

Situación actual y perspectivas futuras del control del proceso de elaboración del aceite de oliva virgen

P. Cano Marchal*, J. Gómez Ortega, D. Aguilera Puerto, J. Gámez García

Grupo de Robótica, Automática y Visión por Computador de la Universidad de Jaén, 23071 Jaén, España.

Resumen

En este trabajo se presenta la situación actual y perspectivas de futuro del control del proceso de elaboración del aceite de oliva virgen. Dentro del estado actual se muestra, por un lado, un análisis de los trabajos previos de investigación que tratan sobre esta problemática. Por otro lado se recogen los resultados de una encuesta realizada a nivel de toda España para conocer, de forma precisa y real, cuál es el grado de automatización actual de dicho proceso. Finalmente se indican cuáles serán, a juicio de los autores y dentro del campo de la automática, las futuras líneas de investigación de este campo. *Copyright © 2011 CEA.*

Palabras Clave:

Control de procesos, Modelado de sistemas, Automatización de procesos.

1. Introducción

La elaboración de aceite de oliva es una actividad económica en crecimiento de gran relevancia a nivel mundial. La producción media mundial entre las campañas 2003/04-2008/09 se situó en 2.817.500 toneladas de aceite, lo que supone un incremento de un 11 % respecto al periodo 1997/98-2002/03. La principal región productora es la cuenca mediterránea con más del 90 % de la producción mundial, destacando la Unión Europea (75.8 %), Túnez (6.5 %), Siria (4.5 %) y Turquía (4.2 %). Fuera de la cuenca mediterránea comienzan a adquirir relevancia países en los cuales no estaba tan arraigado el cultivo del olivo, como Argentina (0,7 %), Australia (0,3 %) y Chile (0,2 %). Dentro de la Unión Europea, España es el principal país productor de aceite de oliva, con una producción media para el periodo 2003/04-2008/09 de 1.100.700 toneladas, montante que representa el 39 % de la producción media mundial (COI, 2009).

El proceso de elaboración de aceite de oliva virgen ha evolucionado significativamente a lo largo de los años en España. La técnica tradicional utilizada en las *almazaras*, como se denomina a las fábricas en que se elabora el aceite de oliva virgen, consistía en moltar la aceituna en molinos de piedra llamados empiedros, batir la pasta en una batidora y extraer el aceite prensando la pasta obtenida de las etapas anteriores. Este proceso era discontinuo y requería gran cantidad de mano de obra

para llevarlo a cabo (Ortega Nieto, 1943). En los años 70 del siglo XX comienza la instalación en las almazaras de los llamados *sistemas continuos*, que cambian las prensas por decánters que permiten extraer el aceite del resto de la pasta mediante centrifugación y los empiedros son sustituidos por molinos metálicos que permiten operar en continuo (Fuentes and Nickel, 2003). Estos primeros decánters se conocen como decánters de *tres fases* debido a que en ellos había tres salidas de productos: aceite, alpechín (fase acuosa) y orujo (fase sólida). Este tipo de sistemas requería la adición de gran cantidad de agua y generaba, por tanto, gran cantidad de alpechín, lo que suponía un problema medioambiental serio, puesto que se trata de un residuo de elevada carga contaminante (Alba, 1997). A principios de los noventa se introduce un nuevo tipo de decánter: el decánter de *dos fases*. Este sistema se diferencia de las tres fases en que no es necesaria la adición de grandes cantidades de agua al decánter y en que presenta únicamente dos salidas: aceite y alpeorujo u orujo de dos fases, que está formado por el alpechín y el orujo. La instalación generalizada de estos sistemas continuos ha permitido incrementar la capacidad de proceso de las almazaras de forma simultánea a la reducción del personal necesario para operar la instalación. Paralelamente al cambio técnico, comienza a hacerse patente la importancia de mejorar la calidad de los aceites (Civantos, 1998), lo que supone un incremento en los esfuerzos de investigación en esta materia. La promoción de la investigación sobre elaboración de aceite de oliva virgen y la transferencia al sector de buenas prácticas de elaboración efectivamente han supuesto un incremento en el nivel medio de la calidad de los aceites obtenidos

* Autor en correspondencia

Correos electrónicos: pcano@ujaen.es (P. Cano Marchal), juango@ujaen.es (J. Gómez Ortega), aguilera@andaltec.org (D. Aguilera Puerto), jggarcia@ujaen.es (J. Gámez García)

(Uceda et al., 2006). A pesar de estos cambios significativos, la investigación, el desarrollo y la transferencia al sector de metodologías y técnicas de control automático es un campo en que existe aún un gran margen de desarrollo.

La elaboración de aceite de oliva virgen es un proceso que consta de varias etapas, depende de un elevado número de variables tecnológicas y presenta diversos objetivos de control. Se trata, por tanto, de un proceso físico complejo en el cual es necesario el concurso de operarios especializados y experimentados para explotar la instalación de forma satisfactoria. En este contexto, cabe resaltar las diferencias en las mejoras potenciales derivadas de la aplicación de técnicas de automatización y control automático al proceso de elaboración de aceite de oliva virgen. La automatización de la maquinaria de la almazara permite simplificar la operación de la planta y reducir el personal necesario para su funcionamiento. El arranque asistido de la instalación y el pesado y la generación automática de albaranes en el patio son ejemplos que ilustran lo comentado. Por su parte, como paso previo al control propiamente dicho, la instalación de sensores y su integración en un sistema SCADA permite disponer de mayor información sobre variables representativas del proceso, lo que a su vez faculta a los responsables a mejorar la operación de la planta. Así, disponer de toda la información de temperaturas, caudales, consumos eléctricos, etc. en un único punto permite obtener de forma más intuitiva una visión global del proceso y detectar con agilidad los problemas y desviaciones sufridos por el mismo. La implementación de bucles de control de bajo nivel sobre variables claves del proceso supondría un paso adicional que permitiría asegurar el funcionamiento de la planta en los valores consignados por los responsables, lo que a su vez posibilitaría mejorar significativamente el resultado de la operación de la almazara al tiempo que se rebajaría el nivel de supervisión requerido por parte de los operadores. En este estadio, el usuario únicamente debería cambiar las consignas de las variables en función del fruto y del objetivo de control buscado, sin ser necesaria la supervisión continua por parte del mismo para asegurar que las variables efectivamente alcanzan los valores deseados y no se desvían de los mismos. Finalmente, la utilización de estrategias de control de alto nivel permitiría establecer automáticamente la referencia a los lazos de bajo nivel de forma consistente con los objetivos de control globales, favoreciendo una mejora integral del proceso. Sin embargo, el nivel de desarrollo de sistemas de control automático para la elaboración de aceite de oliva es aún escaso, y la implantación en el sector de estas técnicas no es generalizada. En cambio, sí se aprecia un incremento en la utilización de sistemas que permiten la teleoperación de la planta.

El objetivo de este artículo es realizar una revisión del estado del arte sobre automatización y control de almazaras desde un punto de vista tanto científico como industrial. Así, la sección 2 muestra una breve descripción del proceso de elaboración de aceite de oliva virgen. La sección 3 describe cuáles son los objetivos de control de la planta para posteriormente identificar las variables tecnológicas relevantes del proceso y su influencia en dichos objetivos. La sección 4 realiza una revisión de la bibliografía existente sobre la automatización y el control de almazaras, así como de la tecnología de sensores disponi-



Figura 1: Pasta de aceituna.

bles. La sección 5 se centra en la descripción de la situación actual del grado real de automatización de las almazaras existentes en España, para lo que se expone el diseño de la encuesta utilizada y se discuten los resultados obtenidos. Esta sección supone una continuación y extensión de la encuesta realizada anteriormente en la provincia de Jaén, y cuyos resultados se recogieron en (Aguilera and Ortega, 2005). Finalmente, la sección 6 muestra el punto de vista de los autores sobre las futuras líneas de trabajo relacionadas dentro de este campo del control. Finalmente, en la sección 7 se presentan las conclusiones generales de este estudio.

2. Descripción del proceso de elaboración de aceite de oliva virgen

El proceso de elaboración de aceite de oliva virgen comienza con la recepción en la almazara del fruto. Éste suele ser recibido con cantidades apreciables de tierra, piedras, ramas y hojas, por lo que es necesario separar el fruto del resto de elementos que lo acompañan. Una vez limpia, la aceituna se muele para formar la denominada pasta que se procesará para extraer el aceite. La finalidad de la molienda es romper las células en que está ocluido el aceite y permitir su liberación.

La pasta está formada por trozos de hueso, pulpa, agua y gotas de aceite. Esta pasta presenta una estructura que no favorece la extracción del aceite de la misma debido a dos factores: el pequeño tamaño de las gotas de aceite y la existencia de microgeles formados por restos de tejidos y agua que retienen pequeñas gotas de aceite (Civantos, 1998). Para corregir esta situación, la pasta pasa a una batidora (elemento 4 en la figura 3) en la que se calienta para reducir la viscosidad de la misma mientras unas palas la remueven lentamente para permitir la agregación de las gotas y la ruptura de los geles. En la figura 1 se puede observar la pasta en la batidora y las palas. En la batidora se pueden añadir coadyuvantes (actualmente, únicamente microtalcó natural y agua) para facilitar la adecuación de la pasta a las condiciones requeridas para su procesado.

Una vez batida, la pasta se inyecta al decánter (elemento 5 en la figura 3), mostrado en la figura 2: una centrífuga hori-



Figura 2: Decánter.

zontal en la que se produce la separación del aceite y del orujo debido a la diferencia de densidades entre ambos componentes. El orujo es el subproducto generado por el decánter, y está formado por la fase acuosa y los sólidos del fruto junto con la fracción de aceite que no ha sido posible extraer.

El aceite que sale del decánter presenta un nivel elevado de humedad e impurezas sólidas que afecta negativamente a su conservación, por lo que es necesario separar estos elementos del aceite previamente a su almacenamiento. Para llevar a cabo esta separación actualmente hay dos opciones con implantación práctica. La primera consiste en centrifugar el aceite en una centrífuga vertical (elemento 6 en la figura 3) con adición de agua. La segunda opción es decantar el aceite por acción de la gravedad en depósitos de acero inoxidable diseñados específicamente para esta operación. Tras cualquiera de los dos métodos, el aceite presenta ya unas condiciones adecuadas para su almacenamiento en bodega.

3. Caracterización del proceso desde el punto de vista del control

3.1. Objetivos de control

En la elaboración de aceite de oliva virgen se pueden diferenciar dos objetivos globales de operación:

1. La obtención de la máxima *cantidad* posible de aceite, mediante la maximización del agotamiento del alpeorujo (X_o).

$$\text{OBJ}_1 : \text{Max}(X_o)$$

2. La obtención de la máxima *calidad* posible de aceite (C_o).

$$\text{OBJ}_2 : \text{Max}(C_o)$$

Como cabe esperar, ambos objetivos presentan una dicotomía: la configuración de parámetros de la planta que permite mejorar la calidad del aceite lastra la cantidad obtenida del mismo, mientras que operar la planta para incrementar la cantidad de aceite (mejorar el agotamiento) supone, en general, un decremento en la calidad del mismo (Giovacchino et al., 2002).

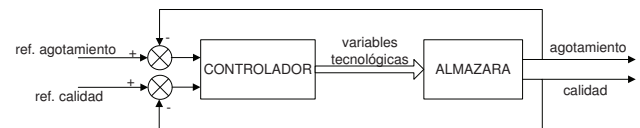


Figura 4: Esquema de control del proceso de elaboración de aceite de oliva virgen.

Ahora bien, la calidad del aceite de oliva virgen extraído depende fuertemente de las condiciones del fruto de entrada (Herrera, 2007). No se puede obtener un aceite de calidad si el fruto que se va a procesar no reúne las condiciones adecuadas. Por tanto, el primer paso para seleccionar los parámetros de control del proceso es determinar el objetivo de elaboración que se busca teniendo en cuenta las condiciones del fruto del que disponemos: rendimiento de extracción o calidad del aceite obtenido. La figura 4 muestra un esquema de control del proceso.

La calidad del aceite de oliva virgen está determinada por los valores de una serie de índices químicos (acidez, peróxidos y demás determinaciones establecidas por el reglamento CE 2568/91) y por las características organolépticas del aceite. En los últimos años se está prestando incipiente atención al contenido en polifenoles del aceite, debido a la publicación de estudios que relacionan la concentración de estas sustancias en el aceite de oliva virgen con gran parte de sus propiedades beneficiosas para la salud (Covas et al., 2006; Tripoli et al., 2005). Todos estos parámetros de calidad vienen determinados tanto por las condiciones propias del fruto (variedad, estado de madurez y condiciones agronómicas, principalmente) (Uceda and Hermoso, 1997), como por las condiciones de conservación del fruto y de elaboración del aceite. Sin embargo, las características organolépticas del aceite y el contenido en polifenoles son más sensibles a las condiciones de elaboración que el resto de parámetros químicos, por lo que en este artículo, cuando nos refiramos a la influencia en la calidad del aceite obtenido, nos estamos refiriendo a la influencia en las cualidades organolépticas del aceite.

3.2. Variables tecnológicas e influencia cualitativa en los objetivos

Las principales variables tecnológicas que influyen en el proceso de elaboración son:

1. Grado de molienda (G_M). El grado de molienda indica el tamaño medio en que quedan las partes más duras de la pasta. Una molienda demasiado gruesa supone una rotura débil de los tejidos que desemboca que un decremento del agotamiento. Por otra parte, una molienda demasiado fina provoca un mayor incremento de la temperatura de la pasta que repercute negativamente en la calidad del aceite, y puede generar mayor cantidad de emulsiones en la pasta que merman el agotamiento. Adicionalmente, una molienda demasiado fina genera problemas de atranques en el molino e incrementa el consumo energético (Civanos, 1998).

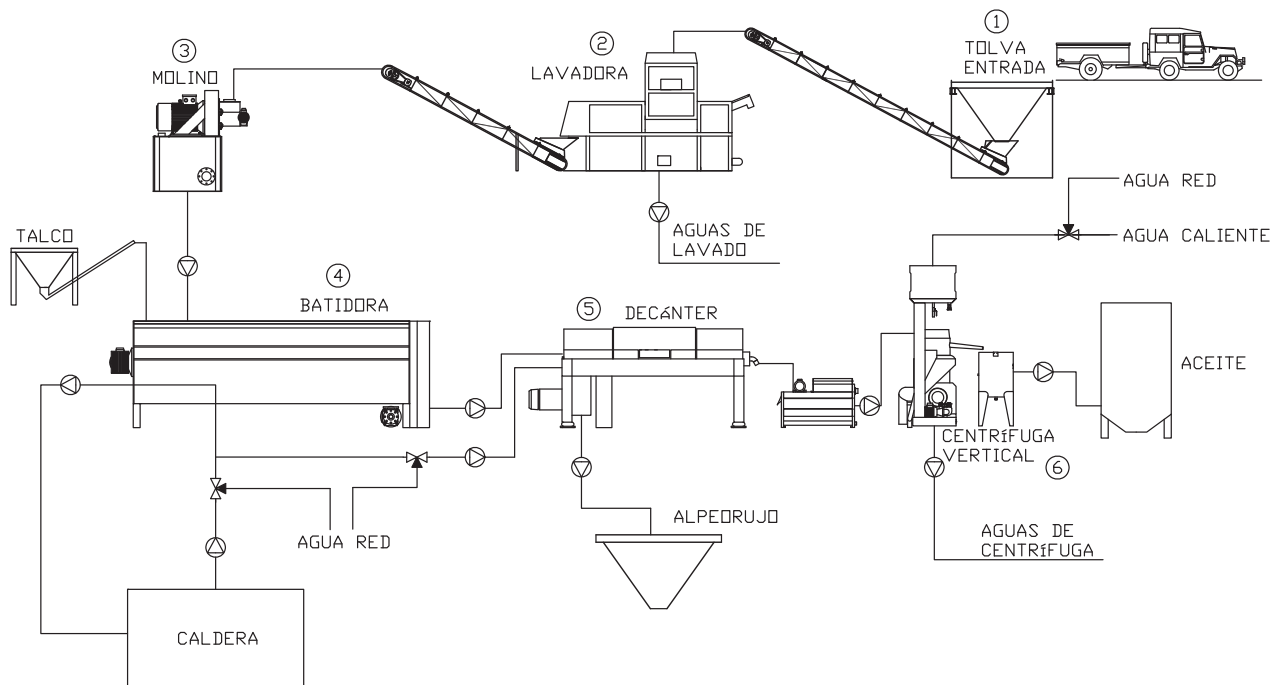


Figura 3: Esquema clásico de una almazara para la elaboración de aceite de oliva virgen.

2. Temperatura (T_b) y tiempo de batido (t_b). Estos parámetros son, quizás, los más determinantes en la calidad del aceite que se va a obtener. El incremento de la temperatura de la pasta en la batidora reduce la viscosidad de la misma, lo que favorece la agregación de las gotas de aceite y, por tanto, mejora el rendimiento de extracción. Por otro lado, el aumento del tiempo de batido también favorece el cambio en la estructura de la pasta que permite incrementar el agotamiento del orujo. Ahora bien, ambos parámetros repercuten negativamente en la calidad del aceite obtenido, puesto que el aumento de la temperatura acelera la velocidad de las reacciones que tienen lugar en la batidora y favorece la pérdida de componentes volátiles.
3. Composición y estructura de la pasta a la salida de la batidora (C_m^b). En el batido de las denominadas *pastas difíciles*, que son aquellas pastas que presentan dificultades para la extracción del aceite, se hace necesario el uso de coadyuvantes (microtalco natural y, en su caso, agua) para mejorar el comportamiento de las mismas. Una preparación de la pasta deficiente conlleva incrementos sustanciales del aceite contenido en el orujo, mientras que la adición de coadyuvantes no presenta influencia en la calidad de los aceites obtenidos (Cert et al., 1996).
4. Grado de humedad de la pasta en decánter (H_d). Este parámetro tiene una gran relevancia en el agotamiento, puesto que va a determinar los espesores de los anillos dentro del decánter y, por tanto, las condiciones de funcionamiento de la máquina.
5. Tiempo de residencia en decánter (t_d). El tiempo de residencia en el decánter viene determinado por el ritmo de producción establecido, que generalmente se ve impuesto por la entrada de aceituna a la almazara y la capacidad de la instalación. Operar el decánter a ritmos superiores a los recomendados supone una pérdida importante de grasa en el orujo.
6. Parámetros propios de la operación dentro del decánter. La velocidad diferencial tornillo-bol ($\Delta\omega$) y la altura de descarga de la fase oleosa (r_1) determinan la anchura de los distintos anillos dentro del decánter (Leung, 1998). Una elección correcta de estos parámetros permite mejorar el agotamiento sin influir en la calidad del aceite obtenido.
7. Parámetros propios de la operación de la centrífuga vertical. La temperatura del agua de adición se debe ajustar a la temperatura del aceite para no afectar a sus propiedades organolépticas y evitar la formación de emulsiones que induzcan la pérdida de aceite con las aguas de lavado. Igualmente, el caudal de agua se debe ajustar al de aceite para el buen funcionamiento de la máquina en términos de pérdidas. Finalmente, la frecuencia de descarga de las borras acumuladas es un parámetro importante puesto que influye en la calidad del aceite obtenido y en las pérdidas de aceite en la operación.
8. Parámetros propios de la decantación en depósitos de acero inoxidable. El parámetro principal es el tiempo de residencia del aceite en los depósitos y la frecuencia de las purgas de las borras. Un tiempo de residencia escaso su-

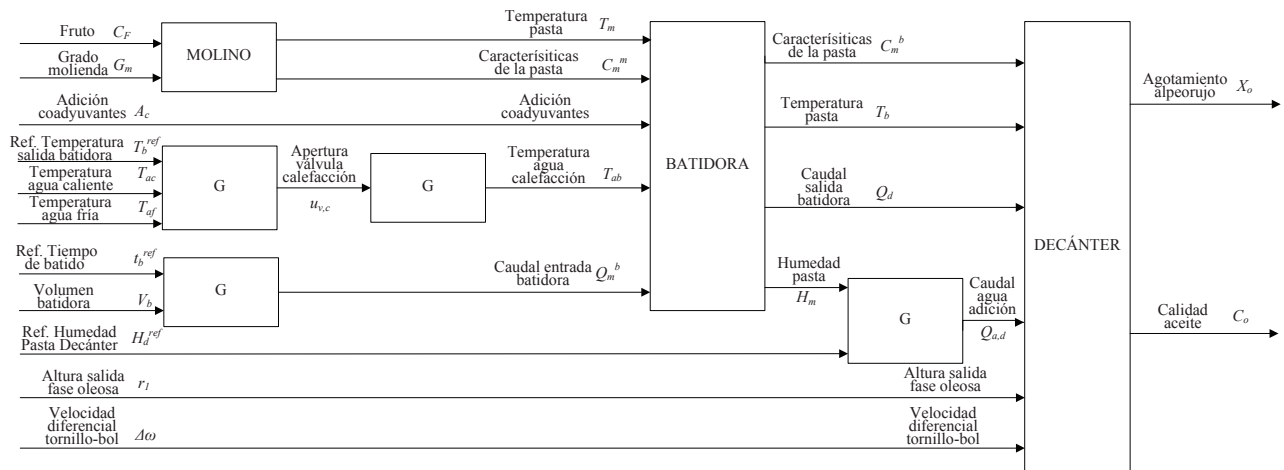


Figura 5: Diagrama de bloques del proceso de elaboración de aceite de oliva virgen, donde cada bloque G representa un regulador.

pone que el aceite permanezca con un nivel elevado de humedad e impurezas, mientras que un tiempo de residencia demasiado alto y una frecuencia de purgado deficiente puede suponer perjudicar las características organolépticas del mismo.

La figura 5 muestra un diagrama de bloques del proceso y la tabla 1 recoge todas las variables implicadas. Por su parte, lo anteriormente expuesto sobre las variables tecnológicas se resume en la tabla 2.

Finalmente, hay que destacar que no todas las variables que influyen en las salidas de la planta son susceptibles de ser manipuladas en continuo, ni todas son susceptibles de ser manipuladas directamente. Variar el grado de molienda (G_M) y la altura de salida de la fase oleosa (r_1) supone tener que parar la operación y realizar cambios en componentes mecánicos del molino y el decánter, respectivamente. La velocidad diferencial tornillo-bol ($\Delta\omega$) sí es susceptible de ser utilizada como variable manipulada, pero no todos los decánters admiten esta posibilidad. Por su parte, la temperatura de salida de la pasta de la batidora (T_b) y el tiempo de batido (t_b) no son variables directamente manipulables, si bien sí son susceptibles de ser controladas automáticamente. Finalmente, los caudales de entrada al decánter ($Q_d, Q_{a,d}$) sí son variables susceptibles de ser manipuladas.

Así, una formulación general del problema del control global de una almazara sería:

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & c_1 X_o + c_2 C_o \\ \text{s.a.} \quad & X_o \leq X_o^{\text{max}} \\ & C_o \leq C_o^{\text{max}} \\ & C_o = f(C_F, G_M, T_b, t_b) \\ & X_o = g(C_F, G_M, T_b, t_b, A_c, H_d, r_1, \Delta\omega, Q_d) \end{aligned}$$

Si definimos la variable *condiciones de la pasta* (C_m) como un resumen de las propiedades reológicas y de calidad de la

misma llegamos a:

$$\begin{aligned} C_m^m &= f_1(C_F, G_M) \\ C_m^b &= f_2(C_m^m, T_b, t_b, A_c) \\ X_o &= f_3(C_m^b, H_d, Q_d, \Delta\omega, r_1) \\ C_o &= f_4(C_m^b) \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta que la temperatura de la pasta en la batidora (T_b), el tiempo de batido (t_b) y la humedad de la pasta en el decánter (H_d) no son variables directamente manipulables:

$$\begin{aligned} T_b &= f_5(Q_m^b, q_{vc}, u_{vc}, T_{ac}, T_{af}) \\ t_b &= f_6(Q_m^b, Q_d) \\ H_d &= f_7(Q_d, Q_{a,d}, x_m^a) \end{aligned}$$

donde Q_m^b es el caudal de inyección de pasta a la batidora, u_{vc} es la apertura de la válvula de calefacción de la batidora, q_{vc} es el caudal de agua de calefacción, T_{ac} y T_{af} son las temperaturas del agua caliente y fría respectivamente y x_m^a es el contenido en agua de la pasta a la salida de la batidora.

4. Estado actual

A nivel científico, el control automático de una almazara es un problema que, si bien se ha tratado, está aún abierto a múltiples aportaciones. De hecho, de los objetivos de operación planteados anteriormente, el único que ha sido tratado explícitamente es la mejora del agotamiento del alpeorjuo X_o .

Dentro del control a bajo nivel de las distintas etapas de elaboración, cabe destacar el controlador propuesto por Bordons y Cueli para la temperatura de salida de la masa de la batidora (T_b) (Bordons and Cueli, 2004). En este artículo se construye un modelo no lineal de la batidora a partir de las ecuaciones termodinámicas que rigen su comportamiento, se ajustan los parámetros del mismo mediante un procedimiento de validación RMS (Ljung, 1999) y se valida el modelo con datos

Tabla 1: Variables tecnológicas del proceso de elaboración de aceite de oliva virgen.

Variable	Denominación
C_F	Características del fruto
G_M	Grado de molienda
T_m	Temperatura de la pasta a la salida del molino
C_m^m	Características de la pasta a la salida del molino
C_m^b	Características de la pasta a la salida de la batidora
A_c	Adición de coadyuvantes
T_b	Temperatura de la pasta a la salida de la batidora
T_{ac}	Temperatura del agua caliente
T_{af}	Temperatura del agua fría
T_{ab}	Temperatura del agua de calefacción
$u_{v,c}$	Apertura de la válvula de calefacción
Q_m^b	Caudal de inyección de pasta a la batidora
t_b	Tiempo de batido
V_b	Volumen de la batidora
H_d	Humedad de la pasta a la entrada al decánter
r_1	Altura salida de la fase oleosa del decánter
$\Delta\omega$	Velocidad diferencial tornillo-bol
Q_d	Caudal de inyección de pasta al decánter
$Q_{a,d}$	Caudal de inyección de agua al decánter
X_o	Agotamiento del alpeorajo
C_o	Calidad del aceite

obtenidos en una planta real. A continuación se acomete la obtención de un modelo lineal mediante la realización de ensayos en escalón sobre el modelo no lineal e identificación del sistema. Una característica importante del proceso es la existencia de retrasos importantes en la dinámica de la temperatura y la rapidez en la dinámica de las perturbaciones que afectan a esta variable. En este escenario, se propone un controlador MPC (Model Predictive Control (Camacho and Bordons, 2004)) que se mejora con la introducción de un modelo de predicción autorregresiva de las perturbaciones, dado el carácter predecible de las mismas. Finalmente, se compara los resultados obtenidos de la aplicación del controlador propuesto en una planta real con los ofrecidos por un controlador PID con feedforward y se evidencian las mejoras obtenidas.

En un artículo posterior, para el control global de la almazara, y con el objetivo de maximizar el rendimiento de extracción mediante la mejora del agotamiento del alpeorajo (X_o), Bordons y Núñez-Reyes proponen un controlador MPC (Bordons and Nunez-Reyes, 2008). Toman como variables manipuladas la temperatura de agua de calefacción de batidora (T_{ab}), el caudal de entrada de masa al decánter (Q_d) y el caudal de agua de entrada al decánter ($Q_{a,d}$). Como salida del sistema toman el caudal de aceite de salida y utiliza un modelo multivariable basado en sistemas de primer grado con retardos que identifica directamente sobre la planta. Esta aproximación al problema

Tabla 2: Variables e influencia en agotamiento y calidad.

Variable	Influencia en agotamiento	Influencia en calidad
Grado de molienda (G_M)	Sí	Sí
Temperatura (T_b) y tiempo de batido (t_b)	Sí	Sí
Adición de coadyuvantes (A_c)	Sí	No
Caudal de entrada pasta al decánter (Q_d)	Sí	No
Humedad de la pasta en el decánter (H_d)	Sí	No
Velocidad diferencial ($\Delta\omega$) y altura de descarga (r_1)	Sí	No
Temperatura agua adición en la centrífuga vertical	Sí	Sí
Frecuencia de descargas en la centrífuga vertical	Sí	Sí
Tiempo residencia en depósitos decantadores	Sí	Sí

tiene las ventajas de poder realizar un control multiobjetivo y la sencillez al tratar el sistema como multivariable. La consideración de la influencia en la calidad de las variables tecnológicas se traduce en la introducción de restricciones en el rango de temperaturas aceptables para la batidora.

Uno de los problemas que se plantean en el control automático de almazaras es la dificultad de disponer de la información necesaria sobre el proceso. En efecto, para poder adaptar las condiciones de operación de la planta desde un punto de vista global sería necesario conocer las características del fruto de entrada, las características de la pasta en la batidora, la composición y caudal de los flujos de entrada y salida del decánter, etc. Para controlar la almazara con el objetivo de maximizar la calidad sería necesario poder medir esta variable, que en general sería una combinación de los valores de distintos parámetros químicos y organolépticos. Muchas de estas variables son cualitativas y difíciles de medir en línea, por lo que la utilización de medidas indirectas o el empleo de técnicas de fusión sensorial se intuyen como alternativas necesarias para poder estimar los valores de los parámetros. Una tecnología de sensores importante para el control automático de almazaras son los sensores NIR (Near Infrared Spectroscopy), puesto que esta técnica permite construir sensores para estimar la humedad y contenido graso de la pasta y del orujo. Además, permite caracterizar el aceite obtenido del proceso en términos de calidad estimando una serie de parámetros químicos, como son la acidez, el índice de peróxidos, K270 y el contenido en polifenoles totales (Hermoso et al., 1999). La utilización de este tipo de sensores conjuntamente con redes neuronales permite mejorar los datos obtenidos de este tipo de sensores (Jiménez et al., 2008, 2005), lo que unido a la posibilidad de emplear estos sensores para mediciones en línea los convierte en herramientas fundamentales para el control automático de la almazara.

Otra tecnología de sensores de relevancia son las matrices de sensores voltimétricos, que permiten evaluar el contenido en polifenoles de un aceite (Rodríguez-Mendez et al., 2008). La construcción de sensores en línea con esta tecnología puede facilitar información muy valiosa para el control de las almazaras con el objetivo de maximizar la calidad de los aceites obtenidos, puesto que permiten obtener información sobre parámetros sensibles al proceso de elaboración y muy relacionados con la calidad del aceite. En este sentido, Esposto et al. han aplicado este mismo tipo de sensores para monitorizar en línea la acumulación de componentes volátiles en la batidora (Esposto et al., 2008), lo que abre las puertas a su utilización para el control automático de la almazara.

La primera referencia de utilización de redes neuronales para construir un sensor virtual se encuentra en (Bordons and Zafra, 2003), donde se diseña e implementa una red neuronal para inferir el agotamiento (X_o) y la humedad del alpeorajo. La utilización de redes neuronales para inferir características del aceite producido a partir de características del fruto de entrada y los parámetros del proceso se puede consultar en (Furferi et al., 2007), así como el uso de visión artificial para captar información de las aceitunas de entrada, en este caso el índice de madurez. En la misma línea de predicción del comportamiento de la instalación a partir de redes neuronales, Jiménez et al. construyen una red neuronal para predecir el agotamiento del orujo (X_o) a partir de variables propias del fruto (contenido de grasa y humedad) y variables tecnológicas como la temperatura de batido (T_b), la adición de microtalco (A_c), el caudal de entrada de pasta en el decánter (Q_d), la humedad de la pasta (H_d) y la altura de salida de aceite del decánter (r_1) (Jiménez et al., 2009). Estos artículos presentan las bases para la construcción de sensores virtuales que permitan incluir variables en los bucles de control que de otra forma no sería posible medir en línea.

5. Nivel actual de control del proceso en España

Con el objetivo de evaluar el nivel actual de automatización de las almazaras españolas, se realizó una encuesta en toda España sobre la implantación de las diferentes tecnologías de automatización y control disponibles actualmente en el mercado. A continuación se detallan el diseño de la encuesta y los resultados más destacables obtenidos de la misma.

5.1. Diseño de la encuesta y muestra de trabajo

La encuesta se estructura en tres secciones principales. La primera sección recaba información sobre la estructura de la entidad: forma jurídica y tamaño, de manera que se pudiera estudiar las diferencias y tendencias encontradas en el grado de automatización de las entidades de acuerdo a estos parámetros. La segunda parte, que conforma el núcleo de la encuesta, inquiriere sobre la disponibilidad de las diferentes tecnologías de automatización en cada estadio del proceso de elaboración, para lo que se realizó una revisión exhaustiva sobre las técnicas disponibles de cada fase del mismo. Este listado se transformó en preguntas cerradas de respuesta sí o no sobre la implantación

Tabla 3: Distribución de almazaras por comunidades autónomas en España.

Comunidad Autónoma	Núm. de Almazaras
Andalucía	819
Aragón	103
Baleares	11
Castilla-La Mancha	241
Castilla y León	15
Cataluña	203
Extremadura	117
Madrid	19
Murcia	38
Navarra	16
País Vasco	4
La Rioja	22
C. Valenciana	129

en la entidad de cada técnica en concreto, agrupadas por estadio de elaboración. Finalmente, el último apartado se interesa por el período en que se acometieron las inversiones y por las ventajas, inconvenientes y necesidades futuras que el encuestado encuentra en la automatización de la almazara. Para recoger estos datos, de forma análoga al apartado anterior, se plantean preguntas cerradas sobre cada uno de estos temas. En todos los apartados de la encuesta se incluyen también preguntas abiertas que permiten al encuestado incluir sistemas de automatización y control, ventajas o problemas diferentes a los recogidos explícitamente durante el diseño de la encuesta.

A partir de estos datos recogidos en las encuestas, los distintos grados de automatización se han calculado como el número de técnicas efectivamente implementadas sobre el total de técnicas disponibles para cada caso, como se recoge en la fórmula:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n s_i}{n \cdot t}$$

donde s_i es el número de técnicas implementadas en la encuesta i , t es el número total de técnicas y n es el número total de encuestas. Así, para el cálculo del grado de automatización global de la almazara, t es el número total de técnicas existentes, mientras que, por ejemplo, para el cálculo del grado de automatización del patio, t representa todas las técnicas aplicables a esta parte del proceso.

En España, según datos de la Agencia para el Aceite de Oliva del año 2009, hay 1.737 almazaras (Agencia para el Aceite de Oliva, 2009); distribuidas por regiones como se recoge en la tabla 3. La encuesta fue enviada a cada una de estas almazaras, según el listado obtenido de la página web de la Agencia del Aceite de Oliva. Del total de encuestas remitidas se recibieron 292, lo que supone un porcentaje de respuesta del 17,68 %.

La distribución de las encuestas recibidas, agrupadas por zona y tipo de entidad, se puede consultar en la figura 6. Como cabía esperar dado su gran cantidad de entidades, Andalucía es la región con mayor número de encuestas recibidas con algo más del 55 %, seguida por Cataluña y Castilla-La Mancha. Respecto al tipo de almazara, el 57 % de las encuestas corresponde a empresas cooperativas, frente al 43 % de empresas privadas.

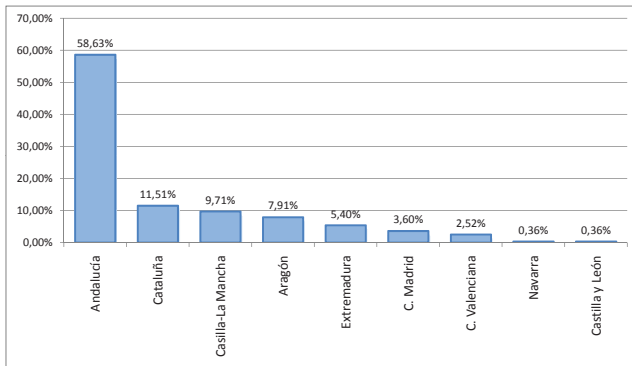


Figura 6: Distribución de encuestas recibidas en función de la comunidad autónoma.

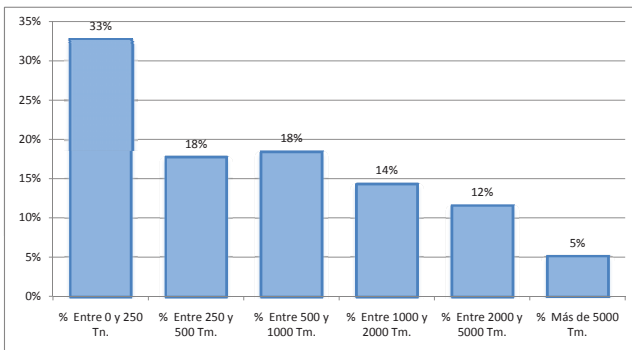


Figura 7: Distribución de encuestas recibidas en función del tamaño.

Por comunidades autónomas, se observa también para cada caso un mayor número de empresas cooperativas, salvo para la Comunidad de Madrid, Navarra y Castilla y León.

Por otra parte, atendiendo al tamaño de las entidades participantes, destacan las empresas con pequeña capacidad de molienda anual (0-250 Tm.) con un tercio de las encuestas recibidas, mientras que almazaras de gran capacidad (más de 5000 Tm.) únicamente representan el 5 % del total.

5.2. Sistemas automáticos de mayor implantación

En este apartado se presentan los resultados más significativos sobre el nivel de implementación de las distintas técnicas disponibles en el mercado. La figura 8 muestra la distribución de técnicas disponibles por estadio del proceso, y el gráfico 9 refleja el porcentaje de implementación real. Se observa que el mayor número de técnicas disponibles se corresponde al decánter, pero que el mayor número de técnicas efectivamente implementadas corresponde al patio.

El gráfico 10 recoge el grado de automatización de cada etapa del proceso de elaboración y resalta la tendencia reflejada en las dos gráficas anteriores: el patio destaca claramente como la zona con un mayor grado de automatización. A continuación, en torno al 40 % de implementación se encuentran la batidora,

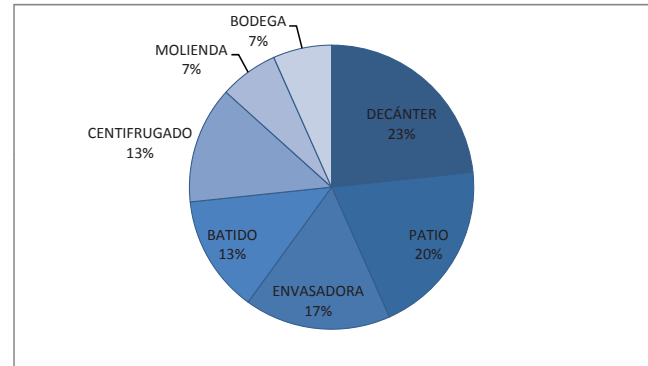


Figura 8: Distribución de técnicas de automatización disponibles.

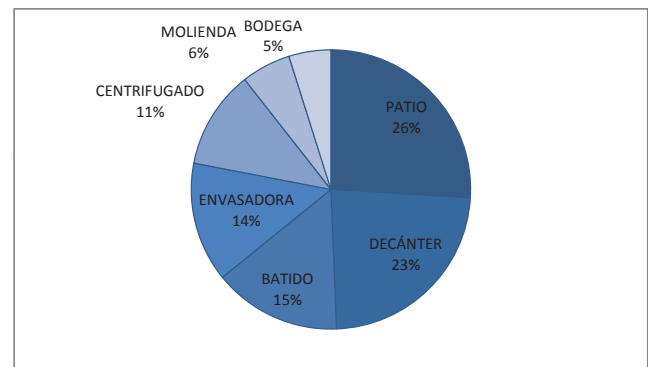


Figura 9: Distribución de técnicas de automatización implementadas.

la envasadora y el decánter. Finalmente, en el entorno del 30 % se encuentran el centrifugado, la molienda y la bodega.

La figura 11 muestra el grado de implantación de cada una de las técnicas de automatización y control incluidas en la encuesta. Como se observa en la gráfica existen cuatro técnicas cuya implantación supera el 80 %, tras las que existe un salto de 20 puntos porcentuales sobre la siguiente técnica más implementada. A partir de aquí, la implantación va cayendo de forma prácticamente constante de una técnica a otra. Cabe comentar los rasgos comunes que presentan las cuatro técnicas más empleadas: todas son procesos análogos a otras industrias y su automatización y control no supone la introducción de elementos muy costosos frente a la operación manual. Así, el pesado y la emisión de albaranes en la recepción de materia prima son acciones comunes a prácticamente cualquier industria. En este caso concreto, es también destacable que la automatización descansa principalmente sobre la utilización de un sistema de información, sin requerir hardware muy diferente del necesario para realizar estas operaciones de forma manual. Por su parte, el control de temperatura de la batidora se traduce en un bucle de control de bajo nivel de la temperatura de un caudal de agua, operación extensamente extendida en la industria. Por último, el llenado y dosificación automática para el envasado es una funcionalidad que incluyen la práctica totalidad de dosificadoras

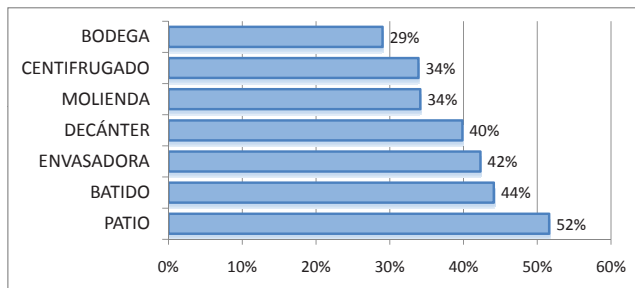


Figura 10: Grado de automatización por etapas del proceso de elaboración de aceite de oliva virgen.

modernas.

Es destacable el grado de implementación de las técnicas relativas a los caudales de entrada al decánter frente al grado de implementación de las técnicas de medición de las variables de la salida del mismo. La elevada implementación de las primeras y la muy baja de la segundas pone de relieve que la variable de salida de estos lazos es el propio caudal de entrada, en lugar del caudal de salida del decánter o el contenido graso del orujo. Es decir, se controlan automáticamente los caudales, no la operación global del decánter, que sigue recayendo sobre el operador al establecer éste las referencias de los caudales en función de las salidas del decánter.

5.3. Grado de automatización de las almazaras

En este apartado se resumen los resultados más interesantes relacionados con el grado de automatización de las almazaras. En la figura 12 se representa el porcentaje de automatización de las almazaras distribuido por región y tipo de entidad. Destaca Castilla-La Mancha como la región con un mayor grado de automatización, seguida por las cooperativas de la Comunidad Valenciana y Extremadura. Respecto a las diferencias por tipo de entidad, en general se observa un ligero mayor grado de automatización en empresas cooperativas que en empresas particulares. La gráfica 13 recoge el grado de automatización en función del tamaño de la empresa, mostrando un mayor nivel de automatización cuanto mayor es el tamaño de la empresa. Esta tendencia puede explicar el mayor grado de automatización de cooperativas frente a almazaras particulares, puesto que, en general, las cooperativas suelen tener un mayor tamaño que las almazaras particulares: según datos de la Agencia para el Aceite de Oliva, las almazaras cooperativas y S.A.T. (sociedades agrarias de transformación), que suponen el 56 % de las entidades, molturan el 67 % de la producción española.

Finalmente, la figura 14 ilustra la distribución de almazaras en función del grado de automatización existente. Se observa que un 35 % de las entidades presentan un nivel de automatización superior al 50 %, pero que apenas un 6 % supera el 70 % de automatización. Por otro lado, el 30 % de las empresas muestran un nivel de automatización inferior al 30 %. Estos datos reflejan que el grueso de las entidades disponen de un nivel de automatización bajo. Las técnicas básicas de automa-

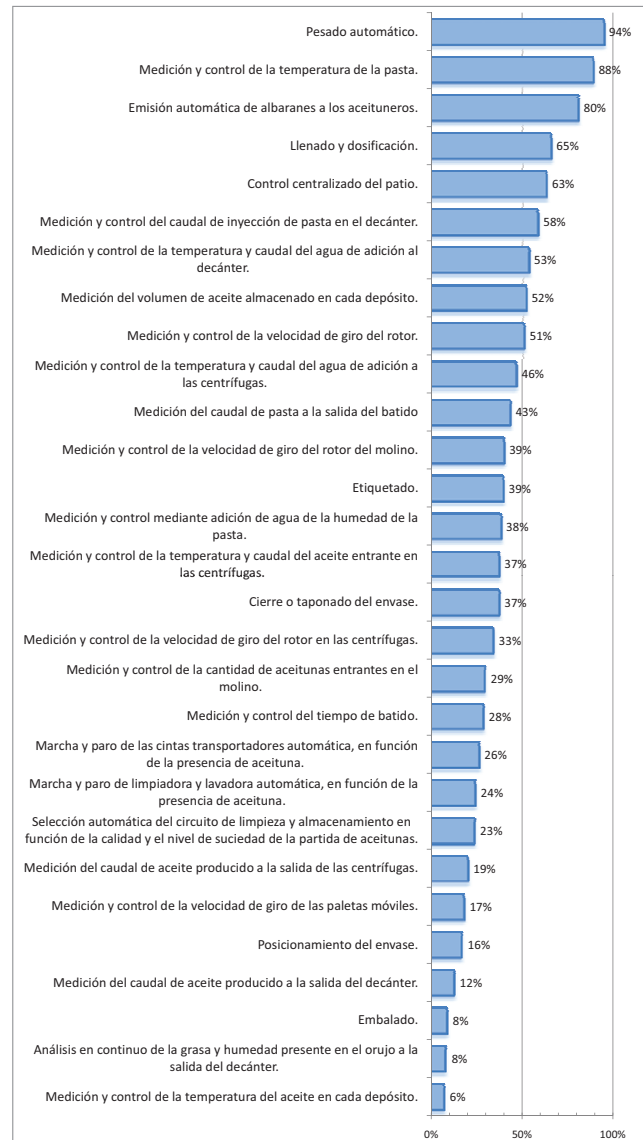


Figura 11: Implementación de técnicas de automatización en el proceso de elaboración de aceite de oliva virgen.

tización están muy extendidas, pero las entidades no acaban de incorporar el resto de tecnologías disponibles en el mercado.

5.4. Ventajas e inconvenientes de la automatización según los encuestados

La figura 15 muestra las ventajas que encuentran los encuestados, hayan o no automatizado de alguna forma el proceso, en la automatización. Casi el 70 % de los encuestados consideran que la automatización y el control de la almazara permiten mejorar el rendimiento industrial de la almazara y un 64 % apuntan que ayuda a mejorar la calidad del producto obtenido.

Respecto a los inconvenientes de la automatización, recogidos en la figura 16, el 61 % resalta los elevados costes de im-

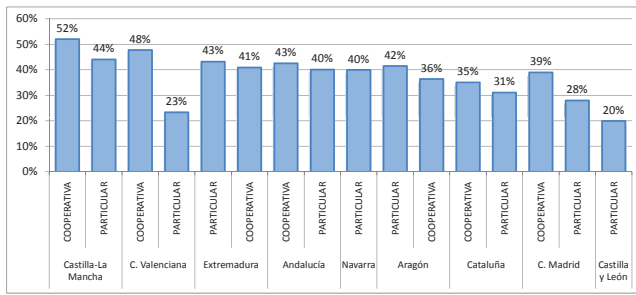


Figura 12: Grado de automatización global.

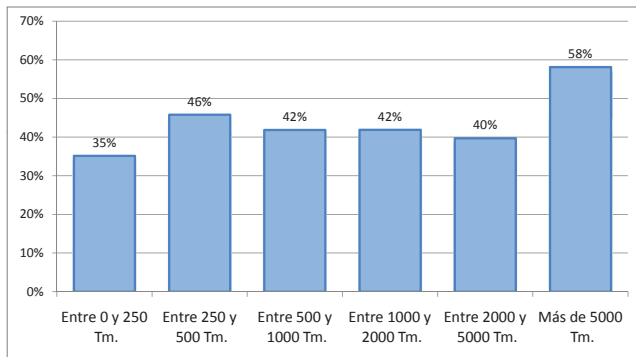


Figura 13: Grado de automatización en función del tamaño de empresa.

plantación. Por contra, únicamente un 5 % considera que los resultados no cumplen lo esperado. Estos resultados nos permiten aventurar que a medida que vaya madurando el sector proveedor de bienes y servicios de automatización para la almazara y, por consiguiente, se vayan reduciendo los niveles de inversión necesarios para acceder a las soluciones, se debe producir un aumento importante del grado de automatización de las almazaras españolas puesto que las ventajas que este tipo de sistemas aporta es claramente percibida por parte de los responsables de las entidades, y la principal barrera para acceder a ellos es el elevado volumen de inversión necesario. En cuanto a las futuras líneas de automatización, el 46 % estima que invertirá en

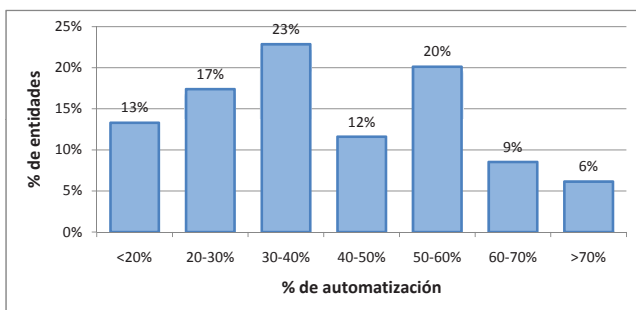


Figura 14: Distribución del grado de automatización.



Figura 15: Ventajas de la automatización del proceso de elaboración de aceite de oliva virgen.

la bodega y un 43 % en el proceso de elaboración en sí, como ilustra la figura 17. Por contra, únicamente un 30 % considera que acometerá nuevos proyectos para el patio de recepción. Estos datos reflejan las tendencias que cabría esperar a la vista de los niveles de automatización actuales, con el patio con un nivel elevado de automatización y la bodega con el nivel más bajo. Resalta la intención de incrementar el nivel de automatización en el proceso de elaboración, lo que está en sintonía con las principales ventajas que los productores de aceite de oliva virgen perciben en las técnicas de automatización y control.

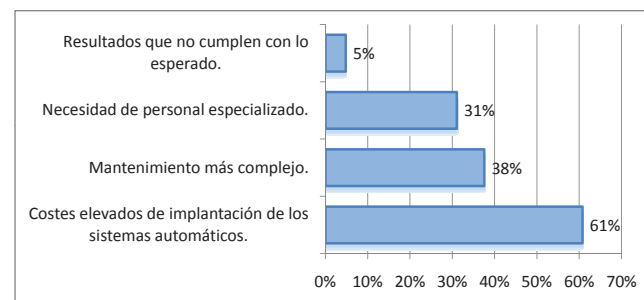


Figura 16: Inconvenientes de la automatización del proceso de elaboración de aceite de oliva virgen.

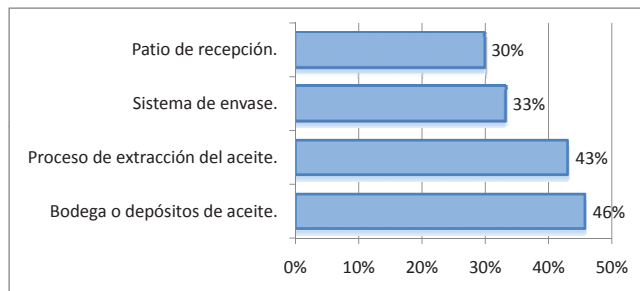


Figura 17: Líneas futuras de automatización para el proceso de elaboración de aceite de oliva virgen.

5.5. Discusión de los resultados de la encuesta

La primera conclusión que cabe extraerse de los resultados de la encuesta es el elevado nivel de automatización que presenta el patio en relación con el resto de zonas de la almazara. Este hecho puede explicarse por la alta necesidad de mano de obra que presenta este área de la almazara y la reducción en la misma que aporta la automatización, así como que la reducción del tiempo de espera de los cosecheros redundará de manera directa en la calidad del servicio que ofrece la entidad a los mismos.

Otro aspecto notable es el elevado nivel de automatización de la envasadora, por encima incluso del decánter, teniendo en cuenta que el peso del envasado en los costos laborales de una almazara es, en general, pequeño. Esta circunstancia puede explicarse porque el proceso de embotellado automático es un proceso maduro en otras industrias, lo que se deriva en niveles de inversión reducidos frente a la ganancia obtenida.

Es muy significativo el dato de que las dos principales ventajas que los encuestados encuentran en la automatización y control de la almazara son la mejora del rendimiento industrial de la misma y de la calidad del producto obtenido. En este sentido, es interesante remarcar que la segunda técnica más implementada es la medición y control de la temperatura de la pasta en la batidora. Este parámetro, como se ha comentado, influye decisivamente en el agotamiento y la calidad del aceite obtenido y su elevado nivel de automatización es reflejo de su importancia. Sin embargo, otros parámetros de importancia para la consecución de buenos agotamientos presentan niveles de implantación bastante más reducidos, destacando especialmente el nivel muy bajo de medición en continuo de la grasa contenida en el orujo, hecho que se puede relacionar con el elevado coste de los sensores NIR. Así, sin la medición en continuo de estas variables, el control automático de la almazara se articula sobre lazos de control de bajo nivel aislados unos de otros, requiriendo la experiencia del operador de la planta para establecer las consignas de los variables de forma consistente y adecuada.

6. Líneas futuras de trabajo

En opinión de los autores, sería interesante avanzar en el control automático de la almazara incluyendo objetivos de control adicionales a la optimización del agotamiento. Así, la inclusión de la calidad del aceite obtenido como salida específica

del sistema permitiría abrir nuevas líneas de investigación. La definición de la *calidad* como una variable vectorial compuesta por distintos parámetros del aceite elaborado permitiría buscar la optimización de algún parámetro en concreto del vector, o de una combinación de los mismos. Como ejemplo, se podría proponer la búsqueda de la maximización de la concentración de polifenoles con el fin de obtener un aceite con las máximas propiedades beneficiosas para la salud. La principal dificultad para alcanzar estos objetivos es, como se comentó anteriormente, la necesidad de disponer de sensores que sean capaces de medir estas variables en línea. Por otro lado, sería necesario conocer qué niveles de las variables controladas sería posible alcanzar en función del fruto de que se dispone, por lo que aparecería la necesidad de caracterizar el fruto con el fin de determinar los límites máximos factibles para cada variable. De nuevo, gran parte de la problemática residiría en disponer de los sensores adecuados para poder realizar estas estimaciones en línea.

Una vez resuelta la disponibilidad de sensores, sería necesario identificar modelos suficientemente detallados de los procesos a controlar, tarea complicada dada la complejidad de los mismos, la dependencia del fruto de entrada y las condiciones de operación de la planta, que no facilitan la realización de ensayos de identificación.

Finalmente, otro aspecto que debería ser estudiado es la capacidad de llevar el proceso a condiciones de operación suficientemente diferenciadas y la sensibilidad de las salidas frente a estas condiciones, que justifiquen la utilización de sistemas sofisticados para la determinación de las referencias de las variables de operación, dado que el rango de variación de las variables tecnológicas del proceso es relativamente estrecho. De cualquier manera, independientemente del establecimiento de referencias automáticamente en función de las condiciones del fruto, el control automático de la instalación es un problema no trivial y, a nuestro juicio, muy interesante por las potenciales mejoras que conllevaría para el proceso.

7. Conclusiones

En este artículo se ha expuesto la situación actual de la automatización y el control automático de las almazaras, tanto desde el punto de vista académico como de implantación industrial. Desde la óptica de la investigación, se ha podido comprobar que el problema del control automático de las almazaras presenta aún un gran margen para el desarrollo de técnicas y metodologías que permitan mejorar el proceso de elaboración de aceite de oliva virgen. En particular, el avance en el control global del proceso considerando objetivos de control adicionales a la optimización del agotamiento se prevé como una línea de trabajo interesante, y que, gracias al avance realizado en los últimos años por diversos autores, se presenta como técnicamente factible.

Desde el punto de vista de la implementación industrial, cabe extraer la conclusión de que existe un nivel de implantación medio de los sistemas disponibles, haciendo énfasis en el carácter local o de bajo nivel de los sistemas implementados. Finalmente, es asimismo destacable que las ventajas que aportan la automatización y el control son percibidas claramente por los

almazareros, y que la principal barrera a la hora de incrementar el grado de automatización es el elevado nivel de inversión requerido.

English Summary

Current situation and future perspectives on virgin olive oil elaboration process control.

Abstract

This paper presents the current situation and future perspectives on virgin olive oil elaboration process control. Regarding the current situation, a review of previous research works on the matter is made. Subsequently, the results of a Spain-wide survey are shown in order to show a precise and realistic degree of the process automation in this area. Finally, the authors present, according to their opinion, the future research lines on the olive oil elaboration process control field.

Keywords:

Process control, System modelling, Process automation.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la subvención parcial de esta investigación a través de los proyectos DPI2008-05798/DPI, TEP2009-5363 y UJA_08_16_31.

Referencias

- Agencia para el Aceite de Oliva, 2009. Datos de información del sector del aceite de oliva en España. <http://aao.mapa.es/>.
- Aguilera, D., Ortega, J. G., 2005. Automatización del proceso de extracción del aceite de oliva. situación en la provincia de Jaén. XXVI Jornadas de Automática.
- Alba, J., 1997. Elaboración de aceite de oliva virgen. In: Barranco, D., Fernández-Escobar, R., Rallo, L. (Eds.), *El cultivo del olivo*, 2nd Edition. Mundi-Prensa, Madrid.
- Bordons, C., Cueli, J., 2004. Predictive controller with estimation of measurable disturbances. application to an olive oil mill. *Journal of Process Control*, 305–315.
- Bordons, C., Nunez-Reyes, A., 2008. Model based predictive control of an olive oil mill. *Journal of Food Engineering* 84, 1–11.
- Bordons, C., Zafra, M., 2003. An inferential sensor for the olive oil industry. In: *European Control Conference* (1). Vol. 1. Cambridge University Press.
- Camacho, E. F., Bordons, C., 2004. *Model predictive control*. Springer.
- Cert, A., Alba, J., Leon-Camacho, M., Moreda, W., Perez-Camino, M., 1996. Effects of talc addition and operating mode on the quality and oxidative stability of virgin olive oils obtained by centrifugation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 44 (12), 3930–3934.
- Civantos, L., 1998. Obtención del aceite de oliva virgen. Editorial Agrícola Española, S.A.
- COI, 2009. Datos de producción mundial de aceite de oliva. <http://www.internationaloliveoil.org/>.
- Covas et al., M., 2006. The effect of polyphenols in olive oil on heart disease risk factors. *Annals of Internal Medicine* 145 (5), 333–341.
- Esposito, S., Gianfrancesco, M., Roberto, S., Ibanez, R., Agnese, T., Stefania, U., Maurizio, S., 2008. Monitoring of virgin olive oil volatile compounds evolution during olive malaxation by an array of metal oxide sensors. *Food Chemistry* 2000.
- Fuentes, J. M., Nickel, M. N., 2003. Desarrollo tecnológico en la industria de extracción de aceite de oliva: un análisis dinámico. In: *Foro Económico y Social de Expoliva*. Jaén.
- Furferi, R., Carfagni, M., Daou, M., 2007. Artificial neural network software for real-time estimation of olive oil qualitative parameters during continuous extraction. *Computers and Electronics in Agriculture* 55, 115–131.
- Giovacchino, L. D., Sestili, S., Vincenzo, D. D., 2002. Influence of olive processing on virgin olive oil quality. *European Journal of Lipid Science and Technology* 104 (9-10), 587–601.
- Hermoso, M., Jiménez, A., Uceda, M., Morales, J., 1999. Automatización de almazaras. controles experimentales para la caracterización y regulación del proceso de elaboración. www.inia.es/gcontrec/pub/970151058524220453.pdf.
- Herrera, C. G., 2007. Matter transfer during virgin olive oil elaboration. *Grasas y Aceites* 58 (2), 194–205.
- Jiménez, A., Aguilera, M., Uceda, M., Beltrán, G., 2009. Neural network as tool for virgin olive oil elaboration process optimization. *Journal of Food Engineering* 95 (1), 135–141.
- Jiménez, A., Beltrán, G., Aguilera, M., Uceda, M., 2008. A sensor-software based on artificial neural network for the optimization of olive oil elaboration process. *Sensors and Actuators B: Chemical* 129 (2), 985–990.
- Jiménez, A., Molina, A., Pascual, M. I., 2005. Using optical NIR sensor for on-line virgin olive oils characterization. *Sens. Actuators, B* 107, 64–68.
- Leung, W., 1998. *Industrial Centrifugation Technology*. McGraw-Hill.
- Ljung, L., 1999. *System Identification*, 2nd Edition. Prentice Hall, New Jersey.
- Ortega Nieto, J., 1943. *Cartilla de la almazara*. Ministerio de Agricultura.
- Rodríguez-Mendez, M. L., Apetrei, C., de Saja, J. A., 2008. Evaluation of the polyphenolic content of extra virgin olive oils using an array of voltammetric sensors. *Condensed Matter Physics* 53, 5867–5872.
- Tripoli, E., Giammanco, M., Tabacchi, G., Majo, D. D., Giammanco, S., Guardia, M. L., 2005. The phenolic compounds of olive oil: Structure, biological activity and beneficial effects on human health. *Nutrition Research Reviews* 18 (01), 98–112.
- Uceda, M., Hermoso, M., 1997. Elaboración de aceite de oliva virgen. In: Barranco, D., Fernández-Escobar, R., Rallo, L. (Eds.), *El cultivo del olivo*, 2nd Edition. Mundi-Prensa, Madrid.
- Uceda, M., Jiménez, A., Beltrán, G., 2006. Trends in olive oil production. *Grasas y Aceites* 31 (1), 1–57.