



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

# Centrifugación industrial

<b>Apellidos, nombre</b>	Castelló Gómez, Marisa (mcasgo@upv.es) Pérez Esteve, Édgar (edpees@upv.es) Barrera Puigdollers, Cristina (mbarpu@tal.upv.es) Betoret Valls Noelia (noebeval@tal.upv.es) Andrés Grau, Ana (aandres@tal.upv.es)
<b>Departamento</b>	Departamento de Tecnología de Alimentos
<b>Centro</b>	Universitat Politècnica de València



## 1 Resumen

En este artículo se presentan los fundamentos de la centrifugación como una técnica de separación por velocidad, los diferentes tipos de centrífugas, así como algunas aplicaciones en el sector agroalimentario y/o biotecnológico. Además, se introducen las ecuaciones que relacionan la velocidad de centrifugación con las características del material a separar, y otros parámetros de gran utilidad para el escalado de equipos de nivel de laboratorio a nivel industrial.

## 2 Introducción

La centrifugación permite la separación de materiales con diferentes densidades, gracias a la aceleración del proceso de sedimentación por la acción de una fuerza centrífuga. Así, pueden separarse partículas más pequeñas (0,1-100  $\mu\text{m}$ ) con mayor rapidez que por sedimentación. En las industrias agroalimentarias y biotecnológicas, el uso de las máquinas centrífugas está muy extendido, especialmente por su alta eficiencia de separación. Algunas de sus aplicaciones son:

- Separación de células de caldos biológicos
- Separación de precipitados proteicos
- Recuperación de productos insolubles
- Desfangado de fluidos
- Clarificación de vino, cerveza, zumos y néctares
- Eliminación de la nata en la leche
- Separación del aceite de las borras (winterizado)

## 3 Objetivos

Una vez que te leas con detenimiento este documento, serás capaz de:

- **Seleccionar el tipo de centrífuga** más adecuado en función del material con que se va a trabajar
- **Determinar la velocidad de la centrífuga** según las necesidades del producto a separar
- Realizar el **paso de escala** de una centrífuga de laboratorio a una industrial manteniendo las características de las partículas y de la agitación.

## 4 Desarrollo

### *¿Cómo vamos a abordar este tema?*

En primer lugar, se comenta la teoría de la centrifugación, donde se explican las ecuaciones matemáticas que permiten establecer los parámetros de trabajo de los equipos de centrifugación. A continuación, se presenta una descripción de los tipos



de centrífugas que se pueden encontrar en la industria, clasificándolas en dos grupos: los equipos de centrifugación-filtración y los equipos de sedimentación centrífuga.

## 4.1 Teoría de la centrifugación

### 4.1.1. Ley de Stokes

La filtración y la sedimentación centrífuga constituyen los principios básicos de los equipos de centrifugación que se emplean para separar líquidos, o líquidos de sólidos. La sedimentación de las partículas a través de un líquido se rige por la **ley de Stokes** (ecuación 1), donde la velocidad de caída es directamente proporcional al tamaño de la partícula, así como a la diferencia de densidades entre las partículas y el líquido, y también a la fuerza de la gravedad, e inversamente proporcional a la viscosidad del líquido.

$$u_g = \frac{\rho_P - \rho_f}{18\mu} D_p^2 g \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

$u_g$ : velocidad de sedimentación bajo gravedad

$\rho_f$ : densidad del fluido

$\rho_P$ : densidad de la partícula

$\mu$ : viscosidad del líquido

$D_p$ : el diámetro de la partícula

$g$ : aceleración de la gravedad

La eficacia de la centrifugación se analiza comparando la velocidad que alcanzarían las partículas en una centrífuga y la velocidad de sedimentación que se produciría bajo la influencia únicamente de la gravedad. En una centrífuga la velocidad de sedimentación se obtiene mediante la ecuación 2:

$$u_c = \frac{\rho_P - \rho_f}{18\mu} D_p^2 \omega^2 r \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

$u_c$ : velocidad de sedimentación en la centrífuga

$\omega$ : velocidad angular de la cesta en  $\text{rad s}^{-1}$

$r$ : radio del tambor de la centrífuga

$\rho_f$ : densidad del fluido

$\rho_P$ : densidad de la partícula

$\mu$ : viscosidad del líquido

$D_p$ : el diámetro de la partícula

## 4.1.2. Efecto centrífugo (factor Z) o número G

Por otra parte, la relación entre la velocidad de sedimentación en la centrífuga y la velocidad de sedimentación bajo gravedad se conoce como **efecto centrífugo o número G**, también denominado como factor Z (ecuación 3):

$$Z = \frac{r \cdot \omega^2}{g} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

Z: efecto centrífugo, factor Z o número G

$\omega$ : velocidad angular

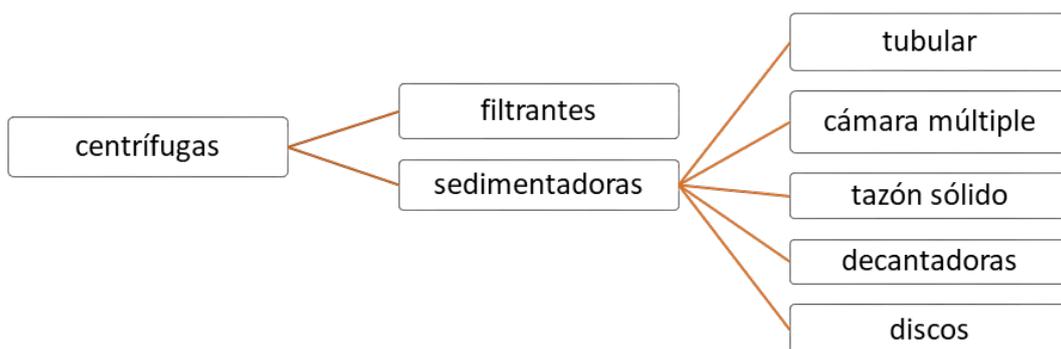
g: aceleración de la gravedad

Por tanto, la fuerza desarrollada en una centrífuga es Z veces la fuerza de la gravedad.

A diferencia de las centrífugas industriales, en las que el factor Z es de 300-16.000, en las centrífugas de laboratorio este factor puede alcanzar valores de 500.000.

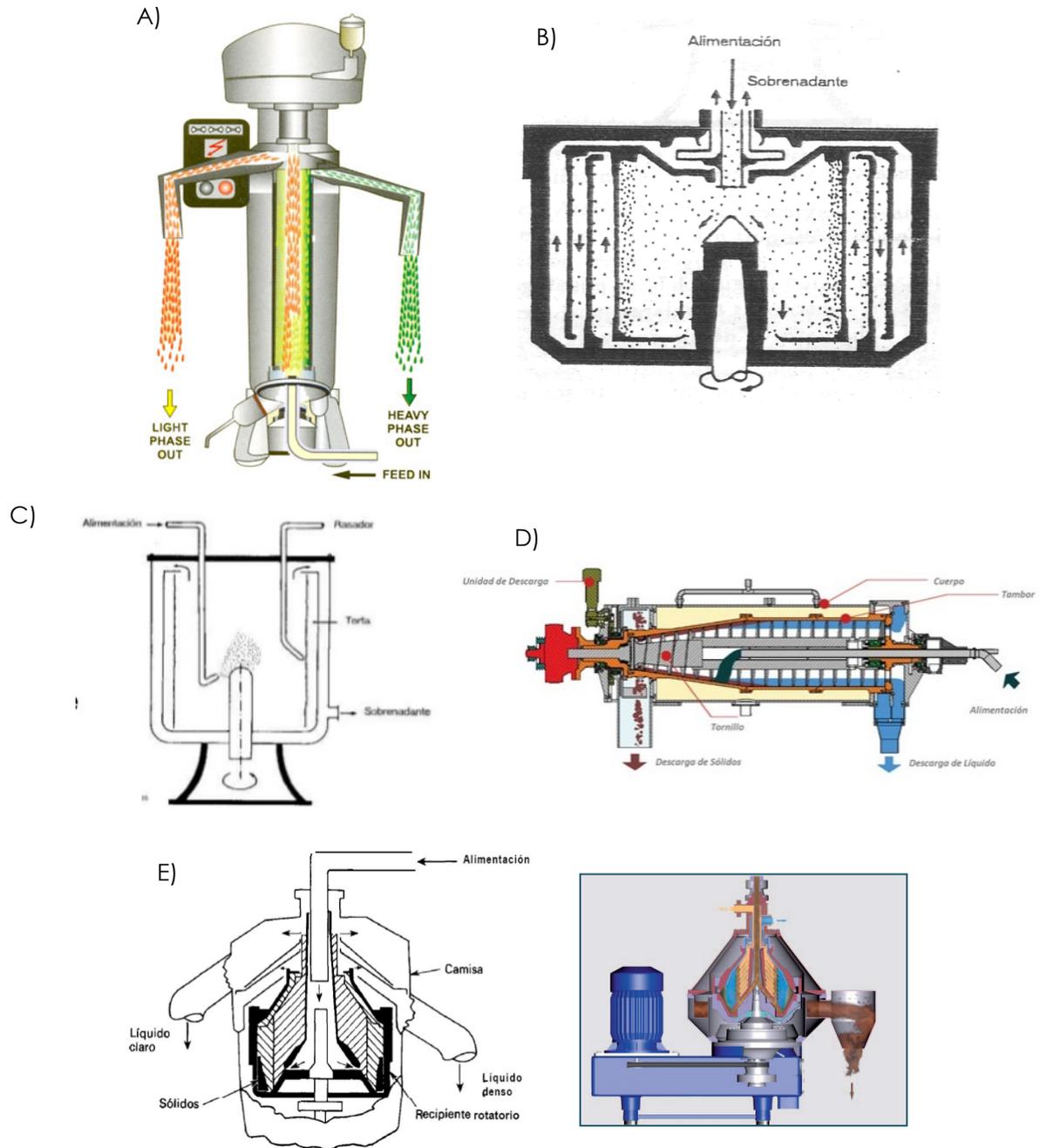
## 4.2. Tipos de centrífugas industriales

La principal clasificación de los equipos de centrifugación se basa en el diseño de su tazón o tina, y en la forma en que se descargan los sólidos sedimentados (Figura 2). Las más habituales en la industria son las centrífugas sedimentadoras.



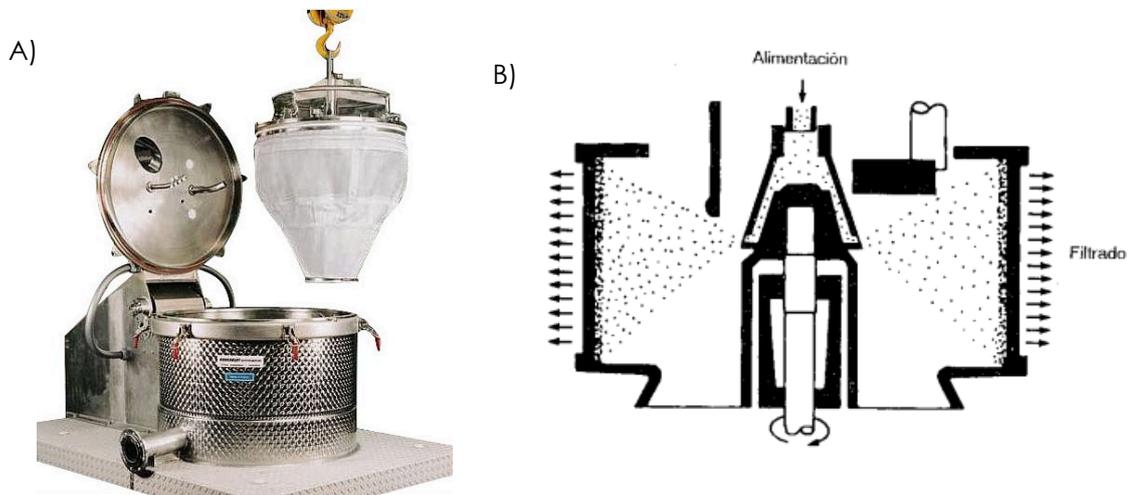
**Figura 2.** Clasificación de las centrífugas (Tejeda et al., 1995)

En la Figura 3 se presentan ejemplos de centrífugas sedimentadoras.



**Figura 3.** Ejemplos de equipos de centrifugas sedimentadoras (Garibay, 2014): A) Centrifuga tubular (Ibtihal, 2015), B) Centrifuga de cámara múltiple C) De tazón o de canasto (Garibay, 2014), D) Decantadoras (Corima, 2017) y E) de discos

Por otra parte, los equipos de filtración-centrífuga están formados por una canasta perforada cubierta con un medio filtrante que gira a altas velocidades, de manera que los sólidos se depositan sobre el medio filtrante y sale el líquido clarificado. En la Figura 4 se presenta un ejemplo de estos equipos.



**Figura 4.** Ejemplo de equipo de filtración-centrifugación: A) Centrífuga vertical con descarga por arriba (Rousselet-Robatel, 2017). B) Esquema de centrífuga de canasta perforada (Tejeda et al., 1995; Garibay, 2014)

## 4.3 Parámetros de diseño y escalado de centrífugas

### 4.3.1 Factor sigma $\Sigma$

Físicamente, el factor sigma ( $\Sigma$ , en  $m^2$ ) representa el área que se necesitaría para sedimentar por gravedad un caudal equivalente al que opera en una centrífuga; es un parámetro característico de cada tipo de centrífuga. En centrífugas continuas se recurre a la ecuación 4:

$$\Sigma = \frac{Q}{2u_g} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde,  $\Sigma$  es el factor sigma, Q es el caudal volumétrico de alimentación y  $u_g$  es la velocidad terminal en un campo gravitatorio.

Sirve para comparar el rendimiento de centrífugas de diferente tamaño o para comparar el rendimiento de una misma centrífuga operando a distinta velocidad. Si dos centrífugas (1 y 2) tienen la misma efectividad (% de recuperación o rendimiento), se cumple la siguiente relación (ecuación 5):

$$\frac{Q_1}{\Sigma_1} = \frac{Q_2}{\Sigma_2} \quad (\text{Ec. 5})$$

El factor sigma ( $\Sigma$ ) depende del diseño de la centrífuga y también de la velocidad de operación ( $\omega$ ).

Para una **centrífuga de discos** este factor se calcula con la ecuación 6:



$$\Sigma = \frac{2\pi\omega^2(N-1)}{3g\tan\theta} (r_2^3 - r_1^3) \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

N: número de discos

$r_1$  y  $r_2$ : radio interior y exterior del disco, respectivamente

$\omega$ : velocidad angular

$\theta$ : ángulo del cono mitad del disco

g: aceleración de la gravedad

Para una **centrífuga de cesta tubular** este factor se obtiene con la ecuación 7:

$$\Sigma = \frac{2\pi\omega^2 br^2}{g} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde

r: radio medio

b: longitud de la cesta

$\omega$ : velocidad angular

g: aceleración de la gravedad

Veamos un par de casos prácticos para ver cómo se manejan estas ecuaciones.

**Ejemplo 1.** Pequeñas partículas de un alimento con un diámetro de  $10^{-2}$  mm y densidad  $1,03 \text{ g/cm}^3$  se encuentran suspendidas en un líquido de densidad  $1,00 \text{ g/cm}^3$ . La viscosidad del líquido es  $1,25 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ . Para separar las partículas se utiliza una centrífuga tubular de 70 cm de longitud y 11,5 cm de radio. Si la centrífuga opera a 10000 rpm, calcular el caudal de alimentación límite que permite separar las partículas de alimento.

**DATOS:**

$$D_p = 0,00001 \text{ m}$$

$$b = 70 \text{ cm}$$

$$\rho_p = 1030 \text{ kg/m}^3$$

$$r = 11,5 \text{ cm}$$

$$\rho_L = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\omega = 10000 \text{ rpm}$$

$$\mu = 0,00125 \text{ kg/ms}$$

$$\omega = 1047,2 \text{ s}^{-1}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

RESOLUCIÓN:

1º) Obtener el factor sigma de la centrífuga tubular con la ecuación 7:  $\Sigma = 6502 \text{ m}^2$

2º) Calcular la velocidad de sedimentación bajo gravedad ( $u_g$ ) con la ecuación 1:  $u_g = 1,31 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$

3º) Con los valores anteriores, despejar el caudal (Q) de la ecuación 4:  $Q = 0,017 \text{ m}^3/\text{s}$



**Ejemplo 2.** Se utiliza una centrífuga de discos a escala piloto para la recuperación de una bacteria. La centrífuga contiene 25 discos con unos diámetros interior y exterior de 2 y 10 cm, respectivamente. El ángulo mitad del cono es 35°. Cuando opera a una velocidad de 3000 rpm con una velocidad de alimentación de 3,5 L/min se recupera el 70% de las células. Si se utiliza una centrífuga de mayor tamaño para el tratamiento industrial de 80 L/min, ¿qué velocidad de operación se necesita para alcanzar el mismo rendimiento de sedimentación si la centrífuga contiene 55 discos con un diámetro exterior de 15 cm y un diámetro interior de 4,7 cm, y un ángulo mitad de cono de 45°?

**¡Importante!**: el ángulo debe ir en radianes y la velocidad angular en  $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$

RESOLUCIÓN:

**Centrífuga discos escala piloto (1)**

N= 25 discos  
 $r_1= 0,01$  m  
 $r_2= 0,05$  m  
 $\theta= 35^\circ$   
 $\omega_1= 3000$  rpm  
 $Q_1= 3,5$  L/min  
 $R_1= 70\%$

**Centrífuga industrial (2)**

N= 55 discos  
 $r_1= 0,0235$  m  
 $r_2= 0,075$  m  
 $\theta= 45^\circ$   
 $\omega_2= ?$   
 $Q_2= 80$  L/min  
 $R_2= 70\%$

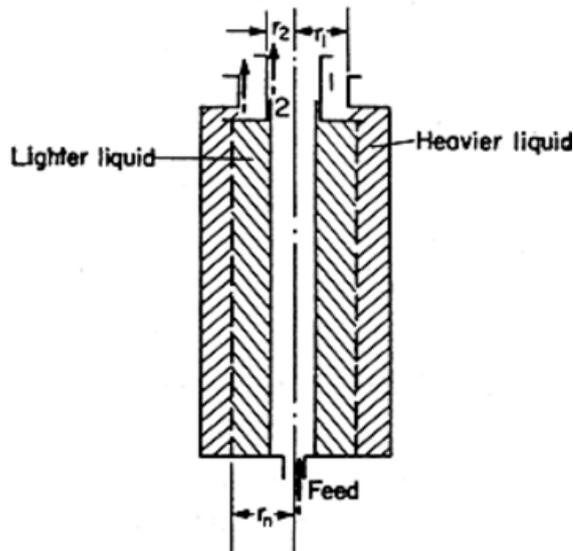
1º) Obtener el factor sigma de la centrífuga de la escala piloto  $\Sigma_1$  utilizando la ecuación 6. El resultado será:  $\Sigma_1=89,56 \text{ m}^2$

2º) Sabiendo que se debe mantener la misma efectividad, aplicando la ecuación 5 para la equivalencia de caudales con los factores sigma y la ecuación 6 para sacar el factor sigma de la centrífuga industrial, podremos despejar el valor de la velocidad de operación de la centrífuga industrial:

$$\frac{3,5}{89,56} = \frac{80}{0,00471409\omega_2^2} \quad \omega_2=659 \text{ rad/s} = \mathbf{6293 \text{ rpm}}$$

### 4.3.2. Dimensionado de una centrífuga tubular

La centrífuga tubular (Figura 1) es una de las más empleadas en la industria láctea, en la que la leche, que es una emulsión, se separa por centrifugación en crema y leche desnatada. En el recipiente de la centrífuga debe haber una superficie de separación entre la crema y la leche desnatada que viene dada por la siguiente expresión (ecuación 8):



$$r_n^2 = \frac{\rho_A \cdot r_1^2 - \rho_B \cdot r_2^2}{\rho_A - \rho_B} \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

$r_n$ : radio de la zona neutra

$\rho_A$ : densidad del líquido más pesado

$\rho_B$ : densidad del líquido menos pesado

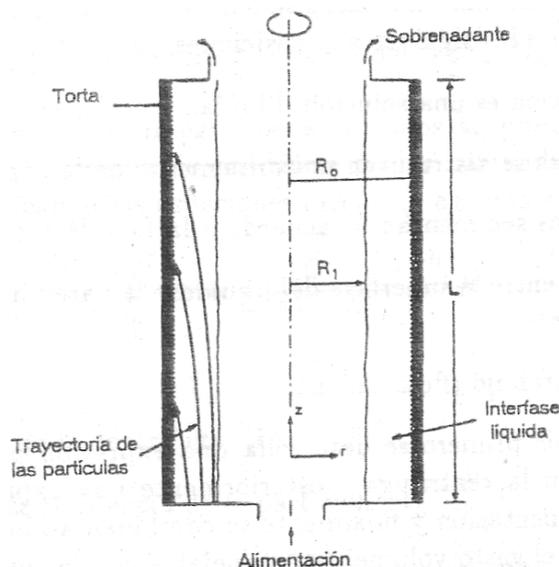
$r_1$ : radio en el punto de descarga del líquido denso

$r_2$ : radio en el punto de descarga del líquido ligero

**Figura 1.** Detalle de los parámetros a considerar en el diseño de una centrífuga tubular (Gómez, 2015)

#### 4.3.2.1. Estimación del tiempo de residencia y de sedimentación

En el diseño de centrífugas tubulares los tiempos de residencia y de sedimentación del caldo que contiene las partículas a separar, se obtiene por las ecuaciones 9 y 10, respectivamente (Figura 2):



$$t_r = \frac{\pi(R_0 - R_1)L}{Q} \quad (\text{Ec. 9})$$

$$t_s = \frac{18\mu}{D_p^2 \Delta\rho \omega^2} \ln \frac{R_0}{R_1} = \frac{g}{v_g \omega^2} \ln \frac{R_0}{R_1} \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:

$R_0$  es la distancia radial del eje de giro a la superficie del líquido

$R_1$  es la distancia del eje de giro a la pared del tazón

$Q$ : caudal

$L$ : longitud de la centrífuga

$\mu$ : viscosidad del líquido

$D_p$ : el diámetro de la partícula

$\Delta\rho$ : diferencia de densidad entre el fluido y la partícula

$g$ : aceleración de la gravedad

$\omega$ : velocidad angular

$v_g$ : velocidad de sedimentación por gravedad

**Figura 2.** Cálculo del tiempo de residencia ( $t_r$ ) y de sedimentación ( $t_s$ ) en centrífugas tubulares



#### 4.3.2.2. Estimación del gasto volumétrico

El gasto manejable ( $Q$ ) para el 100% de sedimentación en el diseño de centrífugas tubulares puede obtenerse con la ecuación 11:

$$Q = v_g \left[ \frac{\pi \omega^2 L}{g} \frac{R_0^2 - R_1^2}{\ln \frac{R_0}{R_1}} \right] \text{ (Ec. 11)}$$

Si el gasto manejable en este tipo de centrífugas es del 50% ( $Q'$ ), la predicción del mismo se llevaría a cabo por la ecuación 12:

$$Q' = 2v_g \left[ \frac{\pi \omega^2 L}{g} \frac{(R_0^2 - R_1^2)}{\ln \frac{2R_0}{R_0^2 + R_1^2}} \right] \text{ (Ec. 12)}$$

Donde:  $v_g$ : velocidad de sedimentación por gravedad,  $R_0$  es la distancia radial del eje de giro a la superficie del líquido,  $R_1$  es la distancia del eje de giro a la pared del tazón,  $L$  es la longitud de la centrífuga,  $\omega$  es la velocidad angular y  $g$  es la aceleración de la gravedad.

## 5 Cierre

A lo largo de este objeto de aprendizaje, hemos visto los fundamentos de la teoría de la centrifugación que dan lugar a las herramientas matemáticas que permiten dimensionar distintos tipos de centrífugas industriales. Por otra parte, también se han presentado las ecuaciones necesarias para estimar las variables de operación en función del caudal de producto a procesar, aplicándolas a algunos ejemplos.

## 6 Bibliografía

- [1] Ibtihal, O. (2015). Centrifuge. [https://www.slideshare.net/gautamparmar18/cell-separation-by-centrifugation?next\\_slideshow=1](https://www.slideshare.net/gautamparmar18/cell-separation-by-centrifugation?next_slideshow=1)
- [2] Díaz, M. "Ingeniería de bioprocesos". Capítulo 11. Separación de Productos (I). Por velocidad y en mallas. Ediciones Paraninfo, 2012 pág. 189.
- [3] Corima, (2017). Decantadora centrífuga. Disponible en: <http://www.shueiz.com/detalle.php?a=decantadora-centrifuga&t=21&d=64>
- [4] Garibay, G. (2014). Centrifugación. Procesos de Bioseparación. UPEMOR. Disponible: <https://es.slideshare.net/guillermogaribay1447/generalidades-centrifugacin>
- [5] Gómez, J. (2015). Centrifugación. Disponible en: <https://es.slideshare.net/juangomez3726613/centrifugacion-1>
- [6] Urbina vinos Blog (2016). Centrifugación de Mostos y Vinos. Disponible en: <http://urbina vinos.blogspot.com.es/2012/01/centrifugacion-de-mostos-y-vinos.html>.
- [7] Rousselet-Robatel, (2017). Disponible en: <http://www.rousselet-robotel.com/espanol/products/vert-basket-top-unload-centrifuges.php>
- [8] Tejeda, O.A., Montensinos, O.R.M., Guzmán O.R. (1995). Bioseparaciones. Capítulo 4. Centrifugación. Editorial Unison. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/104142017/Tejeda-Bioseparaciones>