



**UNIVERSIDAD DE SALAMANCA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL**

***MEJORAS EN EL PROCESO INDUSTRIAL DE  
EXTRACCIÓN DE LANOLINA DEL EFLUENTE  
PROCEDENTE DEL LAVADO DE LA LANA EN BASE  
A UN TRATAMIENTO FÍSICO – QUÍMICO***

**TESIS DOCTORAL**



**Autor: ALBERTO SÁNCHEZ PATROCINIO**

**Directores: Prof. Dr. JAVIER R. SÁNCHEZ MARTÍN  
Prof. Dr. CARLOS COSTA PÉREZ**

**Salamanca, Enero 2016**





Departamento de Ingeniería Química y Textil  
Facultad de Ciencias  
Plaza de los Caídos 1 – 5  
37008 SALAMANCA

## MEJORAS EN EL PROCESO INDUSTRIAL DE EXTRACCIÓN DE LANOLINA DEL EFLUENTE PROCEDENTE DEL LAVADO DE LA LANA EN BASE A UN TRATAMIENTO FÍSICO – QUÍMICO

Memoria presentada por el Ingeniero Industrial del I.C.A.I., D. Alberto Sánchez Patrocinio, para optar al grado de Doctor por la Universidad de Salamanca.

Fdo.: Alberto Sánchez Patrocinio

La presente Tesis Doctoral ha sido dirigida por los Doctores D. Carlos Costa Pérez y D. Javier Ramón Sánchez Martín, ambos profesores del Área de Ingeniería Química y Textil de la Universidad de Salamanca, que autorizan su presentación ante la Comisión de Tercer Ciclo de la Universidad de Salamanca.

Y para que así conste, firman el presente informe en Salamanca, a 4 de diciembre de 2015.

Fdo.: Dr. Javier R. Sánchez Martín

Fdo.: Dr. Carlos Costa Pérez



A la memoria de mi padre



# AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento a los Directores de la Tesis Doctoral por el enorme esfuerzo realizado, así como al personal de MANUFACTURAS S.A. por la colaboración que en todo momento he recibido.

Igualmente, a mi esposa e hijas, por su comprensión ante mis ausencias y por su incondicional apoyo y cariño.



# ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	5
GLOSARIO	7
NOMENCLATURA	11
ÍNDICE DE GRÁFICAS	15
ÍNDICE DE TABLAS	17
ÍNDICE DE IMÁGENES	19
1. INTRODUCCIÓN	23
1.1. Consideraciones previas	23
1.2. Objetivos	28
1.2.1. Objetivos generales	28
1.2.2. Objetivos particulares	32
1.3. La fibra de la lana	36
1.4. Propiedades de la lana	43
1.5. Tipos de lana y procedencias	49
1.6. Impurezas naturales y adheridas de la lana	52
1.7. ¿Qué es la lanolina?	57
1.8. Propiedades de la lanolina	61
1.9. Aplicaciones de la lanolina	63
2. ANTECEDENTES	65
2.1. El proceso de lavado de la lana	65
2.2. La extracción de la lanolina. Estado de la técnica	69

3. PARTE TEÓRICA	83
3.1. Proceso de flotación	83
3.1.1. Descripción	83
3.1.2. Cálculos	90
3.2. Proceso de separación por centrifugación	93
4. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN INDUSTRIAL	111
4.1. Variables a considerar y condicionantes operativos	112
4.2. Diagrama de flujo de la instalación para la extracción de lanolina	119
4.3. Depósitos de almacenamiento y homogeneización del efluente	121
4.4. Equipo de flotación (DAF)	122
4.4.1. Dimensionamiento	122
4.4.2. Características	127
4.5. Tanque de craqueo térmico	139
4.6. Separadoras centrífugas	142
4.6.1. Dimensionamiento	142
4.6.2. Características	148
4.7. Funcionamiento de la planta	151
4.8. Automatización de la instalación	159
5. MÉTODOS ANÁLITICOS	165
5.1. Análisis de los efluentes	166
5.1.1. Análisis de la DQO	166
5.1.2. Análisis del contenido en sólidos	172
5.1.3. Análisis del contenido en aceites y grasas	176
5.2. Análisis de la lanolina	178
5.2.1. Punto de fusión	178
5.2.2. Contenido en agua	179
5.2.3. Contenido en cenizas	181

5.2.4. Índice de acidez en grasas	183
5.2.5. Análisis cromático	185
6. RESULTADOS	187
6.1. Pruebas iniciales realizadas con el prototipo del equipo flotador DAF	187
6.2. Organización de las pruebas experimentales en la planta Industrial	199
6.2.1. Variables a considerar	199
6.2.2. Definición del parámetro índice de efluente	203
6.2.3. Medición de la cantidad de lanolina extraída	205
6.3. Pruebas realizadas en la planta industrial	206
6.3.1. Tablas del parámetro índice de efluente	207
6.3.2. Valores de índice de efluente igual a 2,0	216
6.3.3. Valores de índice de efluente entre 2,1 y 3,0	229
6.3.4. Valores de índice de efluente entre 3,1 y 4,0	234
6.3.5. Valores de índice de efluente mayor o igual a 4,0	239
6.3.6. Conclusión parcial del apartado	243
6.4. Características de la lanolina extraída	244
6.4.1. Punto de fusión	244
6.4.2. Contenido en agua	245
6.4.3. Contenido en cenizas	247
6.4.4. Índice de acidez en grasas	249
6.4.5. Análisis cromático	251
6.5. Resultados económicos	252
6.5.1. Rentabilidad y rendimiento umbral	252
6.5.2. Costes de extracción y precio de venta de la lanolina	259
6.5.3. Escenario pesimista	267

6.5.4. Escenario optimista	268
7. CONCLUSIONES	273
7.1. Conclusiones de la instalación de extracción de lanolina	273
7.2. Conclusiones económicas y de operación de la planta	279
8. LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS EN LA INSTALACIÓN	283
BIBLIOGRAFÍA	287

## RESUMEN

El Trabajo que aquí se presenta consiste en la implantación de una instalación dedicada a la extracción de la lanolina presente en el efluente procedente del lavado de lana de oveja.

La lanolina es una ceramida existente en la lana en jugo (sin lavar) y es la responsable de contribuir con la mayor parte de la carga contaminante al efluente del lavado de la lana. Por esta razón, su eliminación se puede considerar como parte del proceso de depuración o tratamiento de las aguas.

Por otra parte, la lanolina tiene aplicaciones comerciales, derivadas de sus propiedades lubricantes, en sectores productivos tan singulares como la industria farmacéutica o cosmética.

La combinación de estos dos aspectos como son el tratamiento del efluente y la valorización del producto, hace que la extracción de la lanolina esté ampliamente implantada en los procesos industriales dedicados al lavado de la lana de oveja.

En la actualidad hay novedosos métodos para realizar esta extracción, citados en el *Estado de la Técnica*, aunque su aplicación a nivel industrial aún no está desarrollada, al menos dentro de las instalaciones comerciales de lavado de lana.

Por ello, este Trabajo toma como base las instalaciones tradicionales para extracción de lanolina, método que utiliza máquinas separadoras centrífugas, aunque introduce algunas innovaciones. La más importante de ellas consiste en el tratamiento de la totalidad del efluente generado, a diferencia de los sistemas conocidos, en que la extracción de lanolina solamente se realiza sobre una fracción del efluente del lavado.

La experimentación ha sido realizada en una instalación industrial, en la que se han determinado los valores de las variables que optimizan el proceso de extracción, entre ellos el pH del agua y la presión del aire en el equipo de flotación de aire disuelto (DAF), incorporado a la planta.

Una de las conclusiones más relevantes derivadas de la presente investigación es que el rendimiento o eficiencia de la extracción de la lanolina depende en su mayor parte de un parámetro, que ha sido denominado *Índice de Efluente*, y cuyo valor es función del tipo de lana que se está procesando en cada momento. Los resultados esperados para el rendimiento de la extracción han sido cuantificados en función de este parámetro.

Una vez optimizados los valores de las variables más importantes que intervienen en el proceso, se realizó un estudio económico para la instalación. Ello permitió determinar, en base al Índice de Efluente definido, la rentabilidad esperada del proceso de extracción.

Para finalizar, se esbozan las líneas de trabajo futuras en esta planta con el fin de conseguir mejorar los resultados actuales de la extracción de lanolina.



## ABSTRACT

The main aim of this research is the establishment of a process for the extraction of lanolin. This substance is a waste obtained from sheep wool scouring.

Lanolin is a ceramide present in raw wool (grease). It is responsible for contributing most of the pollution load of the effluent from washing wool. Therefore, their removal can be considered as part of the water purification treatment.

Moreover, lanolin has commercial applications in different fields such as pharmaceutical or cosmetic industries, derived from its lubricating properties.

The wash water treatment together with lanolin extraction is typically used in wool scouring industries. There are even currently ideas and new methods to perform the lanolin extraction, but so far have not yet been developed for industrial use.

Therefore, this study is based on traditional industrial plants for lanolin extraction using centrifugal separating machines, but adding some innovations. The most important consists on treating the whole effluent generated, unlike known systems, in which the extraction of lanolin is only performed on a fraction of the effluent washing.

In light of the foregoing, it has been designed, made and developed, an industrial plant for experimentation, in which the values of the parameters that optimize the extraction process of lanolin have been calculated. These variables are mainly the pH of the water and the pressure of the air introduced into the DAF (Dissolved Air Flotation) equipment.

One of the most important conclusions of this research is that the efficiency of lanolin extraction depends largely of the parameter called "Effluent Index". This parameter depends on the type of wool that is being washed and allows quantifying the results of this efficiency.

When the values of the most important variables were optimized, it is conducted an economic study for the installation and could determine the expected profitability of the extraction process.

Finally, future work plans in the plant are shown in order to achieve better results extracting lanolin.

## GLOSARIO

Batanado o enfieltramiento: Operación industrial destinada a aumentar la tupidez y el espesor de los artículos de lana, lo cual se produce a consecuencia del encogimiento experimentado por el tejido, bien en la urdimbre, en la trama o en ambos sentidos a la vez.

Craqueo ácido: Es un proceso que tiene lugar dentro del equipo de flotación DAF. Consiste en la disminución del pH del efluente hasta los valores que se establecen en base al presente estudio, buscando con ello favorecer la creación de flóculos en el equipo DAF y por tanto incrementar su eficacia.

Craqueo térmico: Es el proceso mediante el cual, como consecuencia del diferente comportamiento de los componentes del “licor” ante el incremento de temperatura, se produce una separación o disociación de dichos componentes, resultando de ello una estratificación del fluido en capas bien diferenciadas dentro del depósito en el que se realiza este proceso.

CSIRO: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization.

DAF: Equipo de flotación por aire disuelto que tiene la misión de, por medio de unas micro-burbujas de aire generadas en su interior, favorecer la agrupación del efluente en flóculos, y de hacer que dichos

agrupamientos asciendan hacia su parte superior para ser posteriormente evacuados del equipo hacia el exterior.

DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno. Determina el consumo de oxígeno producido en una muestra de agua residual, al cabo de cierto tiempo (normalmente cinco días, DBO-5), como consecuencia de la degradación biológica de la materia orgánica por microorganismos propios del agua residual. Se mide en mg O<sub>2</sub>/L

DQO: Demanda Química de Oxígeno. Concentración másica de oxígeno equivalente a la cantidad de dicromato consumida por la materia disuelta y en suspensión, cuando una muestra de agua se trata con este oxidante en condiciones definidas. Se mide en mg O<sub>2</sub>/L

Efluente: Caudal de agua y otras sustancias que se genera en el lavado de la lana y sobre el que se tratará de realizar la extracción de lanolina.

Floculante: sustancia química que, añadida al efluente, tiene la propiedad de aglutinar o crear *flóculos* de sus sustancias componentes, con el fin de proceder a su posterior separación de la fase líquida.

Índice de efluente: parámetro cuyo valor está entre 2,0 y 6,0 que se utiliza para caracterizar la calidad del efluente generado en el lavado, y que depende del tipo de lana que se esté procesando en cada momento.

IWS: International Wool Secretariat.

Lanolina: Es el producto obtenido al refinar la grasa segregada por las glándulas sebáceas de la oveja, de la cual queda impregnada la fibra de lana. La lanolina que resulta de la desodorización, decoloración, neutralización y eliminación del agua presente en ella. Tiene una composición muy compleja.

Licor: Es el fluido concentrado de grasa que se genera tras el proceso de flotación en el equipo DAF, que es recogido por la parte superior de éste, y que se introduce en el tanque de craqueo térmico y posteriormente en las separadoras centrífugas.

Rendimiento umbral: Es la eficiencia mínima del proceso de extracción de lanolina que garantiza la rentabilidad económica del funcionamiento de la instalación.

Sólidos disueltos: Sustancias que permanecen después de filtrar y evaporar a sequedad una muestra bajo condiciones específicas (4.24.1 de la ISO 6107-2:1989).

Sólidos en suspensión: Sólidos separados por filtración o centrifugación bajo unas condiciones específicas (4.24.3 de la ISO 6107:1989).

Suintina: Se genera en la oveja como consecuencia de la sudoración del animal, a través de las glándulas sudoríparas. Se compone principalmente de sales sódicas y potásicas, la mayoría de las cuales son solubles en agua.

Tipo de lana: Dependiendo de la raza de la oveja así como de las partes (lomo, barriga, patas...) del propio animal que se consideren, la lana tiene unas características diferentes, concernientes sobre todo a la finura de la fibra. En función de ésta, las lanas se denominan según los "tipos", que van desde el *Tipo 2* para las lanas más finas, hasta el *Tipo 5* ó *Tipo 6* de las más gruesas. Las materias más finas tienen mayor valor comercial que las gruesas. De cara a procesar industrialmente la lana, siempre se realiza por partidas o lotes homogéneos, es decir, se agrupan las materias del mismo tipo y no se mezclan calidades diferentes, salvo en muy raras ocasiones.

Trama: Serie de hilos colocados transversalmente que forman parte de un tejido de calada. Estos hilos suelen denominarse "pasadas".

Urdimbre: Serie de hilos colocados longitudinalmente que forman parte de un tejido de calada. Se denominan simplemente "hilos".

Vertido: Es el fluido que se envía a la depuradora municipal. Es el resultado del efluente procedente del lavado de lana, después de haber sido sometido al proceso de extracción de lanolina y posteriormente a un tratamiento de depuración en la propia empresa.

WRONZ: Wool Research Organization of New Zealand

## NOMENCLATURA

$A/S$ : relación de masa de aire de entrada al flotador – masa de sólidos del efluente (kg aire/kg sólidos)

$C$ : coste de extracción de la lanolina, en euros por kg de lana de entrada a los lavaderos (€/kg de lana)

$D'_e$  y  $D'_i$ : diámetros aparentes a la entrada y salida de la primera máquina separadora centrífuga, respectivamente, utilizados en el estudio mediante un análisis dimensional de esta máquina (m)

$d$ : diámetro (medio) de la partícula que se desea separar (m)

$e$ : distancia de separación entre canales (m)

$F_C$ : factor de carga del DAF [ $m^3/(m^2 \cdot h)$ ]

$f$ : fracción de saturación de aire disuelto

$N$ : número de platos apilados de que consta la separadora centrífuga

$Q$ : caudal de flujo de entrada en la primera separadora centrífuga ( $m^3/s$ )

$Q_E$ : caudal de efluente a tratar en el equipo de flotación DAF ( $m^3/s$ )

$R$ : caudal de recirculación presurizada en el equipo de flotación DAF ( $m^3/s$ )

$R_e$ : radio exterior de los discos o platos de la máquina separadora centrífuga (m)

$Re$ : número adimensional de Reynolds. Caracteriza el flujo de trabajo en la entrada y salida de la separadora centrífuga en función de su velocidad y viscosidad.

$R_i$ : radio interior de los discos o platos platos de la máquina separadora centrífuga (m)

$s_a$ : solubilidad del aire para una temperatura del efluente (mL/L)

$u_e$ : velocidad tangencial del flujo a la entrada de la primera separadora centrífuga (m/s)

$u_i$ : velocidad tangencial del flujo a la salida de la primera separadora centrífuga (m/s)

$V$ : precio de venta de la lanolina (€/kg de lanolina)

$X_0$ : concentración de sólidos en el efluente a tratar en el equipo flotador DAF (mg/L)

### **GRIEGAS**

$\alpha$ : ángulo que forman los canales intermedios de los discos de la primera separadora centrífuga

$\mu$ : viscosidad dinámica del fluido en la entrada de la primera separadora centrífuga [kg/(m.s)]

$\eta_U$ : valor del rendimiento umbral de rentabilidad de la instalación de extracción de lanolina (kg lanolina/100 kg de lana de entrada a los lavaderos).

$\rho_f$ : densidad del fluido en la entrada de la primera separadora centrífuga ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_p$ : densidad de la partícula a separar en la entrada de la primera separadora centrífuga ( $\text{kg/m}^3$ )

$\omega$ : velocidad angular de giro de la primera máquina separadora centrífuga (rad/s)



## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 4.1. Concentración teórica de sólidos en el fango que es posible tratar en función de la presión del aire de entrada al DAF

Gráfica 6.1. Rendimiento de la extracción en función del índice de efluente

Gráfica 6.2. Rendimiento de la extracción en función del pH conseguido en el efluente (DAF) SIN adición de floculante. Índice de efluente = 2,0

Gráfica 6.3. Rendimiento de la extracción para pH igual a 3,5 en el efluente (DAF) CON adición de floculante. Índice de efluente igual a 2,0

Gráfica 6.4. Rendimiento de la extracción para diferentes valores de presión de aire de entrada en DAF. Índice de efluente = 2,0

Gráfica 6.5. Rendimientos medios de la extracción frente a distintos valores de presión de aire de entrada en DAF y pH del efluente. Índice de efluente = 2,0

Gráfica 6.6. Rendimiento de la extracción en función del pH conseguido en el efluente (DAF). Índice de efluente entre 2,1 y 3,0

Gráfica 6.7. Rendimiento de la extracción para diferentes valores de presión de aire de entrada en DAF. Índice de efluente entre 2,1 y 3,0

Gráfica 6.8. Rendimientos medios de la extracción frente a distintos valores de presión de aire de entrada en DAF y pH del efluente. Índice de efluente entre 2,1 y 3,0

Gráfica 6.9. Rendimiento de la extracción en función del pH conseguido en el efluente (DAF). Índice de efluente entre 3,1 y 4,0

Gráfica 6.10. Rendimiento de la extracción para diferentes valores de presión de aire de entrada en DAF. Índice de efluente entre 3,1 y 4,0

Gráfica 6.11. Rendimientos medios de la extracción frente a distintos valores de presión de aire de entrada en DAF y pH del efluente. Índice de efluente entre 3,1 y 4,0

Gráfica 6.12. Rendimiento de la extracción en función del pH conseguido en el efluente (DAF). Índice de efluente mayor o igual a 4,0

Gráfica 6.13. Rendimiento de la extracción para diferentes valores de presión de aire de entrada en DAF. Índice de efluente mayor o igual a 4,0

Gráfica 6.14. Rendimientos medios de la extracción frente a distintos valores de presión de aire de entrada en DAF y pH del efluente. Índice de efluente mayor o igual a 4,0

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Tipos de lanas

Tabla 1.2. Tipos de lana, porcentajes de producción anual de la empresa  
Manufacturas S.A.

Tabla 1.3. Propiedades físicas de la lanolina

Tabla 1.4. Contenido de la fracción ácida de la lana

Tabla 1.5. Contenido de la parte alcohólica de la grasa de la lana

Tabla 6.1. Caracterización de la muestra inicial

Tabla 6.2. Resultados del parámetro índice de efluente

Tabla 6.3. Resultados generales de las pruebas: tiempo de llenado de los  
bidones

Tabla 6.4. Resultados ordenados de las pruebas para muestras cuyo índice de  
efluente es igual a 2,0

Tabla 6.5. Datos medios observados en las pruebas para muestras cuyo índice  
de efluente es igual a 2,0

Tabla 6.6. Resultados ordenados de las pruebas para muestras cuyo índice de  
efluente está entre 2,1 y 3,0

Tabla 6.7. Datos medios observados en las pruebas para muestras cuyo índice  
de efluente está entre 2,1 y 3,0

Tabla 6.8. Resultados ordenados de las pruebas para muestras cuyo índice de  
efluente está entre 3,1 y 4,0

Tabla 6.9. Datos medios observados en las pruebas para muestras cuyo índice  
de efluente está entre 3,1 y 4,0

Tabla 6.10. Resultados ordenados de las pruebas para muestras cuyo índice de efluente es mayor o igual a 4,0

Tabla 6.11. Resultados de los rendimientos medios optimizados de extracción obtenidos en las pruebas en función del índice de efluente

Tabla 6.12. Estrategias de funcionamiento de la planta de extracción de lanolina en función del precio de venta del producto

## ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1.1. Raza merina

Imagen 1.2. Constitución de la fibra de lana

Imagen 1.3. Estructura típica de las escamas cuticulares de una fibra de lana

Imagen 1.4. Vista longitudinal de varios tipos de fibras al microscopio

Imagen 1.5. Algunas impurezas vegetales que suele incorporar la lana

Imagen 2.1. Lana entrando en la primera barca de lavadero

Imagen 2.2. Sistema WRONZ para extracción de lanolina en continuo

Imagen 2.3. Esquema de una máquina separadora centrífuga

Imagen 3.1.a. Separadora centrífuga

Imagen 3.1.b. Velocidad y recorrido de una partícula entre dos discos

Imagen 3.2. Separadora centrífuga comercial

Imagen 3.3. Vista del paquete de discos de una centrífuga en el momento de su extracción para su limpieza

Imagen 3.4. El mismo paquete de discos en el momento de su colocación dentro de la separadora centrífuga

Imagen 4.1. Tanques de homogeneización en el interior de la nave

Imagen 4.2. Esquema de funcionamiento del sistema de floculación

Imagen 4.3. Equipo de flotación DAF. Vista del colector de mezcla aire – agua

Imagen 4.4. Inyectores del caudal de recirculación al interior del tanque

Imagen 4.5. Floculador perteneciente al equipo de flotación DAF

Imagen 4.6. Vista superior de los dos compartimentos del tanque con sendos serpentines por los que circula el vapor

Imagen 4.7. Tanque de craqueo térmico

Imagen 4.8. Separadora centrífuga ALFA LAVAL C 209

Imagen 4.9. Separadora centrífuga ALFA LAVAL C 207

Imagen 4.10. Equipo regulador de caudal de entrada de aire al DAF

Imagen 4.11. Rasqueta del DAF llenando el espesador de grasa antes de su entrada en el tanque de craqueo térmico

Imagen 4.12. Tanque de craqueo térmico

Imagen 4.13. Recogida de lanolina en un embudo a la salida de la segunda centrífuga para su almacenamiento

Imagen 4.14. Una de las pantallas de visualización de la planta en el PC

Imagen 5.1. Ejemplo de viraje de color al añadir la sal de Mohr

Imagen 5.2. Ejemplo de preparación de las muestras de agua para analizar su DQO.

Imagen 6.1. Ensayo de laboratorio de la muestra 1. Informe de partida realizado sobre una muestra de agua procedente de los lavaderos sin tratar, antes de la entrada en el prototipo DAF

Imagen 6.2. Ensayo de laboratorio de la muestra 2. Informe de ensayo realizado en una muestra del vertido después de ser tratada en el prototipo DAF trabajando con un  $\text{pH} = 3$ , sin añadir floculante

Imagen 6.3. Ensayo de laboratorio de la muestra 3. Informe de ensayo realizado sobre una muestra del vertido después de ser tratada en el prototipo DAF, trabajando con un  $\text{pH} = 3$  y añadiendo el floculante en la dosificación indicada

Imagen 6.4. Válvulas para regular caudal y presión del aire de entrada en el DAF

Imagen 6.5. Vaso de precipitados sobre calefactor de placas para medir el punto de fusión

Imagen 6.6. Estufa

Imagen 6.7. Muestras en el interior del desecador

Imagen 6.8. Muestra de lanolina sobre mechero Bunsen

Imagen 6.9. Cenizas tras la combustión de la muestra de lanolina

Imagen 6.10. pHmetro digital para el control de la prueba

Imagen 6.11. Muestra virando a color rosáceo

Imagen 6.12. Equipo comercial para medida del color según la escala Gardner



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. CONSIDERACIONES PREVIAS

- La presente Tesis Doctoral se ha realizado utilizando las instalaciones de la empresa MANUFACTURAS S.A. situada en la ciudad de Béjar (Salamanca), dedicada al lavado y peinado de lana de oveja.

Según diversos indicios<sup>1 2</sup>, el origen de la actividad textil bejarana se remonta al siglo XIII. En el siglo XV ya existían en Béjar pequeños centros para la fabricación de paños que, bajo la tutela de los Duques, fueron creciendo y haciéndose un lugar importante dentro del mercado español. A finales del siglo XVI se construye el primer tinte, enteramente financiado por el Duque, a excepción del terreno que fue cedido por el Municipio.

Por entonces en Béjar sólo se fabricaban paños bastos, pero debido a las exigencias del mercado, en 1691 se contrata a varios maestros flamencos que quedaban obligados “a pasar a la villa de Béjar y residir en ella, a imponer y ejecutar la fábrica de paños, bayetas, droguetes, estameñas, sempiternas, ratinas y otros géneros de lanas y enseñar su manufactura a los naturales del Ducado de Béjar que lo quisieran aprender”<sup>3</sup>.

A partir de la llegada de estos maestros flamencos, la secular y estática artesanía se va a transformar en moderna, dinámica y creciente industria textil.

Desde entonces hasta nuestros días, la historia de la ciudad de Béjar ha estado íntimamente ligada al sector textil. Tradicionalmente se han fabricado prendas para uniformes del Ejército, uno de los pilares del sector en cuanto a ventas hasta tiempos bastante recientes.

En la actualidad, la actividad textil de la ciudad se ha visto reducida por diversas circunstancias, sobre todo derivadas de la competencia, muchas veces desleal, de empresas de países terceros, principalmente asiáticos.

La empresa MANUFACTURAS S.A. se creó en 1940 y actualmente es la única industria de envergadura que realiza el lavado y peinaje de lana de oveja en España. Las materias textiles que se trabajan en esta empresa son propiedad de los clientes, facturándose por los trabajos de transformación realizados<sup>4</sup>.

Las claves que han permitido la subsistencia de esta industria, en contra de la tendencia generalizada a dismantelar y *deslocalizar* las instalaciones industriales del país, han sido el compromiso de directivos y trabajadores con la empresa, así como una adecuada política en materia de inversiones en maquinaria<sup>5</sup>, cuya continuidad se refleja asimismo en el objetivo perseguido precisamente en este Trabajo.

- Es conocido que los efluentes procedentes del lavado de la lana poseen una Demanda Química de Oxígeno (DQO) elevada, con valores en el entorno de 30000 a 40000 mg O<sub>2</sub>/L<sup>6</sup>. Una instalación industrial de lavado de lana equivale a un vertido urbano de una población de entre 20000 a 30000 habitantes<sup>7 8</sup>.

De hecho, se conocen expresiones empíricas que relacionan la DQO del efluente con las cantidades de los diferentes contaminantes presentes en la lana en sucio<sup>9</sup>, como la siguiente (en mg de O<sub>2</sub>/L):

$$\begin{aligned} \text{DQO} = & (8,267 \cdot \text{Suintina}) + (30,980 \cdot \text{Grasa oxidada}) + \\ & +(28,236 \cdot \text{Grasa superficial}) + (6454 \cdot \text{Sólidos}) + 1536 \quad (1) \end{aligned}$$

Esta expresión demuestra una correspondencia directa entre la presencia de grasa en la lana y la DQO del efluente generado en su lavado.

En este sentido, la decisión de implantar una instalación para la extracción de lanolina fue tomada en parte para paliar el problema que suponen estos vertidos de tan elevada DQO.

Hay que precisar que las aguas generadas en el proceso de lavado son tratadas en la propia empresa, pasando después a la red general de saneamiento del municipio de Béjar por medio de una instalación de bombeo situada en la misma fábrica.

En esta red municipal los vertidos industriales se mezclan con los urbanos y pluviales, hasta llegar a la estación depuradora del municipio de Béjar, donde son tratados antes de su retorno al cauce. Esta depuradora municipal fue calculada para poder tratar aguas

residuales industriales mezcladas con las urbanas, para una población de 102205 habitantes equivalentes y un caudal de 9391 m<sup>3</sup>/día.

- El denominado *churre o grasa* es el conjunto de la lanolina y la suintina presentes en la lana de la oveja.

La *lanolina* es generada por el animal de forma natural a través de sus glándulas sebáceas. Hay determinadas razas ovinas cuya lana proporciona mayor cantidad de lanolina que otras. Así ocurre, por ejemplo, con la lana procedente de la raza merina, que contiene mayor cantidad de lanolina que otras razas como las entrefinas o churras. Se puede decir, como regla general, que la lana cuya *finura* (diámetro medio de la fibra) es menor, contiene de forma intrínseca una mayor cantidad de lanolina que otra lana más gruesa (con mayor diámetro medio de fibra).

Por otro lado, la *suintina* se genera en la oveja como consecuencia de la sudoración del animal, a través de las glándulas sudoríparas. De ambas, lanolina y suintina, es la primera la que se encuentra en mayor proporción formando lo que comúnmente se viene llamando *grasa*.

- En este estudio se describe el sistema de extracción de lanolina implantado, se exponen las pruebas realizadas y se obtienen las conclusiones oportunas.

Mediante los resultados obtenidos en la parte experimental de la Tesis Doctoral se realizará el ajuste de diversos parámetros de

funcionamiento de la instalación, así como la dosificación adecuada de reactivos, buscando siempre la optimización del proceso.

Se trata por tanto de un trabajo práctico o *aplicado*, realizado en una planta con funcionamiento industrial *en continuo* y cuyos resultados se han utilizado por parte de la empresa promotora para su implantación.

Las pruebas industriales se han ejecutado, tal como se ha comentado, en las instalaciones de la empresa MANUFACTURAS S.A. en Béjar (Salamanca), mientras que los análisis físico – químicos de los diferentes efluentes necesarios para el desarrollo de los trabajos de esta investigación, se han realizado en los laboratorios de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Béjar, aunque en alguna circunstancia también se han utilizado laboratorios externos.

En estas ocasiones, los laboratorios utilizados han sido laboratorios *homologados* para poder utilizar los resultados derivados de los análisis ante las autoridades, con el fin de justificar el cumplimiento de diversos parámetros de vertido.

## 1.2. OBJETIVOS

Durante el año 2014, tomando como base los estudios realizados en el presente Trabajo, comenzó a ejecutarse esta instalación para la extracción de la lanolina procedente de la lana. Con ello se buscaron los siguientes objetivos:

### 1.2.1. OBJETIVOS GENERALES

1. El *estudio e implantación* de una instalación para la extracción de lanolina adaptado a una empresa de lavado y peinado de lana de oveja.

2. *Extracción de la lanolina del efluente.* La lanolina es una ceramida de composición química muy compleja. Se encuentra presente en la fibra de la lana de oveja, ya que este animal la genera de forma natural, a través de sus glándulas sebáceas.

Cuando la lana es lavada en instalaciones industriales como la que es objeto de esta investigación, la lanolina queda incorporada al efluente de agua generado como consecuencia de dicho proceso.

El principal objetivo del estudio que se va a llevar a cabo es separar o extraer la lanolina del resto del efluente.

Con ello se busca obtener un producto que es apreciado por el mercado ya que tiene aplicación en diversos sectores, como en la industria cosmética. También se utiliza como revestimiento antioxidante para lubricantes o como materia prima para la producción de colecalciferol (vitamina D3), para su uso en suplementos vitamínicos de alimentación animal.

3. *Mejorar la calidad del efluente.* El efluente que procede del lavado de la lana se trata en una depuradora situada en la propia fábrica.

El proceso de depuración actual está dotado de un tratamiento físico – químico. Su equipo principal consiste en un equipo de flotación por aire disuelto. En él se combina la acción de las burbujas de aire junto con la adición de un floculante, así como una disminución del pH del efluente, para aumentar su eficacia.

Dicho efluente se neutraliza al finalizar el proceso y se conduce, mediante unos equipos de bombeo, a la depuradora municipal. El vertido se trata de nuevo en esas instalaciones junto al resto de los vertidos generados en el municipio de Béjar.

Si antes de que el efluente del lavado de lana sea tratado en la citada depuradora de fábrica, se realiza sobre él la extracción de su lanolina, dicho efluente quedará liberado de una gran parte de su carga contaminante.

La razón es que la lanolina aporta un elevado porcentaje, incluso por encima del 60% (según el tipo de lana), de la DQO total del efluente procedente del lavado.

4. *Rentabilizar económicamente la instalación.* La inversión realizada en la planta se espera retornar de dos maneras diferentes:

- Comercializando la lanolina extraída.

Durante los años ochenta, cuando aún existía un gran número de instalaciones dedicadas al lavado de lana, la lanolina era extraída solamente por criterios de disminución de costes de depuración. Sin embargo, a medida que muchos de estos lavaderos, por diversas razones, han cesado en su actividad, la producción de lanolina ha disminuido y consiguientemente su precio en el mercado ha ido al alza. A principios de esta década, se llegaron a realizar transacciones de venta a un precio por encima de los 6 €/kg de lanolina. Actualmente, el precio de la lanolina se mantiene estable en el entorno de los 3 a 4 €/kg, que es un precio de venta que proporciona un margen de beneficio ajustado pero suficiente por sí mismo, aparte de la disminución de costes de depuración que se trata a continuación.

- Disminuyendo los costes de depuración asociados a la mejora de la calidad del efluente.

Ya se ha indicado anteriormente que la lanolina contribuye con una parte importante de la DQO total del efluente del lavado de la lana.

Por tanto, si la lanolina se logra extraer del efluente antes de que éste pase al proceso de depuración, los costes asociados a este tratamiento se verán reducidos en dos aspectos:

- Por la disminución de los reactivos a utilizar. Al ser la DQO del fluido de entrada inferior, la utilización de coagulante necesaria para el tratamiento en el equipo de flotación también se reducirá. Además, a lo largo de este estudio se verá que para optimizar la extracción de lanolina, es sustancial reducir el pH del efluente. Si se añade ácido para la extracción, en la depuración ya no será preciso, y por tanto se ahorrarán reactivos también por esta parte.
- Por el menor consumo de energía eléctrica en la maquinaria. Un efluente de mejor calidad (menor DQO), precisa menor caudal de aire en el equipo flotador. El compresor encargado de proporcionar el aire comprimido funcionará por tanto un menor número de horas.

## 1.2.2. OBJETIVOS PARTICULARES

Los objetivos particulares del presente Trabajo son:

1. *Realizar el tratamiento de la totalidad del efluente.* Cuando la grasa, compuesta en su mayor parte por lanolina, se disocia del resto del efluente del proceso de lavado de lana, tiende a ascender a la parte superior del baño, debido a su menor densidad. Esto ocurre, en mayor medida, en las primeras barcas del lavadero, aquellas más cargadas de grasa.

Para lograr completar el proceso de extracción de lanolina, los sistemas industriales habitualmente sólo tratan una pequeña fracción del efluente, precisamente esa parte flotante de las primeras barcas.

Sin embargo, si bien la parte superior del baño de las primeras barcas del lavadero es muy rica en lanolina, hay una parte ésta que se encuentra en zonas intermedias, y que no es posible tratar por tanto por el sistema convencional.

En la instalación que se propone en este estudio, a diferencia del método citado anteriormente, se contempla tratar todo el caudal generado en los lavaderos. La manera de hacerlo será reuniendo la totalidad del efluente en un sistema de homogeneización y posteriormente haciendo pasar todo el

caudal por la instalación proyectada. De esta forma se espera conseguir rendimientos de extracción de lanolina superiores.

2. *Establecer las variables de funcionamiento de los diferentes equipos para la optimización de la extracción de lanolina.* En este Trabajo se dimensionan los principales sistemas que conforman la instalación. Estos son un nuevo equipo de flotación por aire disuelto, a añadir al existente para la depuración, y dos separadoras centrífugas.

En cada uno de estos aparatos se precisa ajustar determinadas variables que condicionan su funcionamiento, mejorando con ello la eficacia del proceso final. Para el equipo de flotación se manejan las siguientes variables:

- Caudal y presión del aire de entrada al equipo
- pH del efluente
- Adición de sustancias floclulantes

En lo que se refiere a las separadoras centrífugas, el ajuste de funcionamiento más importante es el caudal de entrada a las máquinas.

Se estudiará la influencia de cada una de estas variables en el rendimiento global de la extracción de lanolina y se intentará establecer un modelo del comportamiento de la instalación en función de ellas.

3. *Conocer e implantar las consignas de funcionamiento de la planta.* No todos los tipos de lana poseen la misma cantidad de lanolina, ni ésta tampoco tiene las mismas características.

Por tanto, es de esperar que, en función del tipo o calidad de la lana que se esté trabajando en cada momento, la cantidad de lanolina que se extraiga en la instalación pueda variar.

Se pretenden averiguar los costes derivados de la extracción de este producto, que dependerán fundamentalmente del uso de reactivos y de los costes energéticos. Si finalmente estos costes se comparan con los beneficios derivados de la extracción (punto 3 de los Objetivos Generales), será posible conocer y por tanto establecer, en función del tipo de lana que se trabaje en cada momento, las consignas de funcionamiento o parada de la instalación.

4. *Analizar la lanolina generada para establecer sus parámetros de calidad con el fin de comercializarla.* En el punto anterior se ha indicado que las características de la lanolina dependen, en gran medida, del tipo de lana de la que procede.

A pesar de que la lanolina que se obtiene de las lanas de origen nacional, con las que se ha realizado el presente estudio, tiene poca variación en lo que a sus características se refiere, (y por tanto también en su precio de venta), para comercializar el producto es necesario indicar una serie de parámetros que la caractericen.

Estos parámetros se analizan para varias muestras representativas de cada uno de los tipos de lana y son los siguientes:

- Punto de fusión. Suele ser muy estable, en torno a los 40 °C
- Contenido en agua. Representa la cantidad de agua presente en la lanolina. Si su valor está por encima del 1%, probablemente se deba a un problema en las máquinas separadoras centrífugas.
- Contenido en cenizas. Este parámetro está muy relacionado con el color de la lanolina. Un contenido elevado en cenizas proviene de muestras excesivamente cargadas de tierras y su color será oscuro, frente a una lanolina de color claro, que tendrá poco contenido de tierras y por tanto dará pocas cenizas cuando se realice este ensayo.
- Índice de acidez en grasas. Expresa los miligramos de Hidróxido Potásico necesarios para neutralizar la acidez libre de un gramo de sustancia grasa. La importancia de su conocimiento radica en que en base a su valor es posible estimar el contenido en determinados componentes, especialmente los ácidos grasos libres, que incorpora la lanolina. De esta forma, se puede conocer a

priori si la muestra es válida para algunas aplicaciones concretas.

- **Análisis cromático.** El color de la lanolina, independientemente de su contenido en cenizas, es función fundamentalmente del tipo de lana. Las lanas merinas (de tipo 2) suelen proporcionar lanolinas de color más claro que las lanas de tipos más “altos”. El color se analiza por comparación con una escala patrón y es uno de los parámetros que más se aprecian por su simplicidad de observación y por la información que aporta sobre el producto.

### 1.3. LA FIBRA DE LA LANA

Algunas fibras textiles proceden del pelo que cubre a algunos animales, siendo la lana de la oveja el más importante. La oveja es el animal doméstico más antiguo y su lana ha sido usada en vestimenta desde hace al menos diez mil años. La lana es una materia renovable, pues la oveja se esquila todos los años, en primavera o a comienzos del verano, obteniéndose cada vez un vellón que puede llegar a pesar hasta 4 kg en los casos más favorables. Actualmente hay alrededor de 40 razas de oveja diferentes, dando lugar aproximadamente a 200 tipos de lana, siendo los mayores productores Australia, Nueva Zelanda, Sudáfrica, Argentina, Rusia y China<sup>10</sup>.

La calidad de la lana es función de su finura, longitud, color, brillo, rizado, etc., lo que depende mucho de la raza de que procede. Hay muchas razas, pero entre ellas sobresale la merina, debido a la finura de sus fibras.



Imagen 1.1. Raza merina <sup>11</sup>

Esta raza estaba estrictamente protegida en España, pero a principios del siglo XVIII se difundió por el mundo. Existen marcadas diferencias entre las características de la lana que proporcionan las distintas razas de ovejas, como se muestra en la Tabla 1.1<sup>12</sup>:

<i>Tipo</i>	<i>Nombre</i>	<i>Longitud, mm</i>	<i>Diámetro, <math>\mu\text{m}</math></i>
Fina	Merino	40-100	10-30
Media	Cheviot, Suffolk	50-100	20-40
Larga	Cotswold, Leicester	120-350	25-50
Rizada	Corriedale	70-150	20-40

Tabla 1.1. Tipos de lanas

La lana de oveja es el resultado de un proceso de *queratización* o endurecimiento de la materia viva y blanda que, al fluir hacia la superficie de la piel del animal, hace que el tejido vivo se transforme en fibroso.

La constitución de la lana es compleja, mucho más que la de cualquier otra fibra vegetal, artificial o sintética.

Si se observa una sección transversal de la fibra al microscopio, se aprecian tres zonas bien diferenciadas:

A.- *Parte central o medular*

B.- *Substancia cortical o córtex*

C.- *La corteza o cutícula exterior*

La *parte central* es un canal, continuo o discontinuo, formado por células redondeadas o poliédricas. En algunas lanas, principalmente lanas gruesas, se ve a simple vista y puede llegar a ocupar el 70% de la fibra. Cuando el canal es discontinuo, la parte que falta queda ocupada por el aire. Se puede poner como límite de la medulación a las lanas de 25 micras: por encima de este micraje la médula aumenta y por debajo disminuye hasta incluso desaparecer.

De esta manera, se pueden diferenciar las lanas en dos clases, las que tienen médula y aquellas que no la tienen.

En la figura siguiente<sup>13</sup> se puede observar una fibra de la lana con sus partes constituyentes.

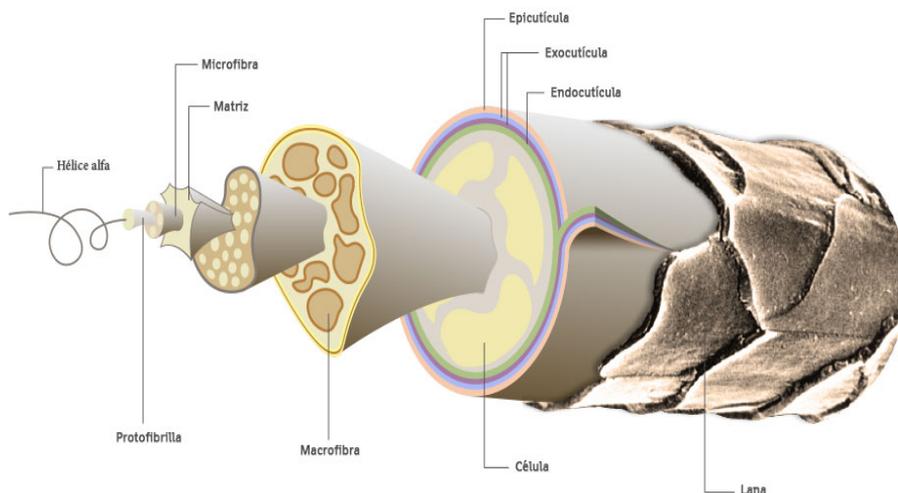


Imagen 1.2. Constitución de la fibra de lana

La *sustancia cortical o córtex* es la parte principal de la fibra de la lana. Está formada por células fusiformes, que tienen 100 micras de largo por 4 de ancho, pudiendo llegar a constituir el 90% del total de la fibra, y dan a la lana la mayoría de sus propiedades: resistencia, elasticidad, baja densidad, facilidades tintóreas, etc. A su vez la constituyen fibrillas más pequeñas, las "microfibrillas", las cuales en su interior contienen una unidad menor aún, la "protofibrilla", formada por las moléculas de proteína y unidas entre sí por una especie de cemento que las

cohesiona y tiene, de forma directa, la responsabilidad de la elasticidad de la fibra de la lana.

El córtex presenta una estructura bilateral formada por dos partes diferentes distribuidas longitudinalmente, *ortocórtex* y *paracórtex*.

Las dos partes de que consta esta zona son de una misma constitución y como tal se comportan en seco pero, al humedecerse, el ortocórtex es más flexible debido a que las microfibrillas están irregularmente distribuidas y el cemento que las une deja intersticios que ocupa la humedad, mientras que en el paracórtex las células están repartidas uniformemente y el cemento que las une cubre bien los huecos. No siempre hay un límite de separación entre el orto y el paracórtex, existiendo formas intermedias que van diferenciando la barrera divisoria.

La *corteza o cutícula exterior* está formada por escamas que confieren a la fibra muchas y excelentes cualidades. Estas escamas son fácilmente visibles al microscopio. Las lanas finas suelen tener una sola escama que ocupa por completo a la fibra, presentándose a manera de embudos o tubos cónicos, enchufados unos dentro de otros. En las fibras gruesas, se necesitan tres o cuatro escamas para abrazar toda la fibra. A medida que aumenta el diámetro de las fibras, las escamas son más escasas y menos pronunciadas, siendo igualmente más difíciles de ver al microscopio porque sus puntas están pegadas a la fibra y su superficie

es lisa y con más brillo. La parte visible de la escama tiene de 8 a 14 micras.

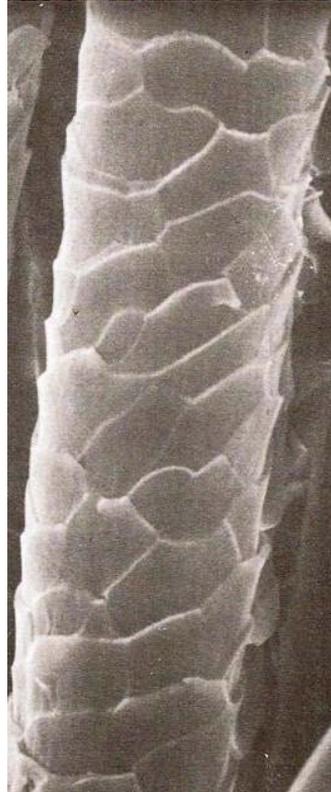


Imagen 1.3. Estructura típica de las escamas cuticulares de una fibra de lana<sup>14</sup>

Esta superficie escamosa, que muchas veces no es una escama sino una superposición de ellas y que alcanza un 10% de la totalidad del espesor de la fibra, tiene la misión de dar resistencia a la lana frente a la acción de los agentes y fuerzas exteriores, así como delimitar su crecimiento. Protegiendo estas escamas hay una finísima membrana de composición

química diferente, que hace a la fibra más suave al tacto y evita el ataque de los ácidos. Se conoce con el nombre de *epicutícula*.

En Schneegluth pueden observarse interesantes fotografías de fibras de lana tomadas al microscopio<sup>15</sup>.

Una de las propiedades más importantes que aportan las escamas a la lana es su poder de enfieltramiento, que guarda una relación directa con el número de escamas y la finura de la fibra. El enfieltramiento se puede definir como la facilidad que tiene la lana de formar un tejido consolidado a base de entrelazarse unas fibras con otras y, por tanto, sin necesidad de procesos de hilado y tejeduría.

Hay que precisar que el enfieltramiento es el efecto conseguido mediante una operación de acabado que se llama “batanado” y que se realiza habitualmente sobre los tejidos de calada para mejorar sus propiedades de abrigo. Es decir, se trata de una operación industrial destinada a aumentar la tupidez y el espesor de los artículos de lana, lo cual se produce a consecuencia del encogimiento experimentado por el tejido, bien en la urdimbre, en la trama o en ambos sentidos a la vez<sup>16</sup>.

En cuanto a la tintura de la lana, se realiza en distintas formas de presentación (flocas, peinado, hilo o tejido), pudiendo utilizarse para ello colorantes de diferentes tipos, tales como colorantes ácidos, premetalizados, al cromo o reactivos, aunque el consumo de los colorantes al cromo está disminuyendo por problemas

medioambientales<sup>17</sup>. Entre la bibliografía al respecto pueden consultarse por ejemplo los libros de Cegarra<sup>18</sup> o de Lewis<sup>19</sup>.

## 1.4. PROPIEDADES DE LA LANA<sup>20 21 22</sup>

Las propiedades físicas más relevantes de la lana son las siguientes:

- El **color** va del blanco leche al amarillo pálido, sin olvidar que existen lanas coloreadas por la propia naturaleza: pardas, grises o negras.
- La **finura** viene determinada por el diámetro de la fibra, es decir, por la parte mayor del óvalo que se formaría en un corte transversal de la misma; las fibras no son exactamente cilíndricas, ni todas las fibras dentro de un mismo tipo de lana tienen el mismo diámetro, de tal manera que siempre que se habla de finura se refiere a una finura media.
- La **longitud** puede definirse como la distancia en milímetros medida entre la base y la punta de la fibra. Se distingue entre *longitud real*, que es la que tiene la lana estirada, sin sus rizos, y la *longitud aparente*, que es la que tiene la fibra con su rizo natural.
- El **rizo** de la lana es una característica de las lanas merinas, disminuyendo en las entrefinas y siendo casi nulo en las bastas (estos tipos de lanas se definirán más adelante). Consiste en

unas ondulaciones naturales de la fibra, que confieren al hilo mayor voluminosidad y elasticidad.

- La **densidad o peso específico**, es la relación entre el peso y el volumen. Su valor es de 1,28 a 1,31 g/cm<sup>3</sup> (1280 a 1310 kg/m<sup>3</sup>). La lana tiene la densidad más baja de todas las fibras naturales. La densidad tiene importancia en los procesos industriales, ya que el transporte de fibras suele ser neumático: en él las diferentes fibras se separan en función de su distinta densidad debido a la resistencia que les opone el aire; así también es posible separar la lana seca de la húmeda por su diferente densidad.
- La **resistencia a la rotura** es la fuerza que oponen las fibras a deformarse y romperse. Las principales repercusiones de esta propiedad son tecnológicas, ya que es un parámetro a tener en cuenta en el proceso de transformación de las fibras. Los principales parámetros que cuantifican la resistencia son la carga de rotura o carga que son capaces de soportar las fibras antes de romperse. Se mide en cN o en gramos – fuerza.
- La **tenacidad** quizá sea más interesante que la propiedad anterior, por ser una unidad específica, es decir, referida a la finura de la fibra. La tenacidad de las fibras de lana varía entre 9 y 18 cN/tex en seco y de 7 a 16 cN/tex en mojado, que son valores relativamente bajos en comparación con la tenacidad de otras fibras, sobre todo las denominadas “sintéticas” (obtenidas

por síntesis química a partir de productos derivados del petróleo).

- La **elongación o alargamiento a la rotura** de la fibra es el aumento de longitud que experimentan las fibras en el momento de la rotura. Para la lana es del 20 – 40% de la longitud inicial de la fibra en seco y del 30 – 60% en húmedo, siendo estos valores muy altos en comparación con otras fibras.
- El **módulo inicial o módulo elástico**<sup>23</sup> es una propiedad que indica la capacidad de deformación de las fibras a pequeños esfuerzos. Los módulos altos se corresponden con fibras rígidas, que se deforman muy poco, mientras que fibras más suaves tienen módulos bajos. El módulo inicial de la lana es de 210 – 350 cN/tex, valor bajo en comparación con el de otras fibras.
- La **elasticidad** es la tendencia que tiene la fibra a deformarse y recuperar su dimensión original cuando cesa la fuerza que ha provocado la deformación. La recuperación elástica es la capacidad de recuperación de su dimensión original. Se mide como porcentaje; cuanto mayor es éste, mayor es la recuperación elástica de la fibra, alcanzando el valor del 100% cuando la fibra recupera totalmente el alargamiento a que se sometió inicialmente. La lana, después de experimentar un alargamiento del 2% de su longitud es capaz de recuperar el 99% de ese alargamiento, e incluso después de estirarlas un 5% de su

longitud, la fibra es capaz de recuperar el 84% de ese alargamiento.

Por tanto, se trata de una fibra muy elástica y con excelentes propiedades de recuperación, circunstancias que vienen a compensar su baja tenacidad y que hacen que un tejido de lana sea poco propenso a la formación de arrugas debido a su poder de recuperación. Es lo que se denomina *resiliencia*, o capacidad de la lana de recuperar su forma original, excepto en presencia de condiciones cálidas y húmedas en que no ocurre así (esto último se aprovecha para determinados procesos de acabado de tejidos de lana)

- La lana posee un excelente ***aislamiento térmico*** debido a la gran voluminosidad que se deriva de su rizado y de su resiliencia, que hace que ocluya una gran cantidad de aire en su interior (hasta el 60 – 80% del volumen de la fibra)
- ***No es una fibra conductora*** de la corriente eléctrica, ni tampoco lo son la mayoría de las fibras textiles. Por ello, la lana puede producir problemas de acumulación de electricidad estática, que se solventan cuando la humedad relativa del ambiente es suficiente. También existen tratamientos antiestáticos para determinados productos fabricados con fibras de lana.

- La lana auto extingue la llama y se quema muy lentamente incluso en contacto con ella. El **LOI (Limiting Oxygen Index)** <sup>24</sup> es un índice que mide el comportamiento a la llama de las fibras. Concretamente se define como el porcentaje mínimo de oxígeno presente en el ambiente necesario para que se mantenga la combustión. Cuanto más alto sea este parámetro, mayor es la resistencia a la llama de una fibra. Cuando el LOI es igual o superior a 21, que es el porcentaje de oxígeno en el aire atmosférico, la fibra se comporta como ignífuga. Esto es lo que ocurre en el caso de la lana, cuyo LOI es igual a 25<sup>25</sup>. Las propiedades de la lana que contribuyen a su baja inflamabilidad son su alto contenido en nitrógeno y humedad así como su elevada temperatura de ignición (570 – 600 C)  
También es interesante considerar que la parte carbonizada que se forma en la lana al contacto con la llama es fría, no se adhiere a la piel y es fácilmente eliminable con un cepillado. Esta capa aísla y protege, por ejemplo, el relleno del mobiliario, de una posible fuente de incendio.

Sobre las propiedades químicas de la lana se han de considerar:

- La lana es una fibra simultáneamente **hidrófila e hidrófoba**. Es hidrófila frente al vapor de agua e hidrófoba frente al agua líquida, en este caso por el carácter también hidrófobo de la epicutícula.

La lana puede absorber el 30% de su peso de humedad sin dar la sensación de estar mojada.

- La lana es intrínsecamente **insoluble** por estar formada por un polímero reticulado, la queratina, que es una sustancia proteínica constitutiva de las diferentes capas y cuyo contenido en azufre va aumentando de la capa interna a la externa. Esta proteína está compuesta de más de veinte aminoácidos y su peso molecular oscila entre 59000 y 65000<sup>26</sup>. Su estructura molecular detallada puede verse en Miró Plans<sup>27</sup>. Para poderla disolver, manteniendo intactas las cadenas polipeptídicas, es necesario proceder a la rotura de los enlaces disulfuro de la queratina por reducción o por oxidación.

La queratina componente de la lana, por ser rica en el aminoácido cistina, es sensible a muchos productos químicos, sobre todo a los **álcalis**. Los oxidantes la atacan pero se emplean en los procesos textiles, como sucede con el peróxido de hidrógeno, que se utiliza en los denominados blanqueos.

- Por el contrario, la lana es bastante **resistente a los ácidos**. Baste decir que, durante la operación de carbonizado, el ácido sulfúrico se emplea para la destrucción de las materias celulósicas (vegetales) que incorpora la lana, causando a la fibra un daño mínimo.
- La lana es especialmente sensible a la **polilla**, que la disuelve y digiere. Para paliar este problema existen tratamientos

inhibidores. Por el contrario, resiste bastante bien otros agentes biológicos como los mohos.

- La lana se degrada por acción del **calor**, amarillea por encima de los 150 °C y se carboniza a 300 °C. También es sensible a las **radiaciones ultravioletas** de baja longitud de onda (300 – 350 nm).
- A lo largo de su procesado textil, la lana es tratada también con otros productos químicos, además de ácidos y de álcalis. Concretamente nos referimos a los oxidantes y reductores, que deben aplicarse también en las condiciones adecuadas de concentración, temperatura y tiempo para no dañar la fibra, según describe detalladamente Gacén Guillén<sup>28</sup>.

## 1.5. TIPOS DE LANA Y PROCEDENCIAS

El apartado, sorteo, selección o clasificado de lanas es una operación industrial, pero manual cien por cien. Tiene por objeto convertir las partidas o pilas de vellones de lana en lotes de fibras de semejante longitud, finura, color y tacto. De ello resultan lotes bien definidos que pasarán a la siguiente operación del proceso, el lavado<sup>29</sup>. Los tipos comerciales de lana se clasifican principalmente según su finura y son los siguientes:

- Lanas **tipo 1**. Su finura es inferior a las 22 micras
- Lanas **tipo 2** o lanas *merinas* nacionales. Su finura se encuentra entre 22 y 23,5 micras
- Lanas **tipo 3** o *entrefinas*. Su finura está entre 23,5 y 25 micras
- Lanas **tipo 4**. Son similares a las de tipo III en cuanto a finura, quizá algo más gruesas, pero se diferencian de las anteriores en que no incorporan el denominado “pelo muerto”, que es una fibra totalmente queratizada de color blanco, similar a las canas humanas
- Lanas **tipo 5**. Su finura es superior a las 25 micras, pudiendo llegar a 27 o más, dependiendo de su procedencia
- Lanas **bastas**. Se denominan así a aquellas que suelen tener una finura superior a las 27 micras. Se caracterizan además por tener una elevada longitud de fibra. La lana procedente de la raza *churra* es un claro ejemplo de este tipo de lana

Hay que hacer notar que esta denominación de los tipos de lana ha ido variando con el tiempo, debido a que la fibra cada vez se está volviendo más gruesa por diversas razones. En primer lugar por las mezclas de razas autóctonas con ovejas de pelo más grueso y en segundo lugar por la propia degradación de la fibra como consecuencia de la búsqueda de rendimiento de carne y leche de la oveja, con la consiguiente pérdida de interés por la lana<sup>30</sup>.

En la empresa MANUFACTURAS se procesan lanas *del país*, aunque en alguna ocasión se trabajan de otras procedencias. Por tipos de lana, las estadísticas de producción media anual en fábrica de los últimos años son las siguientes:

<b>Tipo de lana</b>	<b>Porcentaje anual</b>
TIPO 2	55
TIPO 3	20
TIPO 4	11
TIPO 5	5
OTROS (bastas)	9

Tabla 1.2. Tipos de lana, porcentajes de producción anual de la empresa Manufacturas S.A.

Lo que pone de manifiesto que la mayoría de las lanas que se trabajan corresponden a lanas merinas, en su mayor parte procedentes de la zona de Extremadura y Andalucía.

Con la finalidad de comparar la fibra de lana con otras fibras, en la imagen de microscopía siguiente pueden observarse vistas longitudinales de varias de ellas. Pueden apreciarse también, a la izquierda de la imagen, las diferencias entre una fibra de lana gruesa y otra fina.

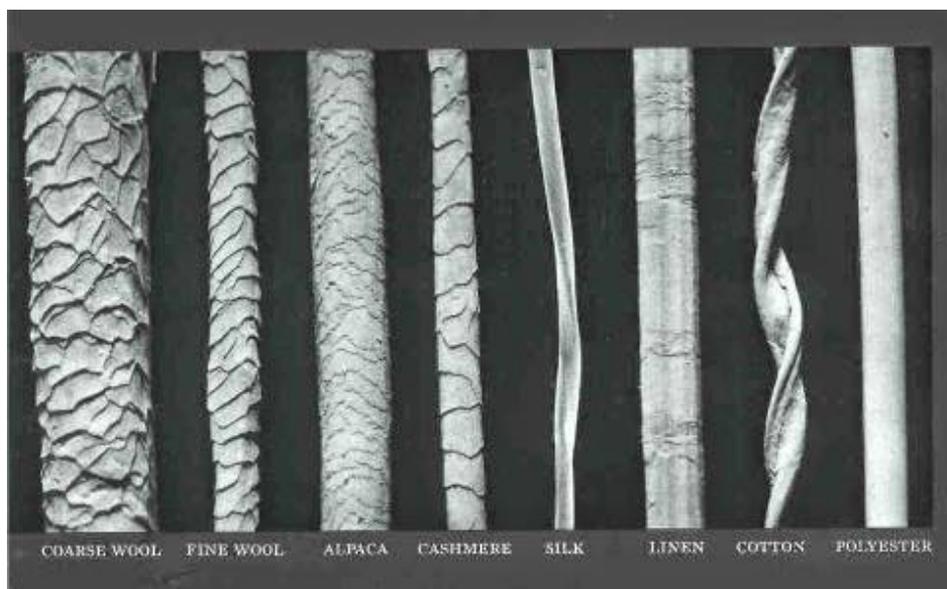


Imagen 1.4. Vista longitudinal de varios tipos de fibras al microscopio<sup>31</sup>

## 1.6. IMPUREZAS NATURALES Y ADHERIDAS DE LA LANA

Tanto la lanolina, de la que se hablará con profusión en los apartados siguientes, como la suintina, se pueden considerar impurezas *naturales*, ya que las origina el propio animal.

La fibra de lana se presenta recubierta de una capa protectora constituida por una parte por materias segregadas por las glándulas sebáceas (*lanolina*) y, por otra, por secreciones de las glándulas sudoríparas del animal, constituidas fundamentalmente por sales

potásicas (*suintina*). Al conjunto de dichas sustancias se le llama *grasa*, *suarda* y algunas veces *churre*.

Los componentes principales de la suintina son solubles en agua pues las sales potásicas están en forma de carbonato, sulfato, cloruro y oxalato, conteniendo también ácidos orgánicos saturados y pequeñas cantidades de urea y amoníaco. Estas impurezas ayudan notablemente en el proceso de lavado en soluciones acuosas que contienen detergentes, ya que actúan como vigorizantes de éstos<sup>32</sup>.

La composición *media* de la lana cruda española es la siguiente<sup>33</sup>:

- 58,6% de fibra de lana (lana desgrasada)
- 15% de lanolina
- 12% de suciedad
- 5% de suintina
- 9,4% de agua

El contenido en lanolina que puede obtenerse de las fibras de lana depende de la raza del animal. Las ovejas de lanas finas (merinas) sudan mucho más y están más cargadas de grasa debido a que cuando el animal soporta la lluvia, un vellón muy compacto deja entrar poca agua a su interior y por tanto las impurezas se aglutinan en vez de eliminarse, fenómeno favorecido además por la presencia de abundante grasa.

Algunas fábricas de lavado de lana han incorporado plantas de recuperación de la grasa. Estas plantas pueden llegar a obtener de 8 a

71 kg de grasa por tonelada de lana procesada, con un promedio de 30. Las mayores tasas de recuperación corresponden a las fábricas que trabajan lanas finas, ya que la lana gruesa contiene porcentajes inferiores de grasa en forma oxidada tal como se ha indicado.

La relación entre el peso de lana sucia y el de la misma una vez lavada, constituye el denominado *rendimiento del lavado*. El lavado de la lana se entiende adecuado cuando el porcentaje medido de grasa en la lana después de su lavado no supera el 1% de su peso. Por encima de esta cantidad de grasa, la materia dará problemas en los procesos textiles subsiguientes, por lo que su eliminación es el objetivo que se persigue en el proceso de lavado. Sin embargo, tampoco conviene reducir la totalidad de la grasa de la fibra porque en su ausencia, la lana se vuelve quebradiza y su resistencia a la rotura disminuye, dificultando los procesos industriales posteriores.

Respecto a las impurezas adheridas a la lana, durante el pastoreo, en su roce con los arbustos y plantas, el ganado ovino coge gran cantidad de materia vegetal que queda adherida a la lana y que no forma parte de su propia constitución, aunque también se adhieren a ella tierra, arena, materias extrañas y algunas veces otros pelos de animales con los cuales ha estado en contacto. Tales impurezas son causa de graves complicaciones en su transformación industrial posterior si no se eliminan convenientemente.

La materia vegetal que se adhiere a la lana puede ser de muy distinta índole, con diversas formas y tamaños y con diferente dificultad para su eliminación. Normalmente está constituida por cadillo, abrojos, semillas, pajas, etc. Cuando se trata de cadillo grande, puede ser fácilmente separado durante el claseo o clasificación inicial de la materia. Dicho cadillo se presenta en general en forma de bolas más o menos grandes, recubiertas de pinchos, adheridas fuertemente a la fibra. Sin embargo, en tipos de cadillo pequeño, con formas de caracol, erizadas y con pequeñas semillas en su interior, la eliminación debe hacerse forzosamente mediante el proceso de cardado anterior al peinado.

Son muy diversas las clases de cadillo y materias vegetales. Podemos citar entre ellas diversas familias: *Erodus Gygnorum*, *Hordeum leoprinum*, etc. que pueden presentarse en los más diversos tamaños y formas.

Una primera clasificación de los vegetales que se observan en cualquier muestra de residuo de carda (Imagen 1.5), según Malvar y otros<sup>34</sup>, podría ser la siguiente (proviene en parte de la Norma UNE 40-239-75):

- Vegetales pequeños, cuyo tamaño es menor de 10 mm, muchos de ellos incluso menores de 5 mm. Suelen ser poco ramificados y por tanto se supone que tienen poca adherencia a la fibra. Es el tipo de vegetal que se suele denominar comúnmente “tabaco”.

- Vegetales tipo espiga, caracterizados por acabar en punta y en el otro extremo poseer muchas ramificaciones. Su tamaño suele oscilar entre 10 y 20 mm y su adherencia a las fibras se produce por el extremo ramificado.
- Vegetales grandes. Su tamaño es muy variable, pero se consideran grandes a partir de 10 mm. Pueden llegar a medir 30 mm o más y se suelen encontrar partidos, lo que aumenta más su adherencia a las fibras no sólo por el tamaño sino también por esta forma quebrada.



Imagen 1.5. Algunas impurezas vegetales que suele incorporar la lana

No obstante, estos vegetales pueden tener un determinado potencial de valoración en los campos textil, de la construcción y agrario, según han descrito A.S. Patrocinio y otros<sup>35</sup>.

Otras impurezas que contiene la lana y que no son objeto de este estudio son los “plásticos”, especialmente los de polipropileno. Han de considerarse más una *contaminación* que una impureza y son de todo punto perjudiciales para los procesos subsiguientes al peinado de la lana y hay que detectarlos y eliminarlos<sup>36</sup>.

Estos provienen de la mala costumbre que hay en el campo de ser utilizados para el atado de las balas de lana, pienso, alimentos animales, etc.

## 1.7. ¿QUÉ ES LA LANOLINA?

La grasa de la lana es uno de los componentes de la lana sucia (sin lavar) que es necesario retirar de la fibra con el fin de continuar realizando posteriores procesos que deriven en aplicaciones textiles.

El producto obtenido al refinar la grasa se conoce como *lanolina*, que resulta de la desodorización, decoloración, neutralización y eliminación del agua presente en ella.

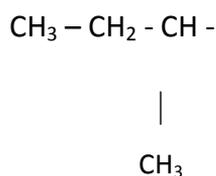
Esta sustancia posee múltiples aplicaciones y, por tanto, es un subproducto del lavado de la lana con elevado valor añadido.

La grasa de la lana es una mezcla muy compleja, compuesta en su mayor parte por ésteres de varias cadenas largas de *ácidos grasos* con cadenas también largas de *alcoholes* y *esteroles*.

Técnicamente se debe considerar una *cera*, más que una grasa, debido a que los ésteres glicéricos no se encuentran presentes.

Los *ácidos grasos* presentes en la grasa de la lana se pueden englobar dentro de cuatro clases diferentes<sup>37</sup>:

- Una serie de parafinas con un número de carbonos entre 10 y 26 (C<sub>10</sub> a C<sub>26</sub>)
- Una serie de iso-ácidos con cadena alcalina terminada en un grupo (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>-CH- con un número de carbonos desde C<sub>10</sub> hasta C<sub>28</sub>
- Una serie de ácidos con un terminal grupo isobutil:



con números impares de carbono desde C<sub>9</sub> hasta C<sub>31</sub>

- $\alpha$ -hidróxidos normales e iso-ácidos, por ejemplo R-CH(OH)-COOH con un número de carbonos entre C<sub>12</sub> a C<sub>32</sub>

Los *alcoholes* son incluso más complejos. Hay alcoholes alifáticos correspondientes a las mismas series de estructuras que los ácidos, por ejemplo

- Alcoholes normales desde C<sub>18</sub> a C<sub>30</sub>
- iso-alcoholes de C<sub>18</sub> a C<sub>26</sub>
- alcoholes desde C<sub>17</sub> a C<sub>27</sub>

- 1,2-dioles, por ejemplo  $R-CH(OH)-CH_2OH$ , ambos normal e iso,  $C_{16}$  a  $C_{24}$

Sin embargo, la mayor parte de la fracción de alcohol consiste en esteroides. El más importante es el colesterol, seguido por el lanosterol y el dihidrolanosterol. Otros derivados esteroides están presentes en menores cantidades.

Claramente, los ésteres formados a partir de estos ácidos y alcoholes forman una variedad confusa, especialmente cuando se considera que los hidroxi-ácidos y los dioles pueden formar di-ésteres.

Además de los ésteres, se encuentran presentes ácidos grasos libres junto con otras impurezas tales como jabones (sales metálicas de ácidos grasos). Los jabones de calcio son particularmente importantes. Estos surgen principalmente de la producción de lana de tenería cuando se usa cal para la depilación, lo que puede causar problemas en la separación centrífuga de la lanolina así como en su refinado.

La lanolina es un elemento con importante valor comercial. Sin embargo, lo más apreciado de los productos de la grasa es la mezcla de alcoholes de la cera. Estos se producen por hidrólisis (saponificación) de los ésteres seguido por extracción con disolventes de los alcoholes. Son ampliamente utilizados en artículos de tocador y preparaciones medicinales debido a su capacidad para formar emulsiones estables arrastrando grandes cantidades de agua.

Además de la lanolina, la otra impureza de tipo natural presente en la lana es la suintina, que procede del sudor de las ovejas, y es una mezcla compleja de sales solubles en agua. El catión predominante es el potasio; los aniones incluyen carbonato, bicarbonato, varios ácidos mono- y di-carboxílicos de bajo peso molecular (succínico, glicólico, glutárico, etc) y cantidades más pequeñas de aniones de ácidos grasos de cadena larga. Los péptidos y otras sustancias nitrogenadas son componentes de menor importancia.

Los aniones de cadena larga son por sí mismos de superficie activa y actúan como una barrera eficaz dispersando agentes durante el lavado. El pH de la suintina suele estar alrededor de 8,5 a 9,0 de tal forma que los ácidos grasos están ionizados y actúan como tensioactivos aniónicos (jabones) participando en la estabilización de la emulsión de grasa confiriendo una carga negativa a las partículas de la emulsión.

En consecuencia, uno de los pasos clave en la desestabilización de la emulsión para los tratamientos de efluentes es la *acidificación*, para convertir esos jabones en ácidos, destruyendo así su carga superficial y facilitando la coalescencia. Este proceso se conoce como *craqueo ácido* y tiene su relevancia en la extracción de la lanolina, como se demostrará posteriormente con las pruebas realizadas.

Cuando se analiza mediante ensayo de extracción con disolvente convencional el efluente del lavado de la lana, se comprueba que existe una superposición entre los componentes de la suintina y de la lanolina.

Además, algunos de los componentes de la grasa, analizada mediante extracción del vertido con éter de petróleo, también es soluble en agua. Por tanto, la distinción entre los componentes de suintina y lanolina, especialmente en lanas oxidadas, está poco definida.

## 1.8. PROPIEDADES DE LA LANOLINA

Tabla de propiedades físicas de la lanolina<sup>38</sup>

<b>Propiedad</b>		<b>Valor aproximado</b>
Color		Amarillo o marrón
Peso específico (15°C)		0,94 – 0,97 g/cm <sup>3</sup>
Índice de refracción (40°C)		1,48
Punto de fusión		35 – 40°C
Contenido ácido libre		4 - 10%
Contenido alcohólico libre		1 - 3%
Índice de Iodo (Método Wijs)		15 – 30
Valor de saponificación		95 – 120
Peso molecular		790 – 880 g/mol
Proporción de ácidos grasos		50 - 55%
Ácidos	Punto de fusión	40 – 45°C
	Índice de Iodo (Método Wijs)	10 – 20
	Peso molecular medio	330 g/mol
Alcohol	Punto de fusión	55 – 65°C
	Índice de Iodo (Método Wijs)	40 – 50
	Peso molecular medio	370 g/mol
	(Dam)	70 – 80

Tabla 1.3. Propiedades físicas de la lanolina

Tabla de la parte ácida de la grasa de la lana<sup>38</sup>

<b>Fracción ácida</b>	<b>Contenido aproximado (% sobre el total de ácidos)</b>
n-ácido	7
iso-ácido	22
anteiso-ácido	29
α-Hidroxi-n-ácidos	25
α-Hidroxi-iso-ácidos	3
<i>Total</i>	<i>86</i>
Resto (Supuestamente la mayoría ácidos saturados)	14

Tabla 1.4. Contenido de la fracción ácida de la lana

Tabla de la parte alcohólica de la grasa de la lana<sup>38</sup>

<b>Fracción alcohólica alifática</b>	<b>Contenido aproximado (% del total de alcoholes)</b>
n- alcohol	4
iso- alcohol	6
anteiso- alcohol	7
n-Alcano-1,2-diol	0,5
iso-Alcano-1,2-diol	25
iso-Alcano-1,2-diol	3
esteroles	28
isocolesterol	27
hidrocarburos	1
<i>Total</i>	<i>78</i>
Residuo no identificado	22

Tabla 1.5. Contenido de la parte alcohólica de la grasa de la lana

Desde un punto de vista práctico, la grasa de la lana disuelta en el efluente procedente del lavado consiste en dos fracciones principales, típicamente referidas como la grasa *oxidada* y la *no oxidada*.

La parte oxidada se viene asociando a la que procede de la parte superficial de la fibra que está expuesta al aire y al medio ambiente, mientras que la parte no oxidada procedería de la parte central e interior de la fibra en contacto con el animal. En general se observa que la fracción oxidada tiene una densidad más alta que la no oxidada, pero valores actuales publicados en diversas obras varían ampliamente<sup>39</sup>.

## 1.9. APLICACIONES DE LA LANOLINA<sup>40 41</sup>

Tradicionalmente, la lanolina se ha venido utilizando en la industria *cosmética*, tanto en el cuidado personal (por ejemplo, los cosméticos de alto valor, cosméticos faciales, productos para los labios, jabones, maquillajes, tratamiento del cabello...) como en el sector de cuidado de la salud. Se utiliza con frecuencia en el tratamiento de protección de la piel<sup>42</sup>.

También se ha utilizado en muchos productos *industriales* como revestimiento antioxidante para lubricantes. Algunos marineros usan lanolina para conformar superficies resbaladizas en sus hélices y equipos de popa para que los percebes no puedan adherirse. Las propiedades *repelentes al agua* hacen que sea valiosa como grasa lubricante donde la corrosión ocasionaría un problema.

La lanolina se utiliza a menudo como materia prima para la *producción de colecalciferol* (vitamina D3). El colecalciferol se produce industrialmente para su uso en *suplementos vitamínicos* y para fortificar

los alimentos mediante la irradiación ultravioleta del 7-dihidrocolesterol extraído de la lanolina. El colesterol se somete a un proceso de cuatro pasos para llegar al 7-dihidrocolesterol, el mismo compuesto que se almacena en la piel de los animales. El 7-dihidrocolesterol se irradia con luz ultravioleta. Durante la irradiación, se forman algunos isómeros no deseados. Estos se eliminan mediante diversas técnicas, conformando una resina que se funde aproximadamente a la temperatura ambiente. La vitamina D3 se utiliza en multitud de *complejos alimenticios para alimentación animal*<sup>43</sup>, y particularmente ha tomado gran profusión en los últimos tiempos para la alimentación de crustáceos, aunque es habitual su presencia también como nutriente en piensos para otras especies animales.

La lanolina también tiene otros usos diversos de menor importancia, como parte de la crema para afeitar, de labios, como repelente de agua y de la suciedad de prendas, etc. Mezclada con alcohol se usa para lubricar el latón en el proceso de recarga de munición y cuando se mezcla con ingredientes como el aceite de pata de buey, cera de abejas y glicerina (glicerol), se utiliza en diversos tratamientos de piel animal, por ejemplo en algunos jabones de silla y para conservación de piezas de vestir de cuero.

En definitiva, la lanolina se utiliza como materia prima para la producción de otras sustancias tras un proceso de mezcla o disociación de alguno de sus componentes.

## 2. ANTECEDENTES

En este apartado se realiza, en primer lugar, una breve descripción del proceso de lavado de la lana de oveja.

Este proceso es fundamental en la instalación ya que, a partir de él, la lanolina presente inicialmente en la fibra de la lana, pasa a incorporarse al efluente tras el lavado.

Posteriormente se estudian las diferentes formas conocidas de extracción de lanolina, en lo que se ha denominado *estado de la técnica*.

### 2.1. EL PROCESO DE LAVADO DE LA LANA

El lavado se realiza mediante un sistema de tanques o barcas de agua, a través de los cuales circula la materia, para conseguir la separación de la grasa y la suspensión de la suciedad<sup>44</sup>.

Se suele emplear, anteriormente al propio lavado, un proceso de eliminación de partículas sólidas, mediante un cribado en un tamiz vibratorio, que permite separar gran parte de las tierras y materias vegetales adheridas a la lana<sup>45</sup>.

Para extraer la grasa por emulsión, los tanques se cargan con agua, detergentes y carbonato de sodio u otro álcali. También es preciso calentar el agua de las barcas a 55 – 65°C, que es la temperatura con la que se alcanza la fusión de la grasa de la lana y a la que los detergentes presentan una mayor eficacia.

Entre tanque y tanque se extrae el exceso de agua de la lana mediante cilindros exprimidores, devolviéndose nuevamente al baño. El agua del sistema circula a contracorriente para así disponer del agua de calidad idónea en cada fase del proceso.

A continuación se describen las operaciones que tienen lugar en cada una de las barcas:

#### *Barca 1*

La lana es sometida a un lavado únicamente con agua a una temperatura relativamente baja, de unos 20°C. Su misión es la eliminación de tierras y materias sólidas del efluente.

#### *Barca 2*

La lana es lavada en un medio alcalino mediante el aporte de carbonato sódico o sosa, junto a un detergente, para permitir el des-emulsionado de la grasa, favorecido este proceso por una temperatura de unos 60°C en el medio acuoso.

### *Barca 3*

En ella el proceso es idéntico al de la segunda barca en cuanto a reactivos químicos y condiciones de temperatura.

### *Barca 4*

La lana desengrasada en anteriores baños se somete a un lavado solamente con agua a una temperatura de unos 45 a 50°C, con el fin de arrastrar el resto de reactivos químicos usados y materias contaminantes que incorpora la lana.

### *Barcas 5 y 6*

Finalmente, la lana se somete a un proceso de aclarado con aporte de agua limpia a una temperatura de unos 30°C.

La obtención de la temperatura deseada en el baño se consigue regulando la aportación de vapor de agua al interior de la barca. Dado que en esta instalación la calidad del agua de aporte es muy buena por la ausencia de sales cálcicas, no se precisa ningún tratamiento previo de esta agua.

Después del proceso de lavado, la lana contiene una humedad del 40-60%, por lo que se procede a su secado con aire caliente. Para el ahorro de energía, el suministro de calor puede ser controlado mediante un dispositivo que mide la humedad de la atmósfera o el contenido de humedad de la lana.

Es interesante apuntar en este instante que las plantas comerciales de lavado de lana de nueva adquisición, se dotan originalmente de un sistema para la recuperación de la lanolina o grasa de lana, pero *no era el caso de los lavaderos de MANUFACTURAS S.A.*, que carecía de él, lo que ha dado lugar al presente trabajo de investigación, con el fin de implantar este sistema sobre la instalación existente.

Existen métodos alternativos que se utilizan para el lavado de la lana. De ellos cabe destacar el lavado utilizando ultrasonidos, que en épocas recientes está dando buenos resultados, al menos a nivel experimental<sup>46 47 48</sup>.



Imagen 2.1. Lana entrando en la primera barca de lavadero

## 2.2. LA EXTRACCIÓN DE LA LANOLINA. ESTADO DE LA TÉCNICA

La extracción de lanolina de la lana es un proceso que se conoce desde hace tiempo. La técnica de extracción ha ido evolucionando a la par que lo ha hecho la maquinaria utilizada en ese proceso.

En el año 2004, el Ministerio de Medio Ambiente publicó la *Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España del Sector Textil*. En este documento se expone el estudio llevado a cabo en un total de ocho industrias dedicadas al lavado de lana, donde se pone de manifiesto que la recuperación de la lanolina del efluente supone beneficios en cuanto a disminución de caudal de agua bruta necesaria para el lavado de lana por recuperación de una parte del efluente, así como una menor carga contaminante del vertido<sup>49</sup>.

En la actualidad, a estas dos justificaciones se une el hecho de que la lanolina de la lana tiene un estimable valor económico en el mercado.

Hay diversas formas de realizar la separación de la grasa de la lana de la propia fibra, algunas de ellas de una eficacia extraordinaria, como se verá. Pero, para ello, utilizan técnicas que no pueden ser consideradas de aplicación industrial en el momento actual, bien por su elevado coste de explotación o por no ser de funcionamiento continuo. Quedan, por tanto, fuera del ámbito del presente estudio en el que es prioritario buscar la rentabilidad técnico – económica del proceso.

Por otra parte, la práctica totalidad de los procedimientos comerciales implantados de extracción de lanolina que cumplen los requisitos de aplicabilidad industrial, trabajan a partir del tratamiento de *una pequeña fracción del agua del proceso de lavado de la lana*, mediante un procedimiento de separación física por centrifugación, tal como se explicará.

En primer lugar, se comienza con la descripción de esos métodos o sistemas de extracción de lanolina que podríamos denominar *experimentales o no industriales*, queriendo con ello expresar la idea de que, a pesar de que se demuestran como muy eficaces en su objetivo, no lo son tanto en cuanto a su aplicabilidad en el sector industrial textil, al menos en la actualidad. Son los siguientes:

*A. Empleo de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en condiciones por debajo del punto crítico del CO<sub>2</sub> en presencia de un cosolvente apropiado<sup>50</sup>.*

La lana sin ningún tratamiento previo se introduce mediante compactación en un reactor de extracción, de manera que se minimicen los espacios vacíos para aumentar de esta manera la cantidad de material a extraer. El reactor de extracción se mantiene a una temperatura de trabajo comprendida entre 40 y 80°C y se introduce el agente extractante (CO<sub>2</sub> de alta pureza cuyo contenido en agua y oxígeno sea menor o igual a 10 ppm y con un contenido de hidrocarburos menor a 30 ppm), al que previamente se le ha incorporado un cosolvente polar (metanol, acetato de etilo, acetona

y/o etanol), en un porcentaje de al menos del 5%, para aumentar el poder solvatante del fluido en cuestión, y a una presión de trabajo que oscila entre 50 y 300 atm. La proporción de cosolvente añadido al CO<sub>2</sub>, es función de la polaridad del mismo y de la miscibilidad en CO<sub>2</sub>. Si se excede el valor de la misma el sistema se comporta como bifásico ocasionando una disminución del rendimiento de extracción, dando lugar a resultados poco reproducibles. La lanolina extraída se recupera mediante una descompresión del CO<sub>2</sub> reduciéndose el poder solvatante del mismo.

El CO<sub>2</sub> puede ser reutilizado para una posterior extracción. El extracto (lanolina + cosolvente) es reconducido a una columna de fraccionamiento a contracorriente de CO<sub>2</sub> que se encuentra presurizada (>100 atm) con el objetivo de obtener un producto (lanolina) libre del cosolvente orgánico (el cual es también reciclado para una posterior extracción) y una fracción de impurezas. El cosolvente se purifica mediante un lecho poroso, permitiendo el reciclaje del CO<sub>2</sub>. El lecho poroso se puede regenerar mediante un proceso térmico que elimina las impurezas retenidas en el mismo.

En las condiciones óptimas de extracción, se obtiene una lana exenta de lanolina, sin dañar la fibra de la lana de oveja, en un proceso de extracción selectivo. El poder solvatante del CO<sub>2</sub> se modula variando polaridad del cosolvente adicionado al CO<sub>2</sub>.

Se ha constatado el estudio de métodos similares a éste<sup>51 52</sup> y otros en los que se ha utilizado Hexano e Isopropanol<sup>53</sup>.

*B. Extracción por el método SOXHLET<sup>54</sup>.*

Se basa en un equipo de extracción del mismo nombre para componentes orgánicos no volátiles o semi-volátiles. Este procedimiento trata de asegurar un contacto íntimo entre la muestra y el disolvente utilizado.

Para la extracción de lanolina mediante Soxhlet se puede seguir el procedimiento de la *International Wool Secretariat (IWS)* denominado ET-708. Utilizando un sistema Soxhlet clásico con cartuchos de extracción de celulosa, se puede mezclar el lodo o crema con sulfato de sodio anhidro al fin de eliminar el contenido de agua. Esta extracción requiere tiempos de proceso en torno a 4 horas, así como disponer de la lanolina previamente separada del efluente.

*C. Extracción con microondas<sup>54</sup>*

Esta técnica, al igual que la anterior, también requiere de la extracción previa de la lanolina del efluente. Se utiliza una muestra húmeda de lodos o crema extraída mediante un disolvente y se irradia sobre ella, durante un determinado tiempo, una potencia en un equipo de microondas. La muestra se filtra posteriormente.

#### *D. Extracción mediante filtros cerámicos*<sup>55</sup>

Esta técnica consiste en el calentamiento del efluente procedente del lavado de lana y su filtración a través de un sistema de filtros cerámicos. El líquido concentrado se conduce posteriormente a un sistema de centrifugado para su total separación o extracción.

Se entiende fácilmente que estos métodos o sistemas de extracción de lanolina descritos tienen un importante componente científico, pero no tanto aplicabilidad industrial, que es lo que se persigue con el procedimiento discutido en el presente estudio.

El método de separación de la grasa de la lana que se describe a continuación es el utilizado habitualmente en la industria textil. Es conocido como sistema WRONZ porque fue desarrollado por la *Wool Research Organization of New Zealand* a partir de los trabajos de algunos investigadores en las últimas décadas del Siglo XX<sup>56</sup>.

Se trata de un sistema *en continuo*, que desvía una parte del efluente originado en una de las barcas del lavado de la lana, según un esquema como el de la figura siguiente<sup>57</sup>.

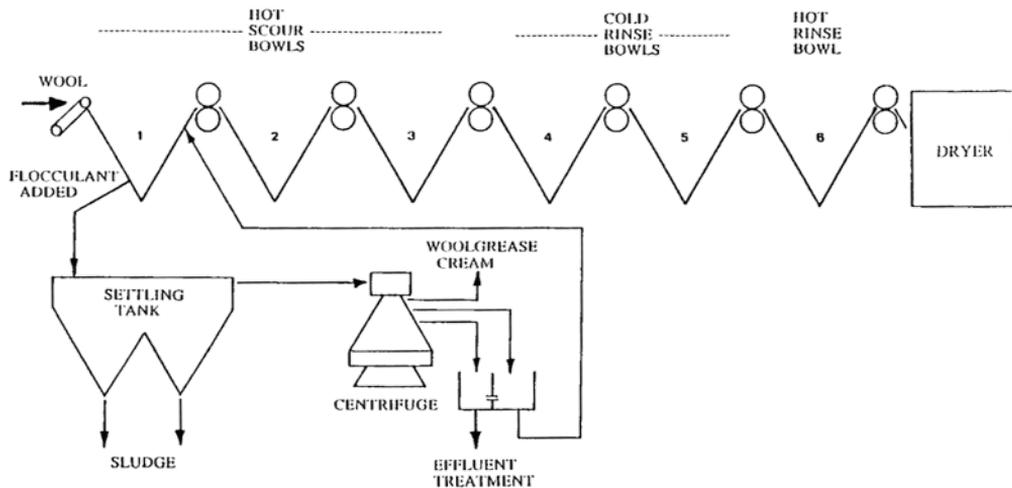


Imagen 2.2. Sistema WRONZ para extracción de lanolina en continuo. Este el sistema más extendido entre la industria actual

Consiste en derivar una cantidad de efluente procedente de la primera barca para ser tratado en el exterior del lavadero, aunque también se han evidenciado instalaciones que la extraen de la segunda barca.

Se extrae del proceso una parte del efluente, que es conducida a un depósito o tanque regulador –que a su vez hace labores de decantación de sólidos–, para posteriormente pasar a través de unas centrífugas y realizar en ellas la separación de la lanolina del resto del efluente.

Tal como se observa en la figura anterior, este sistema devuelve parte del agua de rechazo de la centrífuga de nuevo a la barca del lavadero, lo

que supone una ventaja en lo que a ahorro de energía para el calentamiento de agua se refiere.

Según se ha indicado, la parte del caudal que se desvía fuera del proceso de lavado se hace pasar seguidamente por una o varias centrífugas, dependiendo del número de etapas de que conste el proceso. Debido a su bajo peso específico, la grasa de lana se recupera comúnmente al pasar por estas máquinas centrifugadoras de discos apilados.

Se conocen las siguientes referencias<sup>58</sup> de empresas dedicadas al lavado de lana que disponen de sistemas de recuperación de lanolina basados en este método:

- ✓ Nejdek Wool Combing (República Checa)
- ✓ ADF (Bulgaria)
- ✓ Peinaduría Río Chubut (Argentina)
- ✓ Lanas Trinidad (Uruguay)
- ✓ Jiangyin Zhenxin Wool Tops (República Popular China)
- ✓ Textil Tavares (Portugal)
- ✓ Jandakot (Australia)

La mayor desventaja que plantea este sistema, además de que no trata la totalidad del efluente (y, por ello, la lanolina de esta parte del efluente no se llegará a extraer), es que debido a la extrema disparidad entre las características físicas de la grasa de lana y de los sólidos

pesados, se hace muy difícil optimizar el conjunto para la eliminación de ambos componentes.

En particular, el licor de extracción de las barcas al sistema o *bucle* de recuperación exterior se realiza desde el fondo de la barca de lavado, siendo evidente que este punto de extracción estará muy concentrado en sólidos y menos concentrado en grasa, que es más ligera que el agua y por tanto tenderá a flotar.

Algunas variantes de este método toman el efluente a tratar de la parte superior de la primera barca de lavado en vez de tomarlo del fondo. Disponen para ello de una pequeña barca auxiliar que recoge el agua que se extrae en los rodillos exprimidores existentes entre la primera y segunda barcas.

Con ello se pretende que el licor se incorpore al bucle de recuperación con mayor concentración de grasa y exento en su mayor parte de sólidos. Tal es el caso del sistema implantado en la empresa *Romagniano* en Biela, Italia.

En esta instalación se han conseguido rendimientos de extracción de lanolina en torno al 7% (7 kg de lanolina extraída por cada 100 kg de lana sucia de entrada al lavadero), trabajando con lanas merinas de origen australiano. Este matiz es importante, porque con las lanas merinas de origen nacional (español) no se consigue extraer más de un 3% de promedio según Carmen Canales y otros<sup>33</sup>

El principal inconveniente que plantea esta variante del sistema WRONZ es que solamente se extraería, en el mejor de los casos, la fracción de lanolina que se ha incorporado al efluente en esa barca auxiliar, que no se corresponde con la totalidad de la lanolina presente en la lana sucia, ya que parte de ella se separa de la fibra en otras barcas del lavadero, a medida que se va realizando el proceso de lavado. De hecho, este porcentaje se corresponde aproximadamente con la mitad de la lanolina que posee este tipo de lanas.

En el año 1979, la *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization* (CSIRO, Australia) desarrolló otro sistema para la extracción de lanolina que denominó *Proceso Lo-Flo*<sup>59</sup>, similar al WRONZ, pero incluyendo un *craqueo térmico* en el licor que se deriva del lavadero, antes de la entrada en la centrífuga. El craqueo térmico es un incremento de temperatura del efluente para favorecer el fenómeno de separación o desestabilización de sus componentes.

Este sistema para la extracción de lanolina *Lo-Flo* es el procedimiento que se ha tomado como base al que se propone en nuestro caso, porque incluye el citado craqueo térmico. La diferencia fundamental respecto a él es que ahora se propone, además, la incorporación de un equipo flotador por aire disuelto (DAF), con el fin de favorecer aún más la separación o desestabilización de los componentes del efluente.

De esta forma, se pretende que las separadoras centrífugas se alimenten con un efluente concentrado en grasa pero libre de otras materias como sólidos y tierras, que tan perjudiciales son para su funcionamiento, ya que provocan el *embarrado* de la máquina –del que se hablará más adelante–, y que ha sido una de las causas por las que el sistema Lo-Flo se dejó de utilizar tal y como fue concebido originalmente.

Una vez que se ha derivado del lavadero la parte del efluente sobre la que se va a tratar de extraer la lanolina –*licor*–, los principales procesos desarrollados industrialmente implican alguna combinación de *craqueo térmico* y centrifugación.

El craqueo térmico se realiza bien en la propia barca de la que después se extrae el licor, o por el contrario en un depósito externo al propio lavadero, como en el sistema Lo-Flo de CSIRO.

Respecto al proceso de centrifugación, el funcionamiento de las máquinas centrífugas se describe en el apartado de *Parte Teórica 3.2. Proceso de separación por centrifugación*.

En la imagen siguiente se observa el esquema de una máquina centrífuga.

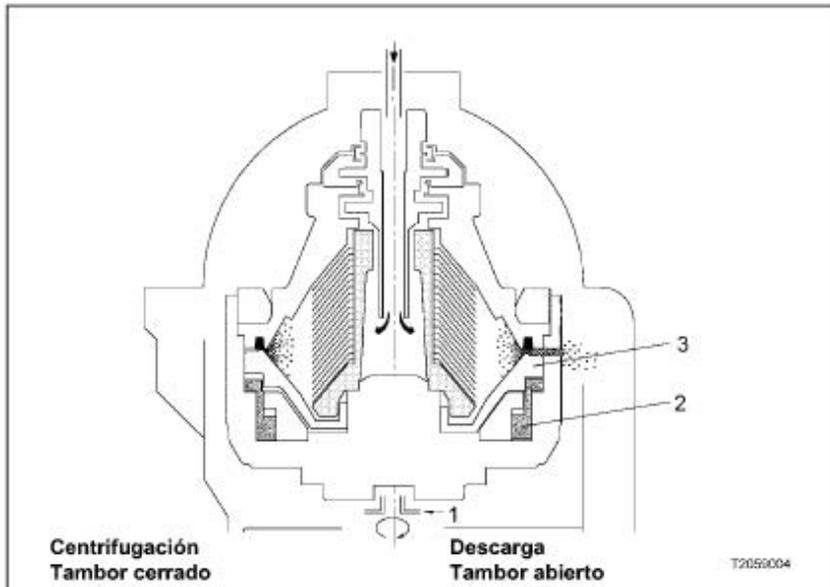


Imagen 2.3. Esquema de una máquina separadora centrífuga

A continuación se describe la forma en que dichas máquinas se encuentran implantadas dentro de una instalación de extracción de lanolina, ya que puede haber variantes en función de la calidad que se desee conseguir.

Se distinguen varios sistemas diferentes de recuperación de lanolina<sup>60</sup>:

- Sistema de centrifugación de SIMPLE ETAPA

El efluente se calienta al menos a 64°C antes de alimentar a la centrífuga. Dentro de ella, la denominada *crema primaria*, que es la fase menos pesada y rica en grasa que fluye hacia arriba de la centrífuga por su parte media interior, se introduce en un tanque

de craqueo térmico en el que se mantiene durante más de cinco horas a aproximadamente 90°C. Durante este periodo la crema se divide en tres fases distintas: una fase acuosa más pesada se extrae de la parte inferior del tanque por drenaje, una fase de emulsión que se recicla a la centrífuga y, por último, la grasa de lana flotando en la parte superior del tanque que se lleva a la centrífuga. Debido a los costes energéticos derivados del tiempo de permanencia de los efluentes a esa elevada temperatura, la recuperación de grasa de lana de una sola etapa ya no se utiliza en la industria actual.

- Sistema de centrifugación de DOBLE ETAPA

En un sistema de dos etapas, se utiliza de nuevo una centrifugadora primaria y un tanque de craqueo térmico, pero esta vez la crema principal y la emulsión desde el depósito de craqueo alimenta a una o varias centrífugas secundarias para una purificación adicional. El tiempo de permanencia en el tanque de craqueo térmico es mínimo en este caso, de unos pocos minutos. La eficiencia de la primera de las de dos etapas de este sistema es de alrededor de 60 a 80% del total de la grasa de lana, mientras que el producto de la centrífuga secundaria es típicamente superior a 99% de pureza.

- Sistema de centrifugación de TRIPLE ETAPA

En un sistema de tres etapas se recupera una mayor proporción global de la grasa de lana del efluente. El licor resultante de la centrifugación primaria contiene sólo el 10 - 20% de grasa. Este volumen de fluido de baja concentración en grasa de crema primaria es entonces craqueado térmicamente a aproximadamente 90°C y posteriormente se pasa a través de la centrífuga secundaria, resultando una crema secundaria que contiene el 70 – 80% de grasa de lana. La crema de la centrifugadora secundaria, todavía a 90°C, se pasa entonces a una centrífuga de purificación donde se mezcla con agua limpia caliente que ayuda al lavado de las impurezas y posteriormente se separa para producir grasa de lana con pureza superior al 99%.



### 3. PARTE TEÓRICA<sup>61 62</sup>

Dentro de los procesos industriales que tienen interés en el ámbito del presente Trabajo, los más relevantes son el proceso de FLOTACIÓN y el de SEPARACIÓN POR CENTRIFUGACIÓN.

El primero es fundamental porque constituye la *preparación del efluente* antes de la extracción de lanolina propiamente dicha. Es el proceso mediante el que realiza la separación de la grasa del resto del efluente del lavado. Del adecuado ajuste y funcionamiento del sistema de flotación dependerá en gran medida el éxito del proceso global.

Posteriormente, el proceso de centrifugación se realiza en máquinas *separadoras centrífugas* adecuadas para este tipo de aplicación. En ellas se consigue, mediante un proceso físico, la separación del efluente ya tratado en el equipo de flotación, en sus fases componentes, una de las cuales es la lanolina.

#### 3.1. PROCESO DE FLOTACIÓN

##### 3.1.1. DESCRIPCIÓN

La *flotación* es una operación consistente en la separación de partículas sólidas o líquidas de una fase líquida.

Esta separación se consigue introduciendo finas burbujas de gas, normalmente aire, en la fase líquida. Las burbujas se adhieren a las partículas, y debido a la fuerza ascensional experimentada por el conjunto partícula – burbuja de aire, éstas suben hacia la superficie del líquido. Así, es posible hacer flotar o ascender partículas cuya densidad es mayor que la del líquido, además de favorecer la ascensión de partículas de densidad menor, como por ejemplo la grasa disuelta en el efluente.

El aumento de la temperatura del efluente permite, como consecuencia de la reducción de la viscosidad del agua, un ascenso más rápido de las burbujas de aire con el consiguiente incremento de rendimiento del proceso<sup>63</sup>.

En el tratamiento de aguas residuales, la flotación se emplea en la eliminación de la materia suspendida y también para la concentración de fangos biológicos. La principal ventaja respecto a una sedimentación convencional es que la flotación elimina mejor y en menos tiempo las partículas pequeñas, cuya deposición sería más lenta. Una vez que las partículas se hallan en la superficie, se pueden extraer del proceso por medio de un rascado superficial.

La eficacia de la flotación para la separación de la grasa ha sido convenientemente estudiada de forma científica. Particularmente, el proceso de flotación aplicado a los efluentes procedentes del lavado de lana se viene utilizando como parte del conjunto de tratamientos de

depuración de dicho efluente aunque no tanto como un proceso dentro de la extracción de la lanolina, que es lo que se pretende en este Trabajo.

Algunos experimentos como los de McLachlan y otros<sup>64</sup> estudiaron la reducción de grasa y de contaminantes sólidos en el efluente procedente del lavado de lana tras un proceso de flotación, en el que además se añadía algún tipo de sustancia floculante.

En sus trabajos de laboratorio experimentaron con más de 200 floculantes comerciales y de ellos tomaron 8 para hacer pruebas en una planta piloto. Los que mejor funcionaron fueron floculantes no-iónicos de elevado peso molecular.

Como resultado de sus experimentos, estos investigadores concluyeron que a través de un proceso de flotación, en combinación con la adición del floculante adecuado, se podría llegar a separar hasta un 80% de la materia contaminante presente en el efluente procedente del lavado de la lana.

Además, el proceso de flotación separa también las materias sólidas (*lodos* o *barros*) del *licor*, en el que se encuentra presente la mayor parte de la grasa, y que posteriormente se puede tratar para completar la extracción de la grasa del resto del efluente.

Hay múltiples referencias de otros estudios en los que utilizando la flotación o aireación simples o en combinación con otros procesos de

coagulación – floculación, se demuestra que son efectivos para la reducción de las materias contaminantes y de grasa presente en los efluentes procedentes del lavado de lana.

Por citar algunos de ellos, se pueden nombrar los trabajos de Mercz y Cord-Ruwisch (1997)<sup>65</sup>, en los que mediante la combinación de un tratamiento biológico anaerobio y la adición de un floculante, se provoca la desestabilización de la grasa del efluente y su posterior coagulación. Estos procedimientos se demostraron mucho más eficaces para el tratamiento de los efluentes del lavado de lana que los hasta entonces utilizados, que consistían muchos de ellos en el *lagunaje* o estancamiento de los efluentes en balsas o lagunas, para su tratamiento por sedimentación.

Otros estudios con similares conclusiones se deben a Labanda y Llorens (2008)<sup>66</sup>, que estudiaron la influencia de los procesos de coagulación – floculación sobre un efluente de lavado de lana. Observaron que estos procesos originaban una desestabilización de las partículas debido a la reducción de la carga iónica superficial, formándose micro-flóculos que posteriormente se podían eliminar más fácilmente.

Investigaciones más recientes como las de Hashem y Aimaghrabi (2013)<sup>67</sup> han demostrado, en estudios teóricos y trabajos experimentales dedicados expresamente a la recuperación de grasa de lana de un efluente industrial por flotación de aire que, en diferentes

condiciones experimentales, la grasa de la lana se puede recuperar con éxito.

Dichos autores realizaron experimentos variando determinadas propiedades en el equipo de flotación, simulando una columna de trabajo con un determinado ratio de altura / diámetro de reactor.

Las variables que fueron modificando en sus experimentos fueron:

- *La concentración inicial de emulsión de grasa / agua*
- *El tiempo de flotación*
- *El caudal de aire del flotador*
- *El valor del pH de la mezcla*

Los resultados obtenidos demostraron que el porcentaje de recuperación de la grasa aumenta con el incremento del tiempo de flotación, aunque esto era bastante previsible. Sin embargo, se pudo comprobar que la recuperación del 90% de la grasa se logró en los 10 primeros minutos.

Por otro lado, la recuperación de la grasa disminuía con el aumento de la concentración inicial de emulsión de grasa / agua, siempre que no variara el caudal de aire, pues a partir de determinada concentración de grasa, se precisa un caudal de aire suficiente como para provocar la flotación.

El porcentaje de recuperación más alto de grasa que obtuvieron lo fue a una altura de trabajo en la columna de aproximadamente ocho veces su

diámetro, con la flotación en una emulsión de pH igual a 9,0 y velocidad de flujo de aire de entrada de 1560 mL/min.

En definitiva, tal como se desprende de estos estudios, el proceso de flotación se puede considerar adecuado para el tratamiento del efluente así como para provocar la desestabilización de la grasa, que será el primer paso para lograr su extracción.

Este fenómeno puede verse acrecentado si se añade algún tipo de floculante durante el proceso de flotación, según se demostrará en los trabajos experimentales del presente estudio, resultado ya logrado por algunas de las investigaciones que se han citado en este punto, como McLachlan y otros<sup>64</sup>, Mercz y Cord-Ruwisch<sup>65</sup> entre ellos.

Hashem y Aimaghrabi también han publicado artículos relacionados con el comportamiento hidrodinámico de fluidos. Por citar algunos, tienen estudios relacionados con la separación de líquidos mediante disolventes, en los que han estudiado la influencia de distintos parámetros en la transferencia de masa durante la formación de las gotas del fluido disolvente<sup>68</sup>.

Existen tres métodos que se utilizan en la práctica actual para la formación de la burbuja de aire en el proceso de flotación:

- Inyección de aire líquido sometido a presión y posterior liberación de la presión a que está sometido el líquido, método denominado

de **flotación por aire disuelto** o comúnmente DAF (*Dissolved Air Flotation*)

- Aireación a presión atmosférica o **flotación por aireación**
- **Flotación por vacío**, saturación con aire a la presión atmosférica seguido de la aplicación del vacío al líquido

En la *flotación por aireación* las burbujas de aire se introducen directamente en la fase líquida por medio de difusores. Este sistema no suele dar buenos resultados cuando se pretende conseguir la flotación de grasas debido a que la aireación se reduce a cortos intervalos de tiempo.

Respecto a la *flotación por vacío*, consiste en saturar de aire el agua residual directamente en el tanque de aireación o permitiendo que el aire penetre en el conducto de aspiración de una bomba. Al aplicar un vacío parcial, el aire disuelto abandona la solución en forma de diminutas burbujas. Las burbujas y las partículas sólidas a las que se adhieren ascienden entonces a la superficie formando una capa de espuma que se puede eliminar mediante un rascado superficial. La arena y otros sólidos pesados se depositan en el fondo. Este sistema, al incorporar equipos en los que hay que realizar un vacío, aunque sea parcialmente, suele descartarse debido a sus elevados costes de implantación y mantenimiento.

### 3.1.2. CÁLCULOS

Nos centramos por tanto en el método de *flotación por aire disuelto DAF*, que es el que finalmente se eligió para esta planta de extracción de grasa.

En él, el aire se disuelve en el efluente a una presión de varias atmósferas, y acto seguido se libera la presión hasta alcanzar la atmosférica. En pequeñas instalaciones, se puede presurizar a 230 – 275 kPa (2,34 – 2,80 kp/cm<sup>2</sup> aproximadamente)<sup>69</sup> mediante un equipo de bombeo, la totalidad del caudal a tratar, añadiéndose el aire comprimido en la tubería de aspiración de la bomba.

El caudal es mantenido a presión durante algunos minutos para dar tiempo a la disolución del aire. Posteriormente, el líquido presurizado se introduce en el tanque de flotación a través de una válvula reductora de presión, provocando que el aire deje de estar disuelto y que se formen diminutas burbujas distribuidas por todo el volumen del efluente a tratar.

En algunas instalaciones se recircula parte del caudal del proceso del DAF que se presuriza y satura con aire. El caudal recirculado se mezcla con la corriente principal sin presurizar antes de su entrada en el tanque de flotación, provocando que el aire deje de estar en disolución y entre en contacto con las partículas sólidas a la entrada del tanque.

La eficacia de un sistema de flotación por aire disuelto depende en gran medida del valor de la relación entre las masas de aire y de sólidos (A/S) necesaria para la obtención del nivel deseado de clarificación, referido a un día (*d*)

$$\frac{A}{S} = \frac{\frac{kg}{d} \text{ de aire liberado por despresurización}}{\frac{kg}{d} \text{ de sólidos en el efluente}} \quad (2)$$

Para sistemas de flotación con recirculación como el que se dispone, se definen los parámetros siguientes:

**R** = caudal de recirculación presurizada, m<sup>3</sup>/d

**Q<sub>E</sub>** = caudal de líquido de efluente, m<sup>3</sup>/d

**C<sub>1</sub>** = solubilidad de aire en el depósito de retención anterior al DAF, mg de aire/L de efluente

**C<sub>2</sub>** = solubilidad de aire en recirculación, antes de inyección de aire, mg de aire/L de efluente

De esta forma, se puede calcular A de la siguiente manera:

$$A = A_1 - A_2 = \frac{R (C_1 - C_2)}{1000} \text{ kg/d de aire liberado}$$

donde A<sub>1</sub> y A<sub>2</sub> son los kg de aire disuelto por día en el depósito de retención a la entrada del DAF y antes de la inyección de aire, respectivamente.

Ahora, siendo  $X_0$  la concentración de sólidos en suspensión en el efluente, en mg/L, el valor de  $S$ , denominador del cociente ( $A/S$ ), se puede expresar:

$$S = \frac{Q_E \cdot X_0}{1000} \quad \frac{kg}{d} \text{ de sólidos en efluente}$$

Por tanto, el cociente ( $A/S$ ) se puede expresar finalmente, utilizando las expresiones anteriores:

$$\frac{A}{S} = \frac{R (C_1 - C_2)}{Q_E X_0}$$

Los valores típicos de la relación aire / sólidos varían entre 0,005 y 0,060 de acuerdo con el texto Metcalf & Eddy (2000)<sup>69</sup>.

Esta relación varía en función de cada tipo de suspensión y se puede determinar experimentalmente en el laboratorio empleando una célula de flotación, similar a la utilizada por Hashem y Aimaghrabi<sup>67</sup> ya referida.

La relación entre el cociente  $A/S$  y la solubilidad del aire  $s_a$ , la presión de trabajo  $P$  y la concentración de sólidos en el vertido  $X_0$  se obtiene, según el texto Ramalho, R.S.<sup>70</sup>, por la expresión:

$$\frac{A}{S} = \frac{1,2 s_a (fP - 1)R}{X_0 Q_E} \quad (3)$$

donde  $A/S$  = relación aire – sólidos, kg (aire)/kg (sólidos)

$s_a$  = solubilidad del aire, mL/L (función de la temperatura del efluente)

$f$  = fracción de aire disuelto a la presión  $P$ . Suele estar entre 0,5 y 0,8

$P$  = presión, atm =  $(p + 101,35)/101,35$  siendo  $p$  la presión manométrica en kPa

$X_0$  = concentración de sólidos en el vertido, mg/L

$R$  = caudal de recirculación presurizada, m<sup>3</sup>/d

$Q_E$  = caudal de líquido de vertido, m<sup>3</sup>/d

En esta ecuación (3), el numerador representa el peso del aire y el denominador el peso de los sólidos. El factor 1,2 se incluye para tener en cuenta el peso específico del aire (en mg/cm<sup>3</sup>) a presión y temperatura ambiente y el término  $(- 1)$  del paréntesis se introduce para prever la posibilidad de que el sistema funcione a la presión atmosférica, en cuyo caso este término no se consideraría.

## 3.2. PROCESO DE SEPARACIÓN POR CENTRIFUGACIÓN

El proceso de separación por centrifugación consiste en la utilización de la fuerza centrífuga para la separación de varias fases que coexisten en un fluido.

El proceso se realiza en máquinas centrífugas dotadas de un paquete de discos como la representada en la Imagen 3.1.a. El aparato gira con una velocidad angular  $\omega$  alrededor de su eje de simetría. Contiene una serie

de platos apilados a modo de conos perforados por su interior, cuyos radios respectivos son  $R_e$  y  $R_i$ , formando un ángulo  $\alpha$ , con  $N$  canales intermedios o platos y espaciados entre sí una distancia  $e$  (ver Imagen 3.1.b)

La alimentación del fluido de densidad  $\rho_f$  y viscosidad dinámica  $\mu$ , así como de las partículas sólidas de diámetro  $d$  y densidad  $\rho_p$  es central, a lo largo del eje, desde arriba hacia abajo.

El caudal del flujo de entrada, denotado por  $Q$ , llega hasta el fondo del equipo o *cazuela* y se distribuye radialmente desde la pared inferior de dicha cazuela, para ascender por la pared lateral cilíndrica de la máquina. Para entonces, la separación ya está realizada en gran medida, con una fracción importante de partículas formando una *torta* en la pared lateral cilíndrica. El flujo restante abandona el aparato ascendiendo a través de los huecos que existen entre los discos apilados.

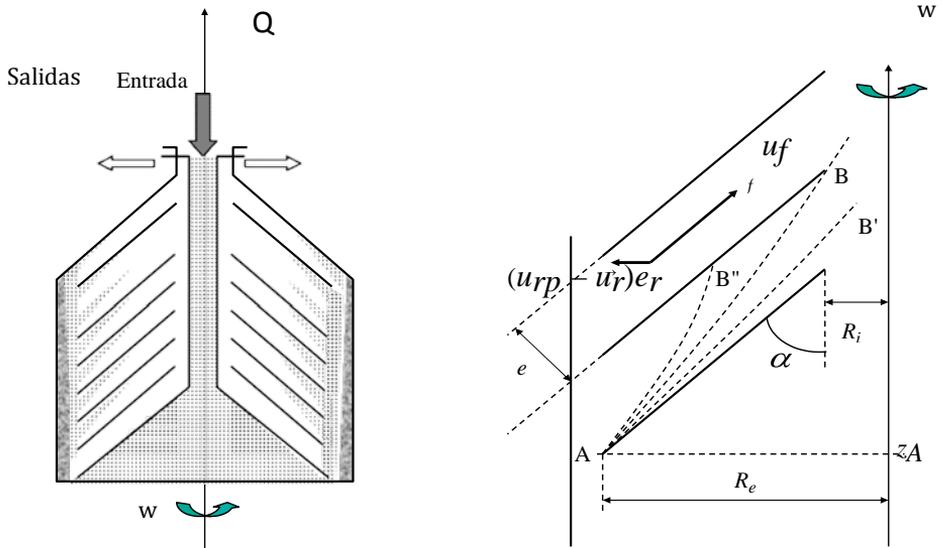


Imagen 3.1.a. Separadora centrífuga    Imagen 3.1.b. Velocidad y recorrido de una partícula entre dos discos

Las partículas se separan cuando pasan entre los discos si sus trayectorias hacen que toquen la aleta o disco superior, deslizándose a lo largo de ella debido al efecto de la fuerza centrífuga, para retornar hacia la torta.

El criterio de separación para una partícula de diámetro  $d$  y densidad  $\rho_p$  se determina mediante el cálculo de la trayectoria de esa partícula entre los discos. La Imagen 3.1.b representa el movimiento de las partículas en un canal intermedio entre dos discos. La velocidad del fluido  $u_f$  es paralela a los discos. La velocidad relativa de la partícula con respecto al

fluido, denota por  $(u_{rp} - u_r) e_r$ , tiene dirección radial y es el resultado de la centrifugación. Se calcula utilizando la expresión siguiente<sup>71</sup>:

$$u_{rp} = u(r_p) + W_c \frac{u_\theta^2(r_p)}{gr_p}$$

que indica que la velocidad radial de centrifugación se puede expresar, particularizando en la ecuación general de Stokes, la velocidad  $W_c$  de sedimentación por efecto de la gravitación. Esta formulación posibilita establecer un enlace con la separación por efecto de la gravedad. El valor adimensional

$$\frac{u_\theta^2(r_p)}{gr_p}$$

se denomina *coeficiente de eficiencia* de la separación centrífuga.

La velocidad radial de centrifugación es habitualmente mucho mayor que la velocidad con la que las partículas se asientan debido a la gravedad, lo que se manifiesta en un coeficiente de eficiencia de la separación centrífuga elevado. Este es el efecto buscado por las máquinas separadoras centrífugas.

Existe gran similitud entre la separación gravitatoria y separación centrífuga. La acción de la rotación se puede cuantificar por la diferencia entre la densidad de la partícula y la del fluido. Si  $\rho_p > \rho_f$  la partícula es centrifugada. En caso contrario, la partícula experimenta un movimiento hacia el eje de rotación.

La fuerza impulsora es la diferencia entre la fuerza centrífuga ejercida sobre la partícula y la fuerza de presión ejercida por el fluido. Para la separación gravitacional, la fuerza impulsora es la diferencia entre el peso de la partícula y la fuerza de flotación, que es la resultante de las fuerzas de presión hidrostática ejercidas sobre la partícula.

Se asume que la rotación del fluido y las partículas sólidas es un movimiento de rotación como *sólido – rígido*, cuyas componentes de la velocidad de las partículas son, por consiguiente:

$$\frac{dr_p}{dt} = u_{rp} = -u_f \operatorname{sen} \alpha + \frac{(\rho_p - \rho_f)d^2\omega^2}{18\mu} r_p$$

$$u_{\theta p} = \omega r_p$$

$$\frac{dz_p}{dt} = u_{zp} = u_f \operatorname{cos} \alpha$$

La velocidad del fluido  $u_f$  varía con la coordenada radial. Su expresión es, derivada de la aplicación del teorema de conservación de la masa:

$$u_f(r) = \frac{Q}{2\pi N e} \frac{1}{r}$$

Asumir el comportamiento como *sólido – rígido*, implica que no se conserva el momento angular. La conservación de este momento angular haría que el fluido y sus partículas tuviesen que incrementar su velocidad de rotación al aproximarse al eje de rotación.

Sin embargo, se produce un flujo secundario en las capas cercanas a los discos, que contrarresta el aumento de la velocidad de rotación en los espacios entre platos.

Este mecanismo explica por qué la rotación como sólido – rígido se puede asumir dentro de los canales, cuando la separación entre platos es pequeña<sup>72</sup>:

$$e \ll (R_e - R_i)$$

Las trayectorias de las partículas sólidas se determinan integrando la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{dr_p}{dz_p} = \frac{u_{rp}}{u_{zp}} = -\tan \alpha \left\{ 1 - \frac{(\rho_p - \rho_f)d^2\omega^2 Ne\pi}{9\mu Q \sin \alpha} r_p^2 \right\} = -\tan \alpha \left\{ 1 - \frac{r_p^2}{R^2} \right\}$$

En la que la variable:

$$R = \sqrt{\frac{9\mu Q \sin \alpha}{(\rho_p - \rho_f)d^2\omega^2 Ne\pi}} \quad (4)$$

Tiene dimensiones de longitud.

Recordemos las variables de esta expresión

$\mu$ : viscosidad dinámica del fluido

$Q$ : caudal de flujo de entrada en la centrífuga

$\alpha$ : ángulo que forman los canales intermedios

$\rho_p$ : densidad de la partícula a separar

$\rho_f$ : densidad del fluido

$d$ : diámetro (medio) de la partícula que se desea separar

$\omega$ : velocidad angular de giro de la máquina

$N$ : número de platos apilados en la máquina

$e$ : distancia de separación entre canales

Siempre se está considerando que  $R > R_e$ . Si se observa la ecuación (4), para un determinado régimen de giro, todas las magnitudes que en ella aparecen son constantes, excepto el caudal volumétrico  $Q$ . Por ello, en el caso de que dicho caudal sea demasiado bajo, podría suceder que  $R < R_e$  y esto significaría que las partículas no entrarían en los intersticios entre discos. Entonces se produciría una retención en la entrada del aparato.

En la Imagen 3.1.b se muestran las trayectorias correspondientes a partículas de diferentes tamaños. Si la partícula es muy fina, la centrifugación es muy débil. La trayectoria de estas partículas diferiría poco de la trayectoria  $AB'$  considerada. La partícula abandonaría el canal intermedio sin tocar la pared superior.

Una partícula solamente es retenida en el aparato si tiene entidad o tamaño suficiente. En este caso, su trayectoria la llevaría a tocar el plato superior (trayectoria  $AB''$ ), y como consecuencia de ello se deslizaría en dirección descendente, a lo largo del plato superior, debido al efecto de la fuerza centrífuga.

La trayectoria límite, para la cual una partícula entra en A y toca el plato superior en su extremo B, se corresponde a un tamaño de partícula  $d_{min}$

tal que todas las partículas cuyo tamaño  $d$  sea superior que éste, son extraídas por el aparato, mientras que aquellas cuyo tamaño sea inferior a  $d_{min}$  son canalizadas hacia el interior de la máquina.

La integración de la ecuación diferencial anterior:

$$\frac{dr_p}{dz_p} = \frac{u_{rp}}{u_{zp}} = -\tan \alpha \left\{ 1 - \frac{r_p^2}{R^2} \right\}$$

expresa la trayectoria, que para una partícula que entre en el intervalo entre discos por el punto A ( $r_p = R_e$ ,  $z_p = z_A$ ), se escribe como:

$$z_p - z_A = \frac{R}{\tan \alpha} \left\{ \tanh^{-1} \left( \frac{R_e}{R} \right) - \tanh^{-1} \left( \frac{r}{R} \right) \right\}$$

La partícula es separada si

$$z_p(R_i) - z_A > \frac{e + (R_e - R_i) \cos \alpha}{\sin \alpha}$$

Es decir, si

$$R \cos \alpha \left\{ \tanh^{-1} \left( \frac{R_e}{R} \right) - \tanh^{-1} \left( \frac{R_i}{R} \right) \right\} > e + (R_e - R_i) \cos \alpha$$

Cuando el hueco es suficientemente estrecho

$$\frac{R_i}{R} \ll 1$$

Bajo esta hipótesis, el desarrollo de Taylor de la última expresión nos conduce al criterio de separación:

$$Q < \frac{(\rho_p - \rho_f)d^2\omega^2}{9\mu} \frac{\pi (R_e^3 - R_i^3)}{3 \tan \alpha} N \quad (5)$$

La igualdad en esta ecuación se obtiene para el tamaño de partícula  $d_{min}$ . El resultado no depende de la separación  $e$  entre cada dos discos o platos cónicos.

Esta expresión, en la que para un determinado régimen de giro  $\omega$ , la extracción depende de la variable flujo volumétrico  $Q$ , determina que un aumento de éste conduce a una reducción en la eficacia de la separación. En ese caso el tiempo de residencia dentro del aparato sería menor y condiciona de la efectividad de la separación.

También se concluye que la extracción mejora al aumentar el número de conos o discos. Esto equivaldría a un aumento en las zonas o áreas de separación, por lo que las partículas tendrían más posibilidades de tocar la pared y el proceso sería más selectivo.

### *Interpretación de la ecuación de la separadora centrífuga mediante análisis dimensional*

La ecuación (5) se puede expresar de la siguiente forma:

$$Q < \left[ \frac{\rho_p \omega^2 (R_e^3 - R_i^3)}{\mu} - \frac{\rho_f \omega^2 (R_e^3 - R_i^3)}{\mu} \right] \cdot \frac{d^2 \pi N}{27 \tan \alpha} \quad (6)$$

Siendo  $\omega$  la velocidad angular de giro, para las secciones de entrada y salida de la máquina, se verifica que:

$$\omega = \frac{u_e}{R_e}$$

$$\omega = \frac{u_i}{R_i}$$

Donde  $u_e$  y  $u_i$  son, respectivamente, las velocidades tangenciales del flujo en la entrada y salida de la centrífuga.

Sustituyendo en (6):

$$Q < \left[ \frac{\rho_p u_e^2 (R_e^3 - R_i^3)}{\mu R_e^2} - \frac{\rho_f u_i^2 (R_e^3 - R_i^3)}{\mu R_i^2} \right] \cdot \frac{d^2 \pi N}{27 \tan \alpha} \quad (7)$$

Si se analiza esta expresión de forma dimensional, se desprende que el término que aparece entre corchetes se corresponde con una diferencia de velocidades. Para su comprobación basta expresarlo de esta forma:

$$\left[ \frac{\rho_p u_e^2 (R_e^3 - R_i^3)}{\mu R_e^2} - \frac{\rho_f u_i^2 (R_e^3 - R_i^3)}{\mu R_i^2} \right] = \left[ \frac{\rho_p u_e R'^3}{\mu R_e^2} u_e - \frac{\rho_f u_i R'^3}{\mu R_i^2} u_i \right]$$

$$= \left[ \frac{\rho_p u_e D'_e}{2 \mu} u_e - \frac{\rho_f u_i D'_i}{2 \mu} u_i \right]$$

En la que se han considerado únicamente las unidades para la diferencia de radios al cubo, y se ha asimilado a un radio  $R'$ . Las unidades de longitud al cubo en el numerador con las unidades de longitud al cuadrado en el denominador se pueden cancelar y simplemente quedan unidades de longitud, que se corresponden con un diámetro aparente que se ha denominado  $D'_e$  a la entrada de la máquina y  $D'_i$  en el interior, a la salida del flujo por el interior de la centrífuga.

Esta ecuación no se debe evaluar en términos estrictamente matemáticos puesto que se han despreciado algunos términos, sino como una expresión que aporta información del fenómeno en estudio. Para ello se tiene en cuenta que el número adimensional de Reynolds es:

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu}$$

Y entonces, el corchete anterior se podría expresar como:

$$\left[ \frac{\rho_p u_e^2 (R_e^3 - R_i^3)}{\mu R_e^2} - \frac{\rho_f u_i^2 (R_e^3 - R_i^3)}{\mu R_i^2} \right] = \left[ \frac{\rho_p u_e D'_e}{2 \mu} u_e - \frac{\rho_f u_i D'_i}{2 \mu} u_i \right] =$$

$$\frac{Re_e u_e - Re_i u_i}{2}$$

Es decir, la mitad de la diferencia del número de Reynolds del flujo por su velocidad tangencial entre la entrada y salida de la máquina centrífuga. Al ser el número de Reynolds adimensional, las unidades de este cociente son las de una diferencia de las velocidades, es decir, unidades de longitud partido unidades de tiempo, tal como se quería comprobar.

Finalmente, la expresión inicial del caudal (7) se puede poner como sigue:

$$Q < (Re_e u_e - Re_i u_i) \frac{d^2 \pi N}{54 \tan \alpha} \quad (8)$$

La interpretación que se puede hacer de ella es la siguiente: a mayor diferencia de los números de Reynolds entre los flujos de entrada y de salida de la centrífuga, (el término dentro del paréntesis aumenta), se posibilita trabajar con un mayor caudal volumétrico  $Q$  de entrada a la máquina para conseguir la extracción.

De forma práctica, el número de Reynolds en la entrada y en la salida no varía con la velocidad  $u$  de las partículas, puesto que el régimen de giro  $\omega$  es constante, ni depende de la magnitud  $D$ , función de la geometría de la máquina, sino de las características del fluido, de su densidad  $\rho$  y de su viscosidad dinámica  $\mu$ .

Es por ello que, aparte de consideraciones sobre la distinta velocidad tangencial del flujo a la entrada y salida de la centrífuga, la diferencia de los números de Reynolds entre la entrada y salida del flujo será tanto mayor cuanto mayor sea la diferencia de las viscosidades cinemáticas  $\nu$  de los fluidos, ya que:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

La diferencia de las viscosidades cinemáticas entre estos fluidos dependerá de su disparidad, o sea, de que sean diferentes las características de ambos fluidos a la entrada, antes de su separación, y una vez separados los sólidos de la grasa.

Como se verá, este hecho será el que condicione el caudal volumétrico  $Q$  con que ha de trabajar la máquina para obtener la separación adecuada a cada tipo de flujo de entrada.

### *Descripción del proceso industrial de separación centrífuga*

El proceso industrial de la separación centrífuga se realiza en máquinas centrífugas similares a la del esquema de la figura siguiente:

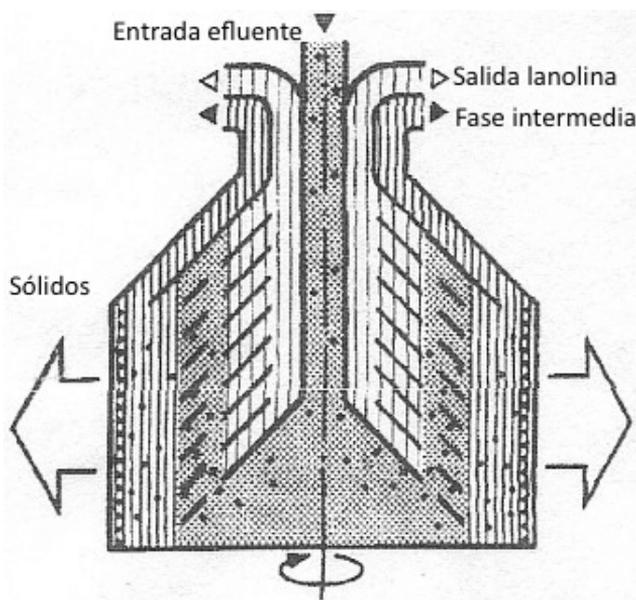


Imagen 3.2. Separadora centrífuga comercial

El efluente entra en la máquina por su parte superior. Como consecuencia del giro de los discos durante el proceso de separación centrífuga, se producen tres fases (ver Imagen 3.2):

Fase **sólida**, compuesta por agua cargada de tierras y sólidos pesados, que se proyectan hacia los laterales y se recogen por la parte exterior (*cazuela*) de la máquina, para ser conducidos al pozo de fangos.

Fase de **grasa o lanolina**, que sale de la centrífuga por su parte superior central y que se recoge para pasar posteriormente a la segunda etapa de centrifugación.

Fase **intermedia o interfase**, formada por agua con un bajo contenido en grasa, llamado *agua de desplazamiento*. Esta fase se recircula, como en nuestro caso, o bien se vuelve a utilizar en los lavaderos, como en los sistemas WRONZ<sup>56</sup> o Lo-Flo de la CSIRO<sup>59</sup>. Los parámetros que afectan a la posición relativa o tamaño de la interfase dentro de la centrífuga son:

- *Densidad*. La separación entre fases o líquidos se ve favorecida si existe una gran diferencia de densidad entre ellos. Esta diferencia de densidades puede acrecentarse cuando se calienta el efluente de entrada cargado de grasa, ya que la disminución de la densidad de la lanolina provoca una separación de ésta con el agua, cuya densidad no disminuye tanto.

Este es también el efecto que se busca en el denominado *tanque de craqueo térmico*, instalación que se describirá más adelante.

- *Viscosidad*. El paquete de discos está diseñado de manera que queden lo más próximos posible para minimizar el recorrido de las partículas de lanolina. Sin embargo, si la lanolina es más espesa o más viscosa, la resistencia para moverse en la dirección entre discos será mayor.

Por tanto, si aumenta la viscosidad del efluente, puede ocurrir que se produzca cierto empuje sobre la interfase hacia el exterior, causando la salida de la lanolina más allá del borde exterior del

paquete de discos. Entonces la lanolina es arrastrada hacia fuera por la toma de salida de los lodos.

Por el contrario, una disminución en la viscosidad provoca un desplazamiento de la interfase hacia dentro del paquete de discos, efecto deseable, ya que favorece la salida de mayor cantidad de caudal por la zona intermedia. Aunque este flujo ascendente, además de lanolina, contiene también una cierta cantidad de agua, el *refino* final, o sea, la separación efectiva entre agua y lanolina, se puede realizar en una segunda centrífuga o segunda etapa.

Lógicamente, siempre será mejor disponer de una segunda etapa de separación por centrifugación (es lo habitual), que perder parte de lanolina en la primera extracción.

En definitiva, esta es la razón por la que el efluente se introduce a una elevada temperatura en la primera de las centrífugas, en torno a los 90°C, con el fin de disminuir la viscosidad de la lanolina y favorecer su extracción.



Imagen 3.3. Vista del paquete de discos de una centrífuga en el momento de su extracción para su limpieza



Imagen 3.4. El mismo paquete de discos en el momento de su colocación dentro de la separadora centrífuga



## 4. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN INDUSTRIAL

En este apartado se realiza una descripción de la instalación, en la que se habrán utilizado los sistemas descritos en el apartado anterior, debidamente conjugados, con el fin de optimizar el conjunto de la planta.

Asimismo se comentará la forma en que se solventaron algunos problemas acaecidos en el funcionamiento, así como de los controles de los diversos parámetros que se realizan en la instalación.

En segundo lugar se describen las pruebas que se realizaron con un *prototipo* de flotador DAF. Antes de decidir si realizar la inversión o no en un equipo para la separación de grasa tipo DAF, previo a las centrífugas, se hicieron pruebas industriales con un equipo similar pero de dimensiones inferiores (prototipo).

En base a los resultados de estas pruebas, consistentes básicamente en el cálculo de los rendimientos de la extracción de grasa en ese equipo, se pudo llegar a determinar la eficiencia esperada en el proceso de flotación con el equipo *real*.

Los resultados obtenidos de estas pruebas arrojaron buenas expectativas sobre el funcionamiento del equipo DAF finalmente

adquirido, que se han cumplido con bastante fidelidad en determinadas condiciones de trabajo, según se expondrá en el apartado de *Resultados*.

#### 4.1. VARIABLES A CONSIDERAR Y CONDICIONANTES OPERATIVOS

El sistema que se propone para la extracción de lanolina en el presente Trabajo supondrá una variante respecto a los sistemas implantados en otras instalaciones, ya que la instalación diseñada va tratar la totalidad del efluente procedente del lavadero y no solamente una parte del total, que es como se hace habitualmente.

Esta es la principal innovación que se introduce respecto a los sistemas que se vienen utilizando en la industria textil, bien sean los sistemas WRONZ<sup>56</sup>, *Lo-Flo* de la CSIRO<sup>59</sup> o derivados de ellos.

A grandes rasgos, con el tratamiento de todo el efluente se persigue un doble objetivo:

- a) Que la práctica totalidad de la lanolina presente en el efluente pase por las máquinas centrífugas, con lo que se podrá mejorar el porcentaje de lanolina extraído.
- b) Que este sistema forme parte del tratamiento posterior de depuración de agua, con lo que se mejorará sensiblemente el rendimiento de dicha depuración, y ello conllevará una

disminución en costes de reactivos y energía de este proceso que tantos esfuerzos supone para la industria.

La solución propuesta es razonable, porque si se trata todo el caudal se puede extraer más lanolina y disminuir la carga contaminante del efluente antes de la depuración.

Sin embargo, hay un aspecto importante que es necesario contemplar para implantar con éxito este nuevo sistema y que ha supuesto una parte fundamental de esta investigación: se trata de que hay varias razones que impiden que el 100% del vertido procedente de los lavaderos pueda ser tratado directamente por las máquinas centrífugas, debido a que:

- Además de la grasa, el efluente incorpora también *tierras* de un grano muy fino que se encuentran disueltas en el agua. Estas proceden en su mayoría del polvo adherido a la lana cuando la oveja se encuentra en el campo y son las que confieren a la materia en jugo un típico color marrón que posteriormente asimila el efluente.

Si estas tierras no se eliminan, al menos en su mayor parte, antes de que el efluente pase a las centrífugas, estos equipos corren el riesgo de sufrir un *embarrado*, fenómeno consistente en que la máquina queda impregnada de barro, es decir, de una mezcla de agua con tierra. Una vez que la centrífuga está embarrada, la extracción de lanolina queda totalmente

paralizada porque los *pasos* (recorridos) de la grasa a través de ella han quedado obstruidos, siendo necesaria una exhaustiva limpieza del aparato, que puede llevar varias horas, con los perjuicios que ello supone.

- La experimentación realizada por otros autores<sup>59</sup> ha demostrado que para conseguir extraer una mayor cantidad de lanolina del resto del efluente es preciso calentar la mezcla a unos 90°C. Es el denominado *craqueo térmico* que se realiza en el tanque de calentamiento antes del proceso de centrifugado, tal como propone el sistema *Lo-Flo* de la CSIRO.

Si se tuviese que calentar la totalidad del vertido de los lavaderos a esta temperatura para realizar el craqueo térmico, se emplearía una enorme cantidad de energía calorífica. Baste pensar que el efluente generado en la empresa está en torno a los 144 m<sup>3</sup> diarios para darse cuenta de ello.

El craqueo térmico consiste en la separación o desestabilización de la lanolina del agua en base a elevar la temperatura del efluente. La grasa disminuye su densidad en mayor medida que el agua cuando se le aumenta la temperatura. Al calentar el efluente de entrada, la diferencia de densidades se acrecentará y esto provocará una separación de ambos líquidos en el interior del tanque de calentamiento.

- Por último, las centrífugas adquiridas tampoco están concebidas para poder asumir un caudal medio como el que se esperaría en estas condiciones, entre 8 y 9 m<sup>3</sup>/h (trabajando 24 horas). El

caudal nominal de estas centrífugas es de unos  $6 \text{ m}^3/\text{h}$ , que es aquél en el que la separación de la grasa del resto de efluente se efectúa de la manera más eficaz.

En resumen: se pretende tratar la totalidad del efluente generado en el lavadero, pero por las centrífugas únicamente ha de circular una parte, libre de tierras y concentrada en lanolina, que será además la que se caliente a  $90^\circ\text{C}$  para realizar el craqueo térmico.

Con estos antecedentes, la solución al problema se encontró colocando, antes del proceso de centrifugado, un sistema de flotación del tipo *Dissolved Air Flotation* (DAF), por el que pasará la totalidad del efluente procedente del lavadero. Mediante la flotación con burbujas de aire se pretende separar la grasa (que ascenderá a la parte superior del equipo DAF), del resto de efluente, y si además se añaden los reactivos adecuados, los fangos precipitarán en el fondo del equipo y pueden ser eliminados del proceso.

Posteriormente, sólo se hará pasar a las máquinas centrífugas la parte concentrada en grasa que ha hecho flotar el DAF en su parte superior, no sin antes provocar el craqueo térmico. Pero esto es ya asumible energéticamente porque únicamente hay que calentar una pequeña parte del total del vertido, la más concentrada en grasa.

Este novedoso sistema toma, por tanto, las ventajas del método convencional pero introduce la mejora de que, con el DAF, las burbujas de aire provocarán la desestabilización y flotación de la grasa, en mayor

medida que si esta separación se realiza solamente en base al craqueo térmico.

Hashem y Aimagrabi<sup>67</sup> estudiaron las cuatro variables siguientes en sus experimentos de flotación:

- *La concentración inicial de emulsión de grasa / agua*
- *El tiempo de flotación*
- *El caudal de aire del flotador*
- *El valor del pH de la mezcla*

Pues bien, en el caso que nos ocupa, sobre dos de ellas no existe posibilidad de intervención pues vienen determinadas por el proceso de lavado, en concreto por el tipo de efluente que se genera, y son:

- *La concentración inicial de emulsión de grasa / agua.* Dependiendo del tipo de lana que se trabaje en fábrica en cada momento esta concentración será una concreta, mayor si se trata de lanas merinas pues incorporan más cantidad de grasa. Pero sobre esta concentración no se puede actuar, ya que la cantidad de agua para realizar el lavado de forma correcta está bien establecida por los parámetros de funcionamiento de este proceso. Lo único que se puede hacer es realizar una clasificación de los efluentes en función de su contenido en grasa, tal como se verá más adelante.
- *El tiempo de flotación,* viene ya predeterminado por el caudal que se ha de tratar en la planta. Dentro de los escasos márgenes

que permite esta instalación, facilitado por la presencia de los tanques de almacenamiento y homogeneización, el tiempo de flotación ya se ha tenido en cuenta en el dimensionado del equipo de flotación DAF.

El cálculo del equipo de flotación se realizó en base a una muestra de agua procedente del lavado de lana en las condiciones más desfavorables, (trabajando en ese momento lanas muy “cargadas” de grasa), según se verá en el punto 4.3 *Equipo de flotación DAF*.

Por tanto, el tiempo de flotación tiene un limitado margen de maniobra o variabilidad en nuestro caso, excepto cuando se trabajen lanas con menor porcentaje de grasa, en que se pueda permitir un aumento el tiempo de residencia del agua en el interior del equipo DAF para incrementar de esta forma, tal como demostraron Hashem y Aimaghrabi, el porcentaje de extracción de grasa.

Con las otras dos variables citadas por Hashem y Aimaghrabi<sup>67</sup>, el *caudal de aire del flotador* y el *pH de la mezcla*, se trabajará en este estudio con el fin de llegar a las conclusiones oportunas que permitan optimizar el proceso de extracción de la lanolina.

Sin embargo, hay una tercera variable que estos autores no contemplaron pero que sí se hará en este Trabajo, que es la *adición de un floculante*. El efecto que se persigue es tan sencillo de entender como efectivo en sus resultados: añadiendo un floculante se incrementa

el efecto concentrador de grasa y de flotación de las burbujas de aire en el DAF.

Las evidencias de este hecho se pusieron de manifiesto en las pruebas realizadas con un prototipo de DAF a menor escala (expresadas en el apartado *6.1. Pruebas iniciales realizadas con el prototipo del equipo flotador DAF*), que se puso en funcionamiento en la industria y ayudó a tomar la decisión de adquirir el equipo de flotación.

Este prototipo de DAF funciona exactamente igual que un equipo convencional. Las pruebas en él realizadas dieron como resultado que mediante la adición de un floculante adecuado, se pudo llegar a extraer hasta el 96% de la cantidad inicial de grasas de la muestra, mejorando así el porcentaje del 70% que se obtuvo en las mismas condiciones de funcionamiento del DAF, a igualdad de pH y de caudal de aire, pero sin añadir este producto. No obstante, ello introdujo una nueva problemática que en su momento se comentará.

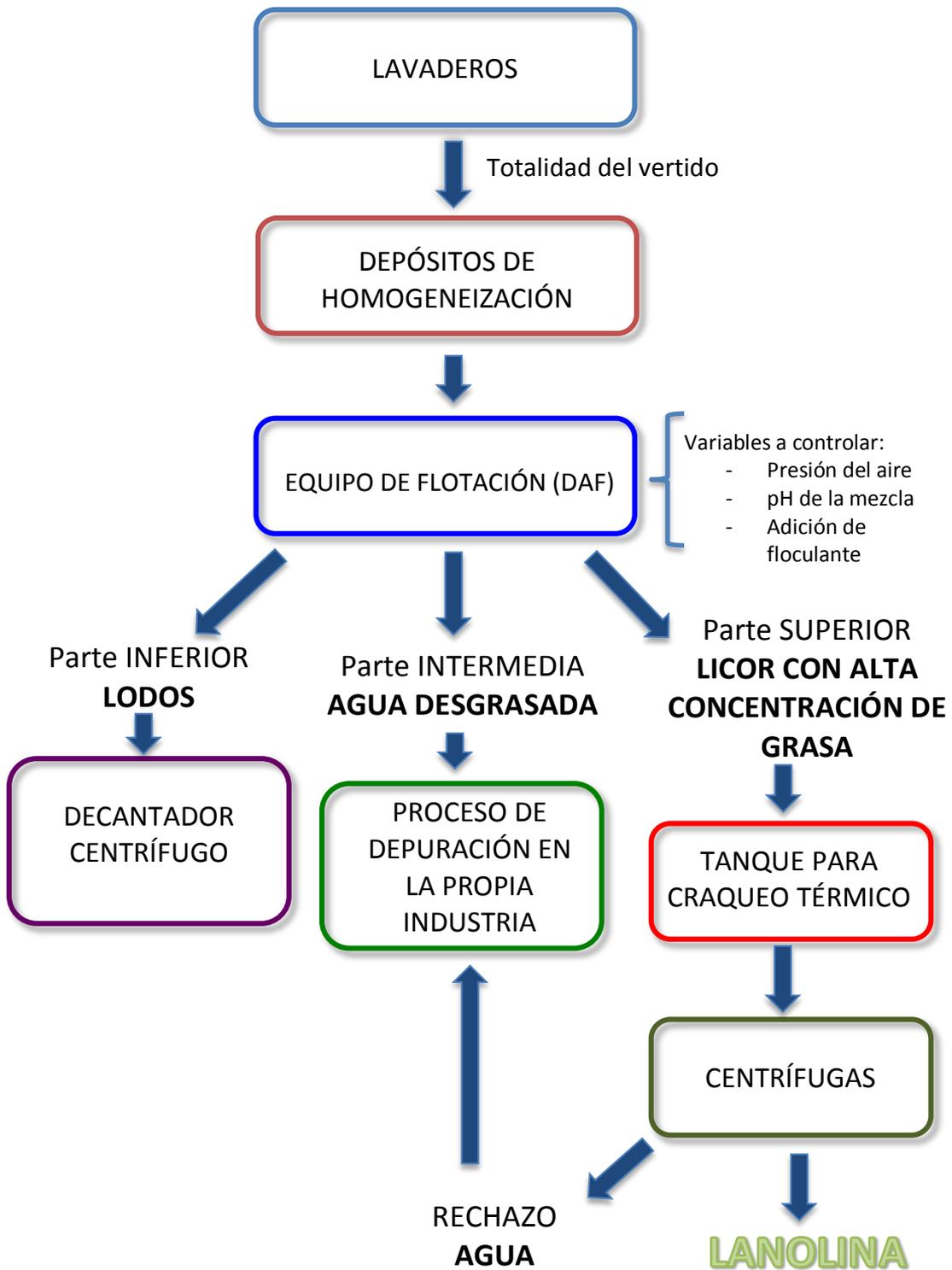
Como resumen de este apartado, indicar que se proponen modificaciones sobre la forma conocida hasta ahora de extracción de lanolina en que sólo se trataba una parte de las aguas residuales; en el método utilizado en este Trabajo se hace pasar la totalidad del efluente procedente del lavado de lana por un equipo de flotación DAF para separar la grasa del resto del vertido.

Posteriormente se procede al craqueo térmico de la parte que ha separado el DAF y a que las centrifugas realicen su cometido de forma

convencional sobre la parte del vertido con elevada concentración de lanolina, el denominado *licor*.

## 4.2. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA INSTALACIÓN PARA LA EXTRACCIÓN DE LANOLINA

En el Diagrama de Flujo de la figura siguiente se expresa de forma esquemática la forma en que va a realizarse la extracción de lanolina en esta instalación, así como las variables a controlar para su optimización.



Los principales elementos de que consta la instalación son los siguientes:

### 4.3. DEPÓSITOS DE ALMACENAMIENTO Y HOMOGENEIZACIÓN DEL EFLUENTE

La instalación ejecutada en la empresa para la extracción de lanolina se diseñó con *dos tanques de homogeneización y agitación* fabricados en poliéster reforzado con fibra de vidrio, de 33 m<sup>3</sup> de capacidad cada uno de ellos, que se encuentran conectados por su parte inferior a modo de “vasos comunicantes”.

Su capacidad se calculó para poder asumir aproximadamente el caudal de efluente total en un turno de 8 horas de funcionamiento de fábrica, que se considera suficiente para cubrir cualquier tipo de contingencia en el funcionamiento normal de los lavaderos de lana.

En el interior de cada uno de los dos tanques se coloca un agitador de hélice con la orientación conveniente para evitar el precipitado y consecuente concentración de lodos en el fondo del depósito, fenómeno muy perjudicial para el adecuado funcionamiento de la planta, pues un caudal de agua con excesiva concentración de lodos provocaría el ya mencionado *embarrado* de las centrífugas.



Imagen 4.1. Tanques de homogeneización en el interior de la nave

## 4.4. EQUIPO DE FLOTACIÓN (DAF)

### 4.4.1. DIMENSIONAMIENTO

Se diseña teniendo en cuenta la relación entre el cociente (A/S), la solubilidad del aire, la presión de trabajo y la concentración de sólidos en el vertido, que según Ramalho, R.S.<sup>70</sup> ya expuesta anteriormente, es:

$$\frac{A}{S} = \frac{1,2 s_a (fP - 1)R}{X_0 Q_E} \quad (3)$$

<b>Temperatura C</b>	0	10	20	30
<b>s<sub>a</sub> mL/L</b>	29,2	22,8	18,7	15,7

siendo **A/S** = relación aire – sólidos = 0,03 kg (aire)/kg (sólidos)  
 obtenida en laboratorio mediante ensayo

**s<sub>a</sub>** = solubilidad del aire 18,7 mL/L para una temperatura del  
 efluente de 20°C (ver tabla anterior)

**f** = fracción de aire disuelto a la presión P. Suele estar entre  
 0,5 y 0,8. En este caso tomaremos un valor de f igual a 0,8

**P** = presión, atm = (p + 101,35)/101,35 siendo p la presión  
 manométrica en kPa. Para p = 294,3 kPa (3 kp/cm<sup>2</sup>), que se  
 demostrará como la óptima:

$$P = \frac{294,3 + 101,35}{101,35} = 3,90 \text{ atm}$$

**X<sub>0</sub>** = concentración de sólidos en el efluente = 5100 mg/L  
 (valor obtenido en laboratorio para las condiciones de  
 efluente más desfavorable, ver la Tabla 6.1 con la  
 caracterización inicial de la muestra)

**Q<sub>E</sub>** = caudal de efluente a tratar en el caso más desfavorable  
 = 144 m<sup>3</sup>/d (6 m<sup>3</sup>/h)

**R** = caudal de recirculación presurizada, dato que se desea  
 obtener

En este punto hay que indicar que las unidades de presión que normalmente se manejan en ingeniería son los kilopondios por centímetro cuadrado ( $\text{kp}/\text{cm}^2$ ). La razón es que habitualmente los aparatos de medida de presión comerciales, los manómetros, se encuentran graduados en dicha escala. Por tanto, a partir de ahora, en este Trabajo, la presión estará siempre indicada en estas unidades. Las equivalencias con unidades del Sistema Internacional (SI) es la siguiente:

$$1 \text{ kp}/\text{cm}^2 = 98100 \text{ N}/\text{m}^2 = 98,1 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ atm} = 101350 \text{ N}/\text{m}^2 = 101,35 \text{ kPa} = 1,033 \text{ kp}/\text{cm}^2$$

Por tanto, la presión calculada de 3,90 atm equivaldría a:

$$P = 3,90 \text{ atm} = 395,265 \text{ kPa} = 4,03 \text{ kp}/\text{cm}^2$$

Operando en la ecuación (3) se obtiene un valor para el caudal de recirculación:

$$R = \left(\frac{A}{S}\right) \frac{X_0 Q_E}{1,2 s_a (fP - 1)} = 0,03 \cdot \frac{5100 \cdot 144}{1,2 \cdot 18,7 (0,8 \cdot 3,90 - 1)}$$
$$\approx 460 \text{ m}^3/\text{d}$$

Con estos valores de  $Q_E$  y de  $R$ , la superficie requerida para la flotación ha de ser:

$$Superficie = \frac{Q_E + R}{24 \cdot F_C}$$

donde  $F_C$  es el factor de carga, en  $m^3/(m^2 \cdot h)$ , cuyo valor oscila entre 4,8 y  $9,6 m^3/(m^2 \cdot h)$ , dependiendo de la concentración, el grado de espesamiento que se desee alcanzar, y la carga de los sólidos<sup>73</sup>. En este caso se toma el valor más desfavorable de  $F_C = 4,8 m^3/(m^2 \cdot h)$

$$Superficie = \frac{144 + 460}{24 \cdot 4,8} = 5,24 m^2$$

Para asegurar que el tratamiento es adecuado si en alguna ocasión se recibe un caudal de efluente superior o con una mayor concentración de sólidos, el equipo se sobredimensiona. Para ello, se toma un coeficiente de seguridad de 1,5 resultando finalmente una superficie de flotación de:

$$Superficie = 1,5 \cdot Superficie\ calculada = 1,5 \cdot 5,24 = 7,86 m^2$$

Con estos cálculos, se elige un flotador de la marca SIGMA modelo FPAC-PWL-25 de  $8,8 m^2$  de superficie de flotación y que permite tratar un caudal de  $25 m^3/h$ . A pesar de ser ligeramente inferior a  $25,2 m^3/h$ , que es la suma de los caudales de entrada más el de recirculación, es asumible porque las condiciones más desfavorables con las que se ha calculado raramente se van a dar. Las dimensiones de este equipo son:

Longitud:	5,250 m
Anchura:	2,400 m
Altura:	2,350 m
Superficie flotación:	8,8 m <sup>2</sup>

Para un caudal medio de  $Q_E = 144 \text{ m}^3/\text{d}$  de vertido de lavaderos (6 m<sup>3</sup>/h), la carga de sólidos en el efluente según la concentración de la muestra tomada es (ver *Tabla 6.1. Caracterización de la muestra inicial*):

$$\text{Carga} = 5,100 \frac{\text{g}}{\text{l}} \cdot 144000 \frac{\text{l}}{\text{d}} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} = 734,4 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

Teniendo en cuenta que la relación A/S tomada es 0,03 y que la masa de sólidos es la calculada anteriormente, el valor del caudal de aire será

$$\begin{aligned} &0,03 \frac{\text{kg aire}}{\text{kg sólidos}} \cdot 734,4 \frac{\text{kg sólidos}}{\text{d}} = \\ &= 22,03 \frac{\text{kg aire}}{\text{d}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3 \text{ aire}}{1,2 \text{ kg}} = 18,4 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} = 12,8 \frac{\text{L}}{\text{min}} \end{aligned}$$

que es el caudal de aire a introducir en el flotador a la presión manométrica de 294,3 kPa (3 kp/cm<sup>2</sup>) para conseguir de forma teórica la clarificación deseada.

El caudal de 15 L/min, ligeramente superior a éste, resultó ser, en las pruebas realizadas durante la puesta en marcha del equipo, el que mejor resultados ofrecía de clarificación del efluente tratado, corroborando con ello las pruebas realizadas en el laboratorio.

La razón de que este caudal de aire que hace que se optimice la instalación (15 L/min), sea ligeramente superior al calculado teóricamente (12,8 L/min), puede deberse a que la superficie implantada en el equipo comercial DAF (8,8 m<sup>2</sup>), es también superior a la superficie teórica calculada (7,86 m<sup>2</sup>)

#### 4.4.2. CARACTERÍSTICAS

Una de las razones fundamentales por las que se ha decidido la adquisición de este equipo concreto que ofrece la casa SIGMA, es que para mejorar la eficiencia del proceso, este equipo de flotación por aireación dispone adicionalmente de un sistema de floculación. Éste consiste en un serpentín donde se realiza la floculación de modo que el tiempo de retención en dicho serpentín es casi uniforme, y por ello la energía de mezclado es constante en la sección de la tubería. De esta forma, todas las partículas están sometidas a la misma cantidad de energía de mezclado y por un mismo periodo. Como resultado, se obtiene un flóculo de gran uniformidad con excelentes características de separación.

Este tipo de tecnología se denomina *PLUG-FLOW (PFL)* y es ventajosa en sistemas en los que se desea que el tiempo de residencia de las partículas sea controlable y para que el material de salida sea homogéneo.

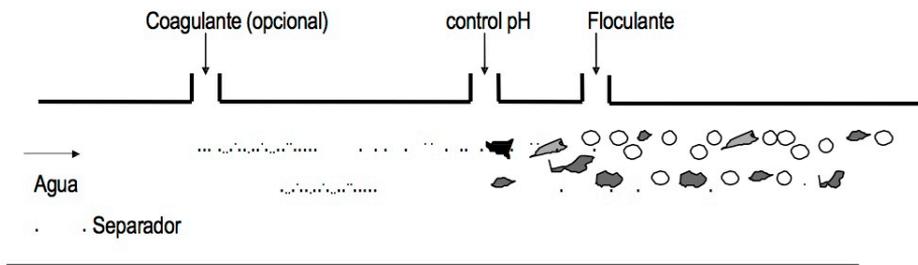


Imagen 4.2. Esquema de funcionamiento del sistema de floculación

Las ventajas que ofrece este sistema PFL son:

- No hay partes móviles. No se precisan mezcladores adicionales
- Flóculo de crecimiento uniforme
- Compacto. Precisa poco espacio
- Todas las condiciones de proceso y la dosificación de reactivo se realizan en una única unidad

Estos equipos se realizan en materiales durables de alta calidad como tuberías de Polietileno de Alta Densidad (HDPE), bastidor y soportes de acero inoxidable AISI316.

El aire disuelto de flotación (DAF) se introduce para separar aceite, grasa, sólidos y/o flóculos (si se efectúa tratamiento químico) que no tienen la suficiente fuerza ascensional para flotar.

El tamaño de las burbujas de aire está entre las 30 y 50 micras, siendo este tamaño esencial para la eficiencia del sistema de flotación pues las mismas se adhieren fácilmente a partículas de igual o superior tamaño.

Otros elementos de este equipo son la rasqueta de movimiento simple con cadenas y el espesador estático para los lodos flotados.

También son importantes el transportador de tornillo y la válvula automática de descarga de lodos del fondo. Esta descarga se consigue mediante una válvula de accionamiento neumático temporizada. El ciclo de descarga tiene también un efecto de auto-limpieza debido al vaciado brusco e instantáneo del volumen total de agua en el conducto. Cualquier partícula adherida a las paredes se despega y sigue el camino inicial del flujo.



Imagen 4.3. Equipo de flotación DAF. Vista del colector de mezcla aire – agua

Evidentemente, una vez el equipo DAF se ha calculado y definido para las condiciones más desfavorables, existen determinados parámetros que se han de considerar fijos.

Lo que sí puede variar respecto a las condiciones de diseño es la *concentración de sólidos en el fango*  $X_0$ , ya que la calidad del vertido no es uniforme y depende del tipo de lana que se esté lavando.

En este sentido, resulta interesante realizar un estudio teórico sobre la variación de la *concentración de sólidos en el fango*  $X_0$  cuando se modifica la presión de aire (P) manteniendo el resto de valores constantes.

Para ello, dado que el equipo DAF adquirido tiene la posibilidad de variar la presión manométrica del aire entre 0 y 5 kp/cm<sup>2</sup> (entre 0 y 490,5 kPa), se toman los puntos de presión manométrica 2, 3 y 4 kp/cm<sup>2</sup> (2,94 atm, 3,90 atm y 4,87 atm respectivamente) para los que se realiza el siguiente estudio teórico.

Se han tomado estos valores de presión porque la experimentación, cuyos resultados se expondrán en el apartado correspondiente, también se realizó con estos valores de la presión manométrica del aire.

Se parte de la ecuación (3)

$$\frac{A}{S} = \frac{1,2 s_a (fP - 1)R}{X_0 Q_E}$$

para la que se toman los siguientes valores fijos:

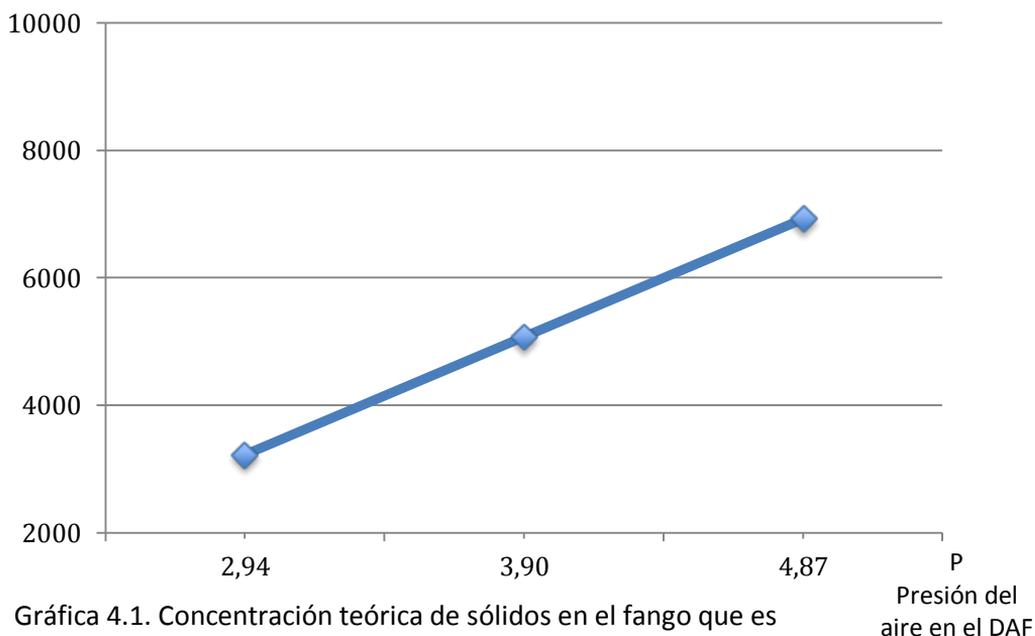
- Solubilidad del aire para temperatura del efluente de 20°C,  $s_a = 18,7 \text{ mL/L}$
- Fracción de aire disuelto a la presión P,  $f = 0,8$
- Caudal de vertido a tratar de los lavaderos,  $Q_E = 144 \text{ m}^3/\text{d}$
- Caudal de recirculación del DAF,  $R = 460 \text{ m}^3/\text{d}$
- Relación (A/S): **0,03 kg (aire) / kg (sólidos)**

La concentración de sólidos en el fango  $X_0$  que se podría llegar a tratar, en función de la presión de aire de entrada al DAF, sería:

$$X_0 = \frac{1}{\left(\frac{A}{S}\right)} \cdot \frac{1,2 s_a (fP-1)R}{Q_E} \quad (9)$$

$X_0$   
 Concentración  
 de sólidos en  
 el fango

$$X_0 = 1911,6 P - 2389,4$$



Gráfica 4.1. Concentración teórica de sólidos en el fango que es posible tratar en función de la presión del aire de entrada al DAF

En esta gráfica se observa que cuanto mayor es la presión  $P$  del aire disuelto que se introduce en el tanque de flotación, mayor es la capacidad de tratamiento del vertido, ya que la concentración de sólidos en el fango  $X_0$  aumenta proporcionalmente a aquella, manteniendo constante la relación  $(A/S)$ , que es un parámetro indicador del nivel de clarificación que se desea obtener.

Mediante la Gráfica 4.1 se puede predecir, para un valor determinado de la relación  $(A/S)$ , la capacidad de tratamiento del equipo flotador DAF instalado en función de la presión del aire disuelto en el equipo.

Sin embargo, tal y como se expondrá cuando se realicen los trabajos experimentales, esta ecuación obtenida de forma teórica y que representa una recta de pendiente constante, no se corresponde con la realidad. Se demostrará que existe una presión del aire en el DAF para la cual habrá un máximo en el fenómeno de flotación, es decir, a partir de una cierta presión de aire no se producirá un incremento en la capacidad de tratamiento del flotador. Este fenómeno será debido a la  *saturación*  de aire disuelto en el equipo flotador, que lejos de favorecer la flotación, la dificulta. Es lo que se suele denominar “*haber aire en exceso*”.

Respecto a la variación del caudal de aire que se introduce en el tanque de flotación, su influencia se percibirá en el incremento o disminución de la relación  $(A/S)$ . En principio, para cada tipo de vertido que se trate en el DAF habrá una relación entre el volumen de aire y la masa de

sólidos (A/S) que será idónea con el fin de obtener el nivel de clarificación deseado. Para la muestra inicial, realizadas las pruebas en el laboratorio, se estimó en el valor 0,03 que fue el utilizado para calcular el equipo DAF necesario.

Por tanto, no existe un valor de la relación (A/S) que sea el que mejor opere para todos los tipos de vertido, sino que en función de éste es posible que haya que variar el caudal de aire introducido en el sistema con el fin de optimizar la flotación. En este caso será la experimentación la que aporte claridad sobre este asunto.

#### *Descripción del proceso de formación de micro – burbujas de aire*

La influencia de la presión del aire disuelto en el efluente se manifiesta justamente antes de que el efluente entre en el equipo de flotación. En ese instante, el caudal pasa de tener una presión elevada, la que aporta la bomba de alimentación, a adquirir una presión próxima a la atmosférica.

Cuando esto ocurre, el aire, que se encontraba disuelto en el agua, genera unas micro – burbujas que se distribuyen por todo el volumen del líquido.

En la imagen siguiente se puede observar un detalle de los inyectores de agua, que partiendo de un colector común, entran en el tanque de flotación.



Imagen 4.4. Inyectores del caudal de recirculación al interior del tanque

Como se observa, estos conductos tienen una sección muy pequeña (diámetro de unos 2 cm), sin embargo, el colector del que parten tiene un diámetro de unos 30 cm y su longitud es la anchura del propio equipo DAF. En otra Imagen, la 4.3, se observaba con detalle este colector así como los inyectores con sus llaves de paso.

El líquido, junto con el aire disuelto, entra en el colector citado a la presión que proporciona el equipo de bombeo. Allí, debido al elevado volumen de este colector, queda en remanso, es decir, con una velocidad muy pequeña, pero con una presión elevada.

El flujo, al ser obligado después a abandonar el colector general y circular por los pequeños conductos (ver Imagen 4.4), provoca un intercambio de altura de presión en altura cinética o de velocidad.

Es el conocido *Efecto Venturi* que se puede particularizar para este caso.

Si el punto 1 representa el colector general y un punto 2 lo situamos en uno cualquiera de los conductos que llevan el efluente hacia el interior del tanque del DAF, para una línea de corriente entre ambos puntos, suponiendo despreciables las pérdidas de carga, la Ecuación de Bernoulli se expresa de esta forma:

$$\frac{p_1}{\rho g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (10)$$

siendo  $p$  la presión del agua,  $\rho$  su densidad,  $z$  la elevación y  $v$  la velocidad en cada punto que se evalúa.

Las cotas o elevaciones  $z$  pueden suponerse iguales en 1 y 2, o en todo caso su influencia es despreciable respecto a la presión y velocidad.

Si, tal como se ha dicho, la velocidad en el colector  $v_1$  es pequeña y su presión  $p_1$  elevada, el fluido tiene en dicho punto una altura piezométrica o altura de presión mucho mayor que la altura de velocidad.

$$\frac{p_1}{\rho g} + z_1 \gg \frac{v_1^2}{2g}$$

El efecto originado al pasar el flujo hacia el interior de las conducciones de pequeño diámetro es un incremento notable en su velocidad. Para que circule un caudal, por pequeño que sea, la velocidad por su interior será superior a la velocidad que tenía en el colector, que era próxima a

cero. Recordemos que el caudal es el producto de la velocidad media del flujo por la sección del conducto por el que circula:

$$Q = v.S$$

Si la sección es pequeña, la velocidad ha de ser relativamente grande para mantener un caudal determinado.

En definitiva, la velocidad  $v_2$  del flujo por el interior de las conducciones a la salida del colector es mucho mayor que la velocidad  $v_1$  que dicho flujo tiene en dicho colector:

$$\frac{v_2^2}{2g} \gg \frac{v_1^2}{2g}$$

Por tanto, para mantener constante la igualdad expresada por Ecuación de Bernoulli entre ambos puntos (10), cuando en el segundo miembro el término de velocidad es mucho mayor que en el primero, consecuentemente la presión en los puntos denominados 2 ha de ser menor.

$$\frac{p_2}{\rho g} \ll \frac{p_1}{\rho g}$$

Finalmente:

$$p_2 \ll p_1$$

Este fenómeno es el que ocurre en los inyectores o estrangulamientos del flujo, y lo que se pretende es la transformación de energía de presión en energía de velocidad.

En nuestro caso, el agua entra con el aire disuelto en las conducciones de baja sección o inyectores, aumentando su velocidad para mantener el caudal. La presión del conjunto disminuirá y con ello se producirá el fenómeno deseado de generación de micro – burbujas de aire antes de la entrada en el tanque de flotación, debido al brusco descenso de la presión que conlleva el incremento de velocidad.

De esta forma, cuando el flujo entra en el tanque flotador, el aire ya no está disuelto sino en forma de pequeñas burbujas, las que se han ido generando a lo largo de esas estrechas conducciones que comunican el colector común con el propio tanque por su parte inferior.

### *Sistema de adición de líquido floculante en el DAF*

Una vez dimensionado el equipo y expuesta la influencia de la presión y del caudal de aire que se introduce en el tanque de flotación, indicar que previamente al equipo de flotación DAF se dispone de un circuito de dosificación – mezcla – floculación de tipo *PLUG-FLOW (PFL)*, descrito con anterioridad en este apartado.

El coagulante es añadido al agua a tratar por la entrada lateral del floculador. Inmediatamente después del punto de entrada del

coagulante se instala una unidad mezcladora. La desestabilización de la materia contaminante conseguida por el coagulante produce partículas finas. En la mayoría de los casos estas partículas no son ideales para obtener la separación. En este caso hay que añadir floculante para obtener un tamaño de partícula susceptible de ser separada.

A continuación de esta primera unidad de mezcla se añade el floculante, que es mezclado mediante una segunda unidad. El crecimiento del flóculo se obtiene en el tramo siguiente de tubería, con lo que se consiguen características adecuadas para la separación.

El floculador se completa con dispositivos adicionales que permiten, tanto la medida del pH, como su corrección.



Imagen 4.5. Floculador perteneciente al equipo de flotación DAF

## 4.5. TANQUE DE CRAQUEO TÉRMICO

Consiste en un depósito de forma troncocónica construido en acero inoxidable de unos 1500 litros de capacidad. En su interior hay una chapa que lo divide en dos partes de tal forma que se imposibilita la comunicación entre ellas por su parte superior, aunque sí lo hace por su parte inferior, ya que la chapa no llega hasta el fondo del tanque.

En cada uno de los dos compartimentos se han colocado sendas tuberías de acero inoxidable en forma circular, por cuyo interior se hace pasar vapor de agua.



Imagen 4.6. Vista superior de los dos compartimentos del tanque con sendos serpentines por los que circula el vapor

La finalidad de este depósito es calentar la mezcla de agua y grasa que procede del espesador del flotador DAF. El calentamiento se produce haciendo circular vapor de agua a través de los serpentines, que se

encuentran inmersos en sendas cámaras del depósito, hasta conseguir la temperatura deseada para provocar el *craqueo térmico*, unos 90°C, según se ha ido indicando a lo largo de este estudio (Sistema o Proceso Lo-Flo de la CSIRO, Australia<sup>59</sup>).

Cuando la mezcla se lleva a esa temperatura, en el interior del tanque se produce una cierta separación o desestabilización entre las diferentes fases de que consta el efluente. Si se da por hecho que en el efluente se tiene, de forma general, una mezcla de sólidos, agua y grasa, su calentamiento produce una disminución de la densidad de los líquidos (y además de las grasas en mayor medida que la del agua), pero no modifica el peso específico de los sólidos. Por tanto, podemos pensar que los sólidos tienden a separarse de los líquidos, descendiendo al fondo del tanque. De los dos fluidos, grasa y agua, la primera tenderá a ascender hacia la parte superior del tanque por haber disminuido su densidad en mayor medida que la densidad del agua, quedando ésta en una fase intermedia.

La razón de que el tanque de craqueo térmico tenga dos cámaras comunicadas inferiormente es para “obligar” al efluente a pasar por la zona más baja del tanque. De esta forma también se favorece la precipitación de los sólidos hacia el fondo, recogándose en la zona cónica o embudo, desde donde posteriormente se descargarán hacia el exterior por medio de una válvula neumática de apertura temporizada.

Este fenómeno descrito de desestabilización para separación de las fases constituyentes del efluente por efecto de la temperatura, también se produce en las máquinas centrífugas. En ellas, el *licor*, muy concentrado en grasa, se introduce a una temperatura lo suficientemente elevada como para que tenga lugar el craqueo térmico, aunque en estas máquinas la separación más efectiva se genera por la acción de la velocidad de rotación de los discos.



Imagen 4.7. Tanque de craqueo térmico

## 4.6. SEPARADORAS CENTRÍFUGAS

Esta instalación se proyecta para realizar una separación centrífuga en dos etapas. La primera es la que realizará el proceso de centrifugado inicial, mientras que la segunda refinará la lanolina extraída en la primera etapa.

### 4.6.1. DIMENSIONAMIENTO

La elección de estas máquinas se justifica en base al tipo de flujo que va a entrar en ellas. En el apartado 3.2. *Proceso de separación por centrifugación*, se obtuvo la ecuación (5):

$$Q < \frac{(\rho_p - \rho_f)d^2\omega^2}{9\mu} \frac{\pi (R_e^3 - R_i^3)}{3 \tan \alpha} N \quad (5)$$

En primera instancia, el único dato de partida es el del tamaño de partícula que queremos extraer, de diámetro  $d$  aproximadamente igual a 10  $\mu\text{m}$ . Este dato es el que se estima para las partículas de una *suspensión muy turbia* que decanta por sedimentación, y por tanto no es solución ni dispersión coloidal<sup>74</sup>.

También se realizó la valoración de las densidades del fluido más cargado de lodos  $\rho_p$  y del fluido más cargado de grasa  $\rho_f$  así como del valor de la viscosidad del fluido  $\mu$  a la temperatura de trabajo (90°C).

Estas densidades del fluido son las que se esperarían conseguir para que el proceso de separación centrífuga fuese adecuado. Los valores de las propiedades del fluido que se han tomado son:

$d = 10 \mu\text{m}$  (diámetro medio de la partícula que se desea separar)

$\rho_p =$  densidad del fluido cargado de lodos (a  $90^\circ\text{C}$ ) =  $0,98 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

$\rho_f =$  densidad del fluido cargado de grasa (a  $90^\circ\text{C}$ ) =  $0,91 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

$\mu =$  viscosidad estimada del fluido (a  $90^\circ\text{C}$ ) =  $0,50 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$

Es evidente que solamente con estos valores no se puede realizar la elección de una máquina separadora concreta. Observando la ecuación anterior y con el fin de ajustar el caudal de funcionamiento de la instalación, se necesitan introducir en esta expresión los parámetros relacionados con la geometría y características de una máquina concreta.

Es decir, para unas características determinadas de tamaño de partícula y del flujo de entrada y salida, puede haber varias máquinas, incluso dentro de la misma marca comercial, que puedan adaptarse a una misma instalación.

En este caso entran a formar parte de la elección de la máquina otros criterios diferentes, algunos de carácter técnico, como por ejemplo que el caudal resultante se encuentre dentro de un determinado rango, así como otros criterios que nada tienen que ver con ellos, como el coste de la maquinaria.

Después de valorar diferentes opciones, en esta instalación se optó por implantar una máquina separadora centrífuga marca ALFA LAVAL modelo C 209 para el primer pasaje o etapa de extracción. Esta máquina tiene estas características:

$$R_e = 150 \text{ mm}$$

$$R_i = 52,5 \text{ mm}$$

$$\alpha = 41,5^\circ$$

$$N = 80 \text{ platos}$$

$$\omega = 78,54 \text{ rad/s (750 rpm)}$$

Sustituyendo ahora los valores de las características del fluido y de esta máquina concreta en (5), se obtiene de la expresión anterior el valor del caudal máximo de fluido de entrada a la máquina con el que se debe trabajar para conseguir realizar la separación esperada:

$$Q < \frac{(0,98 - 0,91) \cdot 10^3 \cdot (10^{-5})^2 \cdot 78,54^2 \pi (0,15^3 - 0,0525^3)}{9 \cdot 0,50 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \tan 41,5^\circ} \cdot 80$$
$$= 0,00294 \text{ m}^3/\text{s} = 2,94 \text{ L/s}$$

Este caudal equivale a 10,59 m<sup>3</sup>/h, que sería el caudal máximo de entrada en la primera máquina separadora centrífuga para poder realizar la separación de las partículas de tamaño 10 μm.

Para un valor de caudal superior, el tiempo de residencia del flujo dentro del aparato sería menor y la efectividad de la separación se reduciría. La grasa que saldría de la máquina por su parte superior

tendría un contenido mayor de agua y de tierras, manifestándose en un color más oscuro de este flujo.

Por otro lado, si el caudal es demasiado bajo, podría suceder que las partículas no entrasen en los intersticios entre discos. Este fenómeno se observaría porque la máquina apenas realizaría trabajo efectivo, no habría flujo de extracción de grasa por la parte superior o sería muy bajo, saliendo un fluido demasiado rico en grasa para esta primera etapa de centrifugación.

Entre los valores de caudal de entrada mínimo y máximo que se han indicado, el punto de funcionamiento de la máquina separadora centrífuga se ha de ajustar dependiendo de las características del fluido a la entrada.

Se considera, por ejemplo, el caso de tener partículas de sólidos de tamaño elevado. El fluido de entrada tendrá color oscuro. En este caso, la componente de la velocidad en dirección radial (hacia el exterior) aumentaría, debido al incremento de la fuerza centrífuga (partículas más pesadas), como consecuencia de la rotación de la máquina. Se estaría extrayendo de la máquina un mayor caudal hacia la cazuela exterior, mientras que disminuiría el caudal de grasa. En estas circunstancias suele suceder que el caudal de grasa es demasiado bajo (lanolina muy “refinada”), teniendo en cuenta además que posteriormente existe una segunda etapa de centrifugación que depura lo que de la primera se ha extraído.

En esta situación, el caudal  $Q$  de entrada a la primera centrífuga debería aumentarse para compensar esa disminución observada en el caudal de grasa. Actuando de esta forma, la velocidad del fluido entre los discos de la máquina se haría mayor, incrementándose también el tamaño mínimo  $d_{\min}$  de las partículas (ver Imagen 3.1.b) con lo que habría menos partículas que chocasen contra el disco superior y saldrían más partículas por la parte interior de la centrífuga.

Este flujo cargado en grasa sería más oscuro, como prueba de su mayor contenido en tierras, pero con un caudal suficiente como para poder alimentar a la segunda centrífuga.

Por el contrario, se tiene el caso en que el fluido de entrada a la centrífuga, procedente del tanque de craqueo térmico, tenga menor contenido de partículas de sólidos o su tamaño sea inferior. Se manifestaría en un fluido de color más claro.

En estas circunstancias, una gran parte de estas partículas sólidas abandonarían los canales intermedios sin tocar la pared superior de los discos (ver Imagen 3.1.b). El caudal de extracción hacia el interior de la máquina sería elevado ( $d_{\min}$  sería mayor), pero más cargado en partículas (tierras).

Ante esta situación, el caudal de entrada en la máquina debe disminuirse, buscando con ello obtener un volumen de fluido concentrado de grasa suficiente pero no muy saturado de sólidos.

En definitiva, el caudal de entrada a la primera de las máquinas separadoras centrífugas debe variarse, tratando de que sea el mayor posible, pero dentro del margen que permita un adecuado funcionamiento de la máquina.

Tal como se dedujo en la interpretación adimensional de la ecuación de estas máquinas (Ecuación 8), ajustando el caudal volumétrico  $Q$  al valor adecuado, se busca que exista una diferencia elevada entre los números de Reynolds de los flujos de entrada a la centrífuga (el denominado *licor*) y de salida de ella (flujo concentrado de grasa). Este hecho aumenta la eficacia de la extracción por incrementarse la diferencia ( $\rho_p - \rho_f$ )

Para la máquina que se ha proyectado, este caudal o flujo volumétrico nominal  $Q$  está en torno a los  $6 \text{ m}^3/\text{h}$  (dato del fabricante), aunque no suele ser inferior a los 4 ni superior a los  $7,5 \text{ m}^3/\text{h}$  para las características del caudal que se suele tratar en la instalación. Recordemos que se podría llegar a  $10,59 \text{ m}^3/\text{h}$  según la expresión teórica utilizada.

Para conseguir estas oscilaciones del caudal (que se adapten a las características de cada flujo de entrada según se ha comentado), se dispone en la instalación de un variador de frecuencia. Este dispositivo actúa sobre la bomba que conduce el agua desde el tanque de craqueo térmico hasta la primera centrífuga, modificando su velocidad de giro y con ello el caudal que aporta la bomba.

#### 4.6.2. CARACTERÍSTICAS

La primera de las centrifugas (ALFA LAVAL modelo C 209) se ajusta a las características de caudal que se han establecido en los cálculos anteriores. Se utiliza para tratar el flujo de agua concentrado en grasa (licor) sobre el que se ha realizado el craqueo térmico en el tanque del apartado anterior. Como ya se dijo, esta centrifuga tiene tres salidas diferentes de flujo:

- El agua **cargada de fangos**, que debido a su mayor densidad se expulsa de la centrifuga por su parte exterior y que se recoge para ser conducido al receptor de fangos situado en la parte inferior del tanque de craqueo térmico, donde se junta con las descargas de este tanque, conduciéndose ambos flujos a un decantador de fangos.
- El agua o interfase **descargada de grasa**. Sale de la centrifuga por la parte superior y se recoge en una canalización que se recircula de nuevo hacia el tanque de craqueo con el doble fin de mantener la temperatura y el caudal mínimo que precisa esta centrifuga, que de otro modo se tendría que aportar procedente en su totalidad a partir del flotador DAF. También se conseguirá pasar el flujo de nuevo por la centrifuga, con lo que se mejorará la extracción de lanolina. Este punto se ampliará en el apartado siguiente cuando se comente el funcionamiento de la instalación.

- Por último, el flujo **rico en lanolina**, que ha evolucionado en la parte central de la centrífuga por ser el menos denso, y que pasará posteriormente a la segunda centrífuga.



Imagen 4.8. Separadora centrífuga ALFA LAVAL C 209

En lo que se refiere a la segunda centrífuga, esta máquina es de la marca ALFA LAVAL modelo C 207. Su elección se justifica por el hecho de que es el propio fabricante el que la recomienda como complemento a la modelo C 209 para concluir el tratamiento. Es decir, esta segunda máquina forma parte del grupo de instalación asociada a la C 209 proyectada en base a los cálculos realizados.

La C 207 toma la mezcla de agua y lanolina concentrada de la primera (el tercero de los flujos comentados anteriormente) y realiza sobre él un proceso de refinado. Para esta máquina hay dos salidas diferentes de efluentes:

- La lanolina ya preparada para su expedición.
- Un caudal de agua muy clarificada, que se encuentra a una temperatura próxima a los 60°C, y que se puede reutilizar en el proceso, por lo que se almacena en un tanque para su disposición cuando se precise.



Imagen 4.9. Separadora centrífuga ALFA LAVAL C 207

## 4.7. FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA

El agua se recibe de los lavaderos en un pozo de bombeo y se hace pasar por unos equipos de desbaste de gruesos tipo *filtros rotativos*. Por gravedad el efluente llega a los tanques de homogeneización y agitación ya descritos.

A la salida de ellos se dispone del equipo de bombeo que regulará el caudal de entrada en el equipo flotador (DAF) hacia el tratamiento. En este tratamiento de flotación tenemos la posibilidad de variar, según se ha descrito:

- El caudal y la presión del aire de flotación (ver imagen siguiente).
- El aporte de ácido, para regular el pH del baño.
- El aporte de otras sustancias, especialmente el floculante.



Imagen 4.10. Equipo regulador de caudal de entrada de aire al DAF

Del flotador DAF obtenemos tres diferentes salidas de líquidos:

- Por un lado los **lodos** que precipitan al fondo del equipo y se retiran por medio del tornillo sinfín al decantador de fangos.
- Por la parte intermedia del equipo DAF se genera un fluido que deberá ser, si todo se realiza correctamente, **muy poco concentrado en grasa**, ya que ésta asciende a la parte superior. Este vertido sale del flotador DAF por la parte posterior del equipo y se conduce al tratamiento de depuración que existe de forma independiente a la extracción de lanolina.
- Por la parte superior la **grasa concentrada**, que asciende al tener menor densidad, fenómeno además que se ve favorecido por la inyección de las burbujas de aire. Este efluente se extrae del

equipo superficialmente por medio de unas rasquetas o rascadores que lo empujan hacia su parte delantera, recogiénose en un espesador tipo tolva para pasar de aquí al tanque donde se realizará el craqueo térmico.



Imagen 4.11. Rasqueta del DAF llenando el espesador de grasa antes de su entrada en el tanque de craqueo térmico

El licor mezcla de agua y grasa extraída del flotador DAF por el espesador entra en el tanque de craqueo térmico, como ya se ha indicado, donde se eleva su temperatura hasta los 90°C para favorecer la separación de la grasa del resto del vertido. En la imagen siguiente se observa una vista superior de este tanque, donde se aprecian las sondas de temperatura y de nivel para controlar la alimentación del licor desde el espesador del DAF. A diferencia de la Imagen 4.6, en este caso los serpentines de calentamiento no se ven, por estar inmersos en el baño.



Imagen 4.12. Tanque de craqueo térmico

El caudal tratado en este tanque de craqueo térmico es el que se introduce en la primera centrífuga, que trabaja por tanto a una elevada temperatura, en torno a los 90°C, para favorecer la extracción de la lanolina, tal como se indicó, debido a la disminución de la viscosidad y densidad de la grasa.

La primera centrífuga es un equipo diseñado para trabajar con un caudal de fluido nominal de 6 m<sup>3</sup>/h, no siendo posible conseguir este valor solamente con el licor procedente del DAF, que se estima en pocas decenas de litros por minuto (dependiendo lógicamente de la cantidad de grasa presente en la lana).

Debido a ello, durante la realización de este Trabajo, se ideó una *recirculación* de la fracción del caudal que rechaza la primera centrífuga

por su parte superior, que está normalmente libre de fangos, según se explicó anteriormente. De esta forma se puede ajustar, mediante llaves de paso, una corriente de recirculación que sumada al caudal del licor concentrado en grasa procedente del flotador DAF, ingrese en la primera separadora centrífuga el caudal deseado.

El caudal de recirculación se ajustará de tal forma que complemente la fracción que se deriva al exterior de la instalación en esta primera centrífuga por su parte inferior, la que corresponde con los fangos, y que se extrae fuera del circuito.

Mediante esta recirculación se aseguran varios aspectos importantes para el funcionamiento de la instalación:

- Garantizar el caudal nominal de la primera separadora centrífuga ( $6 \text{ m}^3/\text{h}$ ), necesario para su correcto funcionamiento.
- La entrada de grasa a la extracción, que se puede regular temporizando el avance imprimido a las rasquetas del DAF, de forma que el caudal de este licor sea equivalente al caudal que sale del sistema, cargado de tierras, en la primera centrífuga, hacia el decantador de fangos.
- El mantenimiento de una temperatura elevada ( $90^\circ\text{C}$ ) en el tanque de craqueo térmico a un coste razonable: si todo el caudal que entrase en este tanque hacia la centrífuga procediese del DAF, sin recirculación, se debería emplear una gran cantidad de energía en elevar la temperatura del efluente (desde los  $30^\circ\text{C}$

aproximadamente que se encuentra en el DAF, hasta los indicados 90°C). Con la recirculación, una gran parte del efluente se encuentra a una temperatura próxima a esos 90°C puesto que ya ha realizado el proceso de craqueo térmico. Solamente se tendrá que elevar la temperatura a la parte del licor concentrado en grasa que procede de la flotación del equipo DAF.

- Por último, esta recirculación también posibilita el incremento de la cantidad de lanolina que se espera extraer, puesto que el flujo pasa en repetidas ocasiones por el conjunto de procesos de craqueo térmico y extracción en la centrífuga.

Para finalizar el proceso, el caudal más rico en grasa procedente de la primera centrífuga, mezclado con una pequeña cantidad de agua limpia para favorecer su transporte, se introduce en la segunda separadora centrífuga, que realiza el refinado, y de la que ya se obtiene un producto con las características deseadas por el mercado.



Imagen 4.13. Recogida de lanolina en un embudo a la salida de la segunda centrífuga para su almacenamiento

Con la recirculación se completa el diagrama de flujo expresado en el apartado 4.2, que queda como sigue:



LAVADEROS



DEPÓSITOS DE  
HOMOGENEIZACIÓN



EQUIPO DE FLOTACIÓN (DAF)



ESPEADOR DE  
GRASA



TANQUE PARA  
CRAQUEO TÉRMICO



Q = 6 m<sup>3</sup>/h



1ª CENTRÍFUGA



2ª CENTRÍFUGA



**LANOLINA**

RECIRCULACIÓN  
para conseguir  
el caudal  
nominal

## 4.8. AUTOMATIZACIÓN DE LA INSTALACIÓN

La instalación de extracción de lanolina se encuentra parametrizada con el fin de poder funcionar de forma automática en base a señales que aportan diferentes equipos.

La ejecución de la automatización y control de la planta fue objeto de un Proyecto Fin de Carrera presentado recientemente y que fue dirigido por este doctorando<sup>75</sup>.

La monitorización y el control de la instalación se realiza desde un entorno visual SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)<sup>76</sup> que permite su gestión desde un ordenador (PC). De esta forma, en todo momento:

- ✓ Se conocen los valores de los parámetros (caudales, temperaturas, pH, presiones...) en diferentes partes y equipos de la instalación y pueden ser modificados
- ✓ Se puede saber si hay algún fallo en la planta y a qué es debido
- ✓ Se puede ajustar de forma sencilla el funcionamiento de la instalación con arreglo a las características del efluente que llega al tratamiento
- ✓ Se tiene acceso a valores históricos de los parámetros de la planta

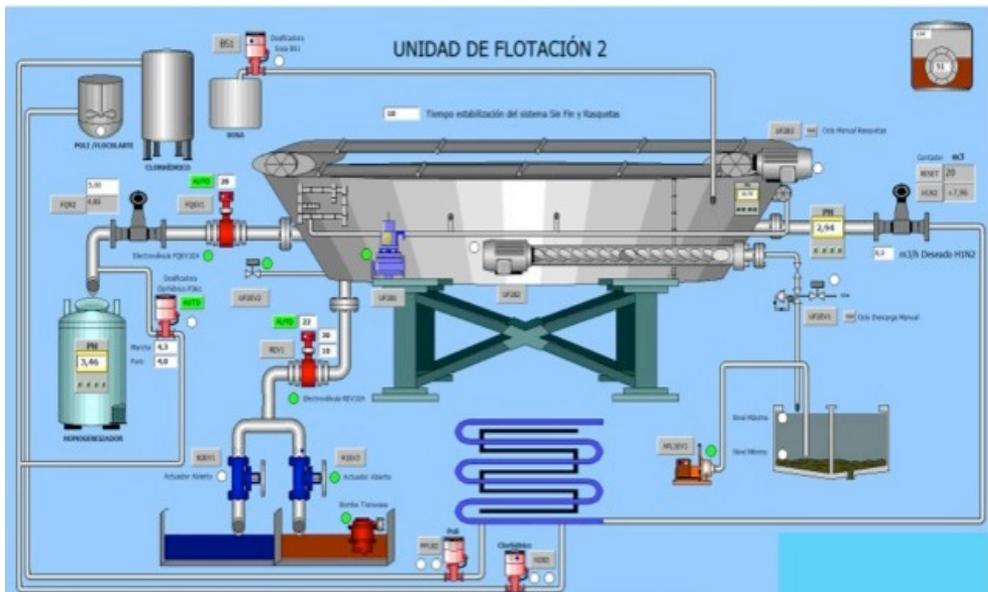


Imagen 4.14. Una de las pantallas de visualización de la planta en el PC

Se pueden distinguir tres niveles en la infraestructura de automatización:

- **ELEMENTOS DE CAMPO:** comprende sensores y actuadores. Entre ellos los siguientes:

*Sensores:*

- Nivel del depósito de homogeneización. Es un medidor de tipo *radar* para medición del nivel de llenado de forma continua.
- Niveles de la arqueta de fangos. Son de tipo *boya*, uno de ellos para al nivel de llenado mínimo y otro para nivel máximo.

- Caudalímetro del homogeneizador. Se utiliza para regular la entrada de efluente desde los depósitos de homogeneizadores en dirección al flotador.
- Caudalímetro de floculante. Para regular la cantidad de floculante que se añade, situado en el serpentín de entrada al flotador DAF.
- Medidor de pH. Mediante una sonda situada dentro del floculador, se utiliza para conocer el pH de la mezcla y para regular el funcionamiento de la bomba de ácido.

*Actuadores:*

- Agitadores de los depósitos de homogeneización. Se utilizan para evitar la precipitación de los lodos que incorpora el efluente en el fondo de estos depósitos.
- Bombas centrífugas de entrada. Son las que se utilizan para introducir el efluente desde los depósitos de homogeneización hasta el flotador, pasando anteriormente por el floculador.
- Bomba dosificadora de ácido. Es la que introduce el ácido dentro del proceso para la adecuación del pH a los requerimientos.
- Bomba dosificadora de floculante. Tiene la misión de aplicar este producto en el floculador a la entrada del equipo DAF cuando así se requiera.

- Bomba de fangos. Se trata de un equipo con funcionamiento neumático, y su misión es la de transportar los fangos desde su arqueta de recogida hasta el espesador situado en la zona de depuración.
  - Electroválvulas. Se utilizan para la regulación del paso del fluido en distintos puntos de la instalación. Reciben las señales del autómeta.
- ELEMENTOS DE CONTROL. Son los siguientes:
- Autómata programable. De la marca SIEMENS. Es el elemento básico para controlar el funcionamiento de la instalación conforme a las condiciones de trabajo que en cada momento sean requeridas. Dispone de 14 entradas digitales y 10 salidas digitales.
  - Módulos de expansión de entradas y salidas. Para cubrir todas las necesidades de la instalación, es preciso aumentar el número de señales de que dispone el autómeta. Para ello se implantan estos módulos de entradas y salidas, tanto digitales como analógicas.

- **ELEMENTOS DE SUPERVISIÓN.** Los datos y parámetros de interés se muestran en una aplicación. Consisten en:
- PC de sobremesa. Ordenador con el software de control para interactuar con la instalación y su visualización a través del SCADA.
  - Cuadro eléctrico de mando. En caso necesario, la instalación también se puede controlar desde un cuadro eléctrico con sus correspondientes botoneras y selectores manuales.



## 5. MÉTODOS ANALÍTICOS<sup>77 78 79</sup>

En este apartado se realiza una descripción de los procedimientos y métodos utilizados en el análisis físico – químico de los fluidos de interés para este Trabajo.

En concreto, se exponen en primer lugar las pruebas realizadas sobre los efluentes derivados del proceso de lavado de la lana, que proporcionarán los datos de partida sobre los que posteriormente, por comparación con la muestra inicial, se puede calcular la efectividad o *rendimiento* de los procesos en estudio.

Es importante hacer notar que estas pruebas sobre los efluentes se realizaron en laboratorios externos por personal que se dedica profesionalmente a ello, con el fin de asegurar la fiabilidad de los resultados. Los informes correspondientes a estas pruebas se incorporan en el apartado de Resultados de este estudio.

Además de las pruebas sobre el efluente, también se hará una descripción de la analítica que se realiza sobre el producto extraído, la lanolina, con el fin de determinar su calidad, que establecerá su valor comercial cuando se ponga en venta.

Estas pruebas sí se han realizado personalmente, en el laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Béjar, en colaboración con los Directores de esta investigación.

Por tanto, además de la descripción de las pruebas, en este caso también se incorporan los resultados obtenidos sobre diferentes muestras de lanolina.

## 5.1. ANÁLISIS DE LOS EFLUENTES<sup>80 81 82</sup>

Las muestras tomadas de los efluentes se recogen en envases apropiados para ese fin y son conservadas en armarios refrigerados hasta el momento de proceder a su análisis. Se ha procurado siempre que el tiempo transcurrido entre la toma de la muestra y la realización de las pruebas analíticas sea lo más corto posible.

### 5.1.1. ANÁLISIS DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)<sup>83</sup>

#### 5.1.1.1. Principio

La DQO es cualquier sustancia, orgánica o inorgánica, que es susceptible de ser oxidada mediante un oxidante fuerte, como el dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ). La cantidad de oxidante que se consume se expresa en términos de su equivalencia en oxígeno, por lo que la DQO se expresa en mg/L de  $O_2$ .

Para determinar la demanda química de oxígeno (DQO) se utilizó el reflujó cerrado, método colorimétrico. Este método consiste en que

cuando la muestra es digerida, su materia orgánica se oxida. Como resultado, el Cromo pasa de estado hexavalente (VI) a trivalente (III).

Ambas especies de Cromo muestran color y absorben luz en la región del espectro visible. En la región de  $400\text{ nm}$  el ion cromo hexavalente (VI) absorbe mucha luz, mientras que el crómico ( $\text{Cr}^{3+}$ ) absorbe mucha menos. En la región  $600\text{ nm}$  ocurre lo contrario y es el ion crómico el que absorbe gran cantidad de luz mientras que el ion dicromato tiene una absorción prácticamente nula.

Se utiliza un método simplificado<sup>84</sup> para determinar la DQO de sustancias químicas, aguas y aguas residuales a escala semimicro. El fundamento del método es el mismo que el del método normalizado (UNE). Sin embargo, con el método propuesto se utiliza una cantidad de muestra y de reactivos mucho menor.

La materia orgánica presente en una muestra puede ser evaluada como la demanda de oxígeno que aquella ejerce para su oxidación total.

En la determinación de la Demanda Química de Oxígeno, la materia orgánica presente en la muestra es oxidada con un exceso de dicromato de potasio en medio ácido, en presencia de sulfato de plata como catalizador, a temperatura elevada.

El dicromato residual se valora con disolución valorante de hierro (II), conociéndose de esta manera el consumo de oxidante de la muestra, que se expresa en mg/L de  $\text{O}_2$ .

En el método tradicional, la digestión con dicromato de potasio se realiza en un matraz de 500 mL a ebullición con reflujo. En el método simplificado se realiza la digestión en tubos de vidrio cerrados, con menor consumo de reactivos, manteniendo la exactitud y la precisión del método.

#### 5.1.1.2. Reactivos

Para determinar la demanda química de oxígeno se preparan los reactivos según se expresa a continuación:

##### *Disolución (A)*

Se disuelven 6,6 g de sulfato de plata en 1000 mL de ácido sulfúrico concentrado.

##### *Disolución de dicromato de potasio*

Se preparan 250 mL de disolución de dicromato de potasio 0,25 N.

##### *Disolución (B) de digestión*

Se disuelven 4 g de sulfato de mercurio (II) y 35 mL de disolución (A) en 100 mL de una disolución 0,25 N de dicromato de potasio.

##### *Disolución de hierro (II) 0,1 N*

9,8 g de sal de Mohr ( $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2 [\text{SO}_4] 6\text{H}_2\text{O}$ ) se disuelven en 100 mL de agua que contengan 5 mL de ácido sulfúrico concentrado, se

transfieren a un matraz aforado de 250 mL, se enrasa y homogeneiza. Esta disolución se normaliza según se indica en el apartado siguiente.

#### *Disolución indicadora*

Se disuelven 1,485 g de 1,10-fenantrolina y 0,695 g de sulfato de hierro (II) ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) y se completa el volumen hasta 100 mL.

#### 5.1.1.3. Normalización de la disolución de hierro

Se introducen 2 mL de disolución 0,25 N de dicromato en un erlenmeyer de 50 mL. Se diluyen a unos 20 mL con agua destilada y se añaden 6 mL de ácido sulfúrico concentrado.

Se enfría a temperatura ambiente y se valora (con una bureta cuyas divisiones sean de 0,02 mL) con la disolución de sal de Mohr, en presencia de una gota de ferroína. El viraje es de verde a marrón rojizo.



Imagen 5.1. Ejemplo de viraje de color al añadir la sal de Mohr

Se repite la valoración y se calcula la normalidad exacta de la disolución de hierro (II).

#### 5.1.1.4. Digestión de las muestras de agua

En cada tubo de digestión se introducen 2 mL de disolución (B), 3 mL de la muestra que se analiza, siempre que su DQO no sobrepase los 900 mg/L de O<sub>2</sub> en cuyo caso se diluye la muestra, y 4 mL de disolución (A).



Imagen 5.2. Ejemplo de preparación de las muestras de agua para analizar su DQO. Tubos para la digestión del agua residual (color verde), junto con un “blanco” de agua destilada (color amarillo)

En caso de que la concentración de cloruros sea superior a 1500 mg/L, se añaden unos cristales de HgSO<sub>4</sub> al tubo.

Se realiza un blanco sustituyendo los 3 mL de muestra a analizar por 3 mL de agua destilada.

Se preparan 3 tubos para cada agua residual para obtener una idea de la variabilidad del ensayo y más confianza en el resultado del mismo.

Los tubos de digestión, bien cerrados con su tapón de rosca, se colocan en una gradilla y se mantienen durante 2 horas y 30 minutos en una estufa a 150°C. Pasado este tiempo se sacan los tubos y se enfrían a temperatura ambiente.

#### 5.1.1.5. Valoración de las muestras de digestión

El contenido de cada tubo se vierte en un erlenmeyer de 50 mL, se lava el tubo tres veces con agua destilada y se valora con la disolución de sal de Mohr, en presencia de una gota de ferroína (en una bureta con divisiones de 0,02 mL).

#### 5.1.1.6. Cálculos

El cálculo de la DQO del agua se realiza de la siguiente manera:

$$DQO \left( \frac{mg O_2}{L} \right) = \frac{8000 (V_0 - V_1) \cdot N}{V}$$

donde:

N: normalidad exacta de la sal de Mohr

V<sub>0</sub>: volumen consumido por el testigo (mL)

V<sub>1</sub>: volumen consumido por la muestra (mL)

V: volumen de muestra introducido en el tubo (mL)

## 5.1.2. ANÁLISIS DEL CONTENIDO EN SÓLIDOS

Por *sólidos* se refiere a la materia suspendida o disuelta presente en aguas naturales y aguas residuales. Es el contenido diferente al agua pura, tanto de naturaleza orgánica como inorgánica.

Los sólidos se dividen en sólidos totales y en sólidos en suspensión.

### 5.1.2.1. *Sólidos totales*

A su vez se pueden diferenciar los sólidos totales (STT) y los sólidos totales volátiles (STV)

#### 5.1.2.1.1. Principio

Con la expresión *sólidos totales* se refiere a los residuos de material que permanecen en un recipiente después de la evaporación de una muestra y su posterior secado en una estufa a 103-105 °C.

Los residuos evaporados después de someterse la muestra a ignición en un horno de mufla a 550 °C durante 15 a 20 minutos, constituyen los sólidos totales volátiles.

Ambos se calculan por diferencia de pesos de las muestras antes y posteriormente a los procesos de secado y evaporación.

#### 5.1.2.1.2. Procedimientos

Consisten básicamente en:

- Limpiar y calentar la cápsula de porcelana a 103-105 °C durante una hora.
- Homogeneizar la muestra y transferir a la cápsula un volumen medido.
- Evaporar la muestra en la estufa a 103-105 °C.
- Conservar la cápsula en desecador, equilibrar la temperatura y pesar.

#### 5.1.2.1.3. Expresión para calcular los STT

$$STT \left( \frac{mg}{L} \right) = \frac{(Peso\ 103^{\circ}C - P_{cápsula})}{Vmuestra} \cdot 10^6$$

donde:

Peso 103°C: peso de residuo seco + cápsula tras secado a 103°C (g)

P cápsula: peso de la cápsula (g)

V muestra: volumen de la muestra (mL)

#### 5.1.2.1.4. Expresión para calcular los STV

$$STV \left( \frac{mg}{L} \right) = \frac{(Peso\ 103^{\circ}C - Peso\ 550^{\circ}C)}{Vmuestra} \cdot 10^6$$

donde:

Peso 103°C: peso de residuo seco + cápsula tras secado a 103°C (g)

Peso 550°C: peso de residuo seco + cápsula tras ignición a 550°C (g)

V muestra: volumen de la muestra (mL)

#### 5.1.2.2. *Sólidos suspendidos*<sup>85</sup>

##### 5.1.2.2.1. Principio

Los sólidos suspendidos son aquellas partículas no solubles que además de ello no son lo suficientemente pesadas para sedimentarse en la masa de agua en que están presentes. Los principales sólidos en suspensión son pequeñas partículas de materia orgánica e inorgánica, microorganismos y plancton.

Para su determinación, en primer lugar se filtra una muestra bien mezclada por un filtro cuyo paso sea de 0,45  $\mu\text{m}$  de diámetro. El volumen filtrado no debe proporcionar un residuo mayor de 200 mg, y el residuo retenido en el mismo se seca hasta peso constante a 103-105 C. El aumento de peso del filtro representa los sólidos totales en suspensión.

El residuo obtenido sobre la muestra de sólidos totales en suspensión se incinera en una mufla a una temperatura 550 C durante un tiempo entre 15 y 20 minutos y se enfría en el desecador. Una vez equilibrada la temperatura, se pesa. Los sólidos que permanecen representan los sólidos fijos, mientras que la pérdida de peso por ignición representa los sólidos suspendidos volátiles.

#### 5.1.2.2.2. Procedimiento

- Limpiar y calentar la cápsula de porcelana durante una hora a una determinada temperatura.
- Calentar el filtro.
- Conservar la cápsula y el filtro en un desecador hasta que se enfríe.
- Homogenizar la muestra y filtrar.
- Llevar a la estufa en la que se evapora la muestra a 103-105°C.
- Conservar la cápsula en desecador para equilibrar la temperatura y pesar hasta que no haya diferencia entre los pesos.

El resultado se determina por medio de las expresiones siguientes:

#### 5.1.2.2.3. Expresión para calcular los sólidos suspendidos totales

$$SST \left( \frac{mg}{L} \right) = \frac{\text{Peso } 103^{\circ}\text{C} - (\text{Pcápsula} + \text{Pfiltro})}{V \text{ muestra}} \cdot 10^6$$

donde:

Peso 103°C: peso de residuo seco + cápsula + filtro tras secado a 103°C (g)

P cápsula + P filtro: peso de la cápsula más el filtro (g)

V muestra: volumen de la muestra (mL)

#### 5.1.2.2.4. Expresión para calcular los sólidos suspendidos volátiles

$$SSV \left( \frac{mg}{L} \right) = \frac{\text{Peso } 103^{\circ}\text{C} - \text{Peso } 550^{\circ}\text{C}}{V \text{ muestra}} \cdot 10^6$$

donde:

Peso 103°C: el mismo del apartado anterior (g)

Peso 550°C: peso de residuo seco + cápsula + filtro tras ignición a 550°C (g)

V muestra: volumen de la muestra (mL)

### 5.1.3. ANÁLISIS DEL CONTENIDO EN ACEITES Y GRASAS<sup>86</sup>

#### 5.1.3.1. Principio

El aceite o grasa disuelta o emulsionada es extraída del agua por contacto íntimo con triclorotrifluoretano. Éste tiene la capacidad de no disolver sólo aceite y grasas sino también otras sustancias orgánicas. La eliminación del disolvente tendrá como resultado la pérdida de los hidrocarburos de cadena corta y aromáticos sencillos por volatilización.

#### 5.1.3.2. Instrumental

Embudo de separación

Matraz de destilación

Baño de agua

Papel de filtro

#### 5.1.3.3. Reactivos

Ácido clorhídrico

Triclorotrifluoretano

Sulfato de sodio  $\text{Na}_2\text{SO}_4$

#### 5.1.3.4. Procedimiento

Se recoge un litro de muestra marcando el nivel en la botella. Se acidifica hasta pH 2. Pueden bastar 5 mL de HCl. Se pasa un embudo de separación y se aclara la botella de la muestra con 30 mL de triclorotrifluoretano y se añaden los lavados del disolvente al embudo de separación.

Tras un proceso de agitación suave de 5 a 10 minutos, se deja que se separen las capas. Se drena la capa de disolvente a través del embudo que contenga papel de filtro humedecido con el disolvente en un matraz de destilación limpio y tarado. Si no es posible obtener una capa clara (blanca) de disolvente, se añade 1 g de sulfato de sodio al cono del papel de filtro y se drena lentamente el disolvente emulsionado. Se añade más sulfato de sodio si es preciso.

Se hacen dos extracciones más con 30 mL de disolvente cada vez aclarándose primero el envase de la muestra con cada fracción de disolvente. Mezclar los extractos en el matraz de destilación tarado y lavar el papel de filtro con otros 10 a 20 mL de disolvente. Destilar el disolvente del matraz de destilación en un baño de agua a 70°C durante 15 minutos extrayendo el aire a su través aplicando el vacío durante el minuto final.

Enfriar en un desecador durante 30 minutos y pesar.

### 5.1.3.5. Expresión para calcular los aceites y grasas

Si el disolvente orgánico está libre de residuos, la ganancia del peso del matraz de destilación tarado se debe principalmente al aceite y a la grasa. La ganancia total del peso A del matraz tarado, menos el residuo calculado B de color blanco del disolvente, es la cantidad de aceite y grasa de la muestra.

$$\text{Aceites y grasas} \left( \frac{mg}{L} \right) = \frac{(A - B)}{ml \text{ de muestra}} \cdot 10^3$$

## 5.2. ANÁLISIS DE LA LANOLINA

En este apartado se exponen las pruebas que se realizan sobre la lanolina con el fin de conocer sus características.

### 5.2.1. PUNTO DE FUSIÓN

Es la temperatura a la que la lanolina pasa de estado sólido a estado líquido. Su valor suele variar poco, en función de la composición de la muestra, aceptándose valores entre 35 y 45°C

#### 5.2.1.1. Material necesario

Vaso de precipitados de 100 mL

Calefactor de placas

Termómetro

#### 5.2.1.2. Procedimiento

En el vaso de precipitados se introduce una muestra de lanolina en estado sólido y se coloca sobre el calefactor de placas con un termómetro en su interior.

Cuando la muestra haya pasado totalmente a estado líquido, se mide la temperatura.

#### 5.2.2. CONTENIDO EN AGUA

Es necesario medir la humedad o contenido en agua que incorpora la lanolina. La mayor o menor presencia de agua en la lanolina es función de la forma en que se ha realizado la extracción. Los ajustes de las máquinas separadoras centrífugas son los que mayor influencia tienen en el contenido de humedad.

Si se extrae una lanolina con poco contenido en agua se corre el peligro de haber “recalentado” el proceso, es decir, de haberla extraído a una temperatura demasiado elevada. Como consecuencia de ello, el color de la lanolina se oscurece debido a un proceso de oxidación térmica por exceso de temperatura. Si esto sucede, se debe aumentar el caudal de agua limpia a la entrada de la segunda etapa de centrifugación.

Por el contrario, si el contenido en agua de la lanolina es elevado, los problemas se originan en los posteriores procesos de transformación del producto, al tener que eliminarla antes de su aplicación comercial.

Ante esta situación, se deben ajustar las máquinas centrifugas, reduciendo en todo caso la aportación de agua limpia a la entrada de la segunda etapa de centrifugación.

*Cualquier valor para el contenido de agua en la lanolina que no supere el 1% se acepta comercialmente.*

Este ensayo se realiza siguiendo un método analítico de empresa<sup>87</sup>.

#### 5.2.2.1. Principio

El agua que se encuentra dentro de la lanolina se elimina cuando se supera la temperatura de evaporación del agua.

Se calculan por diferencia de pesos de las muestras antes y posteriormente a los procesos de evaporación del agua.

#### 5.2.2.2. Material necesario

Báscula de precisión de milésima de gramo

Vaso de precipitados de 100 mL

Horno de secado

Desecador con gel de sílice

#### 5.2.2.3. Procedimiento

Tarar el vaso de precipitados y pesar aproximadamente 10 gramos de la muestra de lanolina. Calentar en el horno a 105°C durante 1 hora, pasar al desecador y pesar.

Volver a repetir la misma operación hasta que los pesos no varíen más.

### 5.2.3. CONTENIDO EN CENIZAS

Por cenizas se refiere a la materia sólida residual que queda tras la combustión de la lanolina. Respecto al contenido de cenizas se puede indicar que, al igual que se dijo para el contenido de agua, depende fundamentalmente de la forma en que se ha realizado la extracción. También en este caso, los ajustes de las máquinas separadoras centrífugas influyen en el contenido en cenizas.

Partiendo de la base de que cada raza de oveja tiene un color de lanolina característico, si el contenido en cenizas es elevado, la lanolina tenderá a ser más oscura por contener una mayor cantidad de partículas sólidas. Esta situación acontece cuando se trabaja con un elevado caudal de entrada en la primera centrífuga, caudal que no permite la extracción de estas partículas sólidas, pasando hacia la siguiente máquina.

Para paliar en lo posible este problema, basta con reducir el caudal de entrada en la primera de las separadoras centrífugas hasta un valor razonable, aquél para el que se observe un cambio en el color de la lanolina extraída hacia un tono más claro.

*El valor para el contenido en cenizas se considera aceptable cualquiera que sea éste, aunque comercialmente se prefiere que no sea elevado.*

Esta prueba no se suele realizar de forma habitual pues está muy relacionada con la prueba de color, o lo que es lo mismo, el color de la lanolina proporciona un parámetro que de alguna manera es equivalente y puede sustituir al contenido en cenizas. Lógicamente, la prueba del color es mucho más sencilla y rápida que ésta. Un color más oscuro de la muestra será indicativo de un mayor contenido en cenizas.

Este ensayo de contenido en cenizas se realiza siguiendo un método analítico de empresa<sup>88</sup>.

#### 5.2.3.1. Principio

Los residuos evaporados después de someterse la muestra a ignición constituyen los sólidos totales volátiles.

Se calculan por diferencia de pesos de las muestras antes y posteriormente a los procesos de combustión.

#### 5.2.3.2. Material necesario

Báscula de precisión de milésima de gramo

Cápsula de porcelana

Mechero Bunsen

Ácido sulfúrico concentrado

Desecador con gel de sílice

#### 5.2.3.3. Procedimiento

Tarar la cápsula de porcelana y pesar aproximadamente 2 gramos de la muestra de lanolina. Calentar con el mechero Bunsen dentro de una campana extractora hasta provocar la combustión. Añadir 3 ó 4 gotas de ácido sulfúrico y calentar de nuevo hasta que no quede humo blanco.

Dejar enfriar la cápsula en el desecador y pesar de nuevo.

#### 5.2.4. ÍNDICE DE ACIDEZ EN GRASAS<sup>89</sup>

El índice de acidez expresa los miligramos de Hidróxido Potásico necesarios para neutralizar la acidez libre de un gramo de sustancia grasa. Se expresa habitualmente como porcentaje de Ácido Oleico.

*Comercialmente se aceptan valores de hasta 30 para el índice de acidez, cuando ésta se expresa en tanto por ciento (60 si se expresa en miligramos de Hidróxido Potásico por gramo de sustancia grasa)*

Su valor depende fundamentalmente de la raza de oveja de que provenga la lanolina, aunque no hay relaciones conocidas entre tipos de animal e índice de acidez de la lanolina que genera.

##### 5.2.4.1. Descripción

La determinación se hace por valoración en medio no acuoso.

#### 5.2.4.2. Reactivos

Etanol (PRS) neutralizado con NaOH 0,1 N

KOH etanólica 0,1 N (SV)

Fenofaleína (solución al 0,1% en Etanol 96%)

Tolueno

#### 5.2.4.3. Equipos y materiales

Erlenmeyer de 100 mL

Bureta de 10 mL graduada en 0,05 mL

#### 5.2.4.4. Procedimiento

En un Erlenmeyer de 100 mL, pesar con precisión de centésima de gramo, entre 0,5 y 20 g de la muestra a ensayar (*P*), según el índice de acidez esperado, para consumir entre 1 y 10 mL de solución valorada.

Disolver la muestra con 10 mL de Tolueno, agitar hasta disolución total y luego añadir los 20 mL de Etanol neutralizado, calentando si es necesario.

Añadir unas gotas de Fenofaleína y valorar frente a la disolución de Hidróxido Potásico 0,1 N. El viraje es de incoloro a rosado y el color debe persistir al menos durante 30 segundos.

#### 5.2.4.5. Cálculos<sup>90</sup>

$$\text{Índice de acidez} \left( \frac{\text{mg KOH}}{\text{g}} \right) = \frac{V \cdot 5,61}{P} \quad (11)$$

Siendo  $V$  = volumen de KOH 0,1 N consumido en mL

P = peso de la muestra en g

$$\text{Índice de acidez (\%)} = \frac{1}{2} \cdot \text{Índice de acidez} \left( \frac{\text{mg KOH}}{\text{g}} \right)$$

#### 5.2.4.6. Observaciones

El Etanol se neutraliza añadiendo primero unas gotas de Fenoftaleína y después, lentamente y con agitación, solución de Hidróxido Sódico hasta que aparezca un ligero tono rosado.

#### 5.2.5. ANÁLISIS CROMÁTICO

Cada raza de oveja tiene un color de lanolina característico. Así, las ovejas merinas generan un tipo de lanolina de color blanquecino muy característico, mientras que las ovejas de otras razas diferentes proporcionan una lanolina más oscura, con tonos que van desde el amarillo, verde o marrón.

En el color de la lanolina también influye el hecho de que las ovejas merinas, al tener mayor cantidad de fibras, no permiten en gran medida que el aire del ambiente penetre hacia el interior, según McKinnon<sup>39</sup>. Es decir, la grasa de la lana tiene una parte *oxidada* menor que la de otras razas. La fracción oxidada de la grasa aporta un color más oscuro a la lanolina.

Para establecer el color de una muestra de lanolina se utiliza habitualmente la escala de colores *Gardner* (ASTM D1544)<sup>91</sup>

La escala Gardner cubre una gama de color amarillo claro a rojo y se especifica mediante el uso de vidrios estándar con transmisión cromática definida. Los vidrios están numerados del 1 al 18, en el que 1 representa el color más claro y 18 el color más oscuro. El color Gardner se utiliza como parámetro de calidad para los productos químicos, aceites y resinas<sup>92</sup>.

#### 5.2.5.1. Material necesario

Equipo comercial para la medida de la escala cromática Gardner, dotado de porta-muestras.

#### 5.2.5.2. Procedimiento

Colocar la muestra de lanolina en el porta-muestras, previamente licuada, y por simple comparación visual con los vidrios estandarizados se determina la escala de color de la lanolina.

## 6. RESULTADOS

En este apartado se desarrolla la parte experimental realizada con la instalación implantada que se ha detallado en el apartado 4. *Descripción de la instalación industrial*. Como paso previo se detallan los resultados obtenidos con un prototipo del equipo flotador DAF.

La propia experimentación es descrita también en este apartado, donde se presentan los resultados de forma conveniente para su posterior análisis.

Seguidamente se exponen los resultados de los análisis realizados sobre diversas muestras de lanolina extraída con el fin de conocer sus características.

Para finalizar, se ha realizado un estudio económico de rentabilidad de la planta.

### 6.1. PRUEBAS INICIALES REALIZADAS CON UN PROTOTIPO DEL EQUIPO FLOTADOR DAF

El *prototipo del equipo flotador DAF* consiste en un aparato similar a él en cuanto a funcionamiento, pero de menor tamaño, cuyo fin es simular el comportamiento del equipo *real*.

Las razones de realizar pruebas industriales con un prototipo DAF son:

- Saber la cantidad de grasa que el equipo es capaz de extraer del total transportado por el efluente. Partiendo de la cantidad de grasa que posee una muestra inicial de efluente, dato obtenido realizando el correspondiente análisis de laboratorio, y repitiendo lo mismo para la muestra una vez que ha sido tratada en el equipo, se puede determinar el rendimiento esperado del proceso de flotación.
- Conocer la DQO del efluente una vez tratado en el DAF. De esta forma se puede definir asimismo el posterior tratamiento de depuración a realizar sobre él.
- Debido al elevado coste del equipo industrial, era preciso conocer de antemano si la inversión iba a ser rentable, teniendo en cuenta los dos puntos anteriores, es decir, la extracción esperada de lanolina y la mejora de las características del efluente a tratar en el proceso posterior de depuración.

Como paso inicial, se realizaron unos ensayos en laboratorio sobre la muestra de efluente para simular el proceso de flotación. A esta muestra previamente se le habían añadido diferentes concentraciones de ácidos y dos productos floculantes comerciales distintos. El objetivo de estas pruebas fue conocer la concentración y tipo de ácido, así como el floculante adecuado, para ser utilizado en la prueba que se realizaría con el prototipo DAF.

*De igual manera, estas pruebas iniciales también serán las que definan las pautas de funcionamiento de la planta industrial.*

Para determinar cuál de las pruebas de laboratorio es la que mejor resultados proporcionaba, se eligió *la que resultó con menor DQO en fase líquida una vez realizadas*. La razón es que las grasas (y en concreto la lanolina) son las sustancias que mayor cantidad de DQO aportan al vertido<sup>9</sup>, con lo que la prueba en la que se obtenga una menor DQO será aquella en la que mayor proporción de grasas se habrá extraído.

La muestra inicial se tomó en las condiciones de trabajo más desfavorables, trabajando con lanas merinas por ambos lavaderos. Sus características fueron:

<b>Características de la muestra</b>	
pH	7,80
DQO	49450 mg/L
Aceites y grasas	5480 mg/L
Sólidos en suspensión	5100 mg/L

Tabla 6.1. Caracterización de la muestra inicial

Los productos y reactivos utilizados y sus concentraciones fueron:

Producto	Concentración
Ácido clorhídrico	10%
Ácido sulfúrico	10%
Floculante comercial tipo X	0,5%
Floculante comercial tipo Y	0,5%

Y los resultados obtenidos:

Prueba	Ácido	Dosificación ácido (mL/L)	pH final	Floculante	Dosificación floculante (mL/L)	DQO (mg/L)	Aceites y grasas (mg/L) (*)
A	Ácido clorhídrico	120	2,95	X	16	8320	276
A1		110	3,54	X	16	9540	
B		120	2,95	X	20	8850	
B1		110	3,54	X	20	10540	
C		120	2,95	Y	24	9070	
D		120	2,95	Y	20	11750	
1	Ácido sulfúrico	40	3,12	X	20	17200	
2		40	3,12	X	24	19540	
3		40	3,12	Y	20	13910	

(\*) Solamente se midió este parámetro en la prueba que resultó con menor valor de DQO, por ser la que finalmente se tomaría como pauta de funcionamiento



Prueba A

Prueba A1

Prueba B

Prueba B1



Prueba C

Prueba D

Pruebas 1, 2 y 3

Como se observa en la tabla de resultados, el mejor de ellos se obtuvo con una dosificación de 120 mL/L de ácido clorhídrico y 16 mL/L del floculante del tipo X. El valor de DQO para esta muestra, habiendo eliminado la parte flotante, fue de 8320 mg/L, y la presencia de aceites y grasas en esta misma fase líquida fue de 276 mg/L. Es decir, los rendimientos de extracción fueron, según la expresión:

$$\eta = \left(1 - \frac{\text{Valor resultante}}{\text{Valor inicial}}\right) \cdot 100 \quad (12)$$

Para la DQO:

$$\eta = \left(1 - \frac{8320}{49450}\right) \cdot 100 = 83,2\%$$

Para los aceites y grasas:

$$\eta = \left(1 - \frac{276}{5480}\right) \cdot 100 = 95\%$$

Esta prueba inicial de laboratorio ayudó a decidir la utilización *de ácido clorhídrico con una dosificación de 120 mL/L para conseguir un pH en torno a 3, así como 16 mL/L del floculante comercial tipo X, que se utilizaron en la prueba industrial con el prototipo del equipo flotador.*

El floculante X se comercializa con el nombre de *ZETAG 9014* de la casa *BASF*, y que tiene una carga catiónica baja – media y otras propiedades como son:

- Peso específico aproximado: 1030 kg/m<sup>3</sup>
- pH de una solución al 1% a 25°C: 3,6 – 4,1
- Viscosidad aproximada: 900 cP

En adelante, siempre que se haga referencia al *floculante*, se tratará de este producto comercial concreto.

Una vez definidos los productos y reactivos que mejor se comportan y sus dosificaciones, se procede a exponer los resultados que se obtuvieron *con el prototipo del equipo DAF en la prueba industrial realizada*.

En los documentos siguientes aparecen los ensayos realizados por un laboratorio externo, en las diferentes condiciones de funcionamiento del prototipo de flotador, que se indican para cada uno de ellos.

Estos ensayos, cuyos informes aparecen a continuación, fueron realizados durante la semana que permaneció el prototipo DAF en las instalaciones de la empresa.

Como se observa en el primer informe, la DQO de la muestra sin tratar resultó ser de 18000 mg O<sub>2</sub>/L, bastante inferior a los 49450 mg O<sub>2</sub>/L que se obtuvieron para la muestra inicial (Tabla 6.1), la que sirvió para fijar las condiciones más desfavorables. La razón es que en la realización las pruebas con el prototipo del flotador, se estaban trabajando materias con menor carga contaminante.

Sin embargo, lo importante de estas pruebas fue comprobar la eficacia del prototipo, es decir, comparar los resultados de las muestras antes y tras el proceso de flotación, como se verá a continuación.



**Aquimisa**  
LABORATORIOS

C/. Hoces del Duratón, 30-34 Polígono El Monte I II • 37008 SALAMANCA • Teléf. 923 19 33 43 - Fax: 923 19 16 93 • E-mail: [aquimisa@aquimisa.com](mailto:aquimisa@aquimisa.com)

**INFORME DE ENSAYO**

**Nº DE MUESTRA:** 13\_395612  
**Nº de Boletín:** 00809308 // 270336 **Recibida el:** 19/11/2013  
**Inicio del Ensayo:** 20/11/2013 **Final de Ensayo:** 22/11/2013



**MANUFACTURAS, S.A**  
Calle Fuente del Duque, 23  
37700 BEJAR  
SALAMANCA

**DATOS IDENTIFICATIVOS DE LA MUESTRA**

Artículo: Agua residual - 4

**RESULTADOS ANALÍTICOS:**

Ensayos	Resultado(#)	Unidades	Método	Legislación
N1 D.Q.O.	18000	mg O2/l	PEQ093	
N1 Aceites y grasas	5111	mg/l	PEQ042	

Imagen 6.1. *Ensayo de laboratorio de la muestra 1.* Informe de partida realizado sobre una muestra de agua procedente de los lavaderos sin tratar, antes de la entrada en el prototipo DAF



C/. Hoces del Duratón, 30-34 Polígono El Montalvo II • 37008 SALAMANCA • Teléf. 923 19 33 43 - Fax 923 19 16 93 • E-mail: aquimisa@aquimisa.com

### INFORME DE ENSAYO

Nº DE MUESTRA: 13\_395610

Nº de Boletín: 00809306 // 270336 Recibida el: 19/11/2013

Inicio del Ensayo: 20/11/2013 Final de Ensayo: 22/11/2013



MANUFACTURAS, S.A

Calle Fuente del Duque, 23

37700 BEJAR

SALAMANCA

#### DATOS IDENTIFICATIVOS DE LA MUESTRA

Artículo: Agua residual - 2

#### RESULTADOS ANALÍTICOS:

Ensayos	Resultado(#)	Unidades	Método	Legislación
N1 D.Q.O.	11600	mg O2/l	PEQ093	
N1 Aceites y grasas	1519	mg/l	PEQ042	

Imagen 6.2. *Ensayo de laboratorio de la muestra 2.* Informe de ensayo realizado en una muestra del vertido después de ser tratada en el prototipo DAF trabajando con un pH = 3, sin añadir floculante

Este ensayo, comparado con el inicial, aportará información sobre la eficacia del proceso de flotación cuando el efluente tenga un pH igual a 3 sin adición de floculante.

La razón de fijar en 3 el valor del pH viene derivada precisamente de las pruebas iniciales de laboratorio.



C/. Hoces del Duratón, 30-34 Polígono El Montalvo II • 37008 SALAMANCA • Teléf. 923 19 33 43 - Fax 923 19 16 93 • E-mail: aquimisa@aquimisa.com

### INFORME DE ENSAYO

Nº DE MUESTRA: 13\_395611  
Nº de Boletín: 00809307 // 270336 Recibida el: 19/11/2013  
Inicio del Ensayo: 20/11/2013 Final de Ensayo: 22/11/2013



MANUFACTURAS, S.A

Calle Fuente del Duque, 23  
37700 BEJAR  
SALAMANCA

#### DATOS IDENTIFICATIVOS DE LA MUESTRA

Artículo: Agua residual - 3

#### RESULTADOS ANALÍTICOS:

Ensayos	Resultado(#)	Unidades	Método	Legislación
N1 D.Q.O.	6800	mg O2/l	PEQ093	
*N1 Aceites y grasas	229	mg/l	PEQ042	

Imagen 6.3. *Ensayo de laboratorio de la muestra 3.* Informe de ensayo realizado sobre una muestra del vertido después de ser tratada en el prototipo DAF, trabajando con un pH = 3 y añadiendo el floculante en la dosificación indicada

Este último ensayo facilitará información sobre la eficacia del proceso de flotación para el mismo valor de pH pero además con adición de floculante.

Para conocer los resultados de las pruebas con el prototipo DAF, se comparan las muestras de cada ensayo (en Imágenes 6.2 y 6.3) con los valores iniciales observados sobre la muestra de agua procedente de los lavaderos sin tratar (Imagen 6.1), que en base a la Ecuación (12) son:

*Sobre la D.Q.O.:*

Ensayo con ácido sin floculante (muestra 2)

$$\eta = \left(1 - \frac{11600}{18000}\right) \cdot 100 = 35,6\%$$

Ensayo con ácido y floculante (muestra 3)

$$\eta = \left(1 - \frac{6800}{18000}\right) \cdot 100 = 62,2\%$$

*Sobre el contenido en aceites y grasas:*

Ensayo con ácido sin floculante (muestra 2)

$$\eta = \left(1 - \frac{1519}{5111}\right) \cdot 100 = 70,3\%$$

Ensayo con ácido y floculante (muestra 3)

$$\eta = \left(1 - \frac{229}{5111}\right) \cdot 100 = 95,5\%$$

De estos resultados se desprende:

1. Se confirman los ensayos que se habían realizado en el laboratorio, que añadiendo el floculante, los rendimientos de extracción de aceites y grasas son sensiblemente superiores a si solamente se añade ácido clorhídrico.
2. Las pruebas con el prototipo DAF se consideraron satisfactorias a la vista de los rendimientos de la extracción de aceites y grasas respecto a la muestra sin tratar, y la consiguiente reducción en los niveles de DQO que este hecho conlleva.

*A la vista de las pruebas realizadas, se aconsejó a la empresa MANUFACTURAS S.A. adquirir un equipo de flotación DAF, de las dimensiones y características resultantes del cálculo realizado en el apartado 4.3. Equipo de flotación (DAF), inversión que la empresa llevó a cabo.*

## 6.2. ORGANIZACIÓN DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES EN LA PLANTA INDUSTRIAL

### 6.2.1. VARIABLES A CONSIDERAR

En el equipo de flotación DAF ya implantado se trabaja con las siguientes variables:

- *Presión de aire de entrada al flotador*
- *Valor del pH de la mezcla*
- *Adición de floculante*
- *Índice de efluente* (definido en el apartado posterior)

que facilitan, mediante el estudio de variabilidad correspondiente, el ajuste más eficaz de la planta en lo que a extracción de lanolina se refiere.

La modificación de los valores de las variables consideradas se realiza de forma sencilla:

Para variar el caudal de aire de entrada al equipo DAF, éste está dotado de una válvula de apertura – cierre de caudal (de color rojo en la imagen siguiente), que es controlada por medio de un medidor tipo rotámetro. Para controlar la presión del aire tiene también una válvula de regulación y un manómetro (en la parte inferior derecha de la imagen)



Imagen 6.4. Válvulas para regular caudal y presión del aire de entrada en el DAF

Respecto a las otras variables, la inyección de ácido (para controlar el pH) y de floculante, se realizan en un serpentín por el que se encuentra obligada a pasar el agua de entrada antes de acceder al DAF, asegurando de esta manera la adecuada mezcla de los reactivos con el efluente. Se controla mediante los correspondientes caudalímetros (ver Imagen 4.5)

Como se puede comprobar, el *caudal de aire* introducido en el DAF no entra a formar parte de esta experimentación. La razón es que se fijó su valor en 15 L/min, que es el caudal con el que se ajustó el equipo al realizar su puesta en marcha.

Para conseguir ajustar el caudal al óptimo resultante, se fue variando dicho caudal de aire manteniendo constantes el resto de parámetros, hasta que se pudo comprobar que el agua de salida del DAF hacia el tratamiento de depuración posterior tenía el nivel de clarificación deseado.

Caudales de aire inferiores y superiores a éste resultaron ser menos eficaces en el proceso de flotación, debido a que para los tipos de lana habitualmente procesados en la empresa, el caudal de 15 L/min de aire de entrada al DAF optimiza la relación aire – sólidos (A/S) del DAF ya definida.

Este caudal de aire ya se calculó de forma teórica en el apartado 4.4.1 *Dimensionamiento del Equipo de flotación (DAF)*. Para un caudal medio de  $Q_E = 144 \text{ m}^3/\text{d}$  de efluente de los lavaderos, la carga de sólidos en el efluente, según la muestra inicial tomada en las condiciones más desfavorables, es de 5100 mg/L de sólidos en suspensión (valor que aparece en la Tabla 6.1):

$$\text{Carga de sólidos} = 734,4 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

Según el mismo apartado, la relación (A/S) para el equipo flotador DAF fue 0,03, y junto con la masa de sólidos presentes en el efluente calculada anteriormente, el valor A de la masa de aire liberada por despresurización en el equipo dio como resultado, en volumen de aire:

$$A = 12,8 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

El caudal que resultó ser el que mejor resultados ofrecía de clarificación del efluente tratado fue ligeramente superior a éste, de 15 L/min.

Para que las pruebas realizadas sean representativas y poder así sacar conclusiones válidas sobre ellas, en primer lugar hay que definir un parámetro que proporcione información sobre la “*calidad*” del efluente generado en el lavadero.

La razón es simple: tal como se ha comentado a lo largo de este Trabajo y como también se demostrará en la experimentación realizada, el tipo de lana es un factor determinante respecto a la cantidad de lanolina extraída. Se sabe que las lanas merinas contienen una mayor cantidad de lanolina que las lanas más bastas, y por tanto es previsible que cuando se *trabajen* lanas de uno u otro tipo, los rendimientos de la extracción sean dispares.

Dado que la experimentación se ha realizado de forma *industrial* y no en laboratorio, los efluentes que se han sometido a extracción en las diferentes pruebas se corresponden con los generados en el lavado, por tanto de los tipos de lana que se estaban procesando en ese momento en fábrica, aunque sí se podrá caracterizar indirectamente el tipo de lana que se está tratando, en función de las aguas generadas en su lavado. Ello se realizará a través de un índice definido en el apartado siguiente.

Dicho de otra manera, las pruebas se han ido realizando con los efluentes generados en el funcionamiento normal o habitual de la fábrica, sin poder elegir el tipo de lana, que viene impuesto por las demandas de los clientes.

Por otro lado, y tal como puede apreciarse en las siguientes Tablas 6.2, las pruebas se han realizado durante un periodo de tiempo lo suficientemente amplio como para tener representados todos los tipos de lana que habitualmente se tratan en el lavadero.

### 6.2.2. DEFINICIÓN DEL PARÁMETRO ÍNDICE DE EFLUENTE

Para introducir en la experimentación la influencia de los tipos de lana que han generado el fluido, se define el *índice de efluente* como un número distintivo del agua obtenida después del lavado en función de la lana tratada. Este número varía entre 2 y 6, como se explicará más adelante.

La fábrica dispone de dos lavaderos, que en muchas ocasiones están procesando materias diferentes y, por tanto, se ha de buscar un número que se corresponda con una media ponderada de la producción de cada uno de ellos. El peso de la lana de entrada a cada uno de los lavaderos se controla en todo momento.

Después de valorar distintas posibilidades, se decidió definir el siguiente parámetro:

$$\text{Índice de efluente} = \frac{\text{Tipo lana lav. 1} \cdot \text{Prod. lav. 1} + \text{Tipo lana lav. 2} \cdot \text{Prod. lav. 2}}{\text{Producción lavadero 1} + \text{Producción lavadero 2}} \quad (13)$$

Es decir, el tipo de lana lavada en el lavadero 1 por su producción, más el tipo de lana lavada por el lavadero 2 por su correspondiente producción (ambas referidas lógicamente al mismo periodo de tiempo), y dividido por la suma de las dos producciones.

Como se comprueba fácilmente, dado que los “tipos” de lana que se procesan en la empresa están entre el tipo 2 (lanas merinas) y el tipo 6 (lanas bastas), el parámetro “índice de efluente” será un número entre 2 y 6, tanto más próximo a 2 cuanto mayor cantidad de lana merina se haya trabajado en la realización de esa prueba. Por el contrario, el índice de efluente se aproximará a 6 cuando la cantidad de lanas bastas que se hayan lavado en ese periodo sea proporcionalmente mayor.

En definitiva, el parámetro *índice de efluente* cuantifica de forma sencilla algo tan complejo como saber con qué tipo de agua se está trabajando para obtener la lanolina. Tal y como se demostrará a lo largo de las pruebas experimentales, este parámetro será determinante para conocer la cantidad de lanolina finalmente extraída, como corresponde con la proporción que de esta materia se encuentra presente en algunos tipos de lana más que en otros.

### 6.2.3. MEDICIÓN DE LA CANTIDAD DE LANOLINA EXTRAÍDA

La forma más sencilla de llevar a cabo las pruebas experimentales y controlar la influencia de la modificación de los diversos parámetros que intervienen en el proceso, es cuantificar la producción de la lanolina generada por la planta industrial bajo las diferentes condiciones de ensayo.

En efecto, si variamos los parámetros que se han indicado (presión de aire en el DAF, pH del vertido y adición de floculante), se estará trabajando con unas condiciones de funcionamiento diferentes y perfectamente medibles, cuya mayor o menor eficacia se puede comprobar simplemente midiendo la producción de lanolina bajo esas determinadas condiciones.

La lanolina, una vez extraída de la segunda centrífuga, se encuentra ya preparada para su expedición y venta. Se almacena en bidones metálicos normalizados de 200 litros de capacidad ( $0,20 \text{ m}^3$ ), similares a los que se utilizan en todo tipo de industrias para usos diversos.

Dado que el peso específico de la lanolina varía muy poco y está en torno a  $950 \text{ kg/m}^3$ , después de haber hecho la prueba con varios bidones iguales, se va a suponer que la masa de todos ellos, una vez llenos, es constante e igual a:

$$m = \rho \cdot V = 950 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,20 \text{ m}^3 = 190 \text{ kg}$$

Por tanto, el control de la producción de la instalación se puede realizar en términos de volumen de lanolina generado –cantidad de bidones–, no siendo necesario pesar cada uno de ellos.

*De esta forma, las sucesivas pruebas se realizan determinando el tiempo que transcurre hasta que un bidón de 200 litros se llena por completo.*

### 6.3. PRUEBAS REALIZADAS EN LA PLANTA INDUSTRIAL

En las tablas que se exponen a continuación se ha dado un número correlativo a cada bidón a medida que se ha ido llenando. Se observa que hay determinados números de bidones que no aparecen en la lista, por ejemplo del 33 al 36. La razón es que ha ocurrido alguna incidencia en la planta, normalmente por avería en alguno de los equipos que conforman la instalación, obligando a detener la prueba. Estos bidones no figuran en la tabla por no tratarse de pruebas representativas.

La experimentación se ha realizado entre los meses de febrero y julio de 2015.

### 6.3.1. TABLAS DEL PARÁMETRO *ÍNDICE DE EFLUENTE*

La primera tabla que aparece se utiliza para expresar el parámetro *índice de efluente*, definido con anterioridad, para cada uno de los bidones de lanolina. Este índice se calcula en función de las producciones y tipo de lana de cada uno de los dos lavaderos, según la expresión (13) indicada en el apartado anterior.

Por ejemplo, en la prueba número 9 (ver Tabla 6.2), se trató el efluente generado en el lavado de 14938 kg de una lana tipo 2 en el lavadero número 1 y 2304,1 kg de una lana tipo 6 por el lavadero número 2.

De esta forma, el índice de efluente resultante en esa prueba es (Ecuación 13):

$$\text{Índice de efluente} = \frac{2 \cdot 14938 + 6 \cdot 2304,1}{14938 + 2304,1} = 2,5$$

Este valor del índice de efluente de 2,5 unidades da una idea de que se trataba de un agua procedente, en su mayor parte, del lavado de lanas merinas (de tipo 2)

Nº bidón	kg lana lavadero nº 1	TIPO LANA Lav. nº1	kg lana lavadero nº 2	TIPO LANA Lav. nº 2	ÍNDICE DE EFLUENTE
1	17201,7	2	1040,0	2	2,0
2	10557,9	5	7803,7	2	3,7
3	10052,0	3	7803,7	2	2,6
4	11920,2	2	6102,0	2	2,0
5	10149,6	2	6971,0	2	2,0
6	18503,1	5	2239,8	6	5,1
7	20042,4	4	1493,2	6	4,1
8	16720,0	3	2126,9	6	3,3
9	14938,0	2	2304,1	6	2,5
10	16446,6	5	16229,0	6	5,5
11	13757,0	2	3985,0	2	2,0
12	12957,0	2	4735,0	3	2,3
13	12213,0	3	4862,0	4	3,3
14	14264,1	5	8861,0	6	5,4
15	9762,8	2	9464,0	6	4,0
16	8542,5	2	7182,2	2	2,0
17	10966,2	2	4926,0	2	2,0
18	10338,4	2	4478,2	2	2,0
19	3356,4	2	2239,1	2	2,0
20	3692,0	2	2463,0	2	2,0
21	6712,7	2	2686,9	2	2,0
22	2685,1	2	1119,6	2	2,0

Tabla 6.2. Resultados del parámetro *índice de efluente*. Pruebas 1 a 22

Nº bidón	kg lana lavadero nº 1	TIPO LANA Lav. nº1	kg lana lavadero nº 2	TIPO LANA Lav. nº 2	ÍNDICE DE EFLUENTE
23	11747,2	2	2587,5	2	2,0
24	12418,5	2	2957,1	2	2,0
25	11411,6	2	2772,3	2	2,0
26	8400,0	2	4470,1	2	2,0
27	12849,6	5	6500,0	6	5,3
28	21573,4	5	19947,0	6	5,5
29	10774,4	2	4654,1	4	2,6
30	11971,5	2	3807,9	4	2,5
31	9696,4	2	5701,0	2	2,0
32	22915,0	4	13954,0	6	4,8
37	9177,2	3	5896,0	6	4,2
38	14105,0	2	2948,0	4	2,3
39	12090,0	2	1894,2	4	2,3
40	11801,6	2	6669,3	6	3,4
45	12323,5	2	8703,0	6	3,7
46	14084,0	2	8470,4	6	3,5
47	11619,3	2	3149,6	6	2,9
48	14084,0	2	2451,3	6	2,6
49	13027,7	2	3922,0	6	2,9
50	18069,5	2	7364,4	6	3,2
51	16889,6	3	8324,4	6	4,0
52	12568,5	3	4563,0	2	2,7
53	10730,7	2	5070,0	2	2,0
54	12700,5	2	8208,0	5	3,2
55	13218,8	2	5884,0	6	3,2

Continuación de la Tabla 6.2. Resultados del parámetro *índice de efluente*.

Pruebas 23 a 55

En la Tabla 6.3 se ofrecen los resultados generales obtenidos en la parte experimental. Aquí aparece el tiempo que se ha empleado en el llenado de cada bidón y el índice de efluente obtenido en la tabla anterior.

También se exponen en ella los valores de las variables que influyen en el proceso (pH y presión del aire en el DAF). Tal como se observa, se han ido modificando en cada prueba, intentando obtener muestras representativas para el amplio espectro de valores del índice de efluente calculado.

Se observa que la variable *presión de aire en el DAF* se expresa en esta tabla en las unidades  $\text{kp}/\text{cm}^2$ , que no corresponde con unidades del SI. La razón para utilizarlas es que son las unidades en que se encuentran habitualmente graduadas las escalas de medida de los manómetros comerciales, incluidos los de esta planta. Recordemos la equivalencia con unidades del SI:

$$1 \text{ kp}/\text{cm}^2 = 98100 \text{ N}/\text{m}^2 = 98,1 \text{ kPa}$$

En la misma tabla también se calcula el rendimiento de la extracción para cada prueba o bidón, dividiendo los 190 kg de peso de lanolina de cada uno entre la suma de las producciones de lana en kilogramos de los dos lavaderos durante el tiempo de duración de cada una de las pruebas.

El *rendimiento* se expresa en porcentaje, es decir, en kg de lanolina extraída por cada 100 kg de lana sucia de entrada a los lavaderos. Este

parámetro será el que proporcione la mayor o menor eficacia de la instalación de extracción de lanolina para cada prueba.

Nº bidón	ÍNDICE DE EFLUENTE	pH	Presión aire del DAF (kp/cm <sup>2</sup> )	Tiempo de llenado del bidón (h)	Rendimiento (kg lanolina / 100 kg lana)
1	2,0	5	2	20,0	1,04
2	3,7	5	3	36,0	1,03
3	2,6	5	2	28,0	1,06
4	2,0	5	2	18,0	1,05
5	2,0	5	3	20,0	1,11
6	5,1	5	3	48,0	0,92
7	4,1	7	3	44,0	0,88
8	3,3	5	4	28,0	1,01
9	2,5	5	3	28,0	1,10
10	5,5	5	4	45,0	0,58
11	2,0	5	4	14,0	1,07
12	2,3	5	4	16,0	1,07
13	3,3	3,5	3	17,0	1,11
14	5,4	3,5	2	33,5	0,82
15	4,0	3,5	3	13,5	0,99
16	2,0	3,5	2	14,5	1,21
17	2,0	3,5	2	15,5	1,20
18	2,0	3,5	4	13,5	1,28
19	2,0	3,5	3	7,0	3,40
20	2,0	3,5	2	7,5	3,09

Tabla 6.3. Resultados generales de las pruebas: tiempo de llenado de los bidones. Pruebas 1 a 20

Nº bidón	ÍNDICE DE EFLUENTE	pH	Presión aire del DAF (kp/cm <sup>2</sup> )	Tiempo de llenado del bidón (h)	Rendimiento (kg lanolina / 100 kg lana)
21	2,0	3,5	2	8,5	2,02
22	2,0	3,5	3	4,5	4,99
23	2,0	3,5	4	12,0	1,33
24	2,0	3,5	2	13,0	1,24
25	2,0	3,5	3	14,5	1,34
26	2,0	3,5	3	14,0	1,48
27	5,3	3,5	4	26,0	0,98
28	5,5	7	2	52,5	0,46
29	2,6	3,5	4	14,0	1,23
30	2,5	3,5	4	13,5	1,20
31	2,0	3,5	2	8,0	1,23
32	4,8	5	2	51,0	0,52
37	4,2	5	2	12,5	1,26
38	2,3	3,5	2	10,5	1,11
39	2,3	3,5	3	9,5	1,36
40	3,4	3,5	3	18,5	1,03
45	3,7	3,5	4	20,0	0,90
46	3,5	3,5	2	20,0	0,84
47	2,9	3,5	3	8,5	1,29
48	2,6	3,5	4	10,5	1,15

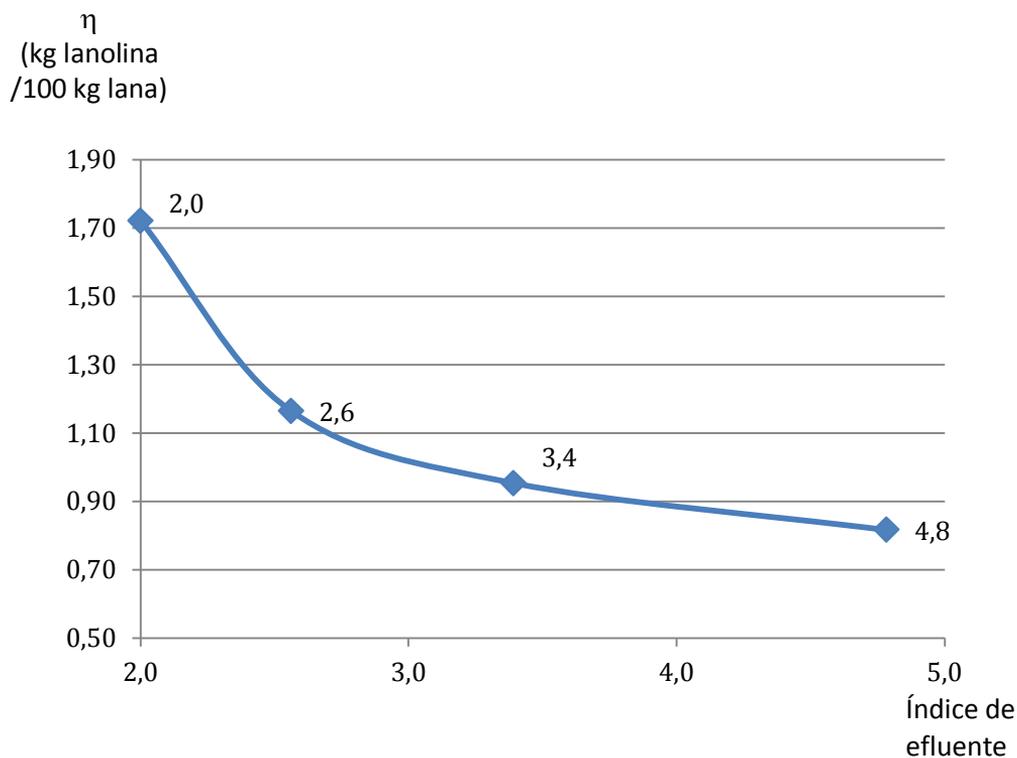
Continuación de la Tabla 6.3. Resultados generales de las pruebas: tiempo de llenado de los bidones. Pruebas 21 a 48

Nº bidón	ÍNDICE DE EFLUENTE	pH	Presión aire del DAF (kp/cm <sup>2</sup> )	Tiempo de llenado del bidón (h)	Rendimiento (kg lanolina / 100 kg lana)
49	2,9	3,5	2	10,5	1,12
50	3,2	5	2	17,0	0,75
51	4,0	7	4	18,0	0,75
52	2,7	3,5	2	10,0	1,11
53	2,0	3,5	2	11,5	1,20
54	3,2	3,5	4	12,0	0,91
55	3,2	3,5	3	9,0	0,99

Continuación de la Tabla 6.3. Resultados generales de las pruebas: tiempo de llenado de los bidones. Pruebas 49 a 55

De un primer examen de los datos anteriores, se observa que *el rendimiento de la extracción depende principalmente, tal como se preveía, del parámetro que se ha denominado índice de efluente* y que está relacionado directamente con el tipo de lana que se está lavando en el proceso industrial durante la realización de cada prueba.

En la gráfica siguiente se observa que a medida que el valor del índice de efluente va incrementando su valor (lanas más bastas o menos cargadas de lanolina), el rendimiento medio –en kg de lanolina extraída por cada 100 kg de lana sucia de entrada al lavadero– va disminuyendo.



Gráfica 6.1. Rendimiento de la extracción en función del índice de efluente

La gráfica anterior se ha construido agrupando en cuatro conjuntos los valores de las Tablas 6.3, según el parámetro índice de efluente (que es el valor que aparece en la gráfica junto a cada observación), y calculando el rendimiento de la extracción como la media aritmética de los rendimientos para cada uno de ellos.

Los cuatro grupos en que se han dividido los datos en función de la índice de efluente son:

- *Índice de efluente igual a 2,0*
- *Índice de efluente entre 2,1 y 3,0*
- *Índice de efluente entre 3,1 y 4,0*
- *Índice de efluente mayor o igual a 4,0*

Para cada uno de ellos se estudia a continuación la influencia de las variables presión del aire en el DAF y pH del efluente en el rendimiento de la extracción.

A pesar de que la Gráfica 6.1 no ofrece unos resultados cuantitativos extrapolables, por estar realizada sin haber tenido en cuenta las variables presión del aire en el DAF y pH del efluente (esto se hará a continuación), sí aporta información sobre la tendencia general observada en lo que se refiere a la mayor o menor cantidad porcentual de lanolina extraída en función del tipo de lana que se esté lavando.

### 6.3.2. VALORES DE ÍNDICE DE EFLUENTE IGUAL A 2,0

Corresponderá a un vertido en el que por ambos lavaderos se estuviera lavando lana de tipo 2, lana merina, que se sabe es la que mayor porcentaje de lanolina incorpora.

Se ha creído conveniente realizar este estudio particular con el valor del índice de efluente igual a 2,0 por dos razones principales:

- Es muy habitual que se dé la circunstancia de estar trabajando este tipo de lana por ambos lavaderos, ya que es la que más demanda tiene de los clientes (el 55% del total de la producción anual de la fábrica, según la Tabla 1.2)
- Es la que mayor rendimiento de extracción proporciona y, como tal, merece un estudio específico.

Los datos organizados según este parámetro aparecen en la tabla siguiente, en la que además se han ordenado de menor a mayor valor de pH.

Nº bidón	ÍNDICE DE EFLUENTE	pH	Presión aire (kp/cm <sup>2</sup> )	Rendimiento (kg lanolina /100 kg lana)
16	2,0	3,5	2	1,21
17	2,0	3,5	2	1,20
18	2,0	3,5	4	1,28
19 (*)	2,0	3,5	3	3,40
20 (*)	2,0	3,5	2	3,09
21 (*)	2,0	3,5	2	2,02
22 (*)	2,0	3,5	3	4,99
23	2,0	3,5	4	1,33
24	2,0	3,5	2	1,24
25	2,0	3,5	3	1,34
26	2,0	3,5	3	1,48
31	2,0	3,5	2	1,23
53	2,0	3,5	2	1,20
1	2,0	5	2	1,04
4	2,0	5	2	1,05
5	2,0	5	3	1,11
11	2,0	5	4	1,07

(\*) Pruebas realizadas con adición de floculante

Tabla 6.4. Resultados ordenados de las pruebas para muestras cuyo *índice de efluente es igual a 2,0*

Las casas comerciales que ofrecen sistemas de extracción, como GARAP<sup>58</sup> y otras, no garantizan con sus instalaciones un porcentaje de extracción superior a 1,5 (1,5 kg de lanolina por cada 100 kg de lana en jugo) para tipos de lana merinas de origen español, cuyo parámetro índice de efluente se ha asimilado al valor 2,0 en este Trabajo.

Se aprecia que para determinados ajustes en los parámetros de la instalación, el porcentaje de extracción de lanolina que se ha conseguido mediante este Trabajo, supera ampliamente este valor. Más adelante se discute sobre estos valores.

En la Tabla 6.4 se observa que no figura, como sucedía en las tablas anteriores, el *tiempo de llenado del bidón*. En realidad, esta variable ya se utiliza de forma implícita al calcular el rendimiento de la extracción (última columna).

Efectivamente, cuando se calcula el rendimiento aquí expresado para cada bidón, se hace teniendo en cuenta la producción de lanolina por cada 100 kg de lana de entrada al lavadero.

Esto significa, por ejemplo, que si el bidón número 16 tardó en completarse 14,5 horas (véase la Tabla 6.3) y durante ese periodo se procesaron 8542,5 kg de lana por el lavadero número 1 y 7182,2 kg de lana por el lavadero número 2 (ver Tabla 6.2), el rendimiento obtenido sería:

$$\begin{aligned}\text{Rendimiento} &= \frac{190 \text{ kg lanolina}}{8542,5 + 7182,2 \text{ kg lana}} \cdot 100 = \\ &= 1,21 \text{ kg lanolina} / 100 \text{ kg lana}\end{aligned}$$

Si el tiempo en completar el bidón hubiese sido mayor, la producción correspondiente de los lavaderos en ese mayor periodo de tiempo también habría sido superior. Así, en la expresión anterior, para el mismo valor del peso del bidón, que es el numerador de la fracción, el denominador, que son las producciones de los lavaderos, sería mayor, y por tanto el resultado del rendimiento sería menor.

Se demuestra con ello que para cuantificar los resultados es suficiente hacerlo tomando como parámetro el rendimiento indicado, pues éste ya incorpora información sobre la producción de los lavaderos durante el tiempo de llenado del bidón.

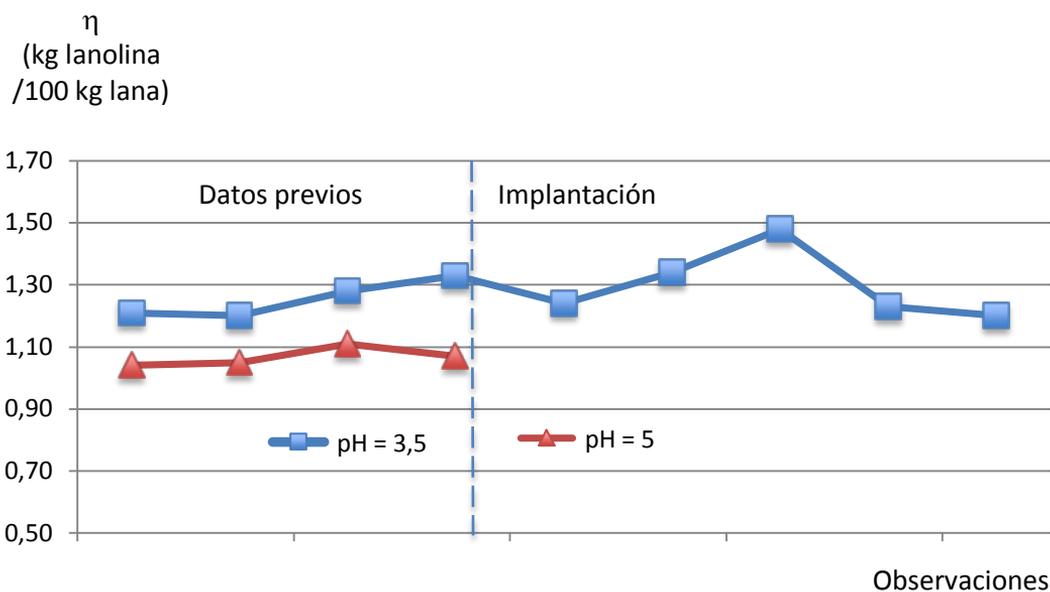
En la Gráfica 6.2, al igual que en otras posteriores como las Gráficas 6.6 y 6.9, se comprueba que el número de observaciones realizadas para pH = 3,5 es superior al número de observaciones de otros valores de pH.

Este hecho se debe a que, una vez constatado que este valor de pH = 3,5 era el que mejores resultados proporcionaba, la planta se puso a funcionar con él para no disminuir la rentabilidad.

De esta forma, aunque todas las observaciones están representadas en la misma gráfica, a partir de una de ellas (en el caso de la Gráfica 6.2

sería desde la quinta), las observaciones se corresponden con el funcionamiento habitual de la instalación. Sin embargo, se ha considerado conveniente su representación gráfica.

En la Gráfica 6.2 se ha representado el rendimiento de la extracción de lanolina para los diferentes valores de pH (3,5 y 5) con que se trabajó para este valor de índice de vertido. Se observa claramente que para valores de pH del agua en el DAF iguales a 5, el rendimiento de la extracción se sitúa por debajo de los valores cuando el pH es de 3,5.



Gráfica 6.2. Rendimiento de la extracción en función del pH conseguido en el efluente (DAF) SIN adición de floculante. Índice de efluente = 2,0

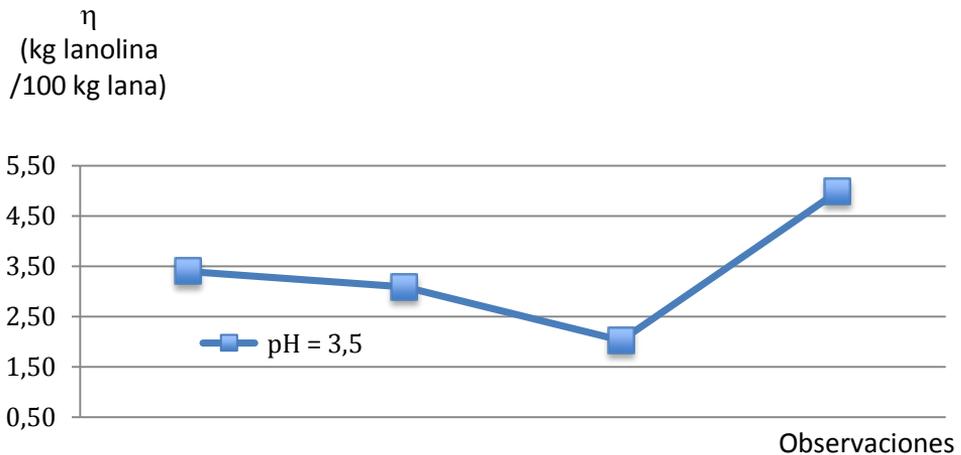
Esta tendencia, que como se verá en la experimentación posterior se mantiene inalterable cualquiera que sea el tipo de lana que con que se

trabaje, viene a confirmar las pruebas iniciales descritas en el apartado *6.1. Pruebas iniciales realizadas con un prototipo del equipo flotador DAF*, así como diversas investigaciones realizadas.

Por ejemplo, Ang y Himawan<sup>93</sup> llevaron a cabo una serie de experimentos en el laboratorio por medio de una cámara de mezclas. En ella introdujeron un efluente procedente del lavado de lana y pudieron demostrar que el mayor porcentaje de la grasa presente en el agua, así como su DQO, se eliminaba cuando el efluente se trataba a valores de pH entre 2 y 3.

Este fenómeno, denominado *craqueo ácido*, se debe a que, a bajos valores de pH, la carga superficial de los coloides formados en la emulsión es menos negativa, disminuyéndose las fuerzas cohesivas y favoreciendo de esta forma la desestabilización o des-emulsión de las grasas, que se pueden extraer posteriormente de forma más sencilla.

En la Gráfica 6.3 se representan los datos correspondientes a los bidones de números 19, 20, 21 y 22, cuyo rendimiento de extracción es sensiblemente superior al resto. Se comprueba que estos rendimientos varían entre el 2,02 para el bidón 21 y el 4,99 del bidón número 22. Ello se debe a que en esas pruebas *se añadió floculante al efluente en el DAF*, incrementándose de forma significativa la cantidad de lanolina extraída.



Gráfica 6.3. Rendimiento de la extracción para pH igual a 3,5 en el efluente (DAF) CON adición de floculante. Índice de efluente igual a 2,0

Este hecho era bastante previsible y ya que se puso de manifiesto en los ensayos realizados en el laboratorio y en las pruebas con el prototipo del DAF (descritas en el apartado 6.1. *Pruebas iniciales realizadas con un prototipo del equipo flotador DAF*), donde se pudo comprobar que, efectivamente, la adición del floculante conllevaba un incremento significativo en la extracción de lanolina.

Sin embargo, hay un problema en la adición del floculante en el DAF, y es que los efluentes generados por el lavado de lana incorporan una gran cantidad de tierra, de grano muy fino, que va dispersa en el agua. Al tener una densidad relativamente baja, estas tierras no precipitan fácilmente en el fondo del DAF, como sería deseable, sino que una parte de ellas se adhiere al flóculo generado junto con la grasa, ascendiendo a

la parte superior de dicho DAF e incorporándose así al *licor* que posteriormente se introduce en las centrífugas.

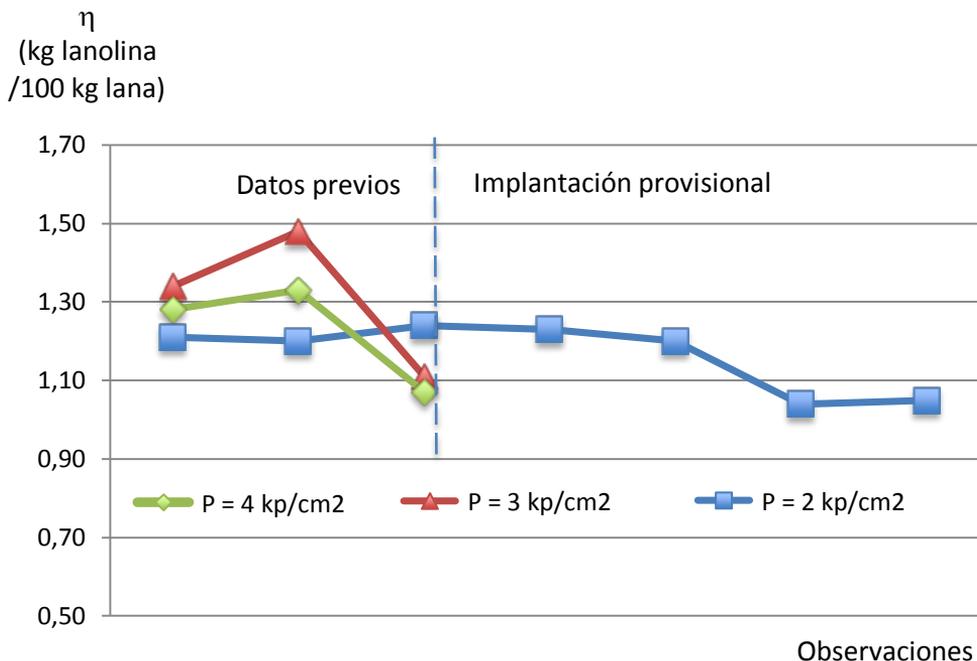
Esto genera un verdadero problema, ya que poco a poco la primera separadora centrífuga se va “cargando” de tierras que no es capaz de echar fuera por los orificios destinados a ello, produciéndose el ya comentado e indeseable *embarrado* de la máquina.

Para volver a poner en funcionamiento la centrífuga, una vez que el embarrado se ha producido, es necesario parar la instalación, desmontar la máquina y limpiar todos y cada uno de los *platos o discos* que incorpora, pues el barro se queda adherido a ellos. Esta labor es delicada y para ella emplea un operario entre 3 y 4 horas, periodo en el que la instalación queda totalmente inutilizada.

Por ello, la adición de floculante es una variable que queda descartada en los experimentos realizados en tanto no se adecúe la instalación y se realicen las mejoras propuestas al final de este estudio.

Los resultados que a partir de ahora se exponen, serán por tanto únicamente de las pruebas realizadas sin añadir floculante.

En la siguiente gráfica se ha representado el rendimiento de la extracción pero ahora frente a la presión del aire en el flotador DAF.



Gráfica 6.4. Rendimiento de la extracción para diferentes valores de presión de aire de entrada en DAF. Índice de efluente = 2,0

En ella se aprecia que cuando la presión de aire en el DAF se aumenta desde los 2 hasta los 3 kp/cm<sup>2</sup> (desde 196,2 hasta 294,3 kPa), el rendimiento de la extracción también aumenta, para volver a disminuir si la presión llega a los 4 kp/cm<sup>2</sup> (392,4 kPa).

Como se observa, la implantación en este caso se realizó con una presión de 2 kp/cm<sup>2</sup>. La explicación se debe a que inicialmente no se observaron grandes diferencias de extracción cuando se modificaba esta variable, y trabajar a una presión de aire de 2 kp/cm<sup>2</sup> suponía

menor consumo energético que si se hacía a  $3 \text{ kp/cm}^2$ . Por ello, en la gráfica aparece como “implantación provisional”. Sin embargo, con la realización de un mayor número de pruebas, y para diferentes valores del parámetro índice de efluente, se pudo comprobar la influencia de esta presión del aire, en el sentido que se indicará en este Trabajo.

En la Gráfica 4.1 se representaba la concentración *teórica* de sólidos en el fango  $X_0$  que era posible tratar en función de la presión  $P$  del aire de entrada al DAF (Ecuación 9). Se concluía que dicha concentración aumentaba linealmente con la presión.

Se podría pensar que, si bien hablamos de dos magnitudes distintas como son la concentración de sólidos en el efluente  $X_0$  y el rendimiento de extracción de lanolina, ambas pueden tener un comportamiento similar cuando se trata de conocer su influencia frente a la presión de aire en el DAF. De hecho es así, ya que si la presión del aire disuelto del DAF se aumenta para tratar un efluente con una mayor concentración de sólidos, por la parte superior del equipo DAF se generará también un mayor caudal de líquido concentrado de grasa.

Sin embargo, las observaciones realizadas en base a la experimentación parecen contradecir las conclusiones teóricas que en su momento se habían extraído y es que, como se ha indicado, el rendimiento de la extracción tiene un valor máximo en función de la presión pero disminuye si la presión sigue aumentando.

La explicación de este hecho se debe a la presencia de aire con exceso de presión en el DAF, que a partir de un valor ya no favorece el fenómeno de flotación<sup>94</sup>.

En definitiva, en base a los razonamientos actuales y a la experimentación, se evidencia la existencia de un valor de la presión P del aire de entrada al DAF, a partir del cual la concentración de sólidos en el fango  $X_0$  disminuye, contrariamente a lo expresado por la Gráfica 4.1.

Por otro lado, en la Gráfica 6.4 se observa un valor que no cumple esta tendencia observada de que el rendimiento de extracción se maximiza para la presión de  $3 \text{ kp/cm}^2$  (294,3 kPa). Es la tercera observación de esta serie y se corresponde con el bidón número 5. No obstante, para ese bidón el pH del efluente fue de 5, y comparando con aquellas pruebas a este mismo valor de pH (bidones 1 y 4), cuyos rendimientos son respectivamente 1,04 y 1,05%, éste es ligeramente superior, de valor 1,11%

De todo lo anterior se desprende que, para un vertido de agua cuyo parámetro *índice de efluente sea igual a 2,0*:

- El porcentaje de extracción de lanolina aumenta cuando el pH del agua en el interior del DAF disminuye, y se optimiza en torno al valor de  $\text{pH} = 3,5$  manteniendo la presión del aire constante

- El porcentaje de extracción de lanolina tiene un máximo cuando la presión de aire de entrada al flotador DAF se encuentra en torno al valor  $p = 3 \text{ kp/cm}^2$  (294,3 kPa), manteniendo el pH del vertido constante

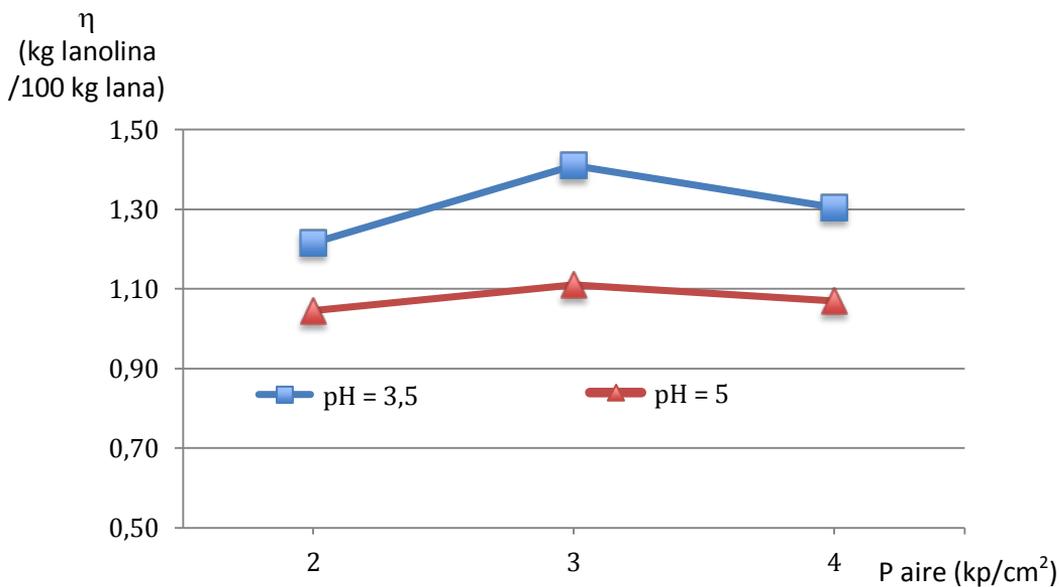
Con el fin de establecer el comportamiento del rendimiento de la extracción de lanolina frente a la influencia de estas dos variables (pH y presión del aire en el DAF), se va a representar en una gráfica el valor de dicho rendimiento frente a la presión de aire en el DAF manteniendo constante el valor de pH. De esta manera se obtienen dos series de valores, unos para  $\text{pH} = 3,5$  y otros para  $\text{pH} = 5$

En primer lugar, se ponen los datos de forma compacta, para iguales valores de pH y presión. Como hay pruebas que se han realizado con los mismos valores de pH y de presión del aire, se toma como rendimiento de la extracción la media aritmética de los rendimientos de cada una. Así, la tabla de datos que se maneja será la siguiente (en la columna *nº de bidón* aparecen aquellos de los que provienen los datos y el *rendimiento* es el rendimiento medio obtenido para igualdad de condiciones –de pH y presión– de operación de la planta):

Nº bidones	ÍNDICE DE EFLUENTE	pH	Presión aire (kp/cm <sup>2</sup> )	Rendimiento MEDIO (kg lanolina/100 kg lana)
16, 17, 24, 31 y 53	2,0	3,5	2	1,216
25 y 26	2,0	3,5	3	1,410
18 y 23	2,0	3,5	4	1,305
1 y 4	2,0	5	2	1,045
5	2,0	5	3	1,110
11	2,0	5	4	1,070

Tabla 6.5. Datos *medios* observados en las pruebas para muestras cuyo *índice de efluente es igual a 2,0*

Esta tabla representada gráficamente permite una mejor interpretación.



Gráfica 6.5. Rendimientos medios de la extracción frente a distintos valores de presión de aire de entrada en DAF y pH del efluente. Índice de efluente = 2,0

En esta gráfica se aprecia claramente lo que ya se ha indicado anteriormente, es decir, el rendimiento de la extracción es mayor cuando el pH del efluente en el DAF es 3,5 para los mismos valores de presión del aire, concurriendo el valor máximo del rendimiento para un valor de esta presión igual a  $3 \text{ kp/cm}^2$  (294,3 kPa)

### 6.3.3. VALORES DE ÍNDICE DE EFLUENTE ENTRE 2,1 Y 3,0

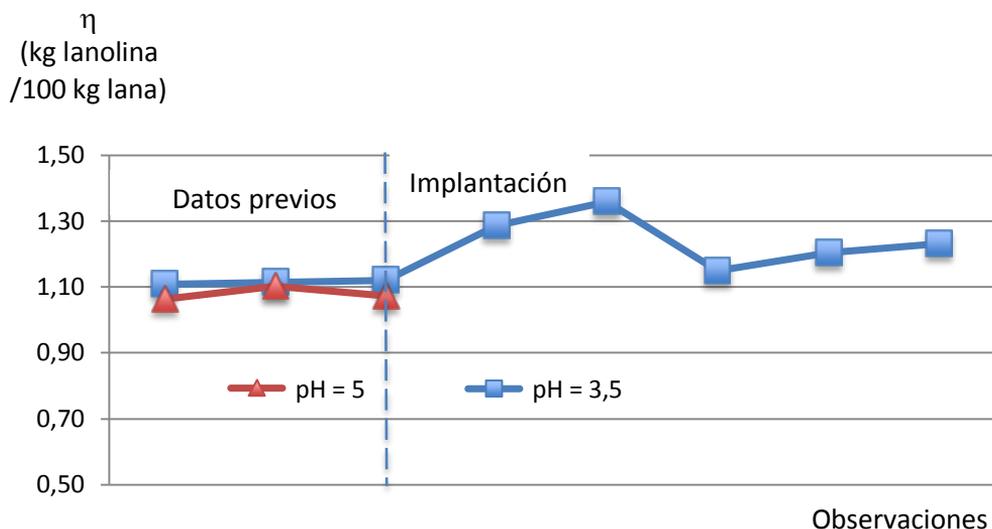
Corresponderá a un vertido en el que por alguno de los lavaderos se estuviera lavando lana de tipo 2, lana merina, pero no así por el otro lavadero.

Los datos organizados según este parámetro aparecen en la tabla siguiente, en la que además se han ordenado de menor a mayor valor de pH.

Se realizan consideraciones similares a las que se hicieron para el caso anterior.

Nº bidón	ÍNDICE DE EFLUENTE	pH	Presión aire (kp/cm <sup>2</sup> )	Rendimiento (kg lanolina /100 kg lana)
52	2,7	3,5	2	1,11
38	2,3	3,5	2	1,11
49	2,9	3,5	2	1,12
47	2,9	3,5	3	1,29
39	2,3	3,5	3	1,36
48	2,6	3,5	4	1,15
30	2,5	3,5	4	1,20
29	2,6	3,5	4	1,23
3	2,6	5	2	1,06
9	2,5	5	3	1,10
12	2,3	5	4	1,07

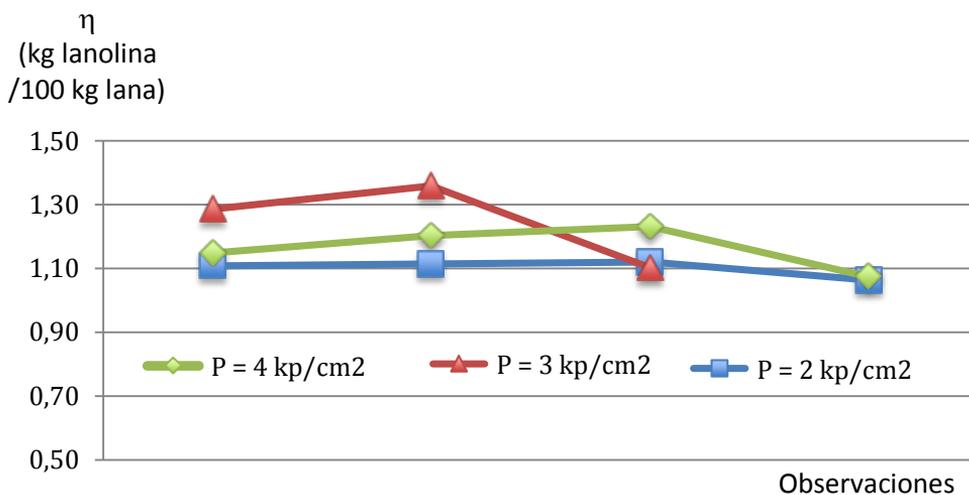
Tabla 6.6. Resultados ordenados de las pruebas para muestras cuyo *índice de efluente está entre 2,1 y 3,0*



Gráfica 6.6. Rendimiento de la extracción en función del pH conseguido en el efluente (DAF). Índice de efluente entre 2,1 y 3,0

Se mantiene la tendencia observada de que para valores de pH del agua en el DAF iguales a 5, el rendimiento de la extracción es menor que si el pH es de 3,5 aunque las diferencias apreciadas son pequeñas.

En esta otra gráfica se ha representado de nuevo el rendimiento de la extracción pero ahora frente a la presión del aire en el flotador DAF.



Gráfica 6.7. Rendimiento de la extracción para diferentes valores de presión de aire de entrada en DAF. Índice de efluente entre 2,1 y 3,0

Se aprecia como norma general que cuando la presión de aire en el DAF se encuentra en los 3 kp/cm<sup>2</sup> (294,3 kPa), el rendimiento de la extracción aumenta, siendo inferior para las presiones de 2 y 4 kp/cm<sup>2</sup> (196,2 y 392,4 kPa respectivamente). Sin embargo, como en el caso anterior, vuelve a haber un valor en la gráfica anterior que no cumple esta regla. Es la tercera observación de esta serie y se corresponde con el bidón número 9. Al igual que antes, para esa muestra el pH del

efluente fue de 5, y comparando con aquellas pruebas a este mismo valor de pH (bidones 3 y 12), cuyos rendimientos son respectivamente 1,06 y 1,07%, éste es ligeramente superior, de valor igual a 1,10%

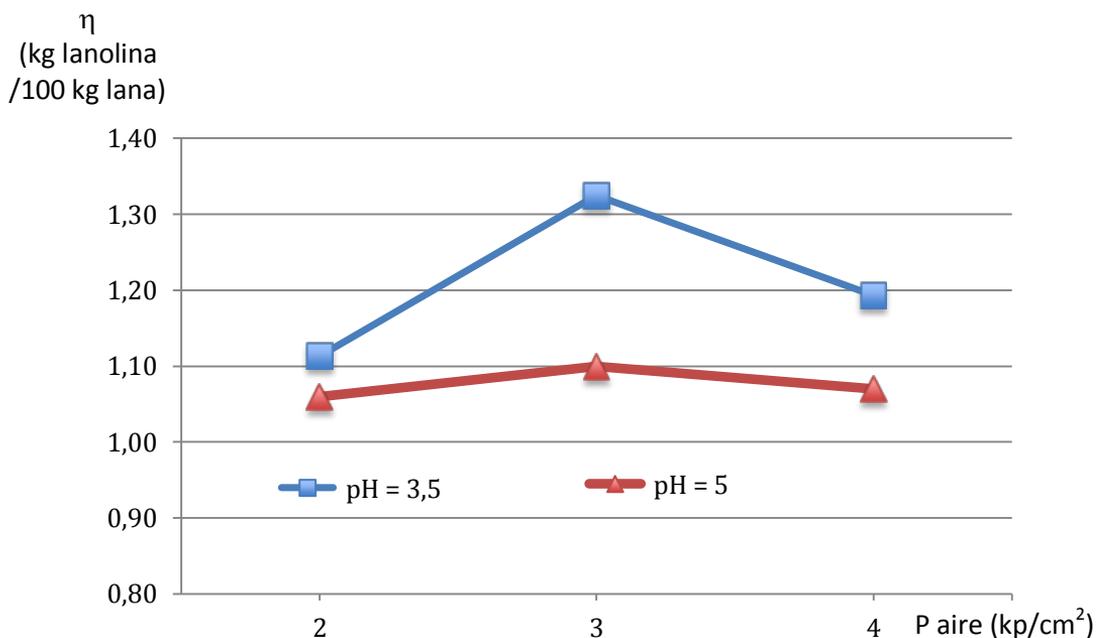
Para conocer el comportamiento del rendimiento de la extracción de lanolina frente a la influencia de pH y presión del aire en el DAF, se procede igual que en el caso anterior. De esta forma se representa el valor del rendimiento de la extracción frente a la presión de aire en el DAF manteniendo constante el valor de pH. De esta manera se obtienen dos series, una para pH = 3,5 y otra para pH = 5

Los datos de forma *compacta* para iguales valores de pH y presión son los que aparecen a continuación, tomando como rendimiento de la extracción la media aritmética de los rendimientos para valores constantes de esas variables (en la columna *número de bidón* aparecen aquellos de los que se han tomado los datos y el *rendimiento* es el rendimiento medio obtenido).

También se ha calculado la media del valor de calidad del efluente entre los datos correspondientes.

Nº bidones	ÍNDICE DE EFLUENTE	pH	Presión aire (kp/cm <sup>2</sup> )	Rendimiento MEDIO (kg lanolina/100 kg lana)
38, 49 y 52	2,63	3,5	2	1,113
39 y 47	2,6	3,5	3	1,325
29, 30 y 48	2,57	3,5	4	1,193
3	2,6	5	2	1,060
9	2,5	5	3	1,100
12	2,3	5	4	1,070

Tabla 6.7. Datos *medios* observados en las pruebas para muestras cuyo *índice de efluente* está entre 2,1 y 3,0



Gráfica 6.8. Rendimientos medios de la extracción frente a distintos valores de presión de aire de entrada en DAF y pH del efluente. Índice de efluente entre 2,1 y 3,0

Las conclusiones son las mismas que para el caso anterior con índice de efluente igual a 2,0: el rendimiento de la extracción es mayor cuando el pH del efluente en el DAF es 3,5 para los mismos valores de presión del aire, concurriendo el valor máximo del rendimiento para un valor de esta presión igual a  $3 \text{ kp/cm}^2$  (294,3 kPa)

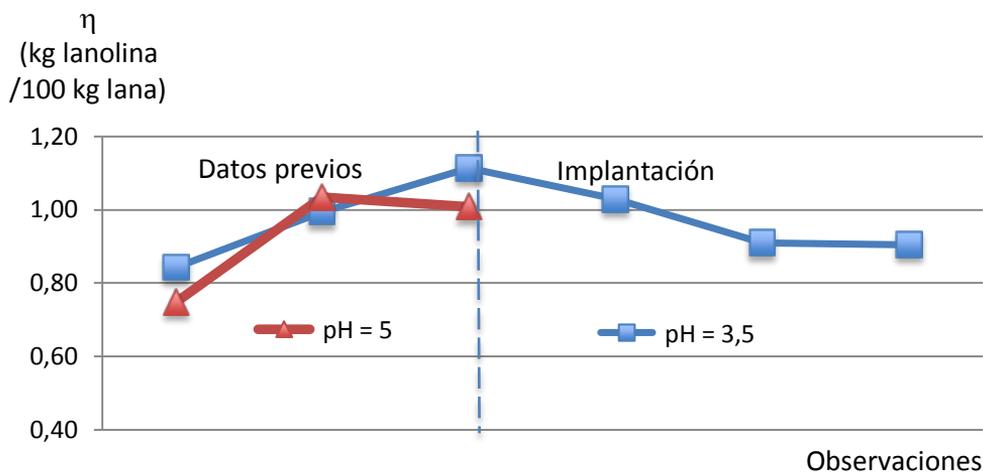
#### 6.3.4. VALORES DE ÍNDICE DE EFLUENTE ENTRE 3,1 Y 4,0

Corresponderá a un vertido en el que las lanas lavadas serán “entrefinas” (no son ni merinas ni muy bastas), tipo 3 ó tipo 4.

Se realiza la exposición y razonamientos similares para este tipo de lanas, en primer lugar exponiendo los datos de forma organizada.

Nº bidón	ÍNDICE DE EFLUENTE	pH	Presión aire (kp/cm <sup>2</sup> )	Rendimiento (kg lanolina /100 kg lana)
46	3,5	3,5	2	0,84
55	3,2	3,5	3	0,99
13	3,3	3,5	3	1,11
40	3,4	3,5	3	1,03
54	3,2	3,5	4	0,91
45	3,7	3,5	4	0,90
50	3,2	5	2	0,75
2	3,7	5	3	1,03
8	3,3	5	4	1,01

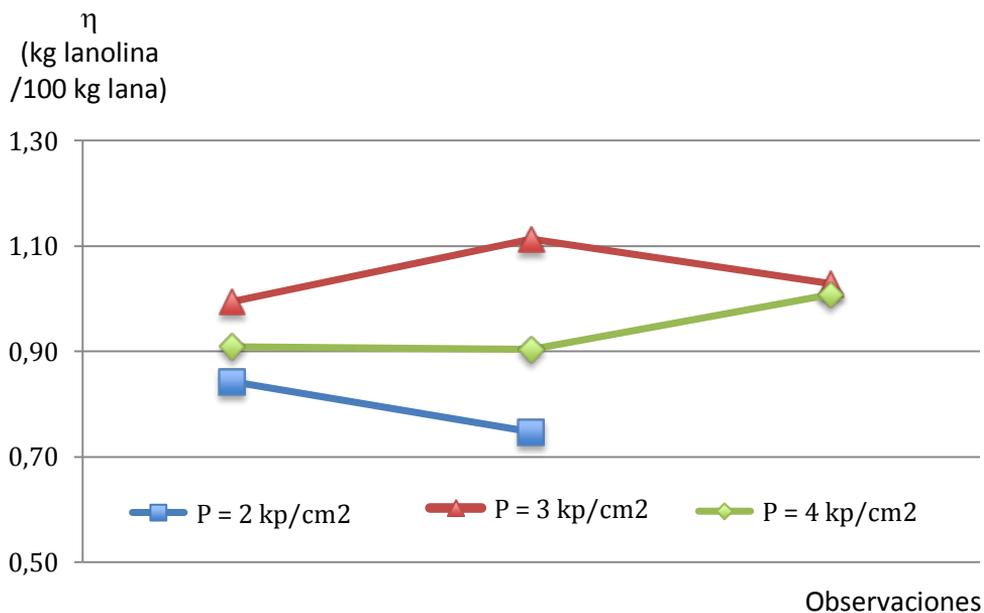
Tabla 6.8. Resultados ordenados de las pruebas para muestras cuyo *índice de efluente está entre 3,1 y 4,0*



Gráfica 6.9. Rendimiento de la extracción en función del pH conseguido en el efluente (DAF). Índice de efluente entre 3,1 y 4,0

El rendimiento de la extracción es máximo (1,11 kg lanolina/100 kg lana) para un pH de valor 3,5 en el agua del DAF y es mínimo (0,75) para pH igual a 5. El resto de valores intermedios mantienen la tendencia observada de que para valores de pH iguales a 3,5 el rendimiento de la extracción es mayor que si el pH es de 5.

También se aprecia la influencia del índice de efluente, ya que cuanto más bajo es su valor, el rendimiento de la extracción aumenta. Así, para el bidón número 8, a pesar de estar obtenido con pH igual a 5, su rendimiento de extracción es superior a otros bidones con pH igual a 3,5 debido sin duda a que el parámetro índice de efluente es inferior.



Gráfica 6.10. Rendimiento de la extracción para diferentes valores de presión de aire de entrada en DAF. Índice de efluente entre 3,1 y 4,0

La tendencia general que se observa es que para una presión de aire en el DAF de  $3 \text{ kp/cm}^2$  (294,3 kPa), el rendimiento de la extracción se maximiza, siendo inferior para las presiones de 2 y  $4 \text{ kp/cm}^2$  (196,2 y 392,4 kPa respectivamente)

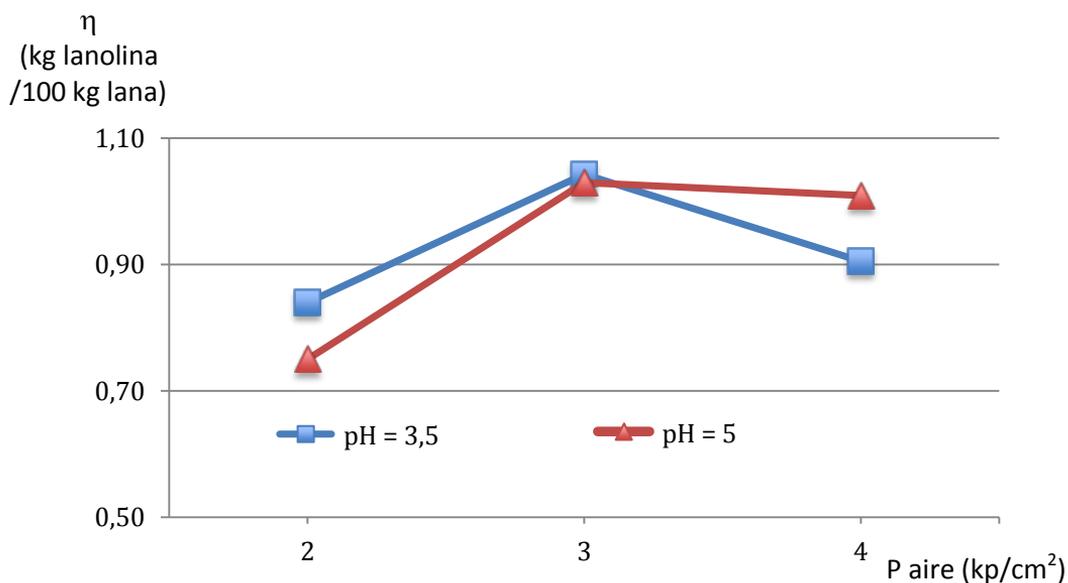
El modelo de comportamiento del rendimiento de la extracción de lanolina frente a la influencia de pH y presión del aire en el DAF de forma conjunta se realiza igual que en los casos anteriores. Se representa el valor del rendimiento de la extracción frente a la presión de aire en el DAF manteniendo constante el valor de pH. De esta manera se obtienen las dos series, una para pH igual a 3,5 y otra para pH igual a 5

Los datos de forma *compacta o resumida* para iguales valores de pH y presión son los que aparecen a continuación, habiendo tomado, como siempre, el rendimiento de la extracción la media aritmética de los rendimientos para valores constantes de esas variables (en la columna *número de bidón* aparecen aquellos de los que se han tomado los datos y el *rendimiento* es el rendimiento medio obtenido para igualdad de condiciones –de pH y presión de aire– de operación de la planta).

También se ha calculado la media del valor de índice de efluente entre los datos correspondientes.

Nº bidones	ÍNDICE DE EFLUENTE	pH	Presión aire (kp/cm <sup>2</sup> )	Rendimiento MEDIO (kg lanolina/ 100 kg lana)
46	3,5	3,5	2	0,840
13, 40 y 55	3,3	3,5	3	1,043
45 y 54	3,45	3,5	4	0,905
50	3,2	5	2	0,750
2	3,7	5	3	1,030
8	3,3	5	4	1,010

Tabla 6.9. Datos *medios* observados en las pruebas para muestras cuyo *índice de efluente está entre 3,1 y 4,0*



Gráfica 6.11. Rendimientos medios de la extracción frente a distintos valores de presión de aire de entrada en DAF y pH del efluente. Índice de efluente entre 3,1 y 4,0

Las conclusiones parciales son las mismas que para los casos anteriores: el rendimiento de la extracción es mayor cuando el pH del efluente en el DAF es 3,5 para los mismos valores de presión del aire, excepto que en último valor de esta serie se aprecia la influencia de un menor índice de efluente que hace que se mejore el rendimiento de la extracción.

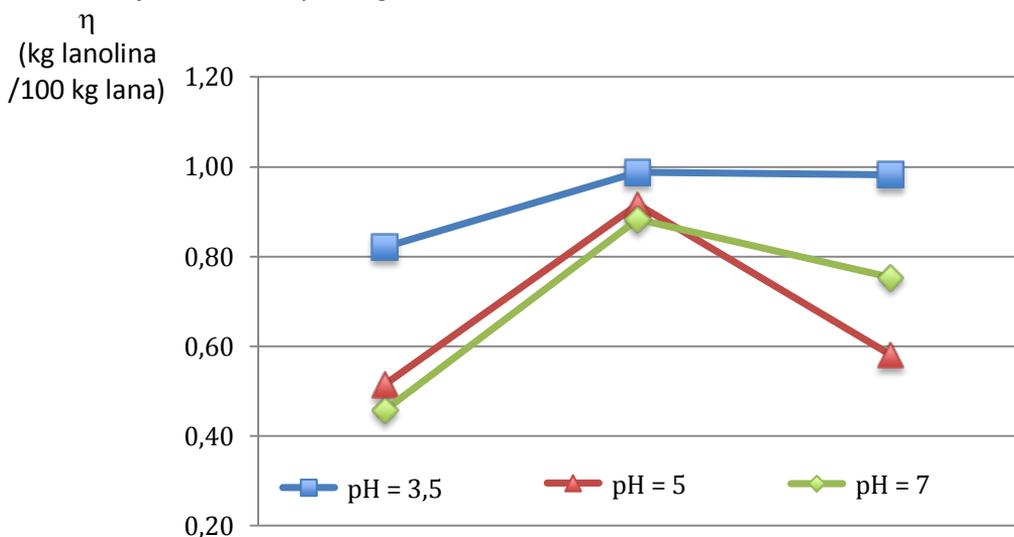
### 6.3.5. VALORES DE ÍNDICE DE EFLUENTE MAYOR O IGUAL A 4,0

Corresponderá a un efluente en el que las lanas lavadas serán bastas.

En este caso se hicieron pruebas con tres valores de pH: 3,5 y 5 como hasta ahora, pero también con pH igual a 7. La razón fue comprobar si se podía ahorrar el coste del ácido clorhídrico en este caso.

Nº bidón	ÍNDICE DE EFLUENTE	pH	Presión aire (kp/cm <sup>2</sup> )	Rendimiento (kg lanolina /100 kg lana)
14	5,4	3,5	2	0,82
15	4,0	3,5	3	0,99
27	5,3	3,5	4	0,98
32	4,8	5	2	0,52
6	5,1	5	3	0,92
10	5,5	5	4	0,58
28	5,5	7	2	0,46
7	4,1	7	3	0,88
51	4,0	7	4	0,75

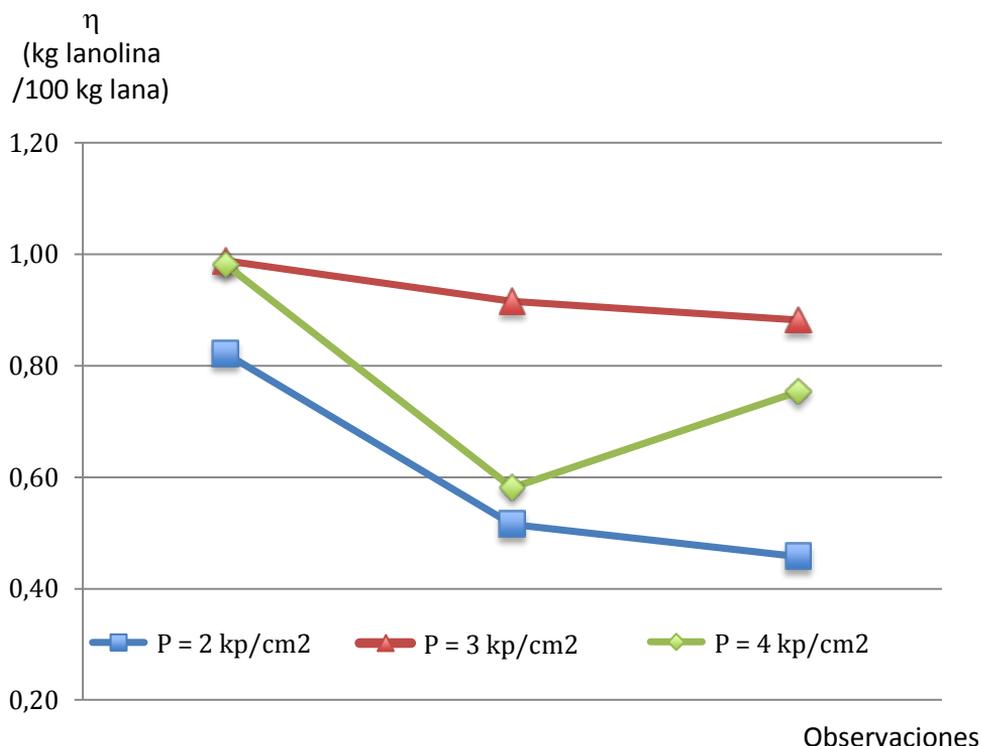
Tabla 6.10. Resultados ordenados de las pruebas para muestras cuyo *índice de efluente es mayor o igual a 4,0*



Observaciones

Gráfica 6.12. Rendimiento de la extracción en función del pH conseguido en el efluente (DAF). Índice de efluente mayor o igual a 4,0

Representando gráficamente el rendimiento de extracción frente al pH se obtiene la Gráfica 6.12. Los rendimientos de la extracción de lanolina en función del pH en el DAF mantienen la tendencia de disminuir cuando el valor del pH aumenta, si bien para valores de pH mayores de 3,5 no se aprecia una diferencia muy grande entre ellos.

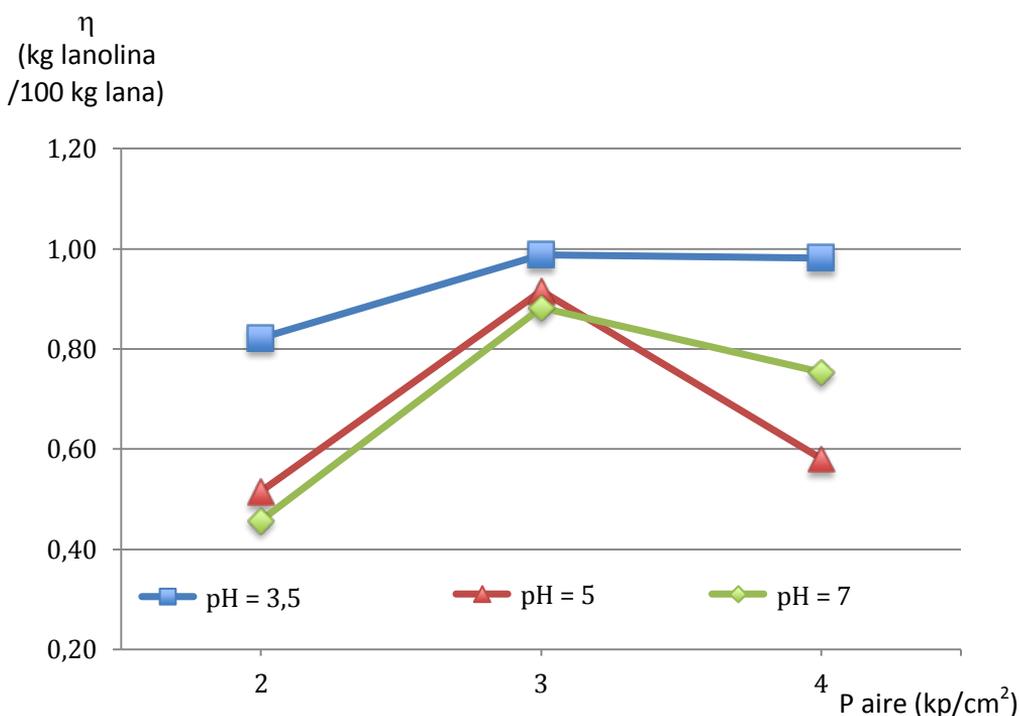


Gráfica 6.13. Rendimiento de la extracción para diferentes valores de presión de aire de entrada en DAF. Índice de efluente mayor o igual a 4,0

La gráfica anterior muestra que para una presión de aire en el DAF de 3 kp/cm<sup>2</sup> (294,3 kPa), se produce el mayor porcentaje de extracción de

lanolina, fenómeno también observado para el resto de valores del índice de efluente, para igualdad de pH.

Para analizar la influencia del pH y de la presión del aire de entrada al DAF de forma simultánea, se exponen en la gráfica correspondiente de rendimiento de extracción en función de la presión de aire para cada valor de pH, teniendo en este caso tres series de datos.



Gráfica 6.14. Rendimientos medios de la extracción frente a distintos valores de presión de aire de entrada en DAF y pH del efluente. Índice de efluente mayor o igual a 4,0

Esta gráfica, similar a la Gráfica 6.12 por tener solamente una observación por cada valor de pH y presión diferente, resume el comportamiento de la serie. Se observa claramente que para cada valor de pH distinto, el máximo en la extracción de lanolina ocurre cuando la presión del aire es igual a  $3 \text{ kp/cm}^2$  (294,3 kPa) y además este rendimiento es máximo cuando el pH es igual a 3,5. Sin embargo, para otros valores de pH no se apreció una diferencia significativa en los resultados. Por tanto, conviene trabajar con  $\text{pH} = 3,5$ .

### 6.3.6. CONCLUSIÓN PARCIAL DEL APARTADO

Como conclusión de todas las observaciones, representadas por el conjunto de gráficas que se han ido exponiendo en este apartado, se puede asegurar, como norma general, lo siguiente:

El rendimiento de la extracción de lanolina se maximiza cuando la presión del aire de entrada en el DAF es de  $3 \text{ kp/cm}^2$  (294,3 kPa) y cuando se logra tener en dicho equipo un efluente cuyo pH es igual a 3,5

## 6.4. CARACTERÍSTICAS DE LA LANOLINA EXTRAÍDA

En este apartado se exponen los resultados de los análisis realizados en el punto 5.2. *Análisis de la lanolina*. A partir de ellos se emite un informe distintivo de las características de la muestra para su comercialización.

Las pruebas se realizaron sobre muestras tomadas de tres bidones con índices de efluente iguales a 2,0, 3,2 y 5,5 (bidones 17, 50 y 10 respectivamente). De esta forma se obtienen conclusiones sobre lanolinas de naturalezas diferentes.

Los resultados que se exponen en las tablas de este apartado son, para cada propiedad estudiada, la media de los resultados de varias pruebas iguales, aunque realizadas sobre muestras distintas de cada lanolina.

### 6.4.1. PUNTO DE FUSIÓN

Las pruebas realizadas dieron los siguientes resultados:

<b>INDICE DE EFLUENTE</b>	2,0	3,2	5,5
<b>PUNTO DE FUSIÓN ( C)</b>	41	38	37

Se observa que el punto de fusión es un parámetro variable en función del índice de efluente, aunque esta variación es poco significativa.

Ello da idea de que esta propiedad apenas depende del origen de la muestra.



Imagen 6.5. Vaso de precipitados sobre calefactor de placas para medir el punto de fusión

#### 6.4.2. CONTENIDO EN AGUA

Para una de las pruebas, los datos del experimento fueron:

Peso del vaso de precipitados = 48,859 g

Peso de lanolina = 10,014 g

Una vez realizada la prueba, el peso del vaso con la lanolina desecada fue de 58,794 g

$$\begin{aligned} \text{Humedad (\%)} &= \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} \cdot 100 \\ &= \frac{10,014 - 9,935}{10,014} \cdot 100 = 0,79\% \end{aligned}$$

Para las otras muestras, realizadas de forma similar, se obtuvieron los siguientes resultados:

<b>INDICE DE EFLUENTE</b>	2,0	3,2	5,5
<b>CONTENIDO EN AGUA (%)</b>	0,79	0,71	0,78



Imagen 6.6. Estufa



Imagen 6.7. Muestras en el interior del desecador

El contenido de agua de las muestras es adecuado por ser inferior al 1%. Es un parámetro que depende exclusivamente de la eficacia del proceso de extracción. De hecho, la lanolina se suele comercializar también en

forma *anhidra*, una vez se ha eliminado por completo el agua que contiene.

### 6.4.3. CONTENIDO EN CENIZAS

En este caso se realizaron dos pruebas, sobre las muestras de índice de efluente igual a 2,0 y 5,5 (bidones números 17 y 10 respectivamente). La razón de ello es que se origina una gran cantidad de humos durante su realización.

Por otro lado, tal como se indicó en el apartado 5.2.3 cuando se explicó la preparación de esta prueba, su realización no es habitual ya que es un parámetro que apenas tiene relevancia comercial.

Además, se puede sustituir por la prueba de análisis cromático, que proporciona información cualitativa relacionada con el contenido en cenizas, de una forma rápida y sencilla (un color más oscuro de la muestra será indicativo de un mayor contenido en cenizas que otra muestra de color más claro).

Para la primera prueba realizada, los pesos iniciales fueron:

Peso de la cápsula de porcelana = 42,258 g

Peso de lanolina = 1,998 g

Una vez la prueba realizada, el peso de la cápsula con la lanolina calcinada fue de 42,557 g

$$\begin{aligned} \text{Cenizas (\%)} &= \frac{\text{Peso del residuo}}{\text{Peso de la muestra}} \cdot 100 = \frac{42,557 - 42,258}{1,998} \cdot 100 \\ &= 14,96\% \end{aligned}$$

La otra muestra se realizó de forma similar con estos resultados:

<b>INDICE DE EFLUENTE</b>	2,0	5,5
<b>CONTENIDO EN CENIZAS (%)</b>	14,96	24,08

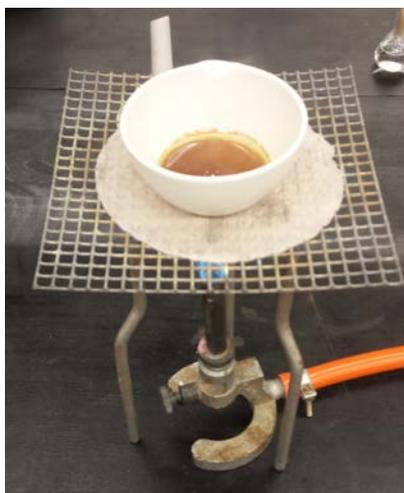


Imagen 6.8. Muestra de lanolina sobre mechero Bunsen



Imagen 6.9. Cenizas tras la combustión de la muestra de lanolina

Este resultado puede considerarse normal, teniendo en cuenta que las materias que permanecen sin quemar son de origen mineral, cuya densidad es bastante superior al resto de componentes de la lanolina. Además, se confirma que muestras con mayor índice de efluente contienen más cenizas que las de índice menor.

#### 6.4.4. ÍNDICE DE ACIDEZ EN GRASAS

Los resultados de una de las pruebas fueron los siguientes (Ecuación 11):

P = peso de la muestra de lanolina = 4,210 g

V = volumen de KOH consumido hasta persistencia de color rosáceo  
 = 2,2 mL

$$\text{Índice de acidez} = \frac{2,2 \cdot 5,61}{4,210} = 2,93 \left( \frac{\text{mg KOH}}{\text{g}} \right)$$

$$\text{Índice de acidez (\%)} = \frac{1}{2} \cdot 2,93 = 1,47\%$$

Para las otras muestras, los resultados aparecen en la tabla de siguiente:

<b>ÍNDICE DE EFLUENTE</b>	2,0	3,2	5,5
<b>ÍNDICE DE ACIDEZ (mg KOH/g)</b>	2,93	4,30	15,78
<b>ÍNDICE DE ACIDEZ (%)</b>	1,47	2,15	7,89

Se observa que el parámetro *índice de acidez* depende en gran medida del índice de efluente definido en este estudio. La relación entre ellos es la que se deduce de la tabla anterior, es decir, la lanolina procedente de una muestra con elevado índice de efluente, tiene mayor acidez en grasas que otra muestra cuyo índice de efluente es inferior.

En cualquier caso, comercialmente se suelen admitir valores de índice de acidez que no superen los valores de 60 mg KOH/g (ó 30 si es en %)



Imagen 6.10. En primer plano: pHmetro digital para el control de la prueba

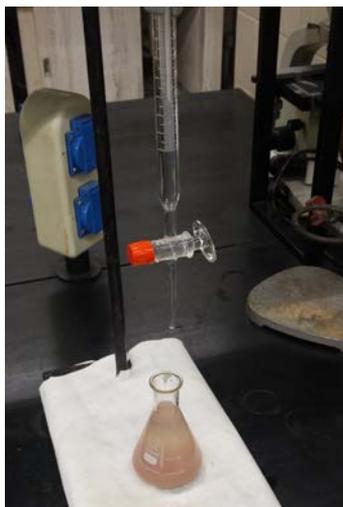


Imagen 6.11. Muestra virando a color rosáceo

### 6.4.5. ANÁLISIS CROMÁTICO

Se han realizado las pruebas de color siguientes:

<b>INDICE DE EFLUENTE</b>	2,0	3,2	5,5
<b>COLOR EN LA ESCALA DE GARDNER</b>	12	13	18



Imagen 6.12. Equipo comercial para medida del color según la escala Gardner

Estos resultados confirman lo que ya se indicó en este estudio, y es que las ovejas de raza merina (lana de Tipo 2 e índice de efluente igual a 2,0) generan una lanolina de color más claro que la de otras razas.

## 6.5. RESULTADOS ECONÓMICOS

### 6.5.1. RENTABILIDAD Y RENDIMIENTO UMBRAL

La rentabilidad económica de la planta de extracción de lanolina depende principalmente de dos factores:

1. El precio de venta del producto
2. Los costes necesarios para su extracción

Respecto al precio de venta del producto, éste es variable según la demanda del mercado y la calidad de la lanolina que se extrae en la instalación.

En lo que se refiere a los costes para la extracción de la lanolina, hay que analizar fundamentalmente los costes energéticos: electricidad para la maquinaria y calor para elevar la temperatura a la parte del efluente sometida al craqueo térmico.

También en este apartado de costes se incluye una parte derivada de la inversión realizada.

Como se ha demostrado, el parámetro *índice de efluente* influye de forma fundamental en el rendimiento de la extracción. Por ello, el estudio económico se centrará en buscar un valor de este índice de

efluente que proporcione el rendimiento mínimo necesario para asegurar la rentabilidad de la planta.

Lógicamente, si el rendimiento de la extracción aumenta, la rentabilidad será mayor que si ese rendimiento es menor. Incluso puede ocurrir, como se verá, que para valores de rendimiento de extracción de lanolina por debajo de un valor *umbral*  $\eta_u$ , no compensará económicamente tener la planta en funcionamiento, por ser mayores los costes de operación que los beneficios asociados a la venta.

Para realizar el estudio económico se consideran las variables siguientes:

- $V$  = precio de VENTA de la lanolina, en *euros por kilogramo de lanolina* (€/kg de lanolina).
- $C$  = coste de extracción, en *euros por kg de lana de entrada a los lavaderos* (€/kg de lana), compuesto por los costes de OPERACIÓN, que son a su vez la suma de los costes de la energía eléctrica ( $C_e$ ) y los costes del vapor utilizado para el calentamiento del licor ( $C_v$ ), y por otro lado el coste derivado de la AMORTIZACIÓN de la instalación ( $C_a$ ).
- $\eta_u$  = valor del rendimiento umbral buscado (kg lanolina/100 kg de lana de entrada a los lavaderos).

Hay que tener en cuenta que V y C no están evaluados en las mismas unidades. Mientras que V se calcula en € por kg de lanolina vendida, los costes C están expresados en € por kg de lana de entrada a los lavaderos.

Para poder formular la ecuación de la rentabilidad de forma dimensionalmente homogénea, se tiene que considerar el rendimiento de la extracción (o sea, los kg de lanolina que se obtienen por kg de lana de entrada al lavadero), de tal forma que la rentabilidad, R, por cada kg de lanolina extraída será por tanto:

$$R = V - \frac{C}{\eta} \quad (14)$$

expresada ya en €/kg de lanolina.

En ella  $\eta$  es el valor del citado rendimiento de la extracción y aparece como divisor de los costes C para transformar los € por kg de lana de entrada en € por kg de lanolina extraída.

Este rendimiento se expresa por tanto en kg de lanolina extraída por kg de lana de entrada a los lavaderos, o en tanto por cien, que es la notación utilizada a lo largo de este Trabajo, es decir, en kg de lanolina extraída por cada 100 kg de lana sucia de entrada.

Por ejemplo, los costes C asociados a la instalación de extracción de lanolina de 0,04 €/kg de lana de entrada y cuyo rendimiento de extracción fuese  $\eta$  igual a 0,0125 kg de lanolina/kg de lana de entrada (ó

1,25 kg de lanolina/100 kg de lana sucia), supondrían unos costes incurridos, por kg de lanolina extraída de:

$$\frac{C}{\eta} = \frac{0,04 \text{ €/kg lana}}{0,0125 \text{ kg lanolina/kg lana}} = 3,2 \text{ €/kg lanolina}$$

En función de los costes incurridos así calculados y del precio de venta esperado del producto, podemos tener dos situaciones diferentes:

- Cuando  $R \geq 0$  estamos en el caso de *rentabilidad positiva* y la planta se mantendrá en funcionamiento. Esta situación se da cuando el precio de venta de la lanolina supera a los costes derivados de la extracción, bien por un precio atractivo del producto, o bien porque el rendimiento de la extracción sea lo suficientemente elevado como para disminuir de forma conveniente los costes de su extracción. En el punto  $R = 0$  se calcula el denominado *rendimiento umbral*, cuyo valor establece el punto de rentabilidad nula.
- Puede ocurrir el caso contrario, es decir, que  $R < 0$ . Este caso se daría cuando los costes  $C$  –derivados de la operación y de amortización de la planta– superasen el precio de venta del producto. Si se trata de este escenario, se tomaría la decisión de parar la planta.

Puede llamar la atención el hecho de que cuando  $R = 0$  sí interese mantener la planta en funcionamiento. Sería el caso en que los costes de extracción de la lanolina fuesen aproximadamente iguales a los ingresos esperados de su venta. La razón de mantener la planta en funcionamiento en estas circunstancias sólo se debería a que la extracción de lanolina conlleva además una disminución de la DQO del efluente, hecho demostrado en las pruebas realizadas en el laboratorio y por diversos estudios como los de Ang y Himawan<sup>93</sup>, ambos hechos expuestos a lo largo de este estudio.

La disminución de la DQO representa que los costes de la necesaria depuración del efluente tratado se verán reducidos y por tanto, en términos económicos globales, puede compensar mantener la planta en funcionamiento.

Hay otros costes, como son los del personal encargado de operar la planta, que no se contemplan en este apartado. La razón es que este personal es el mismo que atiende a la depuradora de la fábrica, es decir, la mano de obra no se ve incrementada por el hecho de poner la instalación de extracción de lanolina en funcionamiento, ni los costes para la empresa ligados a este concepto se ven disminuidos por su parada –lógicamente sí se verían reducidos los costes energéticos–.

Por otro lado, el coste del ácido clorhídrico tampoco se tiene en cuenta en este estudio, ya que de cualquier forma se tiene que reducir el pH hasta los mismos valores ( $\text{pH} = 3,5$ ) para realizar la depuración, se

realice o no la extracción de lanolina, y para el mismo caudal de efluente.

En la expresión (14) anterior, al igualar el precio de venta a los costes de extracción dividido por un rendimiento del proceso, estamos en el supuesto de rentabilidad igual a cero.

En dicho escenario, el rendimiento del proceso sería el denominado *rendimiento umbral* de rentabilidad, siendo deseable que la rentabilidad sea mayor o igual que cero:

$$R = V - \frac{C}{\eta_u} \geq 0 \quad (15)$$

En esta situación:

$$V \geq \frac{C}{\eta_u}$$

Y por tanto

$$\eta_u \geq \frac{C}{V} \quad (16)$$

Es decir, el rendimiento umbral,  $\eta_u$ , será aquél cuyo valor sea el resultado del cociente entre los costes de extracción, C, y el precio de venta, V, y será el que proporcione el mínimo rendimiento de la instalación de extracción de lanolina para que la rentabilidad obtenida de la planta sea positiva.

Por ejemplo, para un precio de venta de la lanolina igual a 3 €/kg, si los costes de fábrica asociados a la instalación de extracción de lanolina fuesen de 0,035 €/kg de lana de entrada, el rendimiento umbral o mínimo sería, de acuerdo con la Ecuación (16):

$$\eta_u \geq \frac{C}{V} = \frac{0,035}{3} = 0,0117 =$$
$$= 1,17 \frac{\text{kg lanolina}}{100 \text{ kg lana de entrada a lavaderos}}$$

Es decir, la instalación debería extraer como mínimo 1,17 kg de lanolina por cada 100 kg de lana sucia de entrada en los lavaderos para conseguir rentabilidad positiva de la planta.

En la realización de este estudio económico, se tratará de obtener en primer lugar el rendimiento umbral  $\eta_u$  que ofrezca el punto de rentabilidad igual a cero con arreglo al precio de venta y a los costes de extracción de la lanolina.

Posteriormente, se comparará este rendimiento umbral con los resultados de los rendimientos de la extracción que se han obtenido de la experimentación para cada índice de efluente.

Las conclusiones del presente estudio se efectuarán, para las condiciones consideradas en él, en la conveniencia de poner en funcionamiento o parar la instalación en función del índice de efluente, es decir, en función del tipo de lana que se esté trabajando.

De esta forma, la empresa puede tomar con la planta las decisiones oportunas de una forma sencilla, simplemente considerando el tipo de lana sucia que se esté lavando, sin necesidad de calcular el rendimiento umbral en cada momento, puesto que toda la experimentación y su análisis vienen a proporcionar uno de los principales logros del presente Trabajo, que es la relación entre ambos: el rendimiento o eficiencia de la extracción y el tipo de lana que se lava en cada momento.

## 6.5.2. COSTES DE EXTRACCIÓN Y PRECIO DE VENTA DE LA LANOLINA

### *Precio de venta $V$ de la lanolina*

A fecha actual (septiembre de 2015), las operaciones de venta de lanolina se están realizando, para la calidad del producto generado en la instalación, a un precio

$$V = 3,50 \text{ €/kg lanolina}$$

que es el valor neto, sin incluir impuestos, descontados los portes y el coste del bidón en el que se almacena el producto cuando se genera.

Este precio puede variar en el tiempo. La tendencia es a que aumente ligeramente, pero el estudio inicial lo realizaremos con el precio actual, considerando posteriormente otros dos escenarios para el precio de venta.

El precio de venta está relacionado con la calidad de la lanolina. Esta calidad suele mantenerse estable dentro de unos parámetros, algunos derivados de la forma en que es extraída (ajustes de las máquinas e instalación), pero otros, la mayoría, son intrínsecos al producto, dependientes en gran medida de la raza de la oveja.

De los primeros, o sea, de los que dependen de la forma en que es extraída, es muy importante que el porcentaje en peso de agua presente en el producto final no supere el 1%. Para ello se ajusta la última de las centrífugas de tal forma que su funcionamiento aporte la proporción deseada de agua. Esto se suele realizar cada vez que la máquina se pone en funcionamiento, normalmente una vez a la semana.

También se evalúan otros parámetros como el índice de acidez, el color, el punto de fusión, etc., aunque el resultado de las pruebas confirma que la lanolina es un producto poco variable en cuanto a sus características, similares para cada raza de oveja.

### *Costes de extracción C de la lanolina*

Para averiguar el coste de extracción de la lanolina, se utilizan los ratios que se disponen en fábrica para los diferentes consumos energéticos.

Históricamente, como se suele realizar en cualquier instalación industrial con el fin de conocer los costes de fabricación de un producto, en la empresa se dispone de los datos siguientes:

- Coste de energía eléctrica por kg de lana de entrada al lavadero (€/kg lana)
- Coste de vapor por kg de lana de entrada al lavadero (€/kg lana)

Estos valores están calculados dividiendo los costes respectivos, tanto de la energía eléctrica como de la energía térmica (en forma de gas natural), entre la producción de los lavaderos, para un periodo de tiempo dado. Así se obtienen estos ratios, que aportan por tanto unos datos fieles con los que se puede trabajar.

Hasta la fecha de puesta en marcha de la instalación de extracción de lanolina (febrero de 2015), estos costes fueron:

$$C_e = 0,047 \text{ €/kg lana}$$

$$C_v = 0,052 \text{ €/kg lana}$$

Desde el mes de febrero de 2015 en adelante, los costes se han incrementado hasta los siguientes:

$$C_e = 0,051 \text{ €/kg lana}$$

$$C_v = 0,069 \text{ €/kg lana}$$

Como no ha habido otras modificaciones en la industria, este incremento puede asociarse con la puesta en marcha de la instalación de extracción de lanolina. Es decir, los costes de *operación* de esta

planta se pueden calcular como la diferencia entre los de la situación inicial y los costes con la instalación de extracción de lanolina en funcionamiento. Se pueden, por tanto, estimar en:

$$C_e = 0,004 \text{ €/kg lana}$$

$$C_v = 0,017 \text{ €/kg lana}$$

que suponen un incremento de un 8,5% y de un 32,7% en los costes de la energía eléctrica y calorífica respectivamente.

Llama la atención el incremento significativo que ha tenido lugar en los costes de energía calorífica derivados de la puesta en funcionamiento de la instalación de extracción de lanolina. Se debe a la necesidad de realizar el craqueo térmico del licor generado en el DAF.

Por el contrario, el incremento de los costes de energía eléctrica, más razonables, se deben a la puesta en funcionamiento del nuevo equipamiento eléctrico dedicado a esta actividad.

Quedarían por valorar los costes de amortización de la instalación ( $C_a$ ) que hay que añadir a los costes de operación anteriores.

Para ello se parte del dato de la inversión realizada (400.000 €, incluyéndose en esta cantidad una parte referente a previsión por costes de mantenimiento) y del periodo de amortización de la planta (8 años, que es un periodo razonable en los momentos actuales). Habría que imputar por tanto 50.000 € al año como costes de amortización.

Para poder utilizar esta cantidad de forma conveniente, es decir, de forma dimensionalmente homogénea en la Ecuación (14) que da la rentabilidad, hay que dividir esa cifra entre la producción anual de lana de entrada a los lavaderos, que es de 3.200.000 kg

Este dato corresponde a la producción media de lana sucia procesada en los últimos 10 años, que se considera suficientemente representativo y válido como previsión futura. Se ha tomado este periodo porque al principio de los años 2000 se realizó un significativo incremento en la producción, como consecuencia de la puesta en funcionamiento de un nuevo lavadero, pero a mediados de esa década el sector textil sufrió un proceso de recesión importante, al que MANUFACTURAS S.A. no fue ajeno. En los últimos 10 años, la producción de la empresa es estable en torno al dato facilitado.

De esta forma, tenemos un coste de amortización:

$$C_a = \frac{50.000 \text{ €}}{3.200.000 \text{ kg}} = 0,015625 \text{ €/kg lana}$$

Según los razonamientos considerados en este apartado, al imponer rentabilidad positiva:

$$R = V - \frac{C}{\eta_u} \geq 0$$

Operando:

$$V \geq \frac{C}{\eta_u}$$

Obteniéndose una expresión similar a la (16):

$$\eta_u \geq \frac{C}{V} \quad (17)$$

Sustituyendo en esta ecuación los datos disponibles:

$$\begin{aligned} \eta_u \geq \frac{C}{V} &= \frac{C_e + C_v + C_a}{V} = \frac{0,004 + 0,017 + 0,015625}{3,50} = 0,01046 \\ &= 1,046\% \end{aligned}$$

*El rendimiento umbral según se ha calculado en este apartado queda establecido en el 1,046%, es decir, 1,046 kg de lanolina extraída por cada 100 kg de lana sucia de entrada en los lavaderos.*

De la experimentación realizada a lo largo de esta investigación, se puede concluir que si la instalación se opera con los valores de las variables que optimizan la extracción de lanolina y que se ha demostrado que son:

- pH del efluente en el DAF igual a 3,5
- Presión del aire en el DAF igual a 3 kp/cm<sup>2</sup> (294,3 kPa)
- Caudal de aire de entrada al DAF = 15 L/min

los rendimientos de extracción de lanolina conseguidos, para cada valor de índice de efluente que se ha estudiado, son:

Índice de efluente	Rendimiento MEDIO optimizado conseguido (kg lanolina/100 kg de lana) (*)
Igual a 2,0	1,410
Entre 2,1 y 3,0	1,325
Entre 3,1 y 4,0	1,043
Mayor o igual a 4,0	0,990

Tabla 6.11. Resultados de los rendimientos medios optimizados de extracción obtenidos en las pruebas en función del *índice de efluente*

(\*) El valor optimizado se consigue, para todos los valores de índice de efluente, cuando la planta se opera con los valores de las variables indicados antes de esta tabla, que por tanto optimizan la extracción de lanolina

Teniendo en cuenta esta tabla, siempre que el rendimiento medio esperado, –que será además el máximo ajustando la planta a los valores que la optimizan– supere el rendimiento umbral calculado, sería rentable el funcionamiento de la planta.

Por ello, para un rendimiento umbral  $\eta_U$  calculado igual a 1,046%, se comprueba que la instalación se debe tener en funcionamiento en los dos primeros casos, cuando el valor del parámetro índice de efluente sea igual a 2,0 ó esté entre 2,1 y 3,0.

En el tercer caso estudiado, cuando el índice de efluente sea superior a 3,0 e inferior a 4,0 estaríamos en el supuesto de ingresos prácticamente igual a costes de operación más amortización, es decir, rendimiento esperado de la extracción igual a 1,043% frente a rendimiento umbral de rentabilidad de 1,046%

En estas circunstancias, la decisión también sería mantener la planta en funcionamiento, justificando esta decisión por la disminución de la DQO del efluente asociada a la propia extracción de lanolina, hecho constatado en las pruebas realizadas en el laboratorio, y que por tanto reducirán los costes en la depuración posterior que es preciso realizar (ver por ejemplo la Ecuación 1).

En definitiva, la planta se debe parar únicamente cuando el índice de efluente sea mayor de 4,0 que se corresponde con el caso de trabajar por ambos lavaderos con lanas de las que hemos denominado *bastas*, que son poco cargadas de lanolina. Únicamente en estas circunstancias

no compensa económicamente realizar la extracción de lanolina según las condiciones en que actualmente se encuentra.

En el apartado de *Conclusiones* se expresan las mejoras que se pueden realizar en la instalación para poder trabajar con ella en cualquier escenario, es decir, con cualquier valor del parámetro *índice de efluente*.

### 6.5.3. ESCENARIO PESIMISTA

En él consideramos que el precio de venta de la lanolina baja hasta

$$V = 3,00 \text{ €/kg lanolina}$$

valor neto, sin incluir impuestos, descontados los portes y el coste del bidón en el que se almacena el producto cuando se genera.

Tomamos los mismos costes de operación y amortización.

Siguiendo los razonamientos anteriores, la rentabilidad positiva se obtendrá sustituyendo en la Ecuación (17) los nuevos datos disponibles:

$$\begin{aligned} \eta_u \geq \frac{C}{V} &= \frac{C_e + C_v + C_a}{V} = \frac{0,004 + 0,017 + 0,015625}{3,00} = 0,01221 = \\ &= 1,221\% \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta la Tabla 6.11, para este nuevo rendimiento umbral  $\eta_u$ , se comprueba que la instalación se debe mantener en

funcionamiento únicamente en los dos primeros casos, cuando el valor del índice de efluente sea igual a 2,0 ó se encuentre entre 2,1 y 3,0.

El tercer caso, cuando el índice de efluente sea superior a 3,0 e inferior a 4,0, para el que el rendimiento esperado de la extracción es igual a 1,043%, queda ya muy lejos de este nuevo rendimiento umbral de rentabilidad, no compensando el sobrecoste de la extracción con la disminución de costes de la depuración, como sí ocurría en el caso anterior.

#### 6.5.4. ESCENARIO OPTIMISTA

En él consideramos que el precio de venta de la lanolina sube hasta

$$V = 4,00 \text{ €/kg lanolina}$$

valor neto, sin incluir impuestos, descontados los portes y el coste del bidón en el que se almacena el producto cuando se genera.

Sustituyendo en la Ecuación (17) los nuevos datos:

$$\begin{aligned} \eta_u \geq \frac{C}{V} &= \frac{C_e + C_v + C_a}{V} = \frac{0,004 + 0,017 + 0,015625}{4,00} = 0,00916 = \\ &= 0,916\% \end{aligned}$$

Volviendo a la Tabla 6.11, para este nuevo rendimiento umbral  $\eta_u$ , se comprueba que la instalación se debe mantener en funcionamiento para todo caso, sea cual sea el índice de efluente, ya que el que el

rendimiento esperado de la extracción es siempre superior al rendimiento umbral.

Para finalizar el estudio económico, se va a calcular el precio al que se debería vender la lanolina para conseguir que la instalación se encuentre funcionando sea cual sea el índice de efluente.

Utilizando la ecuación inicial (15), ahora la incógnita será  $V$ , manteniendo los mismos costes  $C$ , y haciendo que el rendimiento umbral coincida con el rendimiento esperado para que funcione en todo momento. Este valor, tomado de la Tabla 6.11 será:

$$\eta_u \geq 0,0099 = 0,99\%$$

Por tanto:

$$R = V - \frac{C}{\eta_u} \geq 0$$

Operando:

$$V \geq \frac{C}{\eta_u} \quad (18)$$

Sustituyendo:

$$V \geq \frac{C}{\eta_u} = \frac{0,004 + 0,017 + 0,015625}{0,0099} = 3,70 \text{ €/kg lanolina}$$

A partir de este precio de venta de la lanolina, la planta se debe tener en funcionamiento pues sería rentable en todo caso.

Si se repite este razonamiento para los diferentes rendimientos establecidos en la Tabla 6.11, se consiguen los precios de venta de la lanolina que marcan los hitos de parada o funcionamiento de la instalación en función del índice de efluente, o sea, del tipo de lana que se esté trabajando.

Sustituyendo en la ecuación (18):

$$\triangleright \eta_u \geq 0,01043 = 1,043\%$$

$$V \geq \frac{C}{\eta_u} = \frac{0,004 + 0,017 + 0,015625}{0,01043} = 3,51 \text{ €/kg lanolina}$$

$$\triangleright \eta_u \geq 0,01325 = 1,325\%$$

$$V \geq \frac{C}{\eta_u} = \frac{0,004 + 0,017 + 0,015625}{0,01325} = 2,76 \text{ €/kg lanolina}$$

$$\triangleright \eta_u \geq 0,01410 = 1,410\%$$

$$V \geq \frac{C}{\eta_u} = \frac{0,004 + 0,017 + 0,015625}{0,01410} = 2,60 \text{ €/kg lanolina}$$

Estos resultados se pueden resumir en la tabla siguiente:

<b>Precio de venta V (€/kg lanolina)</b>	<b>Estrategia a seguir (para rentabilidad nula o positiva) (*)</b>
$V \geq 3,70$	EN MARCHA EN CUALQUIER CASO
$3,70 \geq V \geq 3,51$	EN MARCHA EXCEPTO CUANDO EL ÍNDICE DE EFLUENTE SEA MAYOR O IGUAL A 4,0
$3,51 \geq V \geq 2,76$	EN MARCHA CUANDO EL ÍNDICE DE EFLUENTE SEA IGUAL A 2,0 O CUANDO SE ENCUENTRE ENTRE 2,1 y 3,0
$2,76 \geq V \geq 2,60$	EN MARCHA SOLAMENTE CUANDO EL ÍNDICE DE EFLUENTE SEA IGUAL A 2,0
$2,60 \geq V$	PARADA EN CUALQUIER CASO

Tabla 6.12. Estrategias de funcionamiento de la planta de extracción de lanolina en función del precio de venta del producto

(\*) La rentabilidad nula de la planta presupone que ahorra costes de la depuración posterior y por ello se debe considerar como rentabilidad positiva



## 7. CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas en la presente Tesis Doctoral han sido estructuradas en dos partes: las referentes a la extracción de lanolina y las económicas y de operación de la planta.

### 7.1. CONCLUSIONES DE LA INSTALACIÓN DE EXTRACCIÓN DE LANOLINA

1. En este Trabajo se ha propuesto un sistema industrial de extracción de lanolina que incorpora el tratamiento de la totalidad del efluente generado en el proceso de lavado de lana.

Los sistemas implantados habitualmente en las industrias de este tipo lo realizan solamente sobre una parte del efluente.

Las ventajas que consigue el sistema que se deriva del presente estudio con respecto al convencional son, además de una mayor posibilidad de extracción de lanolina, la elevada disminución de carga contaminante del efluente, como consecuencia de tratar una mayor cantidad de éste. Ello se traduce en la disminución de los costes de depuración posterior.

2. Se han calculado, además, los equipos principales que componen la instalación, entre ellos un equipo de Flotación por Aire Disuelto (DAF) y dos máquinas separadoras centrífugas, según las necesidades de la empresa y las características del efluente generado.

Como consecuencia de los resultados de la experimentación, se han establecido determinados parámetros de trabajo de los equipos, con el fin de optimizar el proceso de extracción de lanolina.

El cálculo realizado para la superficie de diseño del DAF fue de 7,86 m<sup>2</sup>, y se instaló un equipo comercial de 8,8 m<sup>2</sup> de superficie de flotación.

En cuanto al caudal de aire de entrada al mismo equipo, mediante el cálculo realizado en este Trabajo se obtuvo un valor de 12,8 L/min, mientras que el valor que mejores resultados de flotación ofrece es 15 L/min, ligeramente superior. La razón puede deberse a que la superficie de flotación implantada es también superior a la calculada.

Respecto a la primera de las separadoras centrífugas, el parámetro que condiciona la extracción de lanolina óptima, es el caudal de licor concentrado en grasa de entrada a dicha máquina. El valor teórico calculado en este Trabajo, muestra que este caudal debería ser inferior a 10,59 m<sup>3</sup>/h. En condiciones habituales de funcionamiento se trabaja con un caudal de entrada a la separadora centrífuga en

torno a los  $6 \text{ m}^3/\text{h}$ . Aunque este valor se suele ajustar a la calidad del fluido de entrada a la máquina entre los 4 y los  $7,5 \text{ m}^3/\text{h}$ , no debe sobrepasarse el caudal máximo obtenido en esta investigación.

3. A lo largo de este estudio, se advirtió la necesidad de caracterizar el efluente generado, ya que se comprueba que la cantidad de lanolina extraída depende, en su mayor parte, del tipo de lana que se esté lavando en cada momento.

Para ello se ha definido el denominado *índice de efluente*, parámetro que aporta información sobre la calidad del agua, en términos de mayor o menor contenido de lanolina según el tipo de lana.

Los efluentes se han dividido en cuatro tipos, atendiendo a este índice:

- *Índice de efluente igual a 2,0*
- *Índice de efluente entre 2,1 y 3,0*
- *Índice de efluente entre 3,1 y 4,0*
- *Índice de efluente mayor o igual a 4,0*

Los índices de efluente más bajos corresponden a materias más cargadas de lanolina, que proceden del lavado de lanas de mayor calidad textil.

4. Para cada uno de ellos se estudia la influencia de las variables presión del aire en el DAF y pH del efluente, en el rendimiento de la extracción.

Así, se ha observado que el rendimiento de la extracción de lanolina se maximiza, en cualquiera de los casos estudiados, cuando:

- a. La presión del aire de entrada en el equipo flotador DAF es de 3  $\text{kp/cm}^2$  (294,3 kPa).
  - b. El caudal de aire de entrada a ese mismo equipo es de 15 L/min.
  - c. Se mantiene en dicho equipo un efluente cuyo pH es igual a 3,5.
5. Se ha comprobado que cuanto menor es el valor del índice de efluente, mayor es el rendimiento de la extracción, para las mismas condiciones de funcionamiento de la instalación.

Los valores medios de este rendimiento que se han obtenido en las pruebas realizadas, expresado en kg de lanolina extraída por cada 100 kg de lana de entrada en los lavaderos, y para las condiciones que optimizan la extracción –indicados en el punto 4 anterior–, han sido:

- Para Índice de efluente igual a 2,0: *rendimiento = 1,410*
- Para Índice de efluente entre 2,1 y 3,0: *rendimiento = 1,325*
- Para Índice de efluente entre 3,1 y 4,0: *rendimiento = 1,043*
- Para Índice de efluente mayor igual a 4,0: *rendimiento = 0,990*

6. En la situación actual, estos valores que indican la eficacia de la extracción de lanolina, son semejantes a los que se obtienen para lanas similares en instalaciones que utilizan sistemas diferentes de extracción.

Así, por ejemplo, las casas comerciales, que ofrecen sistemas *convencionales*, no garantizan que al implantar sus instalaciones se obtenga un porcentaje de extracción superior a 1,5 (1,5 kg de lanolina por cada 100 kg de lana en jugo), para tipos de lana merinas de origen español, cuyo parámetro *índice de efluente* se ha asimilado al valor 2,0 en este Trabajo.

En nuestro caso, según se ha indicado, se ha conseguido un valor medio igual a 1,41 para este mismo tipo de materias.

7. También es interesante indicar que con la instalación descrita en este Trabajo se han obtenido, de forma puntual, valores superiores para el rendimiento de la extracción.

Ello se ha conseguido tratando el efluente con una sustancia floculante en el equipo de flotación DAF, extrayendo de este modo prácticamente un 5% de lanolina en una de las pruebas, es decir, 5 kg por cada 100 kg de lana sucia (ver Tabla 6.4).

No obstante, para poder añadir esta sustancia floculante al efluente, se ha comprobado que sería conveniente modificar la instalación,

añadiendo un equipo decantador de sólidos previamente a la extracción de lanolina.

El decantador ya se ha dimensionado. La implantación de este equipo no debería presentar grandes dificultades, ya que suelen ser módulos compactos. Sin embargo, los mayores inconvenientes que están surgiendo se deben a la modificación que es necesaria realizar en la instalación hidráulica para conexionar los equipos actuales con el nuevo decantador, así como también con la ampliación prevista en el tratamiento de depuración, del que se hablará en el apartado de líneas de trabajo futuras.

8. La extracción de lanolina conlleva una reducción de la DQO del efluente. Los ensayos que se han realizado a lo largo de este Trabajo, así como también los que posteriormente se siguen haciendo, confirman que, trabajando en el equipo de flotación DAF con los valores de las variables que optimizan el tratamiento, (indicados en el punto 4 anterior), la DQO se reduce en un 35,6% respecto al valor inicial. En particular, sobre una muestra de efluente de entrada a la instalación cuya DQO era de 18000 mg O<sub>2</sub>/L, se pasó a 11600 mg O<sub>2</sub>/L.

Si además de ajustar estas variables a los valores ya indicados, se añadía una sustancia floculante, de las características y en la dosificación adecuada, que también se han establecido en este estudio, la reducción de la DQO de este mismo efluente que se

consiguió fue del 62,2%, pasando del mismo valor inicial a los 6800 mg O<sub>2</sub>/L después del tratamiento.

## 7.2. CONCLUSIONES ECONÓMICAS Y DE OPERACIÓN DE LA PLANTA

Para cada uno de los cuatro tipos de índice de efluente definidos se ha realizado un estudio económico.

1. En primer lugar se buscó un *rendimiento umbral* de la extracción de lanolina. Este será el que establezca el límite de inicio de rentabilidad de esta planta. Para su obtención, se han tenido en cuenta los costes de operación y amortización de la instalación, así como el precio de venta actual de la lanolina.

El rendimiento umbral de esta planta resultó ser igual a 1,046 kg de lanolina por cada 100 kg de lana de entrada en los lavaderos.

2. Para cada tipo de lana, definido en base al índice de efluente, se ha calculado el rendimiento medio de extracción (en términos de kg de lanolina extraída por cada 100 kg de lana en jugo de entrada a los lavaderos), y por comparación con el valor umbral, se establecen las estrategias de operación de la planta.

Los resultados obtenidos fueron:

Índice de efluente	Rendimiento MEDIO conseguido (kg lanolina/100 kg de lana)	Comparación con el rendimiento umbral
Igual a 2,0	1,410	> 1,046
Entre 2,1 y 3,0	1,325	> 1,046
Entre 3,1 y 4,0	1,043	< 1,046
Mayor o igual a 4,0	0,990	< 1,046

3. En términos económicos, el sistema propuesto para la extracción de lanolina, en las condiciones de precio de venta del producto y con los costes de extracción actuales, está dando resultados satisfactorios solamente en el caso de trabajar lanas *merinas* en al menos uno de los dos lavaderos. Ello implica trabajar con un índice de efluente igual a 2,0 o que esté entre 2,1 y 3,0. Efectivamente, en la tabla anterior se aprecia que en ambos casos el rendimiento es superior al umbral.

Sin embargo, otro factor a considerar es la reducción de DQO del efluente, asociada a la extracción de lanolina, que disminuye los costes de depuración.

Cuantificar económicamente el ahorro conseguido por esta reducción es difícil de realizar. Para ello se deberían estimar, por un lado, la disminución en el consumo de reactivos, y por otro lado, la de energía eléctrica, todo ello en función de la reducción de la DQO.

Lo que sí se conocen son los porcentajes de esta reducción de DQO del efluente tras el tratamiento de extracción, que se encuentran entre el 35,6 y el 62,2% de su valor inicial, según se ha indicado en el punto 8 de las conclusiones anteriores.

Por ello, con los datos que se disponen, se puede asegurar que incluso en el caso de que el índice de efluente esté comprendido entre 3,1 y 4,0 interesaría también mantener la planta en funcionamiento.

Para justificarlo basta observar la tabla anterior. En este caso, el rendimiento medio obtenido es de 1,043 kg de lanolina por cada 100 kg de lana en jugo. Aunque es un valor inferior al rendimiento umbral (1,046), se encuentra tan próximo a él, que la reducción de DQO que conlleva, por pequeña que ésta sea, posibilita la rentabilidad de la operación de la instalación.

4. En el apartado de estudio económico también se han considerado dos situaciones, el escenario optimista y el pesimista. En ellos se proponen precios de venta de la lanolina, superior e inferior al actual, respectivamente. En base a ellos se establecen nuevas consideraciones para la operación de la instalación.

Se ha supuesto una variación en el precio de venta del producto, subiendo de 3,5 €/kg a 4 €/kg de lanolina en el escenario optimista, y bajando de 3,5 €/kg a 3 €/kg de lanolina en el escenario pesimista.

Para el escenario optimista, el rendimiento umbral se reduce hasta el 0,916%, con lo que la planta podría estar en funcionamiento cualquiera que fuese el tipo de lana que se estuviese trabajando.

Por el contrario, en el escenario pesimista, este mismo rendimiento aumenta hasta el 1,221%. Solamente para índices de efluente iguales a 2,0 o entre 2,1 y 3,0 se obtendría rentabilidad económica de la instalación en este supuesto.

## 8. LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS EN LA INSTALACIÓN

De forma prioritaria, se contempla la eliminación de las tierras presentes en los efluentes procedentes del lavado de la lana antes del tratamiento de extracción de lanolina.

De esta manera, sería posible añadir un floculante en el propio DAF sin temor al fenómeno del *embarrado de las centrifugas* del que ya se ha comentado.

Mediante la adición de este producto floculante, los resultados de los porcentajes de rendimiento de la extracción mejoran ostensiblemente, tal como se ha puesto de manifiesto cuando en alguna ocasión se ha podido acometer (pruebas realizadas con los bidones números 19, 20, 21 y 22, Tabla 6.4)

Se contemplan dos formas de realizar esta eliminación de los sólidos del efluente:

1. Mediante la instalación de un decantador antes de la entrada de los efluentes en el DAF. El decantador ya se ha proyectado. Sin embargo, su integración dentro de la instalación actual tiene cierta complejidad. Para ello es necesario realizar modificaciones sustanciales en la parte hidráulica de la planta con el fin de

conexionar los equipos actuales con el propio decantador, pero también con la ampliación prevista en el tratamiento de depuración. Para reducir aún más los parámetros de vertido de aguas que se envían a la depuradora municipal, se está contemplando actualmente la colocación de un tratamiento biológico posterior al de depuración. Este reactor biológico ha de dimensionarse con arreglo a los parámetros del efluente que reciba, y resultará de menor tamaño cuanto más efectivo sea el proceso de extracción de la grasa de que ha sido objeto este estudio.

En cualquier caso, la implantación del tratamiento biológico en las instalaciones de la empresa tiene la dificultad añadida de una relativa falta de espacio para su colocación. Es por ello que la modificación de la instalación hidráulica resulta algo más compleja.

2. Utilizando un sistema diferente de lavado de lana que sea eficaz en lo que a precipitación de tierras se refiere. Este sistema se implantaría en el propio lavadero, y con él se pretendería generar por un lado un efluente muy cargado de tierras, que se pueda tratar de forma independiente en el decantador, y por otro lado un efluente que arrastraría las grasas. Este último sería el que se introduciría en la instalación de extracción de lanolina, garantizando su adecuado funcionamiento, sin incorporación de tierras.

Este novedoso sistema, que precipita los lodos en una parte muy localizada del lavadero, también se está estudiando, y se realizaría utilizando la tecnología de ultrasonidos.

Ya hay constancia de la utilización de esta tecnología aplicada al lavado de lana, pero a nivel teórico o de experimentación en laboratorio<sup>46 47 48</sup>. Actualmente, se pretende realizar una prueba a nivel industrial, utilizando las instalaciones de MANUFACTURAS S.A.



## BIBLIOGRAFÍA

- <sup>1</sup> Sánchez Martín, J. R., 2001. De la oveja al telar: ayer y hoy de la industria textil bejarana. *Revista de la Industria Textil*, nº 387, pp. 10-18
- <sup>2</sup> Bueno Aguado, C., 1973. Del obrador a la fábrica: Vicisitudes de los centros textiles no catalanes. Edita el autor; Impr. Grafisvan, Béjar
- <sup>3</sup> Rodríguez López, G., 1948. *Manufacturas laneras de Castilla: Segovia, Guadalajara, Béjar*. Ed. Escuela Social de Madrid. Impr. S. Sánchez, Béjar, pp. 74-77
- <sup>4</sup> Sánchez Martín, Javier R., *Industria textil y fábricas en Béjar (III)*, 2007, *Béjar en Madrid* nº 4776, pp. 36-40
- <sup>5</sup> Sánchez Patrocinio, A, 2012. Resurgir en plena crisis. Nueva etapa de la industria textil de Béjar. *Revista informativa del Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Madrid* 58, pp. 32-36
- <sup>6</sup> Patel H., Vashi R.T., 2015. Characterization and treatment of textile wastewater, Cap. 2. *Characterization of Textile Wastewater*. Ed. Elsevier (1st edition), pp. 21-71
- <sup>7</sup> Gibson D. M., Morgan W. V. and Robinson B., 1981. Wool scouring and effluent treatments. *Wool Science Review* (57), pp. 2-32.
- <sup>8</sup> Stewart R. G., 1988 *Effluent treatment: nature of wool scouring wastes*. Wool scouring and allied technology, Wool Research Organisation of New Zealand WRONZ, p. 171
- <sup>9</sup> McKinnon J., 1996. *Some chemistry of the wool industry scouring and yarn production*. Ed. Wool Research Organisation of New Zealand (WRONZ). p. 17
- <sup>10</sup> Shaikh, I.A. (Ed.), 2005. *A practical handbook on textile fibers*. Ed. TIS (Textile-Info Society), Lahore (Pakistan), pp. 1 and 151.
- <sup>11</sup> Toomey, Barry J., 1984. *Manejo, clasificación y utilización de la lana*. Monografía nº 55 de la FAO, Naciones Unidas, Roma, p. 9
- <sup>12</sup> Gilabert, E. J., 2002. *Química Textil. Tomo I. Materias Textiles. Propiedades y descripción*. Ed. Universidad Politécnica de Valencia, p. 326.
- <sup>13</sup> Imagen obtenida el 14 de abril de 2014 desde <http://www.military-beret.com>
- <sup>14</sup> Toomey, B.J., 1984. *Manejo, clasificación...*, Op.Cit. Pg. 79
- <sup>15</sup> Schneegluth, H. y Schneegluth, C., 2003. *La microfotografía aplicada a la industria textil*, Ed. Revitextil, Barcelona, pp. 45-49
- <sup>16</sup> Riva Juan, A., 1993. *Tratamientos de la lana en medio acuoso: Problemas generales y parámetros a controlar*, *Boletín Intexter*, Nº 103, p. 60
- <sup>17</sup> Sánchez Martín, J.R., 2003. *Colorantes reactivos para lana: un estudio comparativo con los colorantes al cromo*. *Revista de la Industria Textil*, nº 408, 88-95
- <sup>18</sup> Cegarra, J., Puente, P. y Valldeperas, J., 1981. *Fundamentos científicos y aplicados de la tintura de materias textiles*, Ed. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, pp. 540-634

- <sup>19</sup> Lewis, D.M. (ed), 1992. *Wool dyeing*. Ed. Society of Dyers and Colourists, Bradford (UK), p. 372
- <sup>20</sup> Gacén Guillén, J., 1991. *Fibras Textiles. Propiedades y descripción*. Ed. Universidad Politécnica de Cataluña. Tarrasa
- <sup>21</sup> Shaikh, I.A. (Ed.), 2005. *A practical handbook on textile fibers*. Ed. Textile-Info Society, Lahore (Pakistan), pp. 156-157.
- <sup>22</sup> Sandoz, 1981. *La laine (manuel 9012/81)*. Ed. Sandoz Basilea (Suiza), pp. 4-10.
- <sup>23</sup> IMI-TECH, 1996. *Fibras, cat. Filtration*, Lenzing, Austria, p. 84
- <sup>24</sup> Menachem L. & Sello S.B., 1983. *Chemical Processing of Fibers and Fabrics. Funcional Finishes Part B*. Ed. Marcel Dekker, INC. New York, U.S.A.
- <sup>25</sup> Adanur S. & Wellington Sears, 1995. *Handbook of Industrial Textiles*. Technomic Publishing Co., Pennsylvania, U.S.A.
- <sup>26</sup> Martínez de las Marías, P., 1976. *Química y física de las fibras textiles*. 1ª edición. Ed. Alhambra S.A., Madrid, p. 48.
- <sup>27</sup> Miró Plans, P., 1961. *Determinación de alteraciones químicas de la lana*. Sección de Publicaciones de la E.T.S. de Ingenieros Industriales, Tarrasa, pp. 19-25.
- <sup>28</sup> Gacén Guillén, J., 1989. *Lana: Parámetros químicos*. Ed. Universidad Politécnica de Cataluña. Tarrasa
- <sup>29</sup> Hernández M., 1991. *La lana y su mundo*. Edita el Autor. Béjar (Salamanca), p. 108.
- <sup>30</sup> Ibídem
- <sup>31</sup> <http://tallerdypi1.blogspot.com.es/2014/05/tpn-2-filtro-imagenes-y-videos.html> (consultado el 12/11/2015)
- <sup>32</sup> Cegarra, J., 1997. *Fundamentos de tecnología y blanqueo de materias textiles*. Ed. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona p. 305.
- <sup>33</sup> Canales Canales C. y otros, 2004. *Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España del sector textil*. Centro de Publicaciones de la Secretaria General Técnica del Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- <sup>34</sup> Malvar, J., Ovejero, J., S. Patrocinio, A., Ramírez A. y Sánchez, J.R., 2009. Caracterización de los residuos fibrosos de una instalación de lavado y peinado de lana, *Revista de Química Textil* nº 193, 22-32.
- <sup>35</sup> Sánchez Patrocinio, A., Ovejero, J., y Sánchez, J.R., 2009. Posibilidades de valoración de los residuos textiles de un lavadero y peinaje de lana, *Revista de la Industria Textil*, nº 472-473, 43-50.
- <sup>36</sup> Zhenwei S., Gui Yun T., Chunhua G. 2006. A machine vision system for on-line removal of contaminants in wool. *Mechatronics* 16. Pp. 243–247
- <sup>37</sup> McKinnon J., 1996. *Some chemistry...*, *Op.Cit.*
- <sup>38</sup> Sengupta A., Behera J., 2014. Comprehensive view on chemistry, manufacturing & applications of lanolin extracted from wool pretreatment. *American Journal of Engineering Research (AJER)* 03(07), pp. 35-36
- <sup>39</sup> McKinnon J., 1996. *Some chemistry of the wool industry scouring and yarn production. Cap V-animal products*. Wool Research Organization of New Zealand. WRONZ p. 16
- <sup>40</sup> <http://www.quiminet.com/articulos/conozca-la-amplia-gama-de-usos-y-aplicaciones-de-la-lanolina-3402786.htm> consultada el día 3 de junio de 2015

- <sup>41</sup> <http://www.suruchemical.co.in/index.php?module=product&action> consultada el día 3 de junio de 2015
- <sup>42</sup> Catálogo FabriQuímica S.R.L. *Materias primas cosméticas* v4-2015. Buenos Aires (Argentina), p. 9
- <sup>43</sup> [http://ec.europa.eu/food/food/animalnutrition/feedadditives/registeradditives\\_en.htm](http://ec.europa.eu/food/food/animalnutrition/feedadditives/registeradditives_en.htm). Lista positiva de aditivos. Consultada el día 5 de junio de 2015
- <sup>44</sup> Karmakar, S.R., 1999. *Chemical technology in the pre-treatment processes of textiles*. Ed. Elsevier B.V., Vol. 12, pp. 86–131
- <sup>45</sup> Halliday L.A., 2002. *Wool scouring, carbonising and effluent treatment*. Wool Science and Technology. Woodhead Publishing Ltd., pp. 21-59
- <sup>46</sup> Kadam V.V., Goud V., Shakyawar D.B. 2013. Ultrasound scouring of wool and its effects on fibre quality. *Indian Journal of Fibre and Textile Research*. Vol. 38, pp. 410-414
- <sup>47</sup> Bahtiyari M.I., Duran K., 2013. A study on the usability of ultrasound in scouring of raw wool. *Journal of Cleaner Production* 41 pp. 283-290
- <sup>48</sup> McNeil S.J., McCall R.A., 2011. Ultrasound for wool dyeing and finishing. *Ultrasonics Sonochemistry* nº 18 pp. 401-406
- <sup>49</sup> Canales Canales C. y otros, 2004. *Guía de Mejores...*, *Op.Cit.* Tablas pp. 55 – 56
- <sup>50</sup> Bayona Termens, J. M., Erra Serrabasa, P., Alzaga Morales, R., Juliá Ferrés, M.R., Garde Vidal, F. y Domínguez Fernández, C. *Procedimiento de obtención de lanolina y lana exentas de plaguicidas*. Solicitud de Patente número 009901361. Fecha de publicación 01.12.2001. Oficina Española de Patentes y Marcas
- <sup>51</sup> Cygnarowicz-Provost, M., King J.W., Marmer W.N. y Magidma P., 1994. Extraction of woolgrease with supercritical Carbon Dioxide. *Journal of the American Oil Chemists (JAOCS)*, 71 (2) Febrero. Pp. 223 - 225
- <sup>52</sup> Alzaga R., Pascual E., Erra P., Bayona J.M., 1999 Development of a novel supercritical fluid extraction procedure for lanolin extraction from raw wool. *Analytical Chimica Acta*. 38, pp 39 - 48
- <sup>53</sup> Anderson C.A. y Warner J.J., 1983. The dual-solvent extraction of wool grease with Hexane and Aqueous Isopropanol. CSIRO Division of Textile Industry. *Journal of the American Oil Chemists (JAOCS)*, 60 (12)p. 1997
- <sup>54</sup> López-Mesas, M; Carrillo, F; Gutiérrez, M.C. y Crespi, M., 2007. Alternative methods for the wool wax extraction from wool scouring wastes. *Grasas y aceites* 58 (4) Octubre – diciembre pp. 402 - 407
- <sup>55</sup> Jingchang Y., Zhou M., Xianyang H. 2002. *Method for recovering lanoline from wool washing waste water by ceramic film treatment*. Patente CN1364864 (A)
- <sup>56</sup> Stewart, R.G. and Story, L.F. 1980 Woolgrease. A review of its recovery and utilization. *Tech. Papers*, vol 4, Wool Research Organisation of New Zealand WRONZ
- <sup>57</sup> McKinnon J., 1996. *Some chemistry...*, *Op.Cit.*
- <sup>58</sup> Sistema comercial utilizado por la empresa GARAP. Obtenido el 14 de mayo de 2015 de <http://garap.pagesperso-orange.fr/references.html>
- <sup>59</sup> Wood, G.F., Pearson A.J.C, and Christoe J.R.. 1979 *The CSIRO Lo-Flo Process, an in-process effluent treatment for aqueous wool scouring*. CSIRO Division of Textile Industry. Report nº G39

- <sup>60</sup> Sengupta A., Behera J., 2014. Comprehensive view on chemistry, manufacturing & applications of lanolin extracted from wool pretreatment. *American Journal of Engineering Research (AJER)* 03(07), pp. 37-38
- <sup>61</sup> Kiely, G. 1999. *Ingeniería Ambiental. Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. Ed. Mc Graw-Hill. Madrid
- <sup>62</sup> Henry, J.G.; Heinke, G. W. 1999. *Ingeniería Ambiental*. Ed. Prentice Hall. México
- <sup>63</sup> Shannon W.T. & Buisson D.H. 1980. Dissolved air flotation in hot water. *Water Research* Vol. 14, pp. 759-765
- <sup>64</sup> McLachlan, C.N.S., Smith D.K.W. y Webb R.J. 1980. The treatment of wool scour effluent—I. Removal of colloidal dirt. *Water Research* Vol. 14. pp. 729 - 733
- <sup>65</sup> Mercz, T.I. y Cord-Ruwisch R. (1997) Treatment of wool scouring effluent using anaerobic biological and chemical flocculation. *Water Research* Vol. 31, No. 1, pp. 170-178
- <sup>66</sup> Labanda J. y Llorens J. 2008. Wool scouring waste treatment by a combination of coagulation–flocculation process and membrane separation technology. *Chemical Engineering and Processing* 47 (2008), pp. 1061–1068
- <sup>67</sup> Hashem M.A., Aimaghrabi M.N., 2013. Theoretical and experimental studies for wool wax. *International Journal of Physical Sciences*. Vol 8 (41) pp. 1954 - 1965
- <sup>68</sup> Hashem M.A., Aimaghrabi M.N., 2013. Modelling mass transfer coefficients during drop formation. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. Vol 6 (1) pp. 7 - 13
- <sup>69</sup> Metcalf & Eddy, Inc. 2000 *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*. 3ª edición. Ed. Mc Graw-Hill, Madrid
- <sup>70</sup> Ramalho, R.S., 2003 *Tratamiento de aguas residuales*. Ed. Reverté. Barcelona, p. 152
- <sup>71</sup> Mory M., 2011. *Fluid Mechanics for Chemical Engineering*. John Wiley & Sons. Inc. USA. p. 380
- <sup>72</sup> Mory M., 2011. *Fluid Mechanics...*, *Op.Cit.* p. 387
- <sup>73</sup> Metcalf & Eddy, Inc. 2000. *Ingeniería de aguas...*, *Op.Cit.* Tablas 12-14 y 12-15
- <sup>74</sup> <http://es.slideshare.net/Shvana/coloides-35215239> consultada el 10 de febrero de 2014
- <sup>75</sup> Barrios Márquez A. 2014. *Implantación de sistema de supervisión y control en una depuradora industrial con extracción de lanolina*. Trabajo Fin de Carrera de Ingeniería Técnica Industrial. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Béjar, dirigido por Mario Francisco Sutil y Alberto Sánchez Patrocinio
- <sup>76</sup> <http://www.scada.com/es-ES/> consultada el día 3 de abril de 2015
- <sup>77</sup> Metcalf & Eddy, 2000. *Ingeniería de aguas...*, *Op.Cit.*
- <sup>78</sup> Rodier, J., 1981, *Análisis de las Aguas*. Ed. Omega. Barcelona
- <sup>79</sup> Sawyer, C.N.; Mc Carty, P.L.; Parkin, G.F., 1994. *Chemistry for Environmental Engineering*. 4ª edición. Ed. Mc Graw-Hill. Singapur
- <sup>80</sup> *Degremont: Manual técnico del agua*. 4ª edición (1979). Artes Gráficas Grijelmo, S.A. Uribitarte. Bilbao
- <sup>81</sup> APJA-AWWA-WPCF. 1992 *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Ed. Díaz de Santos, Madrid
- <sup>82</sup> Spiro, T.G.; Stigliani, W.M., 2004. *Química medioambiental*. Ed. Pearson Educación, S.A.. Madrid

<sup>83</sup> Norma UNE 77004, 2002. *Calidad del agua. Determinación de la demanda química de oxígeno (DQO). Método del Dicromato*. Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR, Madrid.

<sup>84</sup> Crespi, M. y Huertas, J. A. Determinación simplificada de la demanda química de oxígeno por el método del Dicromato. *Boletín Intexter* 89/1986, pp. 89-97

<sup>85</sup> Norma UNE - EN 872, 1996. *Calidad del agua. Determinación de los sólidos en suspensión. Método de filtración por filtro de fibra de vidrio*. Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR, Madrid.

<sup>86</sup> Kirschman, H.D. y Pomeroy R., 1949. Determination of oil in oil field waste waters. *Analytical Chemistry*. 21:793

<sup>87</sup> Método analítico de empresa. 2003. PEINAJE DEL RIO LLOBREGAT. San Fruitós del Vallés. Barcelona

<sup>88</sup> Método analítico de empresa. 2003. PEINAJE DEL RIO LLOBREGAT. San Fruitós del Vallés. Barcelona

<sup>89</sup> Método analítico de empresa. 2013 TEXAPEL S.L. Barcelona

<sup>90</sup> Villavecchia V., 1949. *Química analítica aplicada II*. Ed. Gustavo Gili. Barcelona. p. 407

<sup>91</sup> American Society for Testing and Materials ASTM. <http://www.astm.org/> consultada el 13 de junio de 2015

<sup>92</sup> ASTM D 1544, DIN EN ISO 4630-1

<sup>93</sup> Ang H.M. y Himawan P., 1994. Treatment of wool scouring wastewater for grease removal. *Journal of Hazardous Materials* 37. pp. 117-126

<sup>94</sup> Bratby J. y Marais G.V.R., 1975. Saturator performance in dissolved-air (pressure) flotation. *Water Research* Vol. 9, pp. 929-936