjunto de fibras nerviosas que conectan estructuras homólogas de los lados derecho e izquierdo. La fibra nerviosa más

importante es el cuerpo calloso, que conecta regiones de la corteza cerebral izquierda y derecha, no limitándose solo a transferir de forma pasiva información, sino participando también de manera activa en el procesamiento de información entre hemisferios. Investigaciones sobre el tema han demostrado que los hemisferios pueden interactuar entre sí de más de una forma diferente, dependiendo de la situación. Por lo que las conexiones entre los hemisferios son flexibles y dinámicas.

Lo que se propone es fractalizar, partiendo de una estructura básica, e ir incorporando de manera progresiva complejidad en el diseño y el proceso de aprendizaje y enseñanza, para que sirva de “*sustrato*” a lo largo de la vida del discente. Para ello, se puede reconocer un primer diseño a nivel macro formado por el currículum, un segundo diseño a nivel meso que se corresponde con el diseño instruccional, el tercero sería un proceso de aprendizaje-enseñanza a nivel micro y por último, una vuelta al nivel macro influido por los elementos anteriores y en los que emergen los saberes contenidos del individuo que habían estado a la espera de ser despertados.

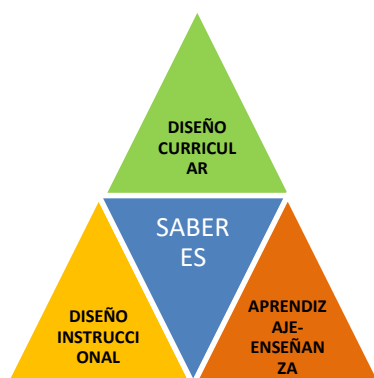


Figura 1: Proceso formativo

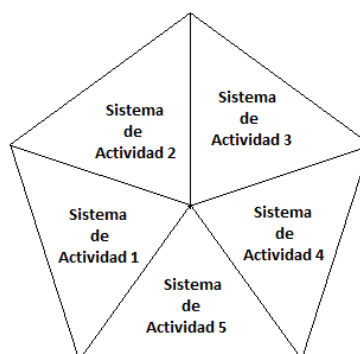


Figura 2: Proceso formativo a lo largo de la vida

Estos cuatro elementos van a ser los ejes a partir de los cuales va a seguir desarrollándose esa geometría fractal, en la que se van a generar cinco sistemas de actividad. Cada sistema de actividad desarrolla la idea de que hay una interacción mediada de las personas, los ambientes, las reglas y las herramientas establecidas para ese sistema. Y de que se dan en el sistema equilibrios inestables que hacen funcionar el sistema de actividad, aunque no de manera óptima. Y que se puede llegar a producir, actuando sobre esas personas, ambientes, reglas y herramientas de manera adecuada, un equilibrio estable que proporcione una solución óptima del sistema. El proceso formativo a lo largo de la vida es un elemento esencial en una sociedad basada en el conocimiento y resulta imprescindible a la hora de enfrentarse al uso de las nuevas tecnologías y procesos industriales que surgen de la nueva revolución industrial en la que se encuentra inmersa la sociedad. Además, permite mejorar la igualdad de oportunidades, la cohesión social y la calidad de vida. Es por ello que se diseña y estructura el conjunto de los diferentes sistemas definidos anteriormente. Contribuyendo a construir ese proceso formativo, a lo largo de la vida, que necesita el individuo para alcanzar las metas que se proponga conquistar.

El ámbito en el que se da ese proceso de fractalización discurre por una parte en el departamento, para el nivel de concreción del diseño instruccional y por otra, en el aula a nivel de proceso de aprendizaje y enseñanza. Los diferentes niveles de fractalización que se van a tener en cuenta son:

Currículum:

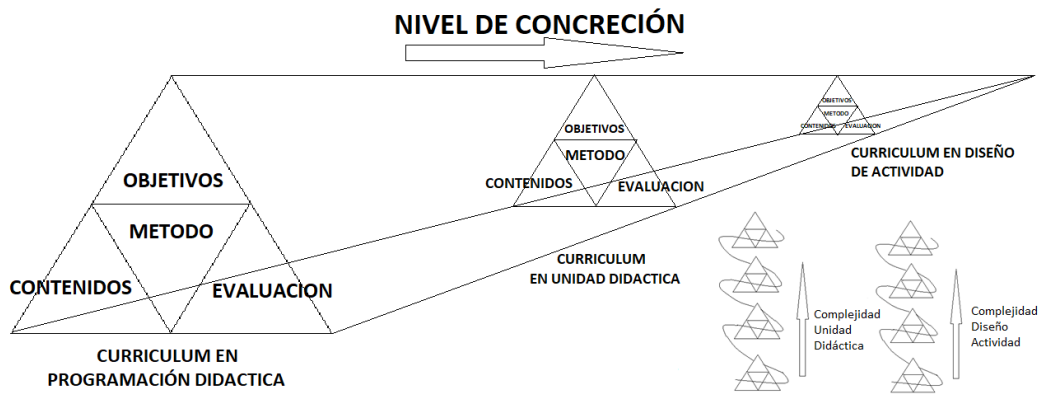


Figura 3: Niveles de concreción del currículum.

En los niveles de concreción representados gráficamente en la figura 3, se pueden observar analogías entre la programación didáctica, la unidad didáctica y la actividad. Pudiendo establecerse un paralelismo entre esos dominios que permiten empoderar la metacognición del discente. También se ha tenido en cuenta una fractalidad de segundo orden al poder considerar reelaborar la complejidad de la unidad didáctica y de la actividad, generando así diferentes situaciones de aprendizaje y enseñanza en función del nivel de profundidad con el que se tratan los elementos.

Diseño Instruccional:

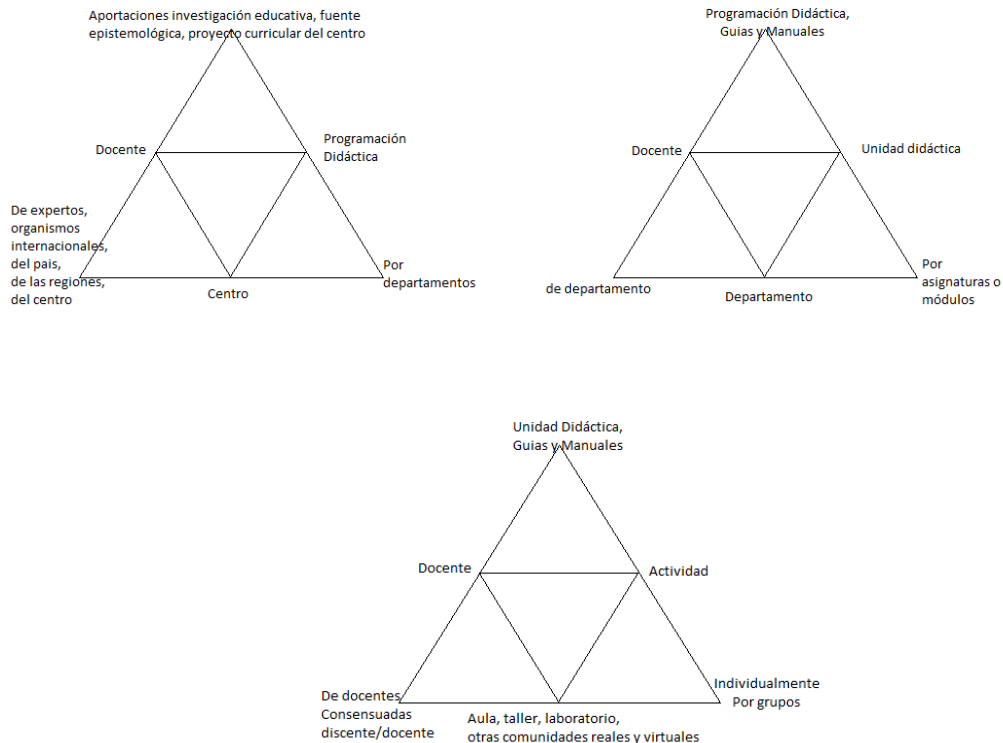
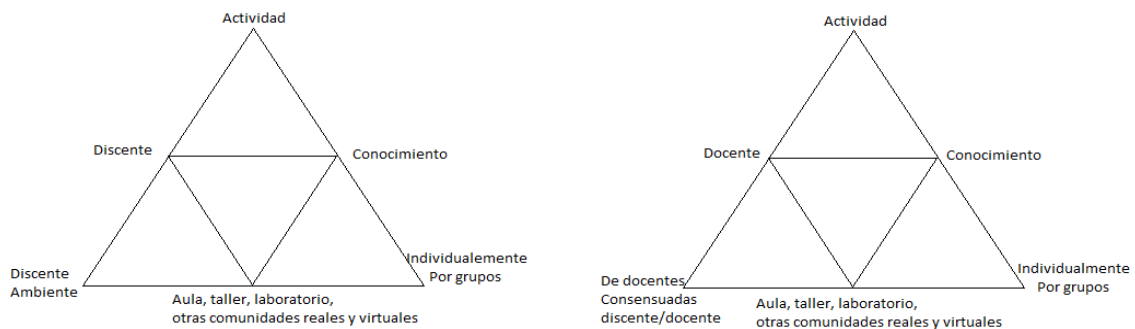


Figura 4: Sistemas de actividad del Diseño Instruccional: Programación Didáctica, Unidad Didáctica, Actividad.

Proceso de Aprendizaje y Enseñanza:



Niveles de fractalización:

- Objetivos
- Contenidos
- Métodos
- Evaluación

Procesos cognitivos facilitadores:

- Emoción.
- Atención.
- Memoria.

Bases neurocientíficas:

- Dicotomía córtico-subcortical.
- Procesos atencionales.
- Procesos básicos de memoria.

Figura 5: Sistema de actividad del proceso de aprendizaje-enseñanza.

Saberes:

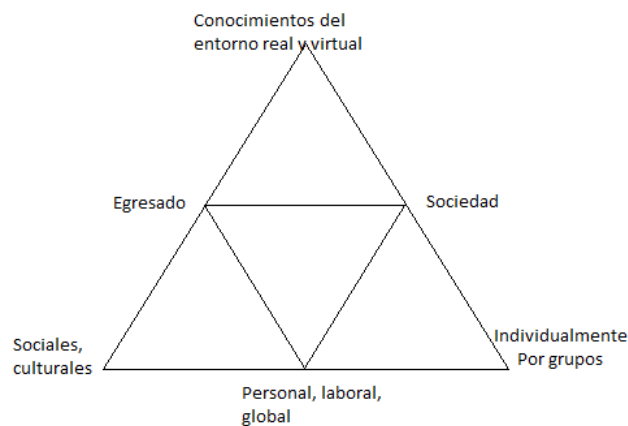


Figura 6: Sistema de actividad Saberes.

El docente no solo realiza su trabajo en el aula de cara al discente, hay un trabajo fuera del aula, asociado a la preparación de la programación didáctica, de las unidades didácticas, de las actividades así como de otras tareas [15]. La programación didáctica es la planificación sistematizada del proceso de aprendizaje-enseñanza de un área o materia para un grupo específico de discentes durante un curso. Y está ligada a la mejora del proceso de aprendizaje-enseñanza, estimando las necesidades, características de los discentes y los objetivos a alcanzar entre otras cosas. De lo ajustada y realista que sea, dependerá en buena medida la calidad de esa programación.

Los componentes que podemos encontrar en la programación didáctica son los objetivos, los contenidos, la metodología y la evaluación. Los “objetivos” determinan lo que los discentes deben reconocer, comparar, relacionar, aplicar, analizar, explicar entre otras cosas al finalizar el curso. Siendo sus referentes los objetivos generales de la etapa, del área o materia y las competencias básicas. Los “contenidos” son el conjunto de procedimientos, conceptos y actitudes a desarrollar de manera integrada

para alcanzar los objetivos planteados. La “metodología” es el conjunto de decisiones para la organización del proceso de aprendizaje y enseñanza, desarrollando aspectos tales como la selección de contenidos, el agrupamiento de los discentes, los recursos a emplear, los criterios de evaluación, la organización de espacio y tiempo entre otros. Por último, la “evaluación” entendida como el proceso sistemático y continuo de recogida y valoración de la información de cara a tomar decisiones, constituye el motor de mejora del proceso de aprendizaje y enseñanza, no conformándose con valorar los resultados académicos del discente sino también valorando lo que se enseña y cómo se enseña.

Se han producido importantes cambios desde la aparición de los primeros modelos de instrucción en los que se empleaban ordenadores y se simulaba el proceso cognitivo del discente para adecuarse únicamente al contenido pretendido. Actualmente el planteamiento es el opuesto y lo que se pretende es enfrentar al discente con un volumen ingente de información. Y no solo es posible explorar esa información, sino modificarla, generar interrelaciones y crear nuevos contenidos. Pasando así el discente de mero lector a autor, pudiendo facilitar el diálogo y el aprendizaje colaborativo mediante los blogs, la wikis, los marcadores sociales y el etiquetado de materiales entre otros. Los sistemas de gestión de aprendizajes así como los entornos personales de aprendizaje también aportan nuevas posibilidades. El papel del discente es reconocer los patrones que hacen surgir el significado de las actividades. Siendo las actividades centrales del aprendizaje decidir el significado y la formación de conexiones entre comunidades especializadas. Descansando el conocimiento y el aprendizaje sobre la diversidad de opiniones, en el que el aprendizaje es un proceso de conexión de nodos o fuentes de información especializada, siendo el fomento y el mantenimiento de las conexiones necesarias para facilitar el aprendizaje continuo. Se tiene previsto plantear un caso de estudio práctico de tipo ICT en el que la complejidad que pueda contener su solución bajo el paradigma conectivista quede desactivada mediante la aplicación de ese enfoque neurofractal mostrado anteriormente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La manera de entender cómo se produce el aprendizaje del individuo, los factores que intervienen y cómo se aplica ha variado a lo largo de los años, lo que ha conllevado la generación de diferentes formas de enfrentarse al mismo dilema. La corriente conductista se basa en reforzar conductas del discente, condicionándole para que actúe de una manera determinada. La teoría cognitiva conceptualiza al individuo como ser que es capaz de estructurar y organizar el conocimiento, dando paso a una estructura cognitiva y una representación mental. Para los constructivistas, el individuo aprende asociando nuevas experiencias a conocimientos previos para construir conocimientos más complejos.

Durante mucho tiempo la neurociencia y la educación han discurrido por sendas diferentes pero las aportaciones que puede realizar la neurociencia cognitiva a la educación pueden ayudar, mediante evidencias empíricas y datos contrastables, a mejorar la efectividad del proceso educativo.

En investigación educativa, se ha pasado de un enfoque empírico-analítico hacia uno sistémico-complejo. Conforme se va desgranando la complejidad que rige el fenómeno educativo, resulta evidente la imposibilidad de ofrecer un enfoque epistemológico proponiendo una perspectiva reduccionista, fragmentada y parcial de los hechos sociales (Delgado y Gutiérrez, 1998). Desde esta perspectiva se pretende hacer posible la construcción de un marco que da cabida al fenómeno educativo en todas sus dimensiones (Salas, 2013). Destacando que el ser humano es un ser vivo social determinado por la herencia biológica y cultural, que posee un sistema nervioso muy desarrollado, con capacidad de aprender por cuenta propia y por la intermediación de otros seres humanos, de enseñar y de construir medios y herramientas para satisfacer necesidades de diferente índole, transformando su entorno social y natural.

Lo que se pretende con este trabajo es, exponer y sustentar mediante el aporte de la neurociencia cognitiva, cómo se puede desmontar la complejidad que caracteriza al logro del saber teniendo en cuenta la fractalidad del proceso y el empleo de sistemas de actividad para enfrentarse con éxito a las demandas actuales de perfiles profesionales en el ámbito de la tecnología y los procesos industriales aplicados a Industria 4.0 e ICT. El aprendizaje se desarrolla dentro de sistemas de actividad entendidos como “espacios” donde el ser humano adquiere patrones propios de la comunidad. Esta característica hace que estos sistemas sean inseparables del concepto de cultura y que las actividades desarrolladas en ellos sean consideradas como una formación sistémica y colectiva que posee una estructura mediacional compleja. El concepto de aprendizaje expansivo, sistematizado por Engeström se puede expresar como las transformaciones que ocurren dentro de un ámbito de actividad, entendida esta última como la unidad básica de la acción cultural humana.

CONCLUSIONES

Los fractales actuando como patrones, se repiten en todos los niveles del sistema y conllevan autosimilitud, lo que da lugar a que el nivel de la complejidad manifiesta de la estructura del proceso de diseño del currículum y procesos de aprendizaje y enseñanza en tecnología y procesos industriales pueda reducirse. Centrándose los ámbitos de fractalización en el currículum, el diseño instruccional y el proceso de aprendizaje enseñanza.

La innovación aportada por este diseño se materializa al plantear:

- Reducir el nivel de complejidad que caracterizan al proceso de diseño del currículum y al proceso de aprendizaje y enseñanza.
- Acometer el proceso desde el sustento de la neurociencia cognitiva.
- Actualizar la forma de enfocar ese diseño para que resulte útil a la hora de aplicarlo a la demanda actual de perfiles profesionales.
- Aplicar un diseño neurofractal a un caso de estudio bajo enfoque conectivista.

Es por ello que resulta de especial relevancia, la propuesta de construcción de un diseño neurofractal del currículum y procesos de aprendizaje y enseñanza adaptado a las demandas actuales de perfiles profesionales asociados a la tecnología y a los procesos industriales. Con la dimensión que se alcanza al involucrar a la neurociencia cognitiva en el proceso de aprendizaje y enseñanza. Estableciendo valor añadido mediante la integración de un diseño socializado y la inclusión del paradigma conectivista.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] SUÁREZ, S.; LAMA, J.R.; AGUAYO, F.; GONZÁLEZ-REGALADO, E. (2017). Cambios asociados a los perfiles profesionales demandados en las enseñanzas técnicas y las ingenierías. 25 Experiencias de innovación educativa. Hacia un mundo por competencias. Badajoz: Escuela de Ingenierías Industriales. Páginas 231-238.
- [2] MEDINA, A.; DOMÍNGUEZ, M.C.; (2012). Didáctica. Formación básica para profesores de la educación. Madrid: UNED.
- [3] SCHUNK, D. H. (2012). *Teorías del aprendizaje. Una perspectiva educativa*. México: Pearson.
- [4] SCHWART, L. (1993). L'enseignement scientifique. Institut de France. Reflexions sur L'enseignement.
- [5] SUÁREZ, S.; MARCOS, M.; PERALTA, M.E.; AGUAYO, F. (2017). The challenge of integrating industry 4.0 in the degree of mechanical engineering. *Procedia Manufacturing*. Volume 13, Pages 1229-1236.
- [6] DELORS, J. (1996). La educación encierra un tesoro. Informe a la UNESCO de la Comisión Internacional sobre la educación para el siglo XXI. Madrid: Santillana/UNESCO.
- [7] BAQUERO, R. *Vigotsky: Sujeto y situación, claves de un programa psicológico*. Capítulo 2. <http://www.bibliopsi.org/docs/carreras/obligatorias/CFP/educacional/erausquin/Unidad%202/Baquero%20-%20Vigotsky,%20sujeto%20y%20situacion,%20claves%20de%20un.pdf>
- [8] VYGOTSKI, L. (2009). *El desarrollo de los procesos psicológicos superiores*. Barcelona: Crítica, S.L.
- [9] ERAUSQUIN, C. (2013). *La teoría histórico-cultural de la actividad como artefacto mediador para construir intervenciones e indagaciones sobre el trabajo de psicólogos en escenarios educativos*. Revista Segunda Época.
- [10] KNIGHT, P.T. (2005). El profesorado de educación superior. Formación para la excelencia. Madrid: Narcea.
- [11] BRUNING, H.; SCHRAW, G.J.; NORBY, M. N.; RONNING, R.R. (2005). *Psicología cognitiva y de la instrucción*. Madrid: PEARSON PRENTICE HALL.
- [12] NUHFER, E.B. (2010). A fractal thinker looks at student rating. California.
- [13] DOWNES, S. (2012). Connectivism and connective knowledge. Under a Creative Common License.

[14] ENRÍQUEZ, P. (2014). Neurociencia cognitiva. Madrid: UNED.

[15] AGUAYO, F.; LAMA, J.R. (1998). Didáctica de la Tecnología: fundamentos del diseño y desarrollo del currículum tecnológico. Madrid: Tebar.

OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS DE FABRICACIÓN CIBERFÍSICOS EN INDUSTRIA 4.0 CON BIG DATA

Morales García, Ana Isabel. Lama Ruiz, Juan Ramón. Aguayo González, Francisco. Martín Gómez, Alejandro M. Grupo de investigación TEP 022, Área de Proyectos de Ingeniería. Departamento de Ingeniería del Diseño. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Sevilla

RESUMEN

El combustible de la cuarta revolución industrial, apodada como "Industria 4.0" por el Gobierno Alemán, será Big Data la cual estará disponible a través de Cyber-Physical Systems (CPS).

El objetivo es crear fábricas inteligentes, en las que las máquinas y los recursos se comuniquen como en una red social. Tal fábrica inteligente, estará diseñada para producir Smart Product (productos inteligentes) que sabrán cómo se han producido a la vez que recopilarán y transmitirán datos a medida que son utilizados; estas enormes cantidades de datos (Big Data) se recopilarán y analizarán en tiempo real.

Para ello, desarrollaremos una visión holística para la aplicación de big data tanto del ciclo de vida del producto, el negocio que conlleva dicho producto, la infraestructura necesaria para su fabricación y el proceso productivo que lo materializa.

Palabras clave: *Big Data, Industria 4.0, sistemas ciberfísicos, productos inteligentes*

ABSTRACT

The fuel of the four industrial revolution, called "Industry 4.0" by the German govern, will be Big Data which will be available through Cyber-Physical Systems (CPS).

The goal is create smart factories. In this factories the machines and the resources will be communicate like a social network. The smart factory will be design to produced smart product. This products will know how they have produced while they will collect and transmit data as they are used. This Big Data will be collected and will be analyzed in streaming.

To do this, we will develop a holistic vision for the application of big data both in the life cycle of the product, the business that this product entails, the necessary infrastructure for its manufacture and the productive process that materializes it.

Keywords: *Big Data, Industry 4.0, Cyber physical system, Smart Product*

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En términos generales podríamos referirnos a Big Data como a la tendencia en el avance de la tecnología que ha abierto las puertas hacia un nuevo enfoque de entendimiento y toma de decisiones, la cual es utilizada para describir enormes cantidades de datos (estructurados, no estructurados y semi-estructurados) que tomaría demasiado tiempo y sería muy costoso cargarlos a una base de datos relacional para su análisis (Barranco, 2012).

De esta forma, el concepto de Big Data aplica a toda aquella información que no puede ser procesada o analizada utilizando procesos o herramientas tradicionales.

Según IBM el término Big Data puede ser definido como la convergencia de las cuatro V's las cuales son (Yin, 2015):

- **Volumen:** la cantidad de datos. Siendo quizá la característica que se asocia con mayor frecuencia a big data, el volumen hace referencia a las cantidades masivas de datos que las organizaciones

intentan aprovechar para mejorar la toma de decisiones en toda la empresa. Los volúmenes de datos continúan aumentando a un ritmo sin precedentes. No obstante, lo que constituye un volumen verdaderamente “alto” varía en función del sector e incluso de la ubicación geográfica y es más pequeño que los petabytes y zetabytes a los que a menudo se hace referencia (Yin, 2015).

- **Variedad:** diferentes tipos y fuentes de datos. La variedad tiene que ver con gestionar la complejidad de múltiples tipos de datos, incluidos los datos estructurados, semiestructurados y no estructurados. Las organizaciones necesitan integrar y analizar datos de un complejo abanico de fuentes de información tanto tradicional como no tradicional procedentes tanto de dentro como de fuera de la empresa. Con la profusión de sensores, dispositivos inteligentes y tecnologías de colaboración social, los datos que se generan presentan innumerables formas entre las que se incluyen texto, datos web, tuits, datos de sensores, audio, vídeo, secuencias de clic, archivos de registro y mucho más (Yin, 2015).
- **Velocidad:** los datos en movimiento. La velocidad a la que se crean, procesan y analizan los datos continúa aumentando. Contribuir a una mayor velocidad es la naturaleza en tiempo real de la creación de datos, así como la necesidad de incorporar datos en streaming a los procesos de negocio y la toma de decisiones. La velocidad afecta a la latencia: el tiempo de espera entre el momento en el que se crean los datos, el momento en el que se captan y el momento en el que están accesibles. Hoy en día, los datos se generan de forma continua a una velocidad a la que a los sistemas tradicionales les resulta imposible captarlos, almacenarlos y analizarlos (Yin, 2015).
- **Veracidad:** la incertidumbre de los datos. La veracidad hace referencia al nivel de fiabilidad asociado a ciertos tipos de datos. Esforzarse por conseguir unos datos de alta calidad es un requisito importante y un reto fundamental de big data, pero incluso los mejores métodos de limpieza de datos no pueden eliminar la imprevisibilidad inherente de algunos datos, como el tiempo, la economía o las futuras decisiones de compra de un cliente. La necesidad de reconocer y planificar la incertidumbre es una dimensión de big data que surge a medida que los directivos intentan comprender mejor el mundo incierto que les rodea (Yin, 2015).

Algunos autores consideran una quinta V la cual se refiere al valor de los datos, es decir, una medida de la utilidad de los datos para la toma de decisiones en la organización, poniendo de manifiesto la dificultad para conocer y evaluar dicha utilidad a priori.

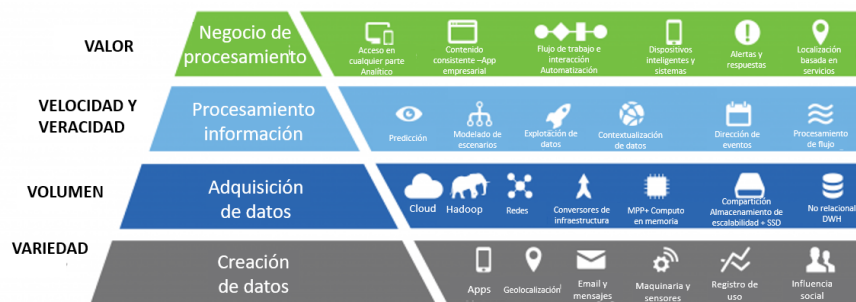


Figura 26: Cinco V's de Big Data.

La fábrica inteligente se caracteriza por un sistema multiagente autoorganizado, asistido con información y coordinación basada en big data (Wang, 2015).

METODOLOGÍA

Para la aplicación de Big Data dentro de la industria 4.0 debemos de tener una visión holística tanto del ciclo de vida del producto, el negocio que conlleva dicho producto, la infraestructura necesaria para su fabricación y el proceso productivo que lo materializa (Lu, 2016).

De esta forma, los distintos ciclos de vida interaccionarán entre ellos proporcionándonos datos los cuales serán procesados a través de Big Data. De esta forma los diversos subsistemas nos proporcionarán grandes cantidades de datos las cuales serán recopiladas y analizadas.

A través del ciclo de vida de la infraestructura podemos encontrar las siguientes fases:

- Diseño de la infraestructura, nos proporcionará los datos técnicos teóricos de la propia infraestructura, como podrán ser resistencia de esta, potencia necesaria, dimensionado...
- Construcción, en cuya fase obtendremos los datos reales de la propia infraestructura retroalimentando la fase inicial.
- Explotación, fase en la cual obtendremos datos sobre el gasto energético, contaminación...
- Mejora y optimización, donde actuaremos para a través de los datos recopilados intentar mejorar la infraestructura existente, por ejemplo, haciéndola sostenible medioambientalmente.
- Demolición, fase final donde la infraestructura llega al fin de su vida útil.

El ciclo de vida del proceso pasa por las siguientes fases:

- Diseño, estudio teórico acerca del proceso donde obtendremos datos acerca de los inputs necesarios, cantidades de materias primas teóricas, parámetros teóricos
- Implantación, en esta fase tendremos una retroalimentación de la fase inicial donde se proporcionarán los datos reales acerca de parámetros, cantidades de materias primas necesarias, consumibles...
- Seguimiento, fase en la que se debe de realizar el aseguramiento del proceso y trabajar para que este se cumpla
- Mejora y optimización, donde se realizará el análisis de los datos para la mejora y optimización de los procesos.

Interaccionando con los anteriores aparece el ciclo de vida del producto el cual está compuesto de las siguientes fases:

- Diseño, diseño conceptual y de detalle del producto donde obtendremos datos teóricos y simulaciones sobre dimensionado del producto, impacto medioambiental, precio...
- Fabricación, fase en la que se procede a la fabricación del producto, proporcionándonos datos reales sobre energía empleada para la fabricación de cada producto, impacto medioambiental (en la fase de fabricación) de cada producto, costo real de cada producto...
- Logística, donde se procederá a la distribución del producto obteniendo datos acerca del combustible gastado, impacto medioambiental en dicha fase...
- Uso, donde será el propio producto el que recopilará datos acerca de averías, impacto medioambiental, consumibles...
- Logística inversa, una vez finalizada la vida útil del producto se ha de proceder a la recogida del producto para llevarlo al centro de reciclaje de este, obteniendo datos acerca del combustible gastado, impacto medioambiental en dicha fase...
- Reciclaje, fase final donde el producto será reciclado y obtendremos datos acerca del tanto por ciento de reciclabilidad de este.

Englobando todo ello está la propia visión del negocio, donde serán proporcionados datos referidos la contabilidad de la empresa, clientes, financiación...

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El seguimiento en tiempo real del estado del ciclo de vida del producto juega un papel crucial en la optimización de las decisiones. En función de la infraestructura del análisis Big Data, se muestra su estructura en la figura 2. Con dicha estructura, se logra el seguimiento en tiempo real de todo el ciclo de vida del producto. En consecuencia, todo el ciclo de vida del producto es dinámicamente monitoreado y optimizado. La estructura propuesta consta de cuatro fases, detección y adquisición de datos, procesamiento y almacenamiento de datos, desarrollo del modelo, realización de minería de datos y aplicación Big Data (Zhang, 2016).

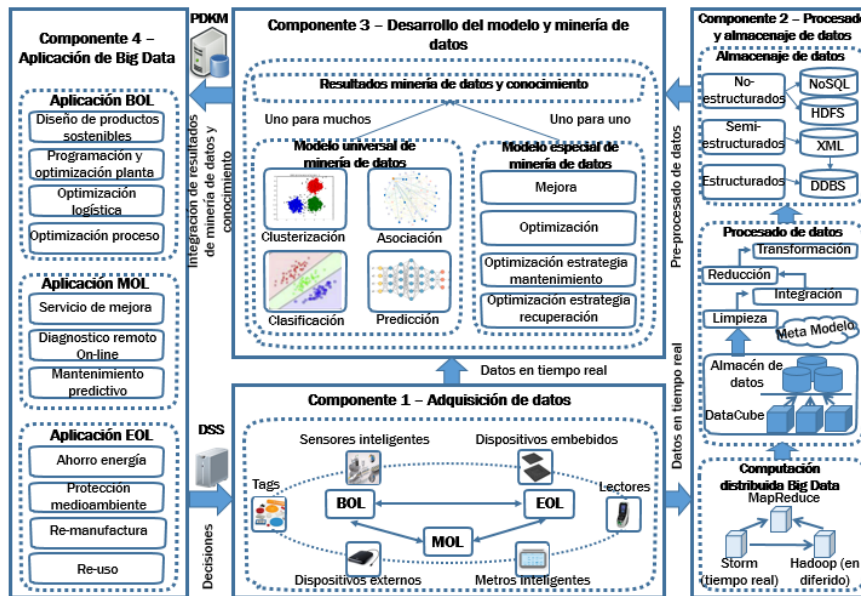


Figura 2: Fases de Big Data (Zhang, 2017).

- Adquisición de datos: Como se muestra en el Componente 1 de la Fig. 2, las configuraciones de los PEID en todo el ciclo de vida son responsables de mejorar la capacidad de detección de objetos detectados (por ejemplo, materiales, máquinas, operadores, productos, etc.) Los objetos detectados son 'inteligentes' por equipar o incrustar los objetos físicos con PEID para lograr un cierto grado de inteligencia. En este marco, los PEID como las etiquetas RFID y los sensores inteligentes se emplean durante todo el ciclo de vida para ayuda a hacer los objetos inteligentes, con la capacidad de identificar el estado de estos en tiempo real de cada etapa del ciclo de vida (por ejemplo, diseño, producción, mantenimiento, reciclaje, etc.) (Zhang, 2017).
- Procesado y almacenamiento de datos: En función de la configuración de los objetos inteligentes, el estado en tiempo real de los recursos de fabricación y productos es capturado durante todo el ciclo de vida (Rachuri, 2012).

El marco informático distribuido para el procesamiento de Big Data, Tormenta y Hadoop se utiliza para procesar el ciclo de vida en tiempo real y no real datos, respectivamente. El motor de cálculo MapReduce proporciona las habilidades de cómputo paralelo para la escala de grande datos del ciclo de vida. Se debe almacenar una gran cantidad de datos del ciclo de vida (Zhang, 2017).

- Computación distribuida Big Data
- Procesado de datos
- Almacenaje de datos
- Desarrollo del modelo y minería de datos: Mediante el análisis Big Data, el modelo de minería de datos es diseñado para extraer el patrón oculto y el conocimiento en tiempo real y Big data histórico del ciclo de vida. Entonces, la base de conocimiento de PLM es desarrollado integrando los resultados minados de varios datos del ciclo de vida. La optimización de PLM se puede lograr solo cuando el conocimiento compartir se logra en todo el ciclo de vida. Por lo tanto, al integrar la base de conocimiento con datos de productos y gestión del conocimiento (PDKM) y DSS, el conocimiento se comparte entre todo el ciclo de vida. Con ello se obtendrá la aplicación de Big Data para la optimización (Zhang, 2017).
 - Aplicación de Big Data en BOL (Beginning of life)
 - Aplicación de Big Data en MOL (Middle of life)
 - Aplicación de Big Data en EOL (End of life)

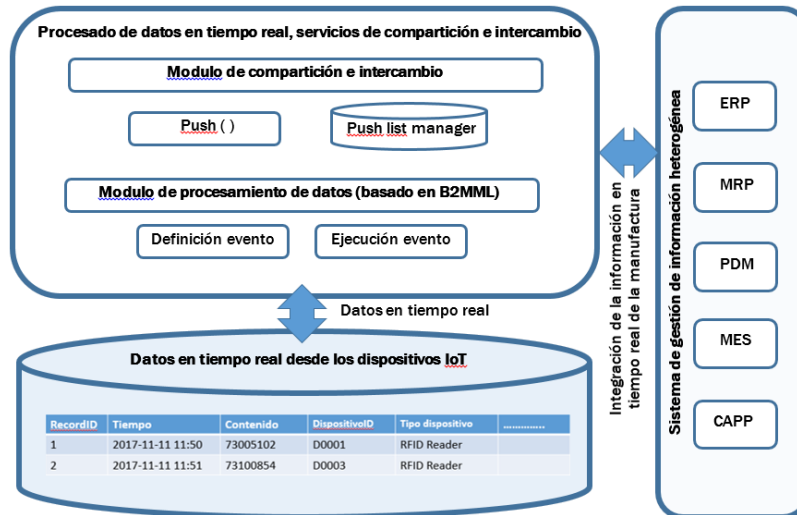


Figura 3: Big Data (Zhang, 2016).

CONCLUSIONES

Para el desarrollo de la Industria 4.0 es necesario la implantación en todas las fases del negocio de Big Data para la recopilación y análisis de todos los datos producidos en toda la unidad de negocio. Por ello, hemos desarrollado un sistema que aporta una visión holística para la aplicación de Big Data tanto en el ciclo de vida del producto, el negocio que conlleva dicho producto, la infraestructura necesaria para su fabricación y el proceso productivo que lo materializa.

Gracias al desarrollo de dicha tecnología seremos capaz de optimizar, predecir y mejorar los distintos comportamientos del producto a lo largo de las fases de su ciclo de vida.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido apoyado Universidad de Sevilla, más concretamente por la Escuela Politécnica Superior, habilitándonos sus instalaciones e infraestructuras además de permitiéndonos el acceso a su conocimiento.

BIBLIOGRAFÍA

- Barranco Fragoso, R. (2012). ¿Qué es Big Data? Todos formamos parte de ese gran crecimiento de datos. DeveloperWorks, 1–11.
- Yin, S., & Kaynak, O. (2015). Big Data for Modern Industry: Challenges and Trends. *Proceedings of the IEEE*, 103(2), 143–146.
- Rachuri, S. (2012). Focus Group : Big Data Analytics for Smart Manufacturing Systems Improving Manufacturing Efficiency through.
- Wang, S., Wan, J., Zhang, D., Li, D., & Zhang, C. (2015). Towards smart factory for Industry 4.0: A self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination. *Computer Networks*, 101, 158–168.
- Zhang, Y., & Tao, F. (2016). *Optimization of Manufacturing Systems Using the Internet of Things*. Academic Press.
- Lu, Y., Morris, K., & Frechette, S. (2016). *Current Standards Landscape for Smart Manufacturing Systems*. National Institute of Standards and Technology, NISTIR (Vol. 8107).
- Zhang, Y., Ren, S., Liu, Y., Sakao, T., & Huisingh, D. (2017). A framework for Big Data driven product lifecycle management. *Journal of Cleaner Production*, 159, 229–240.

P10

EL FACTOR HUMANO EN LA PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES EN LOS NUEVOS ENTORNOS DE TRABAJO DE LA CONSTRUCCIÓN 4.0

Mantilla Muñoz Martín, Aguayo González Francisco, Peralta Álvarez M. Estela. TEP 022 Diseño Industrial e Ingeniería del Proyecto y la Innovación. Departamento de Ingeniería del Diseño. Área de Proyectos de Ingeniería. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Sevilla

RESUMEN

A pesar de los grandes avances alcanzados en prevención de riesgos laborales, hoy en día cuatro personas mueren por minuto a causa de enfermedades profesionales y accidentes de trabajo, muchos de ellos atribuidos a los comportamientos peligrosos de los trabajadores o a sus características individuales.

Para minimizarlos, los campos de aplicación de la prevención de riesgos laborales se han centrado en los últimos años sobre el factor humano, siendo actualmente una de las líneas de estudio e investigación prioritarias de la IV Revolución Industrial.

La industria 4.0 requiere operadores cualificados para el control y la gestión del conjunto de procesos digitalizados, este salto tecnológico debe ser asumido por los trabajadores, no como una barrera o un limitante de sus capacidades, sino como herramienta de apoyo.

Al aprovechar de forma eficiente los sistemas tecnológicos de la cuarta revolución industrial optimizan tiempo, recursos y fomentan un entorno laboral con menos riesgos. En este contexto el presente trabajo analiza las oportunidades existentes del desarrollo de nuevos modelos de prevención y control de los riesgos en los contextos ocupacionales de la Construcción 4.0 desde la ergonomía cognitiva y el error humano.

Palabras clave: *construcción 4.0, factor humano, comportamiento organizacional, personalidad.*

ABSTRACT

Despite the great advances made in the prevention of occupational risks, four people die per minute today due to occupational diseases and work accidents, many of them attributed to the dangerous behavior of workers or their individual characteristics.

To minimize them, the fields of application of the prevention of occupational risks have focused in the last years on the human factor, being currently one of the priority study and research lines of the IV Industrial Revolution.

Industry 4.0 requires qualified operators to control and manage the set of digitized processes, this technological leap must be assumed by the workers, not as a barrier or a limitation of their capabilities, but as a support tool.

By efficiently leveraging the technological systems of the fourth industrial revolution, they optimize time, resources and foster a work environment with fewer risks. In this context, the present work analyzes the existing opportunities for the development of new models for the prevention and control of risks in the occupational contexts of Construction 4.0 from cognitive ergonomics and human error.

Keywords: *construction 4.0, human factor, organizational behavior, personality.*

INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico en el contexto de la construcción 4.0, contribuye al desarrollo de los procesos productivos, trayendo consigo grandes beneficios para las organizaciones, sin embargo, este

escenario de transformación supone la presencia de riesgos que deterioran la salud psicosocial y física de los trabajadores.

Al respecto, existe un escaso contenido bibliográfico, las investigaciones relacionadas al factor humano en su interacción con los sistemas tecnológicos, centran su atención a los beneficios que este salto tecnológico conlleva, mas no se profundiza en los escenarios donde el trabajador tiene que afrontar con su capital intelectual los desafíos de la interacción humano- máquina.

Los objetivos de la Industria 4.0 tienen un impacto directo en las tareas realizadas por los operadores, provocado un aumento considerable de la complejidad y de la cantidad de información de la tarea en los sistemas productivos; por esta razón el error humano debe ser considerado con especial interés en los ámbitos de prevención de riesgos laborales.

El uso de criterios de la ergonomía cognitiva, facilita rediseñar los procesos basados en la relación humano- máquina para conseguir el mayor ajuste, fluidez y flexibilidad entre ambos elementos, facilitando la reducción del error humano. En este contexto se han planteado los siguientes objetivos:

- Estudiar e identificar el error humano a causa de la digitalización de la actividad productiva en la Industria 4.0., en concreto, en la construcción 4.0
- Investigar tendencias actuales de empoderamiento del factor humano en los entornos ocupacionales (construcción 4.0), teniendo en cuenta las posibilidades que otorgan los nuevos facilitadores tecnológicos.
- Estudiar e identificar el diseño de nuevos sistemas de evaluación y control de los riesgos emergentes derivados de la automatización del proceso industrial en entornos constructivos, en su dimensión ergonómica y psicosocial.
- Analizar los riesgos emergentes derivados de las nuevas interfaces (productos inteligentes, *wereables*, interfaces de control robóticas, robots, cobots, etc.) de los entornos de trabajo conectados e inteligentes.
- Identificar y plantear medidas de control de los riesgos emergentes en los sistemas productivos conectados.

La experiencia de transformación de una organización a un entorno altamente automatizado y digitalizado, constituye un proceso de aprendizaje y adaptación constante, la información que adquirimos producto de nuestra interacción con los sistemas de trabajo alimenta nuestro sistema de creencias, juicios y valores, lo cual facilita adaptarnos al contexto cuando este cambia.

Disciplinas como la ergonomía cognitiva estudian la relación entre los sistemas de trabajo y las personas con el objetivo de viabilizar dicha interacción, cuando esta interacción tiene consecuencias psicológicas sobre el trabajador el análisis de esta información nos permitirá modificar o rediseñar el proceso, como medida preventiva.

Muchos empleados perciben la evolución de la tecnología como un evento del cual no forman parte activa, ya que las demandas que estos cambios traen consigo aparentemente están centrados en optimizar el tiempo y los recursos, descapitalizando el talento de los trabajadores.

METODOLOGÍA

Esta investigación de carácter documental considera el desarrollo de nuevos modelos de prevención y control de los riesgos en los contextos ocupacionales de la Construcción 4.0 desde la ergonomía cognitiva y el error humano; partiendo de la identificación y evaluación del error humano y la evaluación de las capacidades digitales de la empresa para generar empoderamiento, lo cual permite mantener actualizada la base de conocimiento para poder adaptar estrategias, marcos de trabajo, guías de implantación, métodos de diseño y evaluación, etc.

Los modelos *Top-down* ('de arriba abajo') y *bottom-up* ('de abajo arriba') son estrategias de procesamiento de información características de las ciencias de la información, especialmente en lo relativo al *software*. Por extensión se aplican también a otras ciencias sociales y exactas, para efectos de este estudio se abordará esta perspectiva como estrategia de empoderamiento de los trabajadores hacia la industria 4.0, para determinar cuál de ellas es la más viable según el contexto.

En el modelo *top-down* se formula un resumen del sistema, sin especificar detalles. Cada parte del sistema se refina diseñando con mayor detalle. Cada parte nueva es entonces redefinida, cada vez con mayor detalle, hasta que la especificación completa es lo suficientemente detallada para validar el modelo.

En contraste, en el diseño *bottom-up* las partes individuales se diseñan con detalle y luego se enlazan para formar componentes más grandes, que a su vez se enlazan hasta que se forma el sistema completo. (Krohn, n.d.)

La transformación tecnológica, implica un cambio de paradigma organizacional, el cual afecta de forma integral a todas las áreas de la compañía y debe estar fundamentado al menos en los siguientes pilares:

- Fábrica digital, haciendo un uso intensivo de tecnologías de información que pongan a disposición de los trabajadores conocimiento relevante.
- Flexibilidad, agilidad extrema de tecnologías y procesos que permita estar en un permanente estado de cambio, adaptándonos rápidamente a necesidades de nuestros clientes en continua transformación.
- Conocimiento profundo de nuestros procesos y tecnologías, extendido a lo largo de toda la organización.
- Personas. Expertos en fabricación y expertos digitales, acostumbrados a enfrentarse a retos en el día a día que permiten a la organización disponer de todo su talento para mejorar.

El cambio es profundo, integral e implica a todos por lo que es necesaria una estrategia *Top Down* impulsada desde la dirección y transmitida a todos los estamentos de la empresa.



Figura 1: Estrategia top down para el empoderamiento digital.

Para aplicar esta estrategia de empoderamiento es importante conocer el grado de madurez digital de la organización para evaluar si existe el compromiso y la identificación de todos con el objetivo de cambio, aquí es esencial conocer si la empresa ha asumido los desafíos tecnológicos en el pasado como oportunidades de mejora y no como obstáculos infranqueables, la capacidad de respuesta que haya tenido en escenarios previos, la evolución de la organización en el tiempo, su filosofía empresarial y el nivel de satisfacción del personal serán un claro referente de su predisposición y capacidad adquirida para incorporar a su proceso productivo o modelo de negocio las ventajas tecnológicas de la cuarta revolución industrial.

Realizar un diagnóstico de la capacidad o el potencial de transformación tecnológica que tiene la empresa mediante la representación de las brechas tecnológicas entre los escenarios reales e ideales ofrece un punto de vista objetivo sobre el contexto y las posibilidades de la empresa, se prioriza el análisis del conocimiento, uso, aplicación y disponibilidad de los siguientes elementos:

Determinar con exactitud la brecha respectiva entre el objetivo y el valor real en el proceso de transformación hacia la industria 4.0 permite trazar una hoja de ruta concreta con un enfoque dirigido, priorizado y estructurado, donde el trabajador sea el elemento sustancial en el diseño de los sistemas para favorecer su máxima eficiencia con el menor riesgo.

El objetivo base de la preventiva es conseguir un índice de cero accidentes y enfermedades profesionales derivados de la interacción hombre- máquina, para medir la efectividad de los modelos de integración implementados, es imprescindible generar indicadores de gestión.

Para comprender la efectividad los modelos de integración Bottom Up y Top Down, se deben analizar los resultados a mediano y largo plazo, tanto en materia financiera, organizativa, indicadores proactivos y reactivos de seguridad, empleando parámetros específicos.

A continuación, se presenta una comparación de cómo se comportan los indicadores de gestión en las metodologías Top Down y Bottom Up, en empresas con actividades económicas similares que adoptan estrategias distintas para la conversión digital y como esto se traduce el comportamientos que constituyen situaciones de riesgo.

1. Costos de desarrollo

BOTTOM UP	TOP DOWN
Los costos de desarrollo tienden a disminuir, puesto que las correcciones son realizadas en etapas tempranas del desarrollo, donde son menos costosas.	Los costos aumentan ya que los errores son corregidos una vez se haya integrado los componentes.

2. Precisión del presupuesto inicial

BOTTOM UP	TOP DOWN
El presupuesto se establece desde el principio. El proyecto se hace más fácil de gestionar. Se pueden utilizar diagramas de Gantt. Reducción de estrés debido a organización en las tareas	Partiendo de la experiencia de procesos de innovación anteriores se estima el presupuesto con poca exactitud. Aumento de estrés por excesiva responsabilidad

3. Comunicación, supervisión e independencia

BOTTOM UP	TOP DOWN
Trabajo colaborativo, y mejor comunicación permite disminuir los errores y hace más fácil la verificación empleando supervisión electrónica. A mayor control, mayor tensión, aumento de estrés y problemas psicosociales	Las personas trabajan de manera independiente, genera una escasa cantidad de datos intercambiados. Las deficiencias en la comunicación pueden afectar a la percepción sobre la claridad de rol. Sin una supervisión constante puede existir tiempo excesivo de trabajo y adicción a tareas

4. Adaptabilidad a nuevos sistemas

BOTTOM UP	TOP DOWN
Es un proceso que requiere de tiempo de entrenamiento y perfeccionamiento de habilidades en donde el error humano puede provocar accidentes.	La conversión digital es una transición que se sustenta por el peso de la experiencia, se cuenta con planes de contingencia producto de escenarios pasados.

5. Tiempo invertido en correcciones

BOTTOM UP	TOP DOWN
El costo de aprendizaje supone mayor tiempo de trabajo, hasta consolidar un sistema funcional El exceso de tiempo de trabajo genera desarraigo familiar, y falta de conciliación entre la vida laboral y familiar.	Esta metodología tiene un mejor comportamiento en este escenario. Reducción de tiempo de trabajo, permite desconcentrar las tareas rutinarias y canalizarlas a otras más creativas, reduciendo los efectos de estrés

6. Tiempo invertido en capacitación

BOTTOM UP	TOP DOWN
Toma menos tiempo, la adquisición de conocimientos permite tomar decisiones en conjunto. Promover apertura y participación en la toma de decisiones enriquece el trabajo.	Se requiere de un cambio en la cultura organizacional, y aprender a trabajar también de manera colaborativa para adaptarse al cambio La toma de decisiones obedece a una cadena de mando.

El desarrollo de una estrategia de transformación 4.0 hacia un modelo de fabricación avanzada es una necesidad que toda organización debe tener en cartera en su plan estratégico. El plan de despliegue puede plantearse en base a un modelo de transformación integral (modelo *Top Down*) o mediante el desarrollo y extensión de células 4.0 en planta (modelo *Bottom Up*).

La decisión sobre qué modelo es el más adecuado en cada caso, depende principalmente del grado de madurez digital de cada organización.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A pesar de que los dispositivos inteligentes suponen una mejora de las condiciones de trabajo (convirtiéndose en facilitadores digitales y tecnológicos, reduciendo la carga de trabajo, proporcionando información de utilidad, automatizando tareas, avisando de incidencias, etc.), suponen un aumento en el tiempo de uso del puesto por parte del trabajador, y puede conllevar a su vez, a la aparición de nuevos riesgos emergentes o no contemplados en las evaluaciones de riesgos y puestos existentes en las empresas dentro de las Mejores Técnicas Disponibles.

Se pueden considerar como riesgos nuevos, ya que el riesgo se origina por procesos que no existían anteriormente, lugares de trabajo, cambios sociales, organizativos y la propia adopción de nuevas tecnologías.

Al facilitar el acceso al trabajo con la tecnología móvil, se producen pocos descansos naturales; aumenta la monotonía, individualiza la responsabilidad y reduce las oportunidades de participación en la toma de decisiones, se intensifica la carga de trabajo. (Kinzel, 2016)

Los denominados riesgos emergentes se entenderán como aquellos que aumentan el número de factores de peligro, que dan lugar al mismo, incrementan el peligro o el número de expuestos.

La OIT ha demostrado que esta carga de estrés afecta más a las mujeres, a los trabajadores de la salud y a los profesionales que hacen uso intensivo de tecnologías.

La centralización de las nuevas tecnologías genera síntomas de estrés de bajo nivel, en escenarios extremos como los penales, donde las personas son clasificadas por su grado de peligrosidad percibido, detonan graves problemas psicosociales y de salud mental. Esas prácticas han llevado al suicidio de trabajadores; se cita el caso de los trabajadores de Foxconn en China (Chan, 2010) como ejemplo de estas prácticas

CONCLUSIONES

Es necesario considerar las diferentes influencias e impactos que la tecnología tiene sobre la seguridad, el confort y el bienestar de los trabajadores en los entornos ocupacionales, en concreto en la construcción 4.0 y proveer mejores soluciones en la gestión de riesgos laborales enfocados a la interacción humano-máquina-tecnología.

La implantación no controlada de la tecnología reduce la autonomía y la privacidad, además mejora los sistemas de control del trabajo y supervisión electrónica, lo cual acelera el ritmo de trabajo, integrando el trabajo a la vida familiar.

El exceso de trabajo es una consecuencia de la implantación de nuevas tecnologías, cuando no existe el control adecuado, incide en la productividad y provoca problemas psicosociales.

La conversión a entornos altamente digitalizados y automatizados, cambia la percepción social sobre el trabajo, reconfiguran los modelos mentales para adaptarse a los cambios.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Sevilla, por brindarme la oportunidad de expandir las fronteras de mi conocimiento, que estarán siempre al servicio de la comunidad.

BIBLIOGRAFÍA

Kinzel, H. (2016). *Industry 4.0 – Where does this leave the Human Factor?*

Krohn, J. (n.d.). Fokus statt Komplexität: Industrie 4.0 in der Produktion umsetzen. Retrieved from https://www.roi.de/fileadmin/ROI_DIALOG/Dialog_Neu/Bilder/Artikel/ROI-Beratung-Consulting-Industrie-4-0-Produktion-Komplexitaet.pdf

Akhtar, P., & Moore, P. (2016). Los efectos psicosociales del cambio tecnológico en los lugares de trabajo contemporáneos y las respuestas de los sindicatos. *Boletín Internacional de Investigación Sindical*, 8(1-2), 113-148.

Forastieri, V. (2016). Prevención de riesgos psicosociales y estrés laboral. *Boletín Internacional de Investigación Sindical*, 8(1-2), 11-37.

Ushakova, T. (2017). Los modelos de la acción normativa de la OIT para regular el trabajo a distancia. El futuro del trabajo: La organización del trabajo y la producción (págs. 1-11). Madrid: Organización Internacional del Trabajo. Obtenido de http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---europe/---ro-geneva/---ilomadrid/documents/article/wcms_548606.pdf

Schroeder, W. (2016). La estrategia alemana industria 4.0: el capitalismo renano en la era de la digitalización. Madrid: Friedrich Ebert Stiftung. Obtenido de https://www.unikassel.de/fb05/fileadmin/datas/fb05/FG_Politikwissenschaften/PSBRD/FES_Madrid_Schroeder_Industria_4.0_ES.pdf

León-Rubio, J. (2017). El factor humano en la industria 4.0: Una nueva lectura de los riesgos psicosociales.

Chan, J. y Pun, N. 2010. «Suicide as protest for the new generation of Chinese migrant workers: Foxconn, Global Capital, and the State», *The Asia-Pacific Journal*, septiembre, vol. 8, ejemplar 37, núm. 2, págs. 1-33. Disponible en <<http://apjjf.org/-Pun-Ngai--Jenny-Chan/3408/article.pdf>>

P11

SOSTENIBILIDAD 4.0: ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA INTEGRADO DEL PRODUCTO INTELIGENTE CONECTADO

de las Heras García de Vinuesa, Ana; Córdoba Roldán, Antonio; Ávila Gutiérrez, María Jesús; Aguayo González, Francisco.

Grupo de Investigación TEPO22: Diseño Industrial e Ingeniería del Proyecto y la Innovación. Departamento de Ingeniería del Diseño. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Sevilla.

RESUMEN

La sostenibilidad se sitúa como un aspecto central en la industria con el desarrollo de la fabricación sostenible donde la tendencia de minimizar los impactos producidos por el desarrollo de productos con el objetivo de crear un ecosistema global sostenible supone el nuevo contexto para los productos de la Cuarta Revolución Industrial (Industria 4.0).

La Industria 4.0 promueve la transformación de las organizaciones productivas del siglo XXI hacia nuevas concepciones de los sistemas de fabricación denominados inteligentes. El nuevo yacimiento de valor es la conectividad entre todos los agentes ciber-físicos (personas, procesos y sistemas) que crean unas nuevas redes de valor inteligentes conectadas en tiempo real, monitorizadas, controladas y organizadas dinámicamente.

Este trabajo propone un nuevo marco de trabajo basado en el paradigma de la economía circular para evaluar la sostenibilidad en tiempo real a través de un análisis del ciclo de vida integrado en las tres dimensiones (economía, ecología y equidad) donde analizar y procesar los datos recogidos en tiempo real en el ciclo de vida del producto junto con aquellos datos provenientes de las bases de datos estandarizadas y el histórico de datos generados en el ciclo de vida del producto a través de una Cloud Manufacturing Platform.

Palabras clave: *Sostenibilidad, Análisis de Ciclo de Vida, Industria 4.0, Conectividad, Plataforma de Manufactura en la Nube.*

ABSTRACT

Sustainability is placed as a central aspect in the industry with the development of sustainable manufacturing where the tendency to minimize the impacts produced by the development of products with the aim of creating a sustainable global ecosystem is the new context for the products of the Fourth Industrial Revolution (Industry 4.0).

Industry 4.0 promotes the transformation of the productive organizations of the 21st century towards new conceptions of manufacturing systems called intelligent. The new value deposit is the connectivity between all the cyber-physical agents (people, processes and systems) that create new smart value networks connected in real time, monitored, controlled and dynamically organized.

This work proposes a new framework based on the circular economy paradigm to evaluate sustainability in real time through an analysis of the life cycle integrated in the three dimensions (economy, ecology and equity) in which to analyze and process the data collected in real time in the life cycle of the product together with data from the standardized databases and the historical data generated in the life cycle of the product through a Cloud Manufacturing Platform.

Keywords: *Sustainability, Life Cycle Assessment, Industry 4.0, Connectivity, Cloud Manufacturing Platform.*

INTRODUCCIÓN

Desde la Revolución industrial, la industria ha evolucionado para desarrollar un sistema que pueda satisfacer la demanda social de productos, cada vez mayor, lo que ha supuesto un impacto sobre el

planeta debido a los efectos que esa producción en masa genera. El modelo de interacción de intercambio de materia entre la naturaleza y la sociedad, basado en la importancia del valor económico, ha hecho que surja una fractura metabólica (Foster, 2000).

Este cambio de pensamiento hacia los intereses económicos hace que exista un exceso de nutrientes creado por la tecno-esfera que no pueden ser asimilados por procesos naturales y, por tanto, generan un impacto que distancia el capital natural y el social (figura 1).

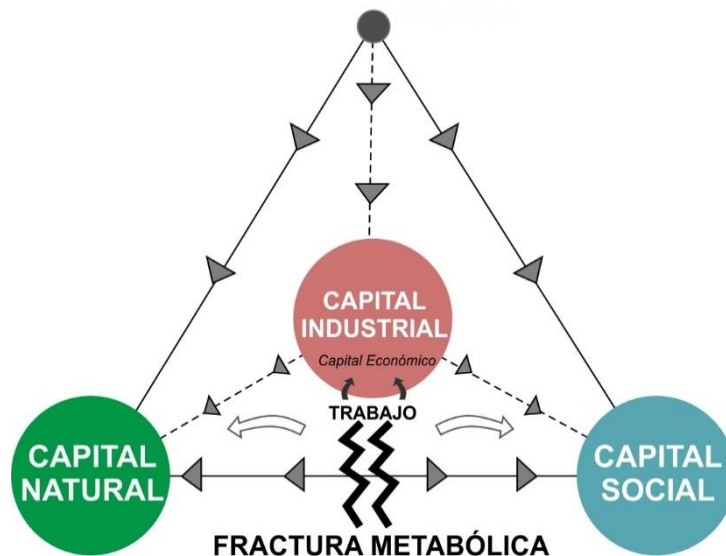


Figura 27: Fractura Metabólica.

El Informe Brundtland (ONU, 1987) marca el comienzo del desarrollo de modos de trabajo más eficientes que permitan satisfacer las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de futuras generaciones. Esta nueva perspectiva se orienta a una visión de eco-eficiencia y eco-efectividad donde reducir o eliminar la fuente de los impactos creando valor es uno de los objetivos para la investigación que serán discutidos en los apartados siguientes.

PARADIGMA SOSTENIBLE Y MARCOS DE TRABAJO

A raíz de esta nueva visión y para la consecución de este nuevo objetivo, mitigar la fractura metabólica y crear un ecosistema global sostenible, surgen una serie de paradigmas que detallan el conjunto de prácticas y saberes que definen una disciplina científica durante un período específico (Thomas, 1962). En la ciencia actual, los paradigmas son vertebrados sobre un conjunto de principios, técnicas y herramientas que estructuran los marcos de trabajo. Estos marcos de trabajo son las estructuras metodológicas y teóricas que son desarrolladas y aplicadas por la comunidad científica y, por tanto, aceptadas como patrón de trabajo.

En cuanto a los paradigmas sostenibles que existen cabe destacar:

- a) Economía Circular (Geissdoerfer, 2017)
- b) Ecología Industrial (Graedel y Allenby, 2002).
- c) Capitalismo Natural (Hawken y Lovins, 2010)
- d) Permacultura (Veteto y Lockyer, 2008)
- e) El Paso Natural (Upham, 2000)

La Economía Circular se presenta como el paradigma de referencia por considerarlo el más significativo para el desarrollo de la sostenibilidad desde la perspectiva industrial en el contexto de proyectos de ingeniería, en atención a su carácter operacional y ecosistémico (Geissdoerfer, 2017; Witjes y Lozano, 2016) [4,9]. En la Economía Circular se aúnan los aspectos ambientales y económicos con un

nuevo modelo de sociedad que utiliza y optimiza stocks y flujos de materiales, energía y residuos y su objetivo es la eficiencia del uso de los recursos.

La figura 2 muestra la propuesta de articulación de la sostenibilidad desde el paradigma de la economía circular en un marco de trabajo sinérgico de ACV y C2C en el contexto de los sistemas ciberfísicos y la digitalización de la industria 4.0.

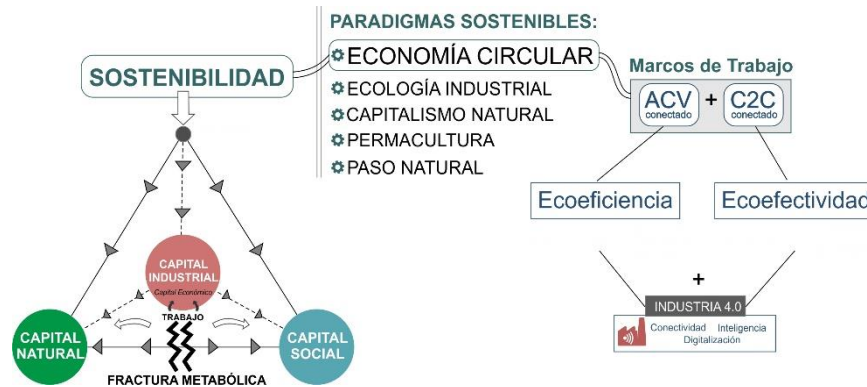


Figura 2: Propuesta marco de trabajo nuevo modelo.

ACV CONECTADO

La eco-eficiencia es parte de la estrategia industrial actual extendida a todas las etapas del ciclo de vida de productos y procesos de fabricación y desarrolla una supervisión exhaustiva de los resultados obtenidos en la fabricación con el objeto de comprobar cómo responden los productos y evaluar sus impactos. El ACV (AENOR, 2006) es el método estándar para la evaluación del comportamiento sostenible de los sistemas (efectos de los impactos) en su dimensión ambiental (UNE-EN ISO 14040 y 14044).

La propuesta de inclusión de la industria 4.0 en el ACV implica:

- La incorporación de la gestión, análisis y procesamiento de datos en tiempo real de todo el ciclo de vida del producto que permita establecer unos modelos basados en Big Data para predecir, mitigar y corregir impactos negativos y ampliar el alcance.
- La incorporación de sensores e inteligencia a lo largo del ciclo de vida del producto ciberfísico hace que se obtengan datos en tiempo real del producto permitiendo la contextualización de la evaluación de los impactos. Gracias al uso de las *Cloud Manufacturing Platform*, se crean nuevas bases de datos de contaminantes, complementarias a las estandarizadas (Ecoinvent, BUWAL,...), alcanzando un nivel mayor de análisis en el contexto de la empresa que posibilita la búsqueda concreta de la causa de los impactos con el objetivo de desarrollar de criterios de actuación particulares para paliar los efectos negativos sobre el medioambiente.
- Supone una mayor objetividad por su adaptación al medio y a la realidad propia de la empresa para el análisis del inventario.
- Permite el desarrollo de una metodología integradora donde se analice la sostenibilidad del producto y proceso de fabricación desde la triple E: impactos ambientales, impactos económicos e impactos sociales (De las Heras et al. 2015).

La figura 3 muestra la inclusión de la digitalización como driver de innovación en la metodología del ACV.

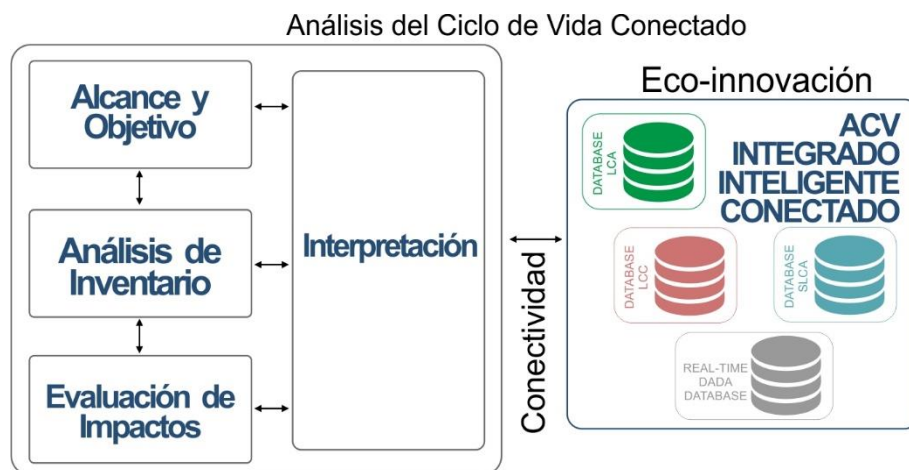


Figura 3: ACV conectado.

C2C CONECTADO

Por su parte, la eco-efectividad surge para aportar soluciones más allá de la eficiencia de los procesos productivos, el objetivo se centra en cerrar el ciclo de vida del producto (sin reducción de calidad) eliminando los efectos (residuos) desde las causas. "De la Cuna a la Cuna" (C2C) (Braungart y McDonough, 2007) incluye producción en lazo cerrado, tecnologías limpias y la revitalización de los sistemas, en definitiva, convertir la tecnosfera en un ecosistema a semejanza de los naturales que reintegre al ser humano en la biosfera con la estrategia orientada a las causas de los impactos. La naturaleza se presenta como maestra, modelo y mentora.

La propuesta de incorporación de la digitalización y la conectividad a C2C implica:

- Conocimiento de la cantidad de energía utilizada en tiempo real.
- Mejora continua y calidad en la sostenibilidad debido a los procesos monitorizados y sensorizados.
- Obtención de información de las causas de los impactos definiéndose como una herramienta necesaria en la toma de decisiones posteriores a la evaluación.
- Fomento de eco-innovaciones eco-efectivas bioinspiradas en los ciclos cerrados de la naturaleza en cualquier punto del análisis de los procesos.
- Fomento no solo la minimización de los impactos sino su completa eliminación siguiendo el concepto de Biomimetismo.
- Favorecer la robustez y la resiliencia desde la conectividad.

La figura 4 muestra la inclusión de la digitalización como driver de innovación dentro del marco de trabajo C2C de forma fractalizada. La 3E proporciona una fractalización del análisis de los procesos en unidades más pequeñas y manejables. Éstas pueden ser reproducidas con el nivel de análisis requerido en cada proceso. Éstos están caracterizados por las entradas, salidas, recursos y control, de forma que modelen la información de cada uno en base a los 4 criterios de C2C.

Así mismo, el nivel de análisis puede ser *bottom-up* y *top-down*, de forma que los datos que se manejan en tiempo real se almacenen, procesen y analicen en una CDMngP con el objetivo de desarrollar un ciclo de vida de producto en ciclo cerrado según el paradigma sostenible bajo la economía circular

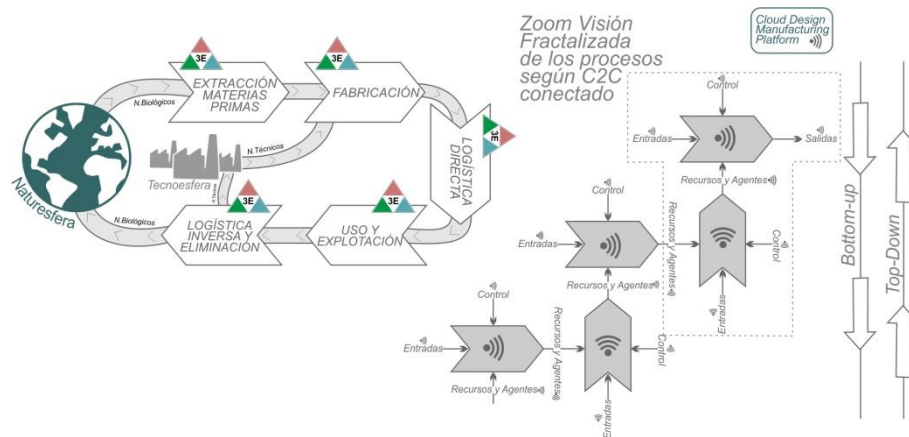


Figura 4: C2C conectado.

CONCLUSIONES

Este nuevo marco de trabajo supone una evolución en cuanto al alcance de ACV y C2C convencional. Gracias al potencial de nuevas posibilidades ligadas a la conectividad e inteligencia que aporta la industria 4.0 y la aparición de los facilitadores digitales, se ofrece una estructura de proceso de diseño y desarrollo de smart connected product que incorpora funciones reales o funciones virtuales del producto. Esto supone la posibilidad de incorporar nueva información del producto y gestionar los datos sostenibles dentro de un modelo de datos de producto bajo la ISO 10303 (STEP) en un P&PLM.

Derivado de esta nueva perspectiva, se encuentra en desarrollo el modelo de evaluación de la sostenibilidad de productos y procesos de fabricación: el Modelo ADeNómico. Se trata de una investigación conjunta por parte del grupo de investigación TEP022 con el grupo de investigación TEP027 de la Universidad de Cádiz donde materializar un entorno de modelado, simulación y optimización para la evaluación de la sostenibilidad 4.0 orientado a analizar los efectos y las causas de los impactos durante el proceso de diseño y desarrollo del producto, de forma que la sensorización de la Industria 4.0 se lleve a cabo en el producto y en procesos de fabricación.

Este escenario supone una mejora hacia la sostenibilidad 4.0 y proporcionará nueva información y datos acerca del impacto de las actividades industriales, favoreciendo la fabricación limpia y las estrategias de la Economía Circular para el cierre de ciclos en las factorías inteligentes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen la colaboración al grupo de investigación TEP027 Ingeniería y tecnologías de materiales y fabricación de la Universidad de Cádiz, por la oportunidad de comenzar esta investigación conjunta incluyendo la posibilidad de trabajo de campo gracias a los equipos de la Escuela Superior de Ingeniería del Campus de Puerto Real.

BIBLIOGRAFÍA

- AENOR, 2006. *Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia*. UNE-EN ISO 14040:2006. Madrid:AENOR.
- Braungart, M; McDonough, W; Bollinger, A. (2007). Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions – a strategy for eco-effective product and system design. *Journal of Cleaner Production*, vol. 15, p. 1337-1348. DOI10.1016/j.jclepro.2006.08.003
- De las Heras García de Vinuesa, A; Marcos Bárcena, M; Aguayo González, F; Córdoba Roldán, A. (2015). *Incorporación de la sostenibilidad y ACV en datos de producto bajo estándar ISO 10303 y PLM*. Actas 19th International Congress on Project Management and Engineering, (Granada, 15-17 de Julio de 2015), p. 1003-1016.

- Foster, J. B. (2000). *Marx's Ecology: Materialism and Nature*. 1a ed. Londres: Monthly Review Press. ISBN 9781583670125
- Geissdoerfer, M; Savaget, P; Bocken, N.M.P. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm?. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 143, p. 757-768. DOI:10.1016/j.jclepro.2016.12.048
- Graedel, T; Allenby, B. (2002). *Industrial Ecology*. 1a ed. Estados Unidos: Prentice Hall. ISBN 9780130467133
- Hawken, P; Lovins, A.B. (2010). *Natural Capitalism: The Next Industrial Revolution*. 10a ed. Estados Unidos: Little, Brown & Company. ISBN 978-1844071708
- ONU. (1987). *Por common Future: Brundtland Report*. Oxford University Press.
- Thomas, K. (1962). *La estructura de las revoluciones científicas*. 1a ed. México: Fondo de Cultura Económica. ISBN 9788437505794
- Upham, P. (2000). An assessment of The Natural Step theory of sustainability. *Journal of Cleaner Production*, vol. 8, p. 445-454. DOI:10.1016/S0959-6526(00)00012-3
- Veteto, J.R, Lockyer J. (2008) Environmental Anthropology Engaging Permaculture: Moving Theory and Practice Toward Sustainability. *Culture & Agriculture*. vol. 30, p. 47-58. DOI:10.1111/j.1556-486X.2008.00007.x
- Witjes S, Lozano R. (2016). Towards a more Circular Economy: Proposing a framework linking sustainable public procurement and sustainable business models. *Resources, Conservation and Recycling*. vol. 112, p. 37-44. DOI:10.1016/j.resconrec.2016.04.015

P12

PROPUESTA DE FABRICACIÓN FRACTAL DISTRIBUIDA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE LA INDUSTRIA AERONAÚTICA EN INDUSTRIA 4.0

Castro Hormigo, F. Javier; Peralta Álvarez, M. Estela; Aguayo González, Francisco. Grupo de investigación TEP022. Departamento de Ingeniería del Diseño. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Sevilla.

RESUMEN

Los programas de Horizonte 2020 y el conjunto de investigaciones propuestas a nivel internacional relacionadas con la Cuarta Revolución Industrial y la Industria 4.0 reflejan el interés y la necesidad de ampliar el alcance del diseño, simulación, optimización, así como la ejecución y gestión de los sectores de fabricación en los sistemas productivos, desde el punto de vista de la digitalización y automatización, para el alcance de los objetivos de la sostenibilidad: (1) el control y prevención de la contaminación; (2) la reducción del impacto y del daño ambiental y social; y (3) el aseguramiento de la viabilidad técnica, económica y de calidad de los resultados. La propuesta de nuevas formas organizativas (entre ellas la organización fractal), así como nuevos entornos de fabricación digitalizados con nuevas tecnologías conectadas (facilitadores digitales y tecnológicos), son una oportunidad para las actividades de I+D+i en el área de conocimiento de la fabricación en todos los sectores industriales, entre ellos, el de la industria aeronáutica.

Palabras clave: *fabricación distribuida, optimización de la sostenibilidad, fabricación fractal, industria 4.0.*

ABSTRACT

The programs Horizon 2020 and the set of internationally proposed research areas regarding the Fourth Industrial Revolution and Industry 4.0 reflect the interest and need to extend the scope of design, simulation, optimization, as well as the execution and management of manufacturing sectors in production systems from the point of view of digitalization and automation to achieve the objectives of sustainability: (1) controlling and preventing pollution; (2) reducing the impact as well as environmental and social damage; and (3) assuring technical, economic and quality viability of the results. The proposal of new organizational forms (including fractal organization), as well as new digitalized manufacturing environments with new connected technologies (digital and technological facilitators) are opportunities for R+D+i activities in the knowledge area of manufacturing in all industrial sectors, including the aeronautical industry.

Keywords: *distributed manufacturing, sustainability optimization, aeronautical, fractal manufacturing, industry 4.0.*

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Las actividades industriales han sido desarrolladas teniendo en cuenta 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. La evolución hasta el momento se ha centrado en un conjunto de características adaptativas según las necesidades demandadas: coste, calidad, variedad o responsabilidad. Actualmente, para solucionar el problema, se incluyen requerimientos sostenibles. Como último avance en la perspectiva, se incorporan, para conseguir todos los requerimientos anteriores, la digitalización y automatización con los desarrollos de la Industria 4.0 (ver Figura 1).

Masa > Lean > Flexible > Reconfigurable > Sostenible > FABRICACIÓN 4.0

En los últimos trabajos científicos se pone de manifiesto que los fundamentos teóricos, modelos o investigaciones experimentales no alcanzan soluciones eficientes para implementar la sostenibilidad en

fabricación. Esta situación está ligada a la gestión de la complejidad: el elevado número de estrategias, actividades, procesos, información y datos, la multi-dimensionalidad de los parámetros de control y los requerimientos de rendimiento a tener en cuenta, hacen que la integración equilibrada de las tres dimensiones sostenibles (economía, ecología y equidad) no sea todavía viable ni técnica ni económicamente. Los sistemas de fabricación fractales son una solución para esta situación.



Figura 28: Industria 4.0: contextos para industrias inteligentes.

Partiendo del estado del arte, la evolución de los sistemas avanzados de fabricación distribuida y de los sistemas de fabricación fractal sostenible SF/FS, teniendo en cuenta el auge que en los últimos años está teniendo la Industria 4.0 a través del inicio de la Cuarta Revolución Industrial en todos los sectores de actividad, entre los que destaca la industria aeronáutica, cabe plantearse: (1) las oportunidades y retos para la industria aeronáutica en las actividades de I+D+i en las próximas décadas, para adaptarse a los nuevos enfoques y perspectivas de la Industria 4.0, (2) cuáles son los facilitadores tecnológicos y digitales más idóneos para introducir de forma eficiente y eficaz los objetivos de la sostenibilidad en los sistemas de fabricación aeronáuticos, (3) la forma de configurar dicha integración con mínima complejidad, como solución al rápido aumento de la incorporación de nuevas tecnologías, sistemas TIC y digitalización-automatización y (4) qué marcos de trabajo y metodologías disponibles permiten llevar a cabo estos objetivos teniendo en cuenta los requerimientos de los sistemas de fabricación de la industria aeronáutica.

Los sistemas fractales aeronáuticos se orientarán a la mejora continua de resultados a través de la co-evolución y adaptación al medio y contexto, ya que se encuentran, como se ha comentado anteriormente, en un estado sub-óptimo, por lo que intentarán de forma continua y en tiempo real optimizar sus resultados. Es por lo que cada sistema fractal artificial deberá regular los criterios relacionados con la formación de la estructura, teniendo en cuenta los objetivos relacionados con el producto, procedimientos, materiales, requerimientos de información y comunicación, flujo material, personal, requerimientos de aprendizaje y experiencia (ver Figura 2). El paradigma fractal es un marco de trabajo óptimo para la concepción de sistemas empresariales y de fabricación que tengan que desenvolverse en ambientes de negocio turbulentos, otorgando agilidad y viabilidad, a través de un balance entre complejidad y simplicidad (simplejidad) en la gestión organizacional y operaciones. Permite la gestión de la variedad requerida para el control de la complejidad de los sistemas.

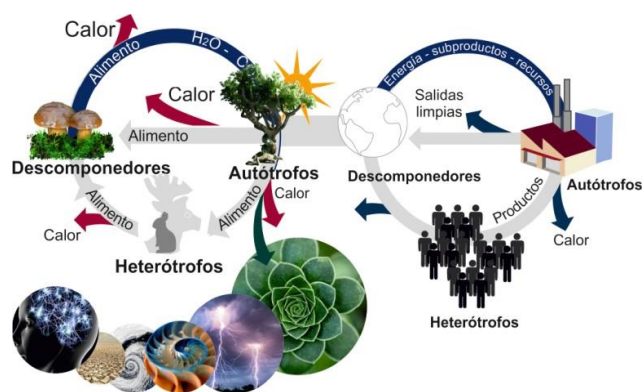


Figura 29: Analogía sistema natural - sistema industria de fabricación.

METODOLOGIA

Los primeros sistemas de fabricación fractal surgen como solución de la complejidad de organización de los sistemas de fabricación inteligentes en las organizaciones. El modelo 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 auto-optimizable y auto-configurable para sobrevivir a los continuos cambios (gubernamentales, mercado, demanda social, competencia, etc). Además, otros estudios amplían la teoría fractal introduciendo la sostenibilidad en la fabricación fractal desde el enfoque de la Industria 4.0 proponiendo Sistemas de Fabricación Fractal Sostenible (SF|FS) que, además de los principios propuestos por Warnecke y desarrollados en sistemas de fabricación convencionales por Ryu, proponen los SF|FS como sistemas ciberfísicos (CPS) que cumplan con un conjunto de objetivos de ejecución de su operación eficiente (ver Figura 3):

- **AUTO-SIMILARIDAD:** los sistemas fractales son auto-similares; su arquitectura se crea a partir de la división del objetivo global en diferentes unidades (autónomas) con su propia función o servicio al sistema; se caracterizan por una misma configuración y estructura e interactúan a partir de relaciones de cooperación.
- **ORIENTACIÓN AL OBJETIVO:** los objetivos del sistema global (macroscópico) que surgen de los objetivos de los fractales individuales (elementos microscópicos) se encuentran libres de contradicciones; todos los fractales, aunque autónomos, deben estar al servicio de alcanzar el objetivo global de la organización.
- **AUTO-ORGANIZACIÓN:** los fractales pueden re-estructurar, regenerar y eliminarse según el nivel de alcance de su objetivo
- **DINAMISMO Y VITALIDAD:** los fractales se encuentran unidos a través de una red de información y comunicaciones eficiente que intercambia datos en tiempo real. Ellos mismos determinan la naturaleza y la forma de acceso a los datos y permiten controlar el rendimiento del fractal, objeto de análisis y evaluación constante para la optimización y la mejora continua.
- **GESTIÓN DE LA COMPLEJIDAD:** en el intercambio de metabolismo industrial (información, materia y energía) del fractal
- **COMPORTAMIENTO SOSTENIBLE (EFICIENTE Y EFICAZ):** reducción o eliminación del impacto y daño integral (3E) económico, social y ambiental



Figura 30: Principios de organización fractal.

Uno de los principales objetivos será la implementación real de los resultados en un entorno productivo aeronáutico con sedes en España, Francia y Alemania. Se tendrán en cuenta para ello las últimas tecnologías del sector, técnicas de implementación y el actual estado del arte:

1. Fabricación sostenible en la industria aeronáutica. Oportunidades y retos

- a. Marco normativo
- b. MTD, MPA y T+L
- c. Oportunidades y líneas de investigación emergentes

2. Fabricación sostenible

- a. I+D+i en fabricación sostenible
- b. Industria 4.0, EFFRA y IMS2020
- c. Sistemas de gestión de la complejidad
- d. Oportunidades desde los CPS

3. Fabricación fractal sostenible

- a. Marcos de trabajo disponibles
- b. Sistemas fractales de fabricación convencionales y SF|FS
- c. Metodologías, técnicas y herramientas

Los sistemas de fabricación distribuidos pueden ser definidos a diferentes escalas, sobre las cuales organizar la red de información, instalaciones, infraestructura y otros recursos necesarios para implementar la fase de fabricación y distribución de productos y servicios. La división de la ingeniería de fabricación desde una perspectiva multinivel (ver Figura 4) permite organizar publicaciones para recoger el estado del arte de los sistemas fractales de fabricación.

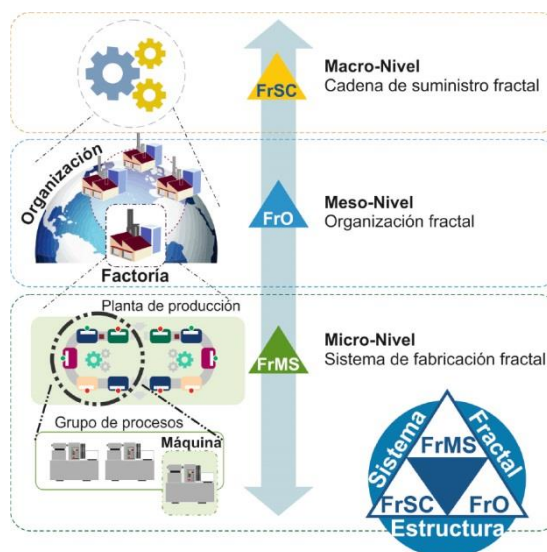


Figura 31: Niveles de estudio para la fractalización.

Las siguientes afirmaciones recogen la situación en la que se encuentra la integración de la sostenibilidad en el paradigma fractal:

- La analogía fractal-organizacional planteada por Warnecke no incorpora principios de sostenibilidad.
- En el estado actual del paradigma fractal, la sostenibilidad no es un objetivo.
- Salvo contadas excepciones, el conjunto de trabajos se enfoca a la dimensión económica exclusivamente, no incorporando ningún criterio de sostenibilidad ambiental ni social.
- Por otro lado, existe la necesidad de encontrar un paradigma que gestione la complejidad introducida por la sostenibilidad en las prácticas organizacionales, en concreto, en la ingeniería de fabricación.
- Desde diferentes ámbitos de estudio del desarrollo sostenible (incluida la ingeniería de fabricación), para la incorporación de la creación de valor sostenible finalmente se ha adoptado por parte de la comunidad científica y técnica un modelo auto-similar denominado Triple Bottom Line, donde se fractalizan las tres dimensiones económica, social y ambiental.
- En conclusión, el paradigma fractal permite la concepción de sistemas que pueden gestionar gran nivel de complejidad sin importar las variables o criterios a tener en cuenta (económicos, financieros, relacionales, tecnológicos...) por lo que es el adecuado para incorporar a los requerimientos convencionales de los sistemas (relacionados hasta el momento con la dimensión económica), las otras dos dimensiones ecológica y social, proporcionando un marco para la sostenibilidad integral.

Partiendo de lo expuesto y teniendo en cuenta el auge que en los últimos años está teniendo la Industria 4.0 a través del inicio de la Cuarta Revolución Industrial en todos los sectores de actividad, y entre ellos, la industria aeronáutica cabe plantearse (1) las oportunidades y retos para la industria aeronáutica en las actividades de I+D+i en las próximas décadas para adaptarse a los nuevos enfoques y perspectivas de la Industria 4.0, (2) cuáles son los facilitadores tecnológicos y digitales más idóneos para introducir de forma eficiente y eficaz los objetivos de la sostenibilidad en los sistemas de fabricación aeronáuticos, (3) la forma de configurar dicha integración con mínima complejidad, como solución al rápido aumento de la incorporación de nuevas tecnologías, sistemas TIC y digitalización-automatización y (4) qué marcos de trabajo y metodologías disponibles permiten llevar a cabo estos objetivos teniendo en cuenta los requerimientos de los sistemas de fabricación *lean* de la industria aeronáutica.

Para ello, el objetivo general de: (1) Incorporar el modelo fractal para la fabricación sostenible en la industria aeronáutica y (2) proponer un marco de referencia para el diseño, configuración y control de los sistemas de fabricación distribuida utilizando los sistemas fractales sostenibles de fabricación con mínima complejidad y sostenibilidad integrada.

Los resultados esperados, aplicables a la industria aeronáutica, deben incluir la configuración de CPS (sistemas ciber-físicos), que permitan reducir la complejidad y optimizar la organización de los sistemas de fabricación aprovechando los nuevos enfoques de automatización y digitalización, que serán desarrollados desde las líneas de trabajo de la Industria 4.0 (IoT, Big Data o predicción de datos). También facilitarán la configuración de diferentes niveles para el sistema de fabricación completo (cadena de suministro, organización, planta, línea, proceso, ...), en forma de entidades fractales caracterizadas por integrar los requerimientos sostenibles y *lean* necesarios, bajo criterios de mínima complejidad.

AGRADECIMIENTOS

A los directores de la Tesis y a mi familia.

BIBLIOGRAFÍA

- Attar, A. & Loukik L. (2014). Fractal Manufacturing System–Intelligent Control of Manufacturing Industry. *International Journal of Engineering Development and Research*. Volumen 2, (número 2). Páginas 1814–1816.
- Farjoun, M. & Levin, M. (2011). A Fractal Approach to Industry Dynamism. *Organization Studies*. Volumen 32, (número 6). Páginas 825-851.

- Kwangyeol, R. (2003). *Fractal-based Reference Model for Self-reconfigurable Manufacturing Systems*. Pohang, China. PhD Dissertation. Pohang University of Science and Technology.
- Lasi, H., Fettke, H. & Kemper, H. (2014). Industry 4.0. *Business and Information Systems Engineering*. Volumen 6, (número 4). Páginas 239-242.
- Mrugalska, B. & Wyrwicka, M. (2017). Towards Lean Production in Industry 4.0. *Procedia Engineering*. Volumen 182, (número 1). Páginas 466-473.
- Peralta, M.E. (2016). *Modelado, simulación y optimización de la sostenibilidad de procesos de fabricación para su integración multiescala y multinivel. Aplicación a células de mecanizado*. Cádiz, España. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz.
- Peralta Álvarez, M.E., Marcos Bárcena, M. & Aguayo González, F. (2016). On the sustainability of machining processes. Proposal for a unified framework through the triple bottom-line from an understanding review. *Journal of Cleaner Production*. Volumen 142, (número 4). Páginas 3890-3904.
- Peralta, M.E. (2015). The Fractal Frontier: Sustainable Development Trilogy. *Procedia Engineering*. Volumen 132, (número 5). Páginas 926-933.
- Prisecaru, B., Nicolescu, D., Persideanu, V. & Moise, A. (2012). The process approach as a fractal structure for continuous improvement of the organizations. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*. Volumen 74, (número 3). Páginas 253-266.
- Seliger, G., Khraisheh, M. & Jawahir, I.S. (2011). *Advances in Sustainable Manufacturing*. Berlín, Alemania: Springer Berlin Heidelberg.
- Shin, M., Jungtae, M. & Mooyoung J. (2009). Self-evolution framework of manufacturing systems based on fractal organization. *Computers & Industrial Engineering*. Volumen 56, (número 3). Páginas 1029–1039.
- Sauter, R., BODE, M. & Kittelberger, D. (2015). *How Industry 4.0 is changing how we manage value creation*. Stuttgart, Alemania : White Paper.
- Tirpak, T., Daniel, S., John D. J.D. LaLonde, J. & Davis, W. (1992). A note on a fractal architecture for modelling and controlling flexible manufacturing systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* [en línea]. Volumen 22, (número 3). Páginas 564-567.

P13

EL FACTOR HUMANO EN LA PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES EN LOS NUEVOS ENTORNOS DE TRABAJO DE LA CONSTRUCCIÓN 4.0

Mantilla Muñoz Martín, Aguayo González Francisco, Peralta Álvarez M. Estela.

TEP 022 Área de Proyectos de Ingeniería. Departamento de Ingeniería del Diseño. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Sevilla.

RESUMEN

A pesar de los grandes avances alcanzados en prevención de riesgos laborales, hoy en día cuatro personas mueren por minuto a causa de enfermedades profesionales y accidentes de trabajo, muchos de ellos atribuidos a los comportamientos peligrosos de los trabajadores o a sus características individuales.

Para minimizarlos, los campos de aplicación de la prevención de riesgos laborales se han centrado en los últimos años sobre el factor humano, siendo actualmente una de las líneas de estudio e investigación prioritarias de la IV Revolución Industrial.

La industria 4.0 requiere operadores cualificados para el control y la gestión del conjunto de procesos digitalizados, este salto tecnológico debe ser asumido por los trabajadores, no como una barrera o un limitante de sus capacidades, sino como herramienta de apoyo.

Al aprovechar de forma eficiente los sistemas tecnológicos de la cuarta revolución industrial optimizan tiempo, recursos y fomentan un entorno laboral con menos riesgos. En este contexto el presente trabajo analiza las oportunidades existentes del desarrollo de nuevos modelos de prevención y control de los riesgos en los contextos ocupacionales de la Construcción 4.0 desde la ergonomía cognitiva y el error humano.

Palabras clave: *construcción 4.0, factor humano, comportamiento organizacional, personalidad.*

ABSTRACT

Despite the great advances made in the prevention of occupational risks, four people die per minute today due to occupational diseases and work accidents, many of them attributed to the dangerous behavior of workers or their individual characteristics.

To minimize them, the fields of application of the prevention of occupational risks have focused in the last years on the human factor, being currently one of the priority study and research lines of the IV Industrial Revolution.

Industry 4.0 requires qualified operators to control and manage the set of digitized processes, this technological leap must be assumed by the workers, not as a barrier or a limitation of their capabilities, but as a support tool.

By efficiently leveraging the technological systems of the fourth industrial revolution, they optimize time, resources and foster a work environment with fewer risks. In this context, the present work analyzes the existing opportunities for the development of new models for the prevention and control of risks in the occupational contexts of Construction 4.0 from cognitive ergonomics and human error.

Keywords: *construction 4.0, human factor, organizational behavior, personality.*

INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico en el contexto de la construcción 4.0, contribuye al desarrollo de los procesos productivos, trayendo consigo grandes beneficios para las organizaciones, sin embargo, este escenario de transformación supone la presencia de riesgos que deterioran la salud psicosocial y física de los trabajadores.

Al respecto, existe un escaso contenido bibliográfico, las investigaciones relacionadas al factor humano en su interacción con los sistemas tecnológicos, centran su atención a los beneficios que este salto tecnológico conlleva, mas no se profundiza en los escenarios donde el trabajador tiene que afrontar con su capital intelectual los desafíos de la interacción humano- máquina.

Los objetivos de la Industria 4.0 tienen un impacto directo en las tareas realizadas por los operadores, provocado un aumento considerable de la complejidad y de la cantidad de información de la tarea en los sistemas productivos; por esta razón el error humano debe ser considerado con especial interés en los ámbitos de prevención de riesgos laborales.

El uso de criterios de la ergonomía cognitiva, facilita rediseñar los procesos basados en la relación humano- máquina para conseguir el mayor ajuste, fluidez y flexibilidad entre ambos elementos, facilitando la reducción del error humano. En este contexto se han planteado los siguientes objetivos:

- Estudiar e identificar el error humano a causa de la digitalización de la actividad productiva en la Industria 4.0., en concreto, en la construcción 4.0
- Investigar tendencias actuales de empoderamiento del factor humano en los entornos ocupacionales (construcción 4.0), teniendo en cuenta las posibilidades que otorgan los nuevos facilitadores tecnológicos.
- Estudiar e identificar el diseño de nuevos sistemas de evaluación y control de los riesgos emergentes derivados de la automatización del proceso industrial en entornos constructivos, en su dimensión ergonómica y psicosocial.
- Analizar los riesgos emergentes derivados de las nuevas interfaces (productos inteligentes, *wereables*, interfaces de control robóticas, robots, cobots, etc.) de los entornos de trabajo conectados e inteligentes.
- Identificar y plantear medidas de control de los riesgos emergentes en los sistemas productivos conectados.

La experiencia de transformación de una organización a un entorno altamente automatizado y digitalizado, constituye un proceso de aprendizaje y adaptación constante, la información que adquirimos producto de nuestra interacción con los sistemas de trabajo alimenta nuestro sistema de creencias, juicios y valores, lo cual facilita adaptarnos al contexto cuando este cambia.

Disciplinas como la ergonomía cognitiva estudian la relación entre los sistemas de trabajo y las personas con el objetivo de viabilizar dicha interacción, cuando esta interacción tiene consecuencias psicológicas sobre el trabajador el análisis de esta información nos permitirá modificar o rediseñar el proceso, como medida preventiva.

Muchos empleados perciben la evolución de la tecnología como un evento del cual no forman parte activa, ya que las demandas que estos cambios traen consigo aparentemente están centrados en optimizar el tiempo y los recursos, descapitalizando el talento de los trabajadores.

METODOLOGÍA

Esta investigación de carácter documental considera el desarrollo de nuevos modelos de prevención y control de los riesgos en los contextos ocupacionales de la Construcción 4.0 desde la ergonomía cognitiva y el error humano; partiendo de la identificación y evaluación del error humano y la evaluación de las capacidades digitales de la empresa para generar empoderamiento, lo cual permite mantener actualizada la base de conocimiento para poder adaptar estrategias, marcos de trabajo, guías de implantación, métodos de diseño y evaluación, etc.

Los modelos *Top-down* ('de arriba abajo') y *bottom-up* ('de abajo arriba') son estrategias de procesamiento de información características de las ciencias de la información, especialmente en lo relativo al *software*. Por extensión se aplican también a otras ciencias sociales y exactas, para efectos de este estudio se abordará esta perspectiva como estrategia de empoderamiento de los trabajadores hacia la industria 4.0, para determinar cuál de ellas es la más viable según el contexto.

En el modelo *top-down* se formula un resumen del sistema, sin especificar detalles. Cada parte del sistema se refina diseñando con mayor detalle. Cada parte nueva es entonces redefinida, cada vez con mayor detalle, hasta que la especificación completa es lo suficientemente detallada para validar el modelo.

En contraste, en el diseño *bottom-up* las partes individuales se diseñan con detalle y luego se enlazan para formar componentes más grandes, que a su vez se enlazan hasta que se forma el sistema completo. (Krohn, n.d.)

La transformación tecnológica, implica un cambio de paradigma organizacional, el cual afecta de forma integral a todas las áreas de la compañía y debe estar fundamentado al menos en los siguientes pilares:

- Fábrica digital, haciendo un uso intensivo de tecnologías de información que pongan a disposición de los trabajadores conocimiento relevante.
- Flexibilidad, agilidad extrema de tecnologías y procesos que permita estar en un permanente estado de cambio, adaptándonos rápidamente a necesidades de nuestros clientes en continua transformación.
- Conocimiento profundo de nuestros procesos y tecnologías, extendido a lo largo de toda la organización.
- Personas. Expertos en fabricación y expertos digitales, acostumbrados a enfrentarse a retos en el día a día que permiten a la organización disponer de todo su talento para mejorar.

El cambio es profundo, integral e implica a todos por lo que es necesaria una estrategia *Top Down* impulsada desde la dirección y transmitida a todos los estamentos de la empresa.



Figura 1: Estrategia top down para el empoderamiento digital.

Para aplicar esta estrategia de empoderamiento es importante conocer el grado de madurez digital de la organización para evaluar si existe el compromiso y la identificación de todos con el objetivo de cambio, aquí es esencial conocer si la empresa ha asumido los desafíos tecnológicos en el pasado como oportunidades de mejora y no como obstáculos infranqueables, la capacidad de respuesta que haya tenido en escenarios previos, la evolución de la organización en el tiempo, su filosofía empresarial y el nivel de satisfacción del personal serán un claro referente de su predisposición y capacidad adquirida para incorporar a su proceso productivo o modelo de negocio las ventajas tecnológicas de la cuarta revolución industrial.

Realizar un diagnóstico de la capacidad o el potencial de transformación tecnológica que tiene la empresa mediante la representación de las brechas tecnológicas entre los escenarios reales e ideales ofrece un punto de vista objetivo sobre el contexto y las posibilidades de la empresa, se prioriza el análisis del conocimiento, uso, aplicación y disponibilidad de los siguientes elementos:

- | | |
|-------------------------------------|---|
| • Estrategia | • <i>Big data</i> |
| • Equipos inteligentes | • Modelos digitales |
| • Soporte del operador | • Planificación de recursos empresariales |
| • Estructura del movimiento digital | • Cultura organizacional |
| • Logística inteligente | • Liderazgo |
| • Infraestructura | • Cualificación |
| • Trazabilidad | • Hoja de ruta |
| • Consistencia de los datos | |

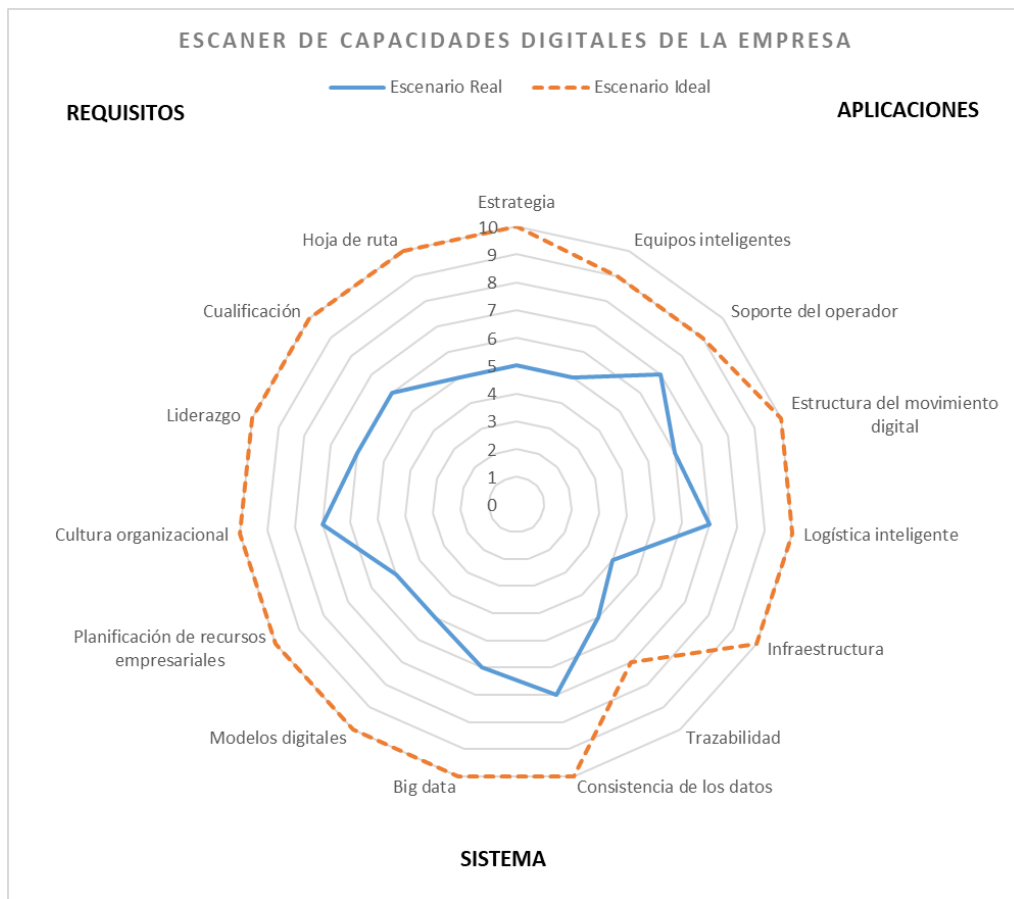


Figura 2: Escáner de capacidades digitales; [ilustración]; elaboración propia.

En caso de no disponer de un alineamiento claro, es recomendable no arrancar una iniciativa integral de transformación digital hacia la industria 4.0 sino, iniciar el proceso con proyectos.

El concepto *Bottom Up* como modelo de integración hacia la industrial 4.0, se lo concibe como, CÉLULA 4.0, aquí se concentran todos los elementos de transformación desde las bases hacia un modelo de fabricación avanzada, permite el desarrollo de una iniciativa avanzada 4.0 sin el esfuerzo de concienciación para el arranque de un proceso integral; genera una semilla que puede ser rápidamente extendida a otras áreas obteniendo un rápido retorno; y conforma los miembros necesarios para preparar a la organización para un proceso global de transformación (*Top Down*).

Determinar con exactitud la brecha respectiva entre el objetivo y el valor real en el proceso de transformación hacia la industria 4.0 permite trazar una hoja de ruta concreta con un enfoque dirigido, priorizado y estructurado, donde el trabajador sea el elemento sustancial en el diseño de los sistemas para favorecer su máxima eficiencia con el menor riesgo.

El objetivo base de la preventiva es conseguir un índice de cero accidentes y enfermedades profesionales derivados de la interacción hombre- máquina, para medir la efectividad de los modelos de integración implementados, es imprescindible generar indicadores de gestión.

Para comprender la efectividad los modelos de integración *Bottom Up* y *Top Down*, se deben analizar los resultados a mediano y largo plazo, tanto en materia financiera, organizativa, indicadores proactivos y reactivos de seguridad, empleando parámetros específicos.

A continuación, se presenta una comparación de cómo se comportan los indicadores de gestión en las metodologías *Top Down* y *Bottom Up*, en empresas con actividades económicas similares que adoptan estrategias distintas para la conversión digital y como esto se traduce en comportamientos que constituyen situaciones de riesgo.

7. Costos de desarrollo

BOTTOM UP	TOP DOWN
Los costos de desarrollo tienden a disminuir, puesto que las correcciones son realizadas en etapas tempranas del desarrollo, donde son menos costosas.	Los costos aumentan ya que los errores son corregidos una vez se haya integrado los componentes.

8. Precisión del presupuesto inicial

BOTTOM UP	TOP DOWN
El presupuesto se establece desde el principio. El proyecto se hace más fácil de gestionar. Se pueden utilizar diagramas de Gantt. Reducción de estrés debido a organización en las tareas	Partiendo de la experiencia de procesos de innovación anteriores se estima el presupuesto con poca exactitud. Aumento de estrés por excesiva responsabilidad

9. Comunicación, supervisión e independencia

BOTTOM UP	TOP DOWN
Trabajo colaborativo, y mejor comunicación permite disminuir los errores y hace más fácil la verificación empleando supervisión electrónica. A mayor control, mayor tensión, aumento de estrés y problemas psicosociales	Las personas trabajan de manera independiente, genera una escasa cantidad de datos intercambiados. Las deficiencias en la comunicación pueden afectar a la percepción sobre la claridad de rol. Sin una supervisión constante puede existir tiempo excesivo de trabajo y adicción a tareas

10. Adaptabilidad a nuevos sistemas

BOTTOM UP	TOP DOWN
Es un proceso que requiere de tiempo de entrenamiento y perfeccionamiento de habilidades en donde el error humano puede provocar accidentes.	La conversión digital es una transición que se sustenta por el peso de la experiencia, se cuenta con planes de contingencia producto de escenarios pasados.

11. Tiempo invertido en correcciones

BOTTOM UP	TOP DOWN
El costo de aprendizaje supone mayor tiempo de trabajo, hasta consolidar un sistema funcional El exceso de tiempo de trabajo genera desarraigo familiar, y falta de conciliación entre la vida laboral y familiar.	Esta metodología tiene un mejor comportamiento en este escenario. Reducción de tiempo de trabajo, permite desconcentrar las tareas rutinarias y canalizarlas a otras más creativas, reduciendo los efectos de estrés

12. Tiempo invertido en capacitación

BOTTOM UP	TOP DOWN
Toma menos tiempo, la adquisición de conocimientos permite tomar decisiones en conjunto. Promover apertura y participación en la toma de decisiones enriquece el trabajo.	Se requiere de un cambio en la cultura organizacional, y aprender a trabajar también de manera colaborativa para adaptarse al cambio La toma de decisiones obedece a una cadena de mando.

El desarrollo de una estrategia de transformación 4.0 hacia un modelo de fabricación avanzada es una necesidad que toda organización debe tener en cartera en su plan estratégico. El plan de despliegue puede plantearse en base a un modelo de transformación integral (modelo *Top Down*) o mediante el desarrollo y extensión de células 4.0 en planta (modelo *Bottom Up*).

La decisión sobre qué modelo es el más adecuado en cada caso, depende principalmente del grado de madurez digital de cada organización.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A pesar de que los dispositivos inteligentes suponen una mejora de las condiciones de trabajo (convirtiéndose en facilitadores digitales y tecnológicos, reduciendo la carga de trabajo, proporcionando información de utilidad, automatizando tareas, avisando de incidencias, etc.), suponen un aumento en el tiempo de uso del puesto por parte del trabajador, y puede conllevar a su vez, a la aparición de nuevos riesgos emergentes o no contemplados en las evaluaciones de riesgos y puestos existentes en las empresas dentro de las Mejores Técnicas Disponibles.

Se pueden considerar como riesgos nuevos, ya que el riesgo se origina por procesos que no existían anteriormente, lugares de trabajo, cambios sociales, organizativos y la propia adopción de nuevas tecnologías.

Al facilitar el acceso al trabajo con la tecnología móvil, se producen pocos descansos naturales; aumenta la monotonía, individualiza la responsabilidad y reduce las oportunidades de participación en la toma de decisiones, se intensifica la carga de trabajo. (Kinzel, 2016)

Los denominados riesgos emergentes se entenderán como aquellos que aumentan el número de factores de peligro, que dan lugar al mismo, incrementan el peligro o el número de expuestos.

La OIT ha demostrado que esta carga de estrés afecta más a las mujeres, a los trabajadores de la salud y a los profesionales que hacen uso intensivo de tecnologías.

La centralización de las nuevas tecnologías genera síntomas de estrés de bajo nivel, en escenarios extremos como los penales, donde las personas son clasificadas por su grado de peligrosidad percibido, detonan graves problemas psicosociales y de salud mental. Esas prácticas han llevado al suicidio de trabajadores; se cita el caso de los trabajadores de Foxconn en China (Chan, 2010) como ejemplo de estas prácticas

CONCLUSIONES

Es necesario considerar las diferentes influencias e impactos que la tecnología tiene sobre la seguridad, el confort y el bienestar de los trabajadores en los entornos ocupacionales, en concreto en la construcción 4.0 y proveer mejores soluciones en la gestión de riesgos laborales enfocados a la interacción humano-máquina-tecnología.

La implantación no controlada de la tecnología reduce la autonomía y la privacidad, además mejora los sistemas de control del trabajo y supervisión electrónica, lo cual acelera el ritmo de trabajo, integrando el trabajo a la vida familiar.

El exceso de trabajo es una consecuencia de la implantación de nuevas tecnologías, cuando no existe el control adecuado, incide en la productividad y provoca problemas psicosociales.

La conversión a entornos altamente digitalizados y automatizados, cambia la percepción social sobre el trabajo, reconfiguran los modelos mentales para adaptarse a los cambios.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Sevilla, por brindarme la oportunidad de expandir las fronteras de mi conocimiento, que estarán siempre al servicio de la comunidad.

BIBLIOGRAFÍA

Kinzel, H. (2016). *Industry 4.0 – Where does this leave the Human Factor?*

Krohn, J. (n.d.). Fokus statt Komplexität: Industrie 4.0 in der Produktion umsetzen. Retrieved from https://www.roi.de/fileadmin/ROI_DIALOG/Dialog_Neu/Bilder/Artikel/ROI-Beratung-Consulting-Industrie-4-0-Produktion-Komplexitaet.pdf

Akhtar, P., & Moore, P. (2016). Los efectos psicosociales del cambio tecnológico en los lugares de trabajo contemporáneos y las respuestas de los sindicatos. *Boletín Internacional de Investigación Sindical*, 8(1-2), 113-148.

Forastieri, V. (2016). Prevención de riesgos psicosociales y estrés laboral. *Boletín Internacional de Investigación Sindical*, 8(1-2), 11-37.

Ushakova, T. (2017). Los modelos de la acción normativa de la OIT para regular el trabajo a distancia. El futuro del trabajo: La organización del trabajo y la producción (págs. 1-11). Madrid: Organización Internacional del Trabajo. Obtenido de http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---europe/---ro-geneva/---ilomadrid/documents/article/wcms_548606.pdf

Schroeder, W. (2016). La estrategia alemana industria 4.0: el capitalismo renano en la era de la digitalización. Madrid: Friedrich Ebert Stiftung. Obtenido de https://www.unikassel.de/fb05/fileadmin/datas/fb05/FG_Politikwissenschaften/PSBRD/FES_Madrid_Schroeder_Industria_4.0_ES.pdf

León-Rubio, J. (2017). El factor humano en la industria 4.0: Una nueva lectura de los riesgos psicosociales.

Chan, J. y Pun, N. 2010. «Suicide as protest for the new generation of Chinese migrant workers: Foxconn, Global Capital, and the State», *The Asia-Pacific Journal*, septiembre, vol. 8, ejemplar 37, núm. 2, págs. 1-33. Disponible en <<http://apjif.org/-Pun-Ngai--Jenny-Chan/3408/article.pdf>>

Ingeniería y Tecnología

