

Las centrífugas de discos: una revisión global

Disk stack centrifuges: a comprehensive review

Amaury Pérez Sánchez ^{1*}, Rutdali Maria Segura Silva², Eddy Emilio Bover Fuentes³

Laura de la Caridad Arias Águila⁴; Lizthalia Jiménez Guerra⁵; Laura Thalía Álvarez Lores⁶

¹ Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba; amaury.perez84@gmail.com . <https://orcid.org/0000-0002-0819-6760>

² Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología de Camagüey, Camagüey, Cuba. ruthdaly.segura@cigb.edu.cu; <https://orcid.org/0000-0003-2821-154X>

³ Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología de Camagüey, Camagüey, Cuba. eddy.bover@cigb.edu.cu; <https://orcid.org/0000-0001-8715-6048>

⁴ Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba; aguilaariaslaura@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-6494-9747>

⁵ Base Depósito 540 CUPET, Camagüey, Cuba; lizthalia.jimenez@reduc.edu.cu; <https://orcid.org/0009-0004-4537-2366>

⁶ Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba; laura.alvarez@reduc.edu.cu; <https://orcid.org/0009-0007-2643-018X>

* Correspondencia: amaury.perez84@gmail.com; Tel. : +53 52952591

<https://doi.org/10.70373/RB/2026.11.02.6>

Resumen

La centrífuga de discos pertenece a un tipo de centrífuga de sedimentación, la cual es ampliamente usada en las industrias química, biofarmacéutica, alimenticia y de protección ambiental, entre otras. El presente artículo de revisión se enfoca en las particularidades y detalles de las centrífugas de discos, con énfasis en su evaluación para diferentes procesos de escala piloto e industrial, las ecuaciones que las caracterizan, su forma de operación, los estudios de escalado y *scaledown* realizados hasta la fecha, sus particularidades operacionales y geométricas, su clasificación con respecto a la forma de descarga de sólidos, y otros estudios específicos realizados sobre estos tipos de centrífugas. Es un equipo con una elevada flexibilidad, robustez y capacidad de procesamiento empleado fundamentalmente para la cosecha/separación de células y clarificación de caldos de fermentación para el recobrado tanto de biomasa en la fase sólida como de metabolitos contenidos en el sobrenadante, entre otras aplicaciones. De su óptima y favorable operación dependerá el éxito de las operaciones y procesos posteriores de recobrado/purificación, desde el punto de vista técnico-económico. Sin embargo, deberá estudiarse en profundidad la aplicación de centrífugas de discos para procesar material biológico sensible al cizallamiento, con el fin de lograr una cosecha exitosa que no perjudique su integridad, actividad biológica y rendimiento.

Palabras clave: centrifugación; centrífuga de discos; escalado; *scale-down*; teoría Sigma; operación; evaluación

Abstract

The disk stack centrifuge is a type of sedimentation centrifuge widely used in the chemical, biopharmaceutical, food, and environmental protection industries, among others. This review article focuses on the particularities and details of disk stack centrifuges, with emphasis on their evaluation for different pilot and industrial scale processes, the equations that characterize them, their mode of operation, the scaling and scale-down studies carried out to date, their operational and geometric peculiarities, their classification with respect to the method of solid discharge, and other specific studies carried out on these types of centrifuges. It is a device with high flexibility, robustness, and processing capacity, primarily used for cell harvesting/separation and clarification of fermentation broths for the recovery of both biomass in the solid phase and metabolites contained in the supernatant, among other applications. The success of subsequent recovery/purification operations and processes from a technical and economic point of view will depend on its optimal and favorable operation. However, the use of disk stack centrifuges to process shear-sensitive biological material will require further study to ensure successful harvesting without compromising its integrity, biological activity, and yield.

Keywords: centrifugation; disk stack centrifuges; scale-up; scale-down; Sigma theory; operation; evaluation

Introducción

La centrifugación es empleada en un variado número de aplicaciones de bioprocesos, entre las cuales se incluyen la clarificación de soluciones a partir de la producción de hormonas, vacunas y enzimas; cosecha de cultivos bacterianos; y la concentración y separación de fracciones de sangre. Las centrífugas típicas usadas para tales aplicaciones son las de diseños de tazón tubular utilizadas en procesos de bajos volúmenes, las decantadoras usadas cuando las concentraciones de los sólidos en el alimentado son elevadas (p. ej. separación de aguas residuales) y las centrífugas de discos ⁽¹⁾.

Las centrífugas de discos son empleadas fundamentalmente para la clarificación o concentración de caldos de cultivo provenientes de fermentaciones comúnmente realizadas en la industria biofarmacéutica. La remoción de biomasa mediante la centrifugación continua es uno de los métodos estándar usados en los procesos que conllevan fermentaciones microbiológicas ⁽²⁾.

Las centrífugas de discos son alimentadas continuamente, aunque la descarga de sólidos se realiza ya sea periódicamente o continuamente. En este caso, una corriente de alimentación es alimentada hacia el tazón de la centrífuga mientras éste rota a una elevada fuerza g. Las diferencias de densidad impulsan a las células hacia la periferia del tazón, en donde se acumulan en el espacio de sólidos, mientras que el sobrenadante libre de células fluye hacia arriba del juego de discos auxiliado por una bomba centrípeta, en donde es colectado para el procesamiento posterior. Se aplica una contrapresión al sobrenadante para asegurar la operación hidroharmética y que el tazón de la centrífuga se mantenga lleno ⁽¹⁾.

Para el caso de la separación líquido-líquido, la centrífuga de discos es un tipo de centrífuga de sedimentación que utiliza un tazón rotando a elevada velocidad para completar la separación, en donde existen múltiples capas de discos dentro del tazón. El espacio entre los discos adyacentes constituye el canal de separación. El líquido presente en el canal de separación genera un campo de fuerza centrífugo fuerte debido a la acción de la rotación del tazón a elevada velocidad, permitiendo que se obtengan dos

líquidos inmiscibles de densidades diferentes bajo diferentes fuerzas centrífugas, logrando así la separación líquido-líquido en el canal de separación del tazón. Tiene las ventajas de su pequeño tamaño y elevada eficiencia de separación, por tanto, es ampliamente usada en las industrias de protección ambiental, biofarmacéutica, alimenticia y química ⁽³⁾.

Para Boychyn *et al.* ⁽⁴⁾ la centrífuga de discos es ampliamente usada en la industria biotecnológica para efectuar el recobrado de células, debris celular, cuerpos de inclusión y precipitados, etc. Sus características claves incluyen la presencia de un juego de discos cónicos en los cuales ocurra gran parte de la separación, así como también su habilidad para realizar descargas intermitentes. Usualmente realiza buena clarificación, pero una deshidratación relativamente pobre comparada con las centrífugas de tazón sólido tales como las tubulares o las de tazón multicámaras.

La deshidratación no es tan eficiente en las centrifugas de discos comparado con otros métodos de centrifugación, tales como los dispositivos de tazón tubular, ya que los sólidos son eyectados en forma de lechada, trayendo consigo etapas adicionales de procesamiento *downstream* ⁽⁵⁾.

La Figura 1 muestra una centrífuga de discos instalada actualmente en una industria biotecnológica cubana, la cual se emplea fundamentalmente para la cosecha de la bacteria *Tsukamurella paurometabola* durante el proceso de producción del bionemático HeberNem[®], y la cosecha de la levadura *Pichia pastoris* como etapa del proceso de producción de la vacuna Gavac[®].



Figura 1. Centrífuga de discos instalada en una empresa biotecnológica cubana

Joseph *et al.* ⁽⁶⁾ mencionan que la centrifugación con discos de flujo continuo es a menudo usada para cosechar procesos con cultivo de células a escala comercial debido a su robustez y costos de operación relativamente bajos. La descarga intermitente suministrada por la centrífuga de discos permite la remoción de una cantidad considerable de células y una elevada cantidad de debris celular en una operación semicontinua. Sin embargo, una de las desventajas de la centrifugación con discos es que en muchos diseños las células entran a la centrífuga a través de una zona de alimentación en donde existen niveles altos de cizallamiento, los cuales pueden dañar las células de mamíferos sensibles al esfuerzo cortante, trayendo consigo la generación de partículas a niveles de submicrón que se transportan hacia el sobrenadante. Estas partículas finas pueden ocasionar el ensuciamiento subsiguiente de los procesos

cromatográficos posteriores, trayendo consigo elevadas presiones en la columna, así como también la reducción de su tiempo de vida y su eficiencia.

La clarificación de caldos de cultivo de células es la primera etapa en la purificación de material biológico. Las partículas sólidas y debris celular son removidas, y el material resultante es procesado a través de filtros de 0,2 μm en la preparación para las etapas de cromatografía de afinidad primarias. Típicamente, la clarificación involucra ya sea la filtración de profundidad de dos etapas o la centrifugación seguida de la filtración de profundidad de una etapa. Se ha reportado que, aunque los filtros de profundidad basados en celulosa de dos etapas son una tecnología de clarificación ya establecida, el costo asociado y las restricciones de espacio limitan los procesos que utilizan solamente la filtración a profundidad a volúmenes de cultivo de 4 000 L. Para capacidades más grandes, los biofabricantes prefieren emplear una centrífuga de discos para la primera etapa de clarificación ⁽⁷⁾.

En la industria cervecera, las centrífugas tienen un número de aplicaciones, tales como ⁽⁸⁾:

- Cosecha de cultivos de levadura no floculantes al final de la fermentación primaria.
- Reducir la cantidad de levadura presente en la cerveza “verde” antes del inicio de la fermentación secundaria.
- Recobrado de la cerveza desde la levadura cosechada.
- Separación del sedimento caliente después de la cocción del mosto.
- Remoción del sedimento frío y levadura al final de la maduración.

En ⁽⁹⁾ se examinan y discuten brevemente el empleo de la centrífuga de discos para lograr los procesos combinados de cosecha de células, disrupción celular y separación de aceite en la industria de las microalgas. Según estos autores, las centrífugas de discos, a pesar de que son aptas para efectuar la separación de los tamaños de partículas y concentraciones usualmente encontradas en las suspensiones de microalgas, tienen un consumo de energía muy alto para ser usadas adecuadamente en la producción de biodiesel a partir de algas en vez de productos de algas comerciales de mayor valor. Estos autores también indican que se ha demostrado que las centrífugas de discos causan daño celular en las levaduras, mientras que el cálculo de los tamaños de micro-remolinos sugiere que las células de las algas pudieran ser dañadas también. Por último, sugieren que, si la fractura de las células de algas es suficiente para liberar aceite, resulta posible que una centrífuga de discos operando como un separador sólido/líquido/líquido pueda lograr, o ser diseñada para lograr, la destrucción de células, separación de aceite y la separación de la biomasa de las algas en una sola operación.

Felfoul y Lopez ⁽¹⁰⁾ refieren que la separación mediante centrífugas de discos es ampliamente usada en la industria láctea para separar los componentes de la leche bovina, mediante la fuerza centrífuga, obteniendo una crema rica en glóbulos de grasa y una fase acuosa de alta densidad generalmente referida como leche descremada, la cual contiene una cantidad muy pequeña de grasa (por debajo de 1,5 g/kg de leche descremada bovina).

Márquez y Maza ⁽¹¹⁾ señalan que, en el proceso de elaboración de aceite de oliva extra virgen, el agua y las impurezas sólidas tienen que ser removidas de la fase aceitosa para evitar la pérdida de aceite y la consiguiente reducción de su calidad mediante procesos de fermentación y oxidación. Esta operación de limpieza usualmente se lleva a cabo en la etapa de clarificación, siendo la centrifugación mediante

centrífugas de discos el método de clarificación más utilizado en la gran mayoría de las fábricas productoras de aceite de oliva. Estos autores también indican que la efectividad de la separación está condicionada por las características del aceite de oliva extra virgen y aquellas variables tecnológicas que lo afectan, tales como la relación agua/aceite y sus temperaturas.

En Zhang et al. ⁽⁵⁾ se indica que debido a su naturaleza continua y elevada área superficial de separación, las centrifugas de discos son capaces de procesar grandes volúmenes de cultivos de alta densidad celular en un tiempo relativamente corto. La aplicación de caudales de hasta 20 000 L/h pudiera ser ventajoso para cosechar elevados volúmenes de mosto para la industria de la carne cultivada. También se infiere que el daño por cizallamiento puede resultar en la lisis celular y la liberación de impurezas no deseadas tales como proteínas celulares. En el contexto de la carne cultivada, la lisis celular es indeseable ya que reduce la viabilidad celular total e impacta potencialmente en la formulación y calidad del producto final. Estos autores indican que las centrifugas de un solo uso tales como GEA kytero® y Alfa Laval CultureOne™ son potencialmente factibles de utilizar en la industria de la carne cultivada debido a que generan bajos niveles de cizallamiento, aunque su naturaleza de un solo uso pudiera prohibir su implementación por motivos de costo y sostenibilidad.

En la actualidad existen algunos trabajos de revisión relacionados con la centrifugación y las centrifugas de discos, específicamente con respecto a la aplicación de centrifugas en la industria farmacéutica ⁽¹²⁾; el uso de centrifugas de discos en la industria de aceite de oliva virgen ⁽¹³⁾ y el diseño, operación y características de los métodos y equipamiento típico usado en la cosecha de cultivos celulares a escala industrial, incluyendo un acápite dedicado a las centrifugas de discos ⁽¹⁴⁾. Sin embargo, para conocimiento de los autores no existe un artículo de revisión exhaustivo dedicado específicamente a las centrifugas de discos, el cual maneje temáticas relacionadas con su operación, clasificación, evaluación, escalado, correlaciones que las caracterizan, y otros tópicos de interés.

En este contexto, el presente estudio de revisión tiene como objetivo recopilar información actualizada relacionada con las centrifugas de discos, con respecto a su clasificación, formas de operación, ecuaciones que las caracterizan, características operacionales y geométricas, evaluaciones realizadas sobre estas centrifugas para diferentes aplicaciones y procesos tanto a escala piloto como industrial, estudios de escalado y *scale-down*, así como otras investigaciones específicas.

Materiales y métodos

La presente investigación bibliográfica se dividió en tres fases, relacionadas con el análisis bibliométrico de los tópicos que se tendrán en cuenta para elaborar el artículo, los cuales son:

- Evidencias bibliográficas relacionadas con la operación de las centrifugas de discos y los tipos disponibles actualmente en dependencia de la forma que descargan la fase sólida.
- Características operacionales y geométricas, y correlaciones que definen y caracterizan estos equipos.
- Funciones de proceso de las centrifugas de discos y los diferentes estudios que han evaluado estas centrifugas tanto a escala piloto como industrial.
- El escalado y *scale-down* de las centrifugas de discos, y otros trabajos donde se han realizado estudios específicos sobre diversas temáticas relacionadas con estas centrifugas.

Para desarrollar todas estas temáticas de investigación, la metodología PRISMA (en inglés: *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) fue aplicada hasta la Fase 3 con el objetivo lograr una evaluación rápida, eficiente y transparente de los artículos científicos recopilados ⁽¹⁵⁾. Este método PRISMA complementa el análisis sistemático y metódico, y toma en cuenta frases de búsqueda investigativas específicas para explorar el contenido y metodologías aplicadas por los investigadores y científicos con respecto a la temática que se desea estudiar. Para efectuar la búsqueda y recopilación de los documentos, se hizo uso de artículos publicados bajo bases de datos específicas tales como Scielo, Redalyc, Scopus y Web of Science, con el fin de verificar el avance y actualidad de la investigación científica basada en los tópicos a tratar en este trabajo. Este proceso de búsqueda fue realizado entre enero y marzo de 2025 y rindió 72 documentos todos en idioma inglés.

Resultados y discusión

- La operación de centrífugas de discos

La centrífuga de discos es una centrífuga de tazón sólido que es empleada para la clarificación mecánica y separación de mezclas consistente en sólidos y líquidos. Pueden ser operadas en forma semicontinua o continuamente, en dependencia de la descarga de sólidos. La separación está basada en la sedimentación de la fase dispersa más pesada específica contenida en la fase continua más ligera debido a la acción de la fuerza centrífuga. Los principales componentes del separador son el tazón y el juego de discos en su interior (Fig. 2).

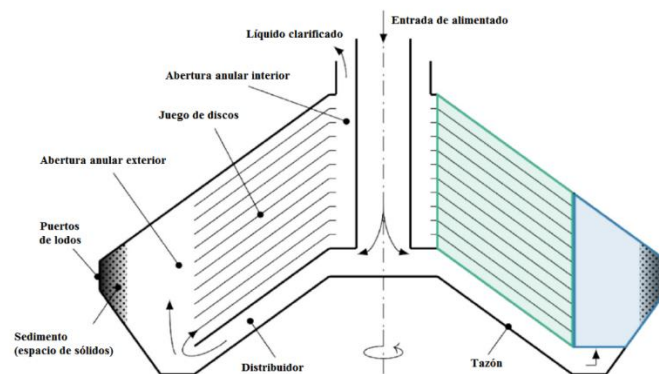


Figura 2. Ilustración esquemática del tazón una centrífuga de discos ⁽¹⁶⁾

El juego de discos consiste en varios discos cónicos los cuales son colocados uno encima de otro. La distancia entre los discos es mantenida mediante espaciadores finos soldados en forma de costillas o puntos. El elevado número de discos y su forma cónica trae consigo un incremento del área superficial disponible para la separación de las partículas. La fuerza centrífuga requerida para el proceso de separación es inducida por la rotación de los discos y del tazón. El alimentado fluye centralmente hacia el aparato y es acelerado suavemente por los distribuidores hasta la máxima velocidad rotacional. En la abertura anular exterior, el flujo de producto se divide dentro de las aberturas de los discos individuales. La separación ocurre tanto en la abertura anular exterior y dentro de las aberturas de los discos. En las aberturas de los discos, las partículas se mueven hacia el disco superior debido a su mayor densidad bajo la influencia del campo centrífugo y son separadas allí. Debido a la fuerza centrífuga, las partículas

separadas se mueven hacia atrás con dirección hacia la abertura anular exterior y se acumulan en el área o dominio de lodos. Mientras tanto, el líquido clarificado fluye desde el juego de discos hacia la abertura anular interior y abandona el aparato desde allí ⁽¹⁶⁾.

Existen tres tipos de centrífugas de discos que se clasifican en dependencia de las diferentes variantes utilizadas para la descarga de sólidos, siendo estas las siguientes: discontinua (remoción manual de los sólidos separados), semicontinua (abertura periódica de los puertos de lodo para su vaciado) o completamente continua (separadores de boquilla) ⁽¹⁶⁾. En la variante discontinua los sólidos se acumulan en la periferia del tazón hasta que el tazón está casi lleno, lo cual se evidencia por el incremento de la turbidez del líquido sobrenadante que fluye desde la centrífuga. En este punto, la centrífuga necesita ser detenida para remover los sólidos acumulados en su interior de forma manual.

El contenido de sólidos del alimentado requiere ser relativamente bajo (0-1% vol.) con el fin de que el tiempo inactivo para la remoción de sólidos no se vuelva excesivo. En el modo semicontinuo, el tazón es abierto intermitentemente para permitir que los sólidos sean descargados a través de puertos localizados en la periferia. El contenido de sólidos del alimentado puede estar en el rango de 0-10% vol. para la descarga intermitente, mientras que los sólidos que salen pueden ser poco fluidos. Para la operación continua, las boquillas son ubicadas en la periferia de la centrífuga, y el contenido de sólidos del alimentado pueden estar en el intervalo de 6-25% vol. Los sólidos que salen por las boquillas son fluidos. Las boquillas son distribuidas alrededor de la periferia de la centrífuga y su número oscila desde 12 hasta 24, en dependencia del tamaño de la centrífuga ⁽¹⁷⁾.

- Características operacionales y geométricas de las centrífugas de discos

Según Leung ⁽¹⁸⁾, el ángulo inclinado (con respecto al eje vertical) del juego de discos en una centrífuga de discos es típicamente 35 grados - 45 grados. El número de discos oscila en cualquier número entre 50 discos y 300 discos, en donde las cantidades varían entre los diferentes tamaños y diseños de las centrífugas de discos. La aceleración centrífuga oscila entre 5 000 g y 15 000g. En cuanto al espaciados entre discos adyacentes, este oscila entre 0,32 mm hasta 1 mm. Por otro lado, el procesamiento de levadura con un contenido de sólidos en el alimentado de 30 % en volumen necesita un espaciado mayor de 1 mm, mientras que un espaciado más estrecho de 0,5 mm es el adecuado para el procesamiento de *Escherichia coli* y lisado con una concentración de sólidos menor en el alimentado. Un espaciado de discos de 0,32 mm o aún tan bajo como 0,25 mm puede ser empleado para procesar un caldo de células de mamíferos bajo una concentración de sólidos en el alimentado de 3 % - 4 %.

La centrífuga tiene que estar totalmente contenida y sellada para favorecer la integridad del producto y la seguridad del operario. Debe tener sellos doble axiales en el pivote del tazón para prevenir la ocurrencia de filtraciones. En algunos diseños, los sellos son enfriados y lubricados con agua, especialmente para soportar las elevadas temperaturas y presiones de esterilización. Usualmente, el tazón de la centrífuga tiene una chaqueta donde se le hace circular agua de enfriamiento para asegurar el control de temperatura durante la separación sólidos-líquido, especialmente durante el procesamiento de material biológico sensible a la temperatura. En cuanto a la demanda de agua por parte de estas centrífugas, esta se necesita en la chaqueta del tazón para enfriar el material que se está centrifugando, así como también en los diseños de sello hermético, sellos axiales, un ciclón con chaqueta de enfriamiento (en algunos diseños),

y en los mecanismos hidráulicos de abertura y cierre del rotor en los equipos con descarga intermitente. Por último, los tazones con chaquetas de enfriamiento son necesarios para asegurar que la emisión de ruido esté por debajo de los 80 decibelios, con el fin de cumplir con los estándares industriales.

De acuerdo con Häggmark y Königsson ⁽¹⁹⁾ la aceleración centrífuga relativa en la región por fuera de los discos está típicamente en el intervalo de 5 000 g – 15 000g (49 100 m/s² – 147 300 m/s²) para centrífugas de discos industriales usadas en el campo de la tecnología de bioprocesos, mientras que la velocidad de sedimentación oscila típicamente entre 10⁻⁹ m/s hasta 10⁻⁶ m/s.

Ecuaciones y correlaciones representativas de la centrífuga de discos

Según Felfoul y Lopez ⁽¹⁰⁾ el principio básico detrás de una centrífuga de discos radica en la separación de diferentes componentes contenidos en una mezcla basada en la diferencia de densidad (ej. células y agua o gotas de aceite y agua) y el tamaño. Esto se logra girando un tazón que contiene la mezcla a elevada velocidad, lo cual genera una fuerza centrífuga. La velocidad a la cual las partículas esféricas son separadas del fluido en el separador centrífugo es calculada usando la ley de Stokes.

Uno de los métodos sugeridos para describir el proceso de clarificación en una centrífuga es la teoría Sigma o concepto de área de sedimentación el cual se basa en la ley de Stokes y define la velocidad de sedimentación de una partícula debido a la gravedad.

La elección de una centrífuga y su diseño está basada a menudo en la experiencia del fabricante y métodos analíticos altamente simplificados, tales como la teoría Sigma, la cual expresa el desempeño y rendimiento del separador en términos de área equivalente de un tanque de sedimentación y el volumen ⁽¹⁶⁾.

De acuerdo con Häggmark y Königsson ⁽¹⁹⁾, la velocidad de sedimentación de Stokes de una partícula sólida en el campo de fuerza gravitacional se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$v_g = \frac{d_p^2 \cdot \Delta\rho \cdot g}{18 \cdot \mu} \quad (1)$$

Dónde:

d_p – Diámetro de la partícula.

$\Delta\rho$ – Diferencia de densidad entre la partícula sólida y la fase líquida.

μ – Viscosidad dinámica Newtoniana de la fase líquida.

g – Aceleración de la gravedad = 9,82 m/s².

La modificación de la ecuación (1) calcula la velocidad de sedimentación de una partícula en un campo centrífugo, la cual se muestra a continuación ⁽²⁰⁾:

$$v_s = \frac{d_p^2 \cdot \Delta\rho \cdot \omega^2 \cdot r_e}{18 \cdot \mu} \quad (2)$$

Dónde:

v_s – Velocidad de sedimentación en el campo centrífugo.

d_p – Diámetro de la partícula.

$\Delta\rho$ – Diferencia de densidad entre la partícula y el líquido suspendido.

ω – Velocidad angular.

r_e – Radio efectivo de la centrífuga.

μ – Viscosidad dinámica.

Teóricamente, el caudal bajo el cual un separador o centrífuga de discos remueve una partícula de diámetro d_p contenida en un fluido puede ser calculada mediante la siguiente ecuación ⁽²⁾:

$$Q = \left[\frac{d_p^2 \cdot \Delta\rho}{18 \cdot \mu} \right] \cdot [2 \cdot \pi \cdot 3 \cdot \omega^2 \cdot N \cdot \cot\alpha \cdot (r_2^3 - r_1^3)] \quad (3)$$

Dónde:

Q – Caudal.

d_p – Diámetro de las partículas a separar.

$\Delta\rho$ – Diferencia de densidad entre la partícula y el fluido.

μ – Viscosidad dinámica.

N – Número de discos.

α – Ángulo de los discos

r_1 – Radio interior de los discos.

r_2 – Radio exterior de los discos.

Para Häggmark y Königsson ⁽¹⁹⁾, el caudal de capacidad Q_f de la centrífuga de discos puede ser estimado usando el área de sedimentación equivalente Σ y la velocidad de sedimentación v_g de tal manera que la capacidad de clarificación de la centrífuga este limitada por:

$$Q_f < v_g \cdot \Sigma \quad (4)$$

Según Zaman *et al* ⁽²¹⁾ la teoría Sigma es un concepto usado para describir el desempeño de la separación sólido-líquido de una centrífuga, el cual puede ser empleado para determinar el tiempo de clarificación. El área Sigma, también llamada área de sedimentación equivalente, se define como el área superficial de un tanque de sedimentación por gravedad con el rendimiento de sedimentación equivalente. Cada tipo de centrífuga tiene una correlación única para calcular el valor Sigma.

El área de separación equivalente donde el 50% de las partículas son separadas se define mediante la siguiente ecuación ^(7,20):

$$\Sigma = \frac{2 \cdot \pi \cdot N \cdot \omega^2 \cdot (r_2^3 - r_1^3)}{3 \cdot g \cdot \tan\theta} \quad (5)$$

Dónde:

Σ – Área de separación equivalente.

N – Numero de espacios de discos.

ω – Velocidad angular.

θ – Ángulo cónico de la mitad del disco.

r_1 – Radio interior de los discos.

r_2 – Radio exterior de los discos.

g – Aceleración de la gravedad = 9,82 m/s².

Merkel *et al* ⁽²²⁾ presentan una variante de la ecuación (5) para calcular el área de clarificación equivalente de la centrífuga de discos, la cual se muestra a continuación:

$$\Sigma = \frac{\pi \cdot \omega^2 \cdot 2}{g \cdot 3} \cdot N \cdot (r_2^2 - r_1^2) \cdot \cot \theta \quad (6)$$

Dónde:

Σ – Área de clarificación equivalente de la centrífuga (m²).

g – Aceleración de la gravedad = 9,82 m/s².

ω – Velocidad angular del tazón (rad/s).

N – Número total de discos.

θ – Angulo de los discos (°).

r_1 – Radio interior de los discos (m).

r_2 – Radio exterior de los discos (m).

La teoría Sigma está basada en las siguientes suposiciones ⁽²³⁾:

- Simetría axial.
- Las partículas son separadas solamente en los discos.
- La partícula es separada seguramente cuando la pared del disco superior ha sido golpeada.
- El caudal es estacionario y distribuido uniformemente en dirección axial y acimutal.
- La partícula se mueve hacia dentro en forma aerodinámica sin resbalar y se desprecia la inercia.
- Rotación del cuerpo rígido a una velocidad angular constante.
- La trayectoria de la partícula no está influenciada por otras partículas de ninguna manera.
- Partícula perfectamente redonda, rígida y que obedece la Ley de Stokes.
- Flujo laminar en la abertura del disco.
- La velocidad del componente ortogonal hacia la dirección de la abertura se asume igual a cero.

Según Iammarino *et al* ⁽²⁴⁾, la velocidad rotacional y la geometría de la centrífuga de discos son tomadas en cuenta mediante el factor Sigma (Σ) para la centrífuga, el cual denota el área de un tanque de sedimentación por gravedad necesario para lograr la misma cantidad de clarificación que la centrífuga. Mediante la combinación de las ecuaciones (2) y (5) resulta posible definir el límite de separación del tamaño de partícula, comúnmente conocido como diámetro crítico, el cual se calcula mediante la siguiente ecuación ^(7,20):

$$d_c = \sqrt{\frac{18 \cdot \mu \cdot Q}{\Sigma \cdot \Delta \rho \cdot g}} \quad (7)$$

Dónde:

d_c – Diámetro crítico.

μ – Viscosidad dinámica.

Q – caudal volumétrico total.

Σ – Área de separación equivalente.

$\Delta \rho$ – Diferencia de densidad entre la partícula y el fluido.

g – Aceleración de la gravedad = 9,82 m/s².

Teóricamente, todas las partículas mayores de d_c serán recobradas. Se piensa que las partículas están distribuidas uniformemente a lo largo del ancho de la entrada del disco y por tanto las partículas más pequeñas que d_c , las cuales están situadas cerca de la parte inferior del disco en el momento de entrada hacia el disco, también serán sedimentadas. Por tanto, resulta posible describir el rendimiento de separación usando el llamado método de eficiencia de grado.

En Cambiella *et al* ⁽²⁵⁾ se presentó la siguiente ecuación para calcular el diámetro crítico de partícula en una centrifuga de discos:

$$d_c = \sqrt{\frac{27 \cdot \mu \cdot Q \cdot \tan \theta}{\pi \cdot N \cdot \omega^2 \cdot \Delta \rho \cdot (r_2^3 - r_1^3)}} \quad (8)$$

Dónde:

d_c – Diámetro crítico.

Q – Caudal volumétrico del líquido.

μ – Viscosidad de la fase continua.

θ – Ángulo medio del disco.

N – Numero de discos.

ω – Velocidad angular de la centrifugación.

$\Delta \rho$ – Diferencia de densidades entre la fase ligera y pesada.

r_1 – Radio interior de los discos.

r_2 – Radio exterior de los discos.

La ecuación (5) indica que el diámetro crítico no depende de la distancia entre discos y cambia con $Q^{1/2}$ y ω^{-1}

Para las centrífugas de discos que operan con descarga intermitente de sólidos existe una restricción de tiempo basada en el intervalo mínimo entre las descargas de sólidos, la cual se expresa mediante la siguiente ecuación ⁽²⁶⁾:

$$t_{comp} = \frac{V_s}{2 \cdot F \cdot \varphi \cdot Q} \quad (9)$$

Dónde:

t_{comp} – Tiempo de residencia promedio de los sólidos.

V_s – Volumen de soporte de sólidos de la centrífuga.

Q – Caudal.

φ – Fracción volumétrica de sólidos en el alimentado.

F – Recobrado fraccional de sólidos (para elevados niveles de clarificación puede asumirse como 1).

La relación del caudal de alimentación hacia la centrifuga (Q) y el área de clarificación equivalente (Σ) suministra la velocidad de sedimentación equivalente que puede lograrse para un juego dado de condiciones de operación. La combinación de esta relación Q/Σ con la ley de Stokes para una partícula esférica sedimentada por gravedad (asumiendo un fluido Newtoniano y baja densidad de la partícula) permite calcular, mediante la ecuación (10), el tamaño mínimo de partícula que puede separarse en una centrifuga de discos bajo las condiciones dadas ⁽²⁴⁾:

$$d_{min} = \sqrt{\frac{Q}{\Sigma}} = \sqrt{\frac{18 \cdot \mu}{\Delta\rho \cdot g}} \quad (10)$$

Dónde:

d_{min} – Diámetro del tamaño mínimo de partícula que puede ser separado (m).

Q – Caudal de alimentación a la centrífuga (m^3/s).

Σ – Área de separación equivalente de la centrífuga (m^2).

μ – Viscosidad dinámica del cultivo ($kg/m.s$).

$\Delta\rho$ – Diferencia de densidad entre las células y el medio de cultivo (kg/m^3).

g – Aceleración de la gravedad = $9,82 m/s^2$.

Según ⁽²⁴⁾, a medida que el valor de la relación Q/Σ decrece, también lo hará el tamaño de partículas que puede removerse por la centrífuga para una mejor clarificación.

El tamaño de partícula mínimo que puede remover una centrífuga de discos continua es una función de las propiedades del cultivo celular, caudal de alimentación a la centrífuga y la geometría del tazón y velocidad rotacional ⁽²⁴⁾.

Otros autores ⁽²⁷⁾ presentan el índice de efectividad GT, el cual se define como una integral de Gdt sobre la longitud del camino de flujo para una partícula, y toma en cuenta la dependencia de posición de la fuerza G local, la cual varía a lo largo del camino del fluido desde el borde inferior de los espacios del disco hacia el tubo de descarga superior en una centrífuga de discos. Este índice de efectividad GT se calcula mediante la siguiente correlación:

$$GT = \frac{8 \cdot \pi^3 \cdot n^2 \cdot \varepsilon \cdot N}{3 \cdot g \cdot Q \cdot \cos\theta} \cdot (r_2^3 - r_1^3) \quad (11)$$

Dónde:

n – Revoluciones por segundo = rpm/60.

ε – Espaciado entre dos discos adyacentes.

N – Número total de discos.

g – Aceleración de la gravedad = $9,82 m/s^2$.

Q – Caudal volumétrico de alimentación.

θ – Ángulo del disco.

r_1 – Radio interior de los discos.

r_2 – Radio exterior de los discos.

Häggmark y Königsson ⁽¹⁹⁾; Boychyn *et al* ⁽⁴⁾ y Ninga *et al* ⁽²⁸⁾ presentan una modificación de la ecuación (5) para calcular el área de sedimentación equivalente de una centrífuga de discos, la cual se muestra a continuación:

$$\Sigma = \frac{2 \cdot \pi \cdot N \cdot \omega^2 \cdot (r_2^3 - r_1^3) \cdot FL}{3 \cdot g \cdot \tan\theta} \quad (12)$$

Dónde:

Σ – Factor Sigma de la centrífuga (m^2).

θ – Ángulo de inclinación de los discos con respecto a la vertical ($^\circ$).

g – Aceleración de la gravedad = $9,82 \text{ m/s}^2$.

ω – Velocidad angular (rad/s).

N – Número de discos.

r_1 – Radio interior de los discos (m).

r_2 – Radio exterior de los discos (m).

FL – Factor de corrección que toma en cuenta el espaciado entre los discos, el cual se calcula mediante la siguiente ecuación ^(4,28):

$$FL = 1 - \left(\frac{3 \cdot Z_L \cdot B_L}{4 \cdot \pi \cdot r_2} \right) \cdot \left(\frac{1 - (r_1/r_2)^2}{1 - (r_1/r_2)^3} \right) \quad (13)$$

Dónde:

Z_L – Numero de *caulks* en el disco.

B_L – Espesor de los *caulks*.

r_1 – Radio interior de los discos.

r_2 – Radio exterior de los discos.

Ekin y Çerçi ⁽²⁹⁾ sugieren la siguiente correlación, la cual es una modificación de la ecuación (3) para calcular el caudal volumétrico en una centrífuga de discos:

$$Q = \frac{4 \cdot \pi \cdot N \cdot v_g \cdot \omega^2}{3 \cdot g \cdot C} \cdot (r_2^3 - r_1^3) \cdot \cot\theta \quad (14)$$

Dónde:

Q – Caudal volumétrico.

N – Número de discos.

v_g – Velocidad de sedimentación de Stokes de una partícula sólida en el campo de fuerza gravitacional, definida por la ecuación (1).

ω – Velocidad rotacional del juego de discos (rad/s).

g – Aceleración de la gravedad = $9,82 \text{ m/s}^2$.

C – Factor que representa el área ocupada por el flujo a través del intervalo de discos 2D, el cual se asume como 1.

θ – Ángulo de los discos (°).

r_1 – Radio interior de los discos (m).

r_2 – Radio exterior de los discos (m).

Merkel *et al* ⁽²²⁾ presentan un parámetro denominado KQ, el cual es una medida semiempírica del tamaño de la centrífuga. Este parámetro se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$KQ = \frac{280}{10^6} \cdot \left(\frac{n}{1000} \right) \cdot N \cdot (r_2^{2,75} - r_1^{2,75}) \cdot \cot\theta \quad (15)$$

Dónde:

n – Velocidad del tazón (rpm).

N – Número de discos.

r_1 – Radio mínimo de los discos (cm).

r_2 – Radio máximo de los discos (cm).

θ – Ángulo de los discos.

Finalmente, Harrison *et al* ⁽¹⁷⁾ presentan una ecuación para calcular el tiempo entre descargas en el modo semicontinuo de operación de una centrífuga de discos, la cual es la siguiente:

$$t_d = \frac{V_s \cdot \varphi_e}{Q \cdot \varphi_f} \quad (16)$$

Dónde:

V_s – Volumen de acumulación de sólidos del tazón (el cual es típicamente 40-50% del volumen total del tazón).

φ_e – Fracciones en volumen de los sólidos en el sedimento.

φ_f – Fracción en volumen de los sólidos en el alimentado.

Q – Caudal volumétrico de alimentación.

- Funciones de proceso de la centrífuga de discos

Existen varias funciones y aplicaciones importantes en la separación sólido-líquido de una centrífuga de discos que combina una alta fuerza G con las elevadas áreas de los discos. Estas aplicaciones son ⁽¹⁸⁾:

1. Separar sólidos suspendidos de una fase líquida: los sólidos son removidos de la fase líquida.
2. Clarificación/purificación: el objetivo es reducir al mínimo los sólidos suspendidos en el sobrenadante líquido o fase efluente.
3. Espesamiento o concentración: la lechada de alimentación es concentrada hasta una suspensión con una concentración de sólidos mucho más elevada. La pérdida de proteína en el concentrado es reducida. Además, la pérdida de sólido en el sobrenadante puede ser también minimizada.
4. Separación y lavado: los sólidos en suspensión pueden contener contaminantes. La suspensión es primero centrifugada, y el concentrado centrifugado es posteriormente diluido con líquido de lavado para disolver los contaminantes. La lechada resultante es separada de nuevo por centrifugación para remover el líquido de lavado agotado conteniendo los contaminantes tanto disueltos como suspendidos.

- Evaluación de centrífugas de discos en diferentes procesos

Las centrífugas son a menudo utilizadas a elevadas fuerzas centrífugas las cuales permiten la separación de partículas finas dispersas o partículas con una baja diferencia de densidad con respecto a la fase continua que la rodea. La centrífuga de discos sirve de forma particular para clarificar líquidos turbios y para concentrar suspensiones diluidas. También resulta posible llevar a cabo la separación de tres fases (sólido-líquido-líquido). Estas centrífugas poseen una elevada de clarificación, la cual es superior que aquella encontrada en otras centrífugas de tazón sólido. Los elevados caudales que puede manejar junto con la posibilidad de procesar suspensiones con bajas (< 1% vol.) o elevadas (10% vol. hasta 25% vol.) concentraciones permite su uso en muchos campos, por lo cual la concentración de sólidos del alimentado determina el tipo de toma de salida. Al mismo tiempo, los separadores de discos tienen una ventaja sobre otros tipos de centrífugas cuando se trata de productos sensibles al cizallamiento ya que su diseño asegura una aceleración suave del flujo de producto ⁽¹⁶⁾.

Sin embargo, según Chlup *et al* ⁽⁸⁾ el paso de levadura a través de una centrífuga expone las células a esfuerzos de corte mecánicos e hidrodinámicos, los cuales pueden ocasionar un decrecimiento de la

viabilidad celular y floculación, daño de la pared celular, incremento de los niveles de proteinasa A extracelular, cervezas más turbias y reducir la estabilidad de la espuma de la cerveza.

De acuerdo con Tebbe *et al* ⁽²⁾, una vía alternativa a los métodos de filtración es la separación de células de mamíferos mediante la centrifugación continua usando separadores o centrífugas de discos.

Son varios los autores que han evaluado centrífugas de discos para verificar si son adecuadas para una determinada aplicación o servicio. En este contexto, Kempken *et al* ⁽³⁰⁾ testearon una centrífuga de discos prototipo, diseñada originalmente para recobrar cultivos de levaduras, para la separación de cultivo de células de mamíferos de fermentaciones entre 80 L y 2 000 L. Se obtuvo como resultado que la capacidad de clarificación fue excelente para las células, aunque se obtuvieron partículas pequeñas en el sobrenadante, lo cual limitó el procesamiento posterior. En este estudio se evaluaron varios parámetros de operación, se calculó el tamaño mínimo de partícula para la separación, así como también se efectuó el análisis de la distribución de partícula. Además, se midió la influencia de la temperatura y presión en el interior del tazón, sugiriendo que se analicen modificaciones desde el punto de vista de la ingeniería mecánica para el mejoramiento del empleo de centrífugas de discos estándar para el recobrado de células de mamíferos.

Tebbe *et al* ⁽²⁾ investigaron la remoción no destructiva de células hibridomas contenidas en un caldo de fermentación mediante el empleo de una centrífuga de discos mejorada, la cual estaba equipada con un sistema de alimentación hidrohermético que permitió la aplicación de una aceleración suave y sin corte de las células dentro del tazón. No se observaron daños significativos de las células durante la separación de las células hibridomas en los lotes de fermentación de 100 L centrifugados en esta centrífuga. La clarificación de las células de mamíferos estuvo en el rango de 90 % hasta 99,9 %, en dependencia de las condiciones de operación, mientras que el contenido de debris celular y otras partículas pequeñas decreció alrededor de 30 % hasta 50 % en dependencia de la carga de partículas en la corriente de alimentación.

Schmidt *et al* ⁽³¹⁾ describieron un método para la validación de una centrífuga de discos de eyección de sólidos con respecto a la esterilización y procesamiento aséptico, en donde se demostró que la centrífuga evaluada es aplicable para procesos asépticos con relación a su esterilización. También se demostró la inactivación de las esporas de *Bacillus stearothermophilus* DSM 494 (NCTC 10003) usando la esterilización en el lugar, y que es posible el procesamiento aséptico por un tiempo de proceso típico. En este estudio, el programa experimental consistió de cinco fases: higienización, contaminación, esterilización, procesamiento estéril e incubación de las muestras, aplicando un tiempo de eyección de lodos cada 5 min.

En Wang *et al* ⁽³²⁾ se describió el empleo de una centrífuga de discos de boquilla para la clasificación húmeda de partículas ultrafinas de carbonato de calcio, en donde se investigó la influencia de la fuerza G y la geometría del disco en el desempeño de la clasificación ultrafina. Se obtuvo como resultado que la eficiencia de clasificación puede incrementarse mediante (1) la aplicación de fuerzas G relativamente moderadas y (2) el uso de discos espaciadores en la centrífuga. Por último, se encontró que la extracción incrementada de las partículas finas está relacionada con la formación de un perfil de velocidad del fluido

apropiada a una fuerza G menor y un movimiento circunferencial sin barreras meridionales para el caso de los discos espaciadores.

Del mismo modo Iammarino *et al* ⁽²⁴⁾ evaluaron una centrífuga de discos para la clarificación primaria de un caldo de células de mamífero, en donde se evaluó en impacto de la densidad celular y la viabilidad. Chlup *et al* ⁽⁸⁾ realizaron varios experimentos para determinar si el procesamiento de una cepa de levadura cervecera (*Saccharomyces cerevisiae*) a través de una centrifuga de discos, aplicando varias condiciones de fuerza G de operación, tiene un efecto negativo en la viabilidad celular, vitalidad y estabilidad física de la cerveza. Se obtuvo como resultado que la cosecha de levadura mediante centrifugación expone a la levadura a un cizallamiento extremo, en donde la viabilidad del cultivo de levadura testeado decreció a medida que fue reciclado a través de la centrífuga. También se observó que hubo daños proporcionalmente mayores de células de levadura dañadas que fueron expuestas a bajas fuerzas G, significando que estas células fueron más resistentes a las fuerzas hidrodinámicas durante la centrifugación. Se concluyó que el paso de células de levadura a través de una centrifuga de discos, a elevada fuerza G, influye desfavorablemente en la fisiología de la levadura y la estabilidad física de la cerveza.

En Shekhawat *et al* ⁽³³⁾ se realizó la modelación mediante Dinámica de Fluido Computacional (DFC) de una centrífuga de discos Culturefuge 100® para la cosecha de anticuerpos monoclonales a partir de un cultivo de células de mamíferos. El ambiente de tensión dentro de la centrífuga fue modelado en función de varias condiciones de operación tales como velocidades rotacionales (rpm) y caudales volumétricos de alimentación. El empleo de DFC en este estudio permitió elucidar que elevados caudales traen consigo un incremento del tamaño de los remolinos conduciendo a un decrecimiento del estrés turbulento. También se encontró que, aunque el incremento de los caudales reduce la lisis celular e incrementa la productividad, también tienen un efecto despreciable en la eficiencia de separación. Sin embargo, se demostró que elevadas velocidades rotacionales tienen una influencia profunda en la eficiencia de clarificación, pero también trae consigo en un daño celular elevado.

En Yang *et al* ⁽²⁷⁾ se propuso un modelo matemático para calcular la efectividad de separación total en términos del índice GT para una centrifuga de discos tomando en cuenta la variación de la fuerza centrífuga con una posición en el disco. Este estudio derivó en una solución analítica para calcular la efectividad propuesta GT bajo un caudal dado y parámetros mecánicos para una centrifuga de discos, en donde el método de GT permitirá una comparación directa entre la centrifuga de rotor fijo de banco y una centrifuga de discos, independientemente de su tamaño y escala. Lo anterior permite predecir la efectividad de separación de una centrifuga de discos industrial mediante el escalado de una centrifuga de rotor fijo pequeña basado en el parámetro integrado GT.

En Esmailnejad-Ahranjani y Hajimoradi ⁽³⁴⁾ se estudiaron, mediante DFC y métodos experimentales, dos tipos de centrifugas industriales, esto es, tubular y de discos, cada una con dos tamaños diferentes, en donde la operación de las centrifugas es optimizada para separar eficientemente el debris de difteria *Corynebacterium* de un medio de cultivo, para finalmente obtener la toxina bacteriana purificada. En este estudio se analizaron la hidrodinámica de las cuatro centrifugas de escala industrial, incluyendo la velocidad, estrés turbulento, fracción másica y tamaño de los remolinos bajo diferentes valores de

caudales volumétricos y velocidades de rotación. Se obtuvo como resultado principal que, de acuerdo con los resultados de la simulación mediante DFC, entre las cuatro centrífugas evaluada la centrífuga de discos de mayor tamaño con velocidades de rotación superiores a 5 500 rpm y caudales menores de 100 L/h, resultó el potencial candidato para ser empleada en el proceso real.

Asimismo, Ott *et al* ⁽³⁵⁾ investigaron por primera vez la idoneidad de una centrífuga de discos (kytero 500) para la separación de células en la producción de anticuerpos basados en células de ovario de hámster chino a escala piloto, en donde se obtuvo como resultado que las células fueron completamente separadas a lo largo de un amplio rango de parámetros del separador sin casi liberar sustancias intracelulares y sin pérdidas del anticuerpo.

Merkel *et al* ⁽²²⁾ describieron un método de tamizado de floculante a escala de laboratorio ajustado para la separación de biomasa floculada en una centrífuga de discos totalmente hermética. En este estudio, los requerimientos específicos de este proceso, esto es, formación de flóculos, estabilidad de los flóculos, comportamiento deslizante en el juego de discos y fluidez del lodo, fueron transferidos hacia escala de laboratorio y validado en pruebas a escala piloto. Se obtuvo como principal conclusión que los resultados cualitativos del tamizado a escala de laboratorio concordaron con los procesos a escala industrial.

En Ekin y Çerçi ⁽²⁹⁾ un marco principal de DFC con Modelación de Elemento Discreto (MED) sobre una base de acople de *Euler-Lagrange* fue desarrollado para determinar la habilidad de separación de una centrífuga de discos clarificante. El modelo 3D fue simplificado desde una máquina real mediante la adopción estricta de las características geométricas del juego de discos. Se obtuvo como resultado que con los parámetros de proceso óptimos generando una tasa de sedimentación de 91,05 %, el límite superior de la fuerza g a un caudal de alimentación de 10 t/h ofrece una eficiencia de separación del 95 %, mientras que el límite inferior del caudal de alimentación ofrece 96 % a 7 700 rpm.

Baust *et al* ⁽¹⁶⁾ presentaron un método de modelación para la simulación en tiempo real de centrífugas de discos. El modelo predictivo usado en este estudio estuvo basado en funciones de máquina y material, lo cual permitió la simulación dinámica para parámetros de operación y propiedades del material de alimentación cambiantes. Los experimentos de validación con dos separadores diferentes fueron reproducidos satisfactoriamente por el modelo.

Felfoul y Lopez ⁽¹⁰⁾ analizaron el fraccionamiento inducido por proceso de los glóbulos de grasa de la leche de camello (GGLC) que ocurre durante la separación centrífuga utilizando una centrífuga de discos convencional, en donde los resultados fueron comparados con aquellos alcanzados mediante el procesamiento de leche bovina. Se concluyó que la separación centrífuga de leche de camello causó el recobrado de cremas de GGLC enriquecidas (317,8 g/kg de grasa $\pm$ 12,1 g/kg de grasa, diámetro medio: 3,2 μ m) y de leches semidescremadas conteniendo 16,7 g/kg de grasa $\pm$ 1,3 g/kg de grasa dispersada en pequeños GGLC de 0,5 μ m de diámetro.

Ninga *et al* ⁽²⁸⁾ determinaron la influencia de los parámetros de centrifugación en las características físico-químicas del jugo de guayaba e identificaron las características operacionales de centrífugas de discos continuas basadas en el desempeño y rendimiento de una centrífuga de laboratorio. En este estudio se evaluaron los efectos de la fuerza g (149 g -3731 g) y el tiempo de centrifugación (10 min - 40 min) en las características físico-químicas del jugo (contenidos de proteína, pectina, ácido galacturónico, materia

seca, contenido de azúcares solubles totales; así como también pH, conductividad eléctrica, claridad y la distribución del tamaño de partícula). Se observó un decrecimiento significativo en el tamaño de partícula promedio, y también en los contenidos de proteína y pectina, contrario a la claridad del jugo.

En D'Incecco *et al* ⁽³⁶⁾ se evaluó el impacto de adoptar un proceso de centrifugación de leche conducido a 39 °C y con eliminación de lodo en la tecnología de producción de queso duro a partir de leche cruda. En este estudio se investigaron tres configuraciones diferentes de centrifugación (con centrífugas de discos) en una fábrica de queso con el objetivo de identificar aquella configuración que represente el mejor compromiso entre la eficiencia de remoción de bacterias y el rendimiento de queso. La centrifugación doble con lodo de bajo volumen tuvo la mayor eficiencia de remoción de esporas (98,2 %) mientras que el proceso con una sola centrifugación minimizó la pérdida de rendimiento de queso. Por último, los resultados indicaron que la centrifugación ocasionó una remoción preferencial de bacterias de ácido láctico en forma de bastón, independientemente de la configuración.

Del mismo modo Jukkola *et al* ⁽³⁷⁾ compararon la eficiencia de la separación centrífuga y por microfiltración de glóbulos de grasa de la leche a partir de crema bovina y los cambios que tienen lugar en las membranas de lípido correspondientes. Se encontró que tanto los glóbulos de grasa como las membranas de lípido son parcialmente dañados bajo las fuerzas cortantes típicamente encontradas en la separación centrífuga y por microfiltración. También los resultados sugirieron que se puede obtener una elevada eficiencia de separación con un mínimo daño de los glóbulos de grasa y elevado rendimiento de las membranas de lípido si se adopta la microfiltración bajo condiciones cuidadosamente optimizadas.

En ⁽³⁸⁾ se evaluó una centrífuga de discos para la cosecha de un cultivo de células de mamíferos de alta densidad celular.

También, Márquez y Maza ⁽¹¹⁾ aplicaron *Machine Learning* a través de Aprendizaje Supervisado por Redes Neuronales Artificiales, con el fin de modelar proceso de clarificación de aceite de oliva virgen mediante una centrífuga de discos. La red neuronal obtenida en este estudio fue entrenada y validada con una base de datos real generada a partir de diferentes experimentos para analizar el desempeño y rendimiento de la centrífuga bajo evaluación. Los resultados obtenidos en la validación indicaron una excelente capacidad predictiva (error de 0,30 kg/h), lo cual permitió que se considere el modelo neuronal como una excelente herramienta para optimizar la centrífuga.

Tradicionalmente, las centrifugas de discos están construidas con tazones de acero inoxidable que requieren una limpieza intensiva en recursos y tiempo entre lotes. Para reducir el tiempo de procesamiento de los lotes y el riesgo de contaminación, se han desarrollado y evaluado versiones de un solo uso, tales como GEA kytero[®] y Alfa Laval CultureOne[™], para su uso con cultivos de células de ovario de hámster chino de alta densidad ⁽³⁹⁻⁴¹⁾. Debido a sus dimensiones más pequeñas, el caudal de alimentación en estas centrifugas de un solo uso es menor con comparación con sus contrapartes de acero inoxidable. Sin embargo, estas centrífugas de un solo uso más pequeñas pueden ser utilizadas para estudios de escalado ya que conservan el mismo diseño mientras que requieren menos cantidad de material de alimentado ⁽⁵⁾.

Finalmente Pimentel *et al* ⁽⁴²⁾ evaluaron una centrífuga de discos de descarga intermitente para cosechar células de *Tsukamurella paurometabola* cepa C-924, con el fin de verificar si esta centrífuga puede

sustituir las centrífugas tubulares actualmente en uso para cosechar dicha bacteria, durante el proceso de producción del bionematicida HeberNem®. Los valores óptimos determinados en este estudio para los parámetros caudal de alimentación, peso húmedo del alimentado y tiempo entre descargas fueron de 64 L/h, 176 g/L y 5 min respectivamente.

La Tabla 1 muestra los diferentes tipos de centrífugas de discos evaluadas en los estudios reportados hasta la fecha, junto con sus parámetros de operación y características geométricas.

Tabla 1. Tipos de centrífugas de discos evaluadas en los diferentes estudios consultados, considerando sus parámetros operacionales y características geométricas.

Marca/Modelo	Parámetros de operación aplicados	Datos geométricos	Referencia
Westfalia CSA-1	4 000 – 9 000 rpm Presión alimentación: 1,0 bar Caudal: 20-50 L/h	Numero de discos: 43 Espacio entre discos: 0,5 mm.	(30)
Westfalia BSB 7-47-476	Presión alimentación: 1,5 bar Caudal: 300 – 700 L/h	-	(43)
Westfalia CSA1	6 080 – 9 700 rpm Caudal: 90-140 kg/h	Número de discos: 43 Radio interior/exterior discos: 23/55 mm. Ángulo discos: 52°	(2)
Westfalia SAOOH-205	Caudal: 20 - 440 L/h	Número de discos: 9-37 Volumen del tazón: 0,13 -0,44 L Volumen del espacio de solidos: 0,09-0,25 L.	(20)
Westfalia CSA 8-06-476	-	-	(31)
Alfa Laval QX210-30B	Caudal: $3 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	Numero de discos: 65. Espacio entre discos: 1 mm.	(32)
Westfalia SC35	Velocidad del tazón máxima: 120 rps Caudal máximo: 25 000 L/h.	Volumen del tazón: 18 L. Volumen de soporte de sólidos: 7,5 L. Área de sedimentación: 10 400 m ²	(26)
Westfalia GEA OTC 2-03-107	Caudal: 300 – 5 000 L/h 10 000 rpm	Radio interior/exterior discos: 22/44 mm Espacio entre discos: 2,5 mm. Número de discos: 36	(25)

		Angulo de los discos: 40°	
Westfalia CSA-1	9 470 rpm Área de clarificación equivalente: 1 400 m ²	Número de discos: 46. Volumen total del tazón: 0,6 L. Volumen acumulación de sólidos: 0,25 L.	(24)
Westfalia SC6-06- 076	Caudal: 5-6 hL/h. 8 000 – 12 000 rpm. Presión interna: 0,1 MPa. Temperatura de operación: 4,5 °C. Intervalo entre descargas: 6 min.	Número de discos: 76. Ángulo de los discos: 40° Radio interior/exterior discos: 31/62 mm. Espaciado entre discos: 0,5 mm.	(8)
Westfalia SA-1	9 470 rpm Caudal: 0,75 L/min.	-	
Westfalia CSC-6	9 300 rpm. Caudal: 1,9 L/min.	-	(21)
Westfalia CSC-20	7 010 rpm. 10 L/min.	-	
Westfalia CSA-1	10-60 L/h 9 800 rpm	Radio interior/exterior discos: 21/53 mm Volumen acumulación de sólidos: 0,20 L. Longitud tazón: 62 mm.	(44)
Culturefuge 100® (BTPX305H)	350-450 L/h. 6 500-7 500 rpm	Número de discos: 82 Radio interior/exterior discos: 36/84,5 mm Ángulo de discos: 40° Volumen del tazón: 3,2 L	(33)
Westfalia SB7	9 200 rpm 4,40x10 ⁻⁶ – 3,22x10 ⁻⁵ m ³ /s.	Número de discos: 70 Espaciado entre discos: 5 mm. Radio exterior discos: 80 mm. Angulo de discos: 45°	(27)
Westfalia CSA-1	9 800 rpm 150-250 L/h	Número de discos: 45 Volumen tazón: 0,6 L. Espacio acumulación sólidos: 0,3 L.	(45)

Westfalia Pathfinder PSC 1-06-177	13 500 rpm 120 L/h	Número de discos: 8 Volumen tazón: 1 L. Espacio acumulación sólidos: 0,85 L.	
Westfalia	0-3 200 rpm $2,0 \times 10^{-5} - 1,1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$	Radio interior discos: 0,034 m Radio exterior discos: 0,0768- 0,084 m. Numero de discos: 16-39. Ángulo de discos: 50°	(23)
GEA Westfalia kytero 500	3 500 y 4 750 rpm 30, 60, 90 y 120 L/h	-	(22)
Westfalia SAOOH	165 r/s 15, 30, 45, 60 y 80 L/h. $\Sigma = 1\,500 \text{ m}^2$.	Radio interior/exterior discos: 21/53 mm Numero de masillas: 6. Espesor de la masilla: 5 mm. Ángulo de discos: 45°. Número de discos: 62	(4)
Alfa Laval LAPX- 404	6 000-10 000g 90-120 L/h	-	(6)
Alfa Laval BTPX- 305	12 500g 480 L/h	-	
Alfa Laval Explorer	10 000 rpm. 60 – 1 000 L/h	Ángulo de discos: 35 ° o 45°	(22)
M09.10000 Elecrom1-Metal	8 000 rpm 125 L/h	Número de discos: 19 Diámetro de discos: 95 mm.	(10)
Westfalia CSI-230- 01-772	21 000 L/h	-	(36)
Frau CN2S	-	Número de discos: 51 Radio interior/exterior discos: 15/54,5 mm Ángulo de discos: 52°	(37)
Alfa Laval MBPX- 404	158.3 rps 60 – 400 L/h	Número de discos: 89 Ángulo de discos: 45° Separación entre discos: 0,5 mm. Volumen de sólidos: 1,1 L.	(38)
Westfalia CSA-1	163,3 rps	Número de discos: 45	

	70 L/h	Ángulo de discos: 38,5° Separación entre discos: 0,5 mm. Volumen de sólidos: 0,25 L.	
Westfalia CSA-1	9 810 rpm 10-60 L/h para E.coli. 50-432 L/h para S. cerevisiae.	-	(46)
Westfalia CSA-8	120 L/h	-	(47)
Alfa Laval BTPX 205SGD-34CDP-60	9 650 rpm 30,6-66,6 L/h	Número de discos: 80 Ángulo de discos: 40° Volumen de sólidos: 1,2 L.	(42)

“-“ Denota que no se reportan datos en la literatura original para este ítem.

- Escalado y *scale-down*

La predicción del desempeño y rendimiento de procesos a escala industrial es un factor importante durante el desarrollo de nuevos productos en la industria farmacéutica. La imitación de un proceso a escala industrial con una cantidad mínima de material de alimentación en la escala de laboratorio reduce el tiempo necesario para el desarrollo y, por tanto, permite una reducción significativa de los costos involucrados ⁽⁴⁸⁾.

De acuerdo con ⁽²⁴⁾, típicamente resulta difícil remover efectivamente el debris celular con diámetro mucho menor de 1 μm usando una centrífuga de discos bajo condiciones de operación prácticas. Una vez que las condiciones de operación hayan sido optimizadas a pequeña escala, la relación Q/Σ es típicamente mantenida constante durante el escalado entre centrífugas de discos diferentes para mantener una remoción del tamaño de partícula mínimo y suministrar una claridad similar del producto en cada escala.

Para Muralidharan *et al* ⁽⁷⁾ los procesos que involucran centrífugas de discos pueden ser escalados manteniendo una relación constante del caudal de alimentación a la centrífuga (Q) con el área de sedimentación equivalente (Σ), en donde según estos autores la relación Q/Σ sirve como una medida sustituta de la capacidad de sedimentación de la partícula de la centrífuga. La aplicación de esta relación asume que las partículas sólidas sujetas a la fuerza centrífuga son resistentes al esfuerzo cortante y que se mantienen intactas durante la centrifugación.

Stoffels *et al* ⁽⁴⁵⁾ indican que las tecnologías de *ultrascale-down* (USD) permiten la realización de experimentos a escala pequeña para ser usados con el fin de predecir el bioprocesamiento del producto a gran escala con mayor facilidad y menor tiempo. Este método ha sido empleado en estudios previos para caracterizar la interacción existente entre el cultivo de células y las etapas del proceso con el recobrado del producto.

Lopes y Keshavarz-Moore ⁽⁴⁴⁾ puntualizan que una técnica exitosa de *scale-down* requiere una comprensión conveniente y detallada de los parámetros claves relevantes para propósitos de escalado.

Estos autores indican que las principales variables consideradas previamente para estudiar la deshidratación de las centrífugas han sido el tiempo, velocidad y espesor del sedimento.

En centrífugas con eyección intermitente de sólidos, los tiempos de residencia son calculados basados en los caudales de alimentación y la capacidad de sólidos de la centrífuga. Mientras mayor sea el caudal de alimentación, menor tiempo estarán los sólidos dentro de la centrífuga (hasta que la capacidad de la centrífuga se alcance), conduciendo a una exposición reducida de los sólidos a la fuerza centrífuga, resultando en una deshidratación pobre.

En el caso de la velocidad, expresada como la aceleración centrífuga o fuerza centrífuga relativa, también ha sido usada como criterio para el **scale-down**. Manteniendo una aceleración centrífuga constante, esto pudiera imitar las fuerzas centrífugas experimentadas a gran escala durante el proceso de deshidratación. El espesor del sedimento, por su parte, expresada como altura, pudiera determinar la deshidratación del sedimento a través de la torta ya que la fuerza compresiva experimentada en cualquier punto en la torta de sedimento es dependiente de la altura de sedimento por encima de esa posición.

En el procesamiento **downstream** resulta a menudo necesario desarrollar técnicas **scale-down** para modelar o simular la operación de equipamiento de escala piloto o industrial. Con el fin de evaluar la aplicación de centrífugas de discos para un proceso en particular resulta necesario emplear una centrífuga de tal tamaño que sea posible el escalado hacia máquinas industriales. Una limitante principal es la habilidad para controlar la descarga de sólidos, y tal restricción conduce al empleo de centrífugas de discos capaces de operar a elevados caudales (> 1 000 L/h), en donde tal caudal es considerablemente superior que aquel disponible en varias instalaciones de desarrollo ⁽⁴³⁾.

Para Maybury *et al* ⁽²⁰⁾ la centrífuga de discos más pequeña disponible aun es una máquina de escala piloto, por tanto se requiere de una cantidad significativa de material de proceso en aras de operar un equipo de este tipo. La habilidad para operar con material de proceso reducido es crucial en ciertas aplicaciones, como por ejemplo las etapas tempranas del desarrollo de procesos cuando la fermentación tiende a ser realizada a pequeña escala. Adicionalmente, a medida que se desarrollan los procesos, se requieren ensayos extensivos para identificar las condiciones de operación deseadas, esto es, si se logran obtener datos lo suficientemente relevantes a escala reducida entonces habrá beneficios de costo significativos con la aplicación de este método.

Felber ⁽⁴⁸⁾ indica que los métodos de **scale-down** han sido realizados mediante el bloqueo de los discos activos o usando discos en blanco y reduciendo el espacio de la región de sedimentación, lo cual puede reducir la cantidad de material de alimentación necesario por un factor de 4 a 10.

La habilidad de la separación sólido-líquido de una centrifuga particular está dada por la relación entre el caudal volumétrico (Q) y el área de sedimentación equivalente (Σ) de la centrifuga. La comparación entre diferentes centrifugas, tales como entre la centrifuga a escala industrial (IS) y la centrifuga de laboratorio (USD) puede ser realizada mediante la siguiente ecuación ⁽⁴⁶⁾:

$$\frac{Q_{IS}}{\Sigma_{IS} \cdot c_{IS}} = \frac{V_{USD}}{c_{USD} \cdot t_{USD} \cdot \Sigma_{USD}} \quad (17)$$

Dónde:

Q_{IS} – Caudal de alimentación en la centrifuga industrial (m³/s).

t_{USD} – Tiempo de residencia en la centrífuga de laboratorio (seg).

c_{USD} – Factor de corrección (toma en cuenta los patrones de flujo de fluido no lineal) cuyo valor depende del diseño de la centrífuga. Como la centrífuga de laboratorio es la usualmente considerada como referencia, entonces $c_{USD} = 1,0$.

c_{IS} - Factor de corrección (toma en cuenta los patrones de flujo de fluido no lineal) cuyo valor depende del diseño de la centrífuga. Para centrífugas de discos, $c_{IS} = 0,4$.

Σ_{IS} – Área de sedimentación equivalente de la centrífuga industrial (para centrífugas de discos se calcula mediante las ecuaciones (5) y (12).

Σ_{USD} – Área de sedimentación equivalente de la centrífuga de laboratorio, calculada mediante la siguiente ecuación:

$$\Sigma_{USD} = \frac{V \cdot \omega^2 \cdot (3 - 2 \cdot x - 2 \cdot y)}{6 \cdot g \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot R_o}{R_o + R_i} \right)} \quad (18)$$

Dónde:

V – Volumen de material de proceso en el tubo de laboratorio (m^3).

R_i – Radio interior (distancia entre el centro de rotación y el tope del líquido) (m).

R_o – Radio exterior (distante entre el centro de rotación y el fondo del tubo) (m).

x – Tiempo fraccional requeridos para la aceleración.

y – Tiempo fraccional para la desaceleración.

g – Aceleración de la gravedad = $9,82 \text{ m/s}^2$.

Esta metodología es desarrollada para material de alimentación con alto contenido de sólidos, por lo cual resulta necesario superar el fenómeno de la sedimentación entorpecida (en inglés ***hindered settling***) en aras de obtener una buena comparación entre la clarificación a escala de laboratorio con aquella observada a escala piloto ⁽⁴⁷⁾.

La sedimentación entorpecida comienza a ocurrir cuando la concentración de sólidos es elevada. A medida que la concentración de sólidos se incrementa, la tasa de sedimentación de las partículas decrece debido al incremento de las fuerzas interpartículas. Las partículas que sedimentan más lento serán estorbadas por aquellas que están por debajo de ellas. Esto es particularmente observado en el espacio confinado de una centrífuga de laboratorio. Si existe una concentración de sólidos muy elevada puede ocurrir la sedimentación “***blanket***”, que surge cuando las partículas sedimentan todas a la misma velocidad y forman un floculo grande que barre las partículas finas en el líquido. Esto conduce a una sobrepredicción en la escala de laboratorio con respecto a lo observado en la centrífuga de flujo continuo de escala piloto.

Sin embargo, debido al elevado esfuerzo cortante en la zona de alimentación y el tiempo de residencia corto en el tazón de la centrífuga, se cree que los flóculos no tienen tiempo suficiente para reformarse y por tanto la sedimentación entorpecida no constituye una preocupación principal a escala piloto. Esto no es el caso de la escala de laboratorio donde la longitud de tiempo entre el material bajo cizallamiento y la clarificación pudiera ser suficiente para que los flóculos se reformen y ocasionen la aparición de

sedimentación entorpecida, lo cual incrementa por consiguiente el rendimiento de clarificación en la escala de laboratorio comparada con la escala piloto bajo una condición de separación equivalente ⁽⁴⁷⁾. En un estudio pionero ⁽⁴⁹⁾ describió las ecuaciones de movimiento para las partículas sólidas en una centrífuga de discos usando los perfiles de velocidad líquida de Bohman y se dedujeron los procedimientos de escalado correspondientes para el gráfico de eficiencia. En este estudio se encontró que, para centrífugas geoméricamente similares usando los mismos sistemas (esto es, mismo líquido y sólido), la eficiencia de separación es una función de tres variables adimensionales en lugar de una sola. Asimismo, Mannweiler y Hoare ⁽⁴³⁾ examinaron como el desempeño de la separación en una centrífuga de discos de escala industrial puede ser evaluado usando cantidades relativamente pequeñas del fluido del proceso. Esto necesita el **scale-down** de la centrífuga de discos, en donde una de las vías examinadas en este estudio para lograr esto es mediante la reducción de la proporción activa de los discos disponibles para efectuar la separación deseada. Se demostró que una centrífuga de discos puede ser **scaled-down** hasta un 10 % de su área de separación disponible total en aras de examinar el recobrado de partícula, mientras que si la centrífuga será empleada para un recobrado de partícula casi completo (> 90 %), como es el caso normal, entonces la predicción de la capacidad de procesamiento será solamente ligeramente subestimada (< 1 %).

Maybury *et al* ⁽²⁰⁾ describieron un método para el **scale-down** de una centrífuga de discos con un número reducido de discos de separación y también de la acumulación de líquido y sólido en el tazón de la centrífuga, con el objetivo de permitir que exista un volumen reducido de material de proceso para el estudio de clarificación deseado. En este estudio se emplearon suspensiones de partículas de acetato de polivinilo y levadura panadera como fluidos de alimentación a la centrífuga, obteniendo como resultado que las curvas de eficiencia de grado producidas mediante las variantes **scaled-down** siguieron cercanamente las curvas de la máquina con todos los discos activos. Esto trajo consigo la obtención de sobrenadantes con la misma distribución de tamaño de volumen y concentración cuando se empleó la metodología **scaled-down** para imitar la operación a gran escala.

Tustian *et al* ⁽⁴⁶⁾ aplicaron un método novedoso de USD para predecir con exactitud el comportamiento de clarificación a gran escala de alimentados celulares (*Escherichia coli* W3110 y *Saccharomyces cerevisiae*) con contenido de sólidos en exceso del 10 % (m/v). La metodología presentada en este estudio tiene como objetivo lograr un método genérico e industrialmente factible para la predicción del desempeño de la clarificación de tales células y verificar el método de USD aplicado mediante su comparación con datos de centrifugación a escala piloto utilizando una centrífuga de discos.

Berrill *et al* ⁽⁴⁷⁾ utilizaron un modelo de **scale-down** predictivo que permite la optimización rápida de las condiciones de operación para la floculación seguida de una etapa de centrifugación usando solamente pequeños volúmenes (20 mL) de extracto de *E. coli* con alta densidad de sólidos (~ 20 % m/m). Los resultados sugirieron que la adición de elevados niveles de un polímero catiónico puede incrementar sustancialmente la fortaleza de las partículas floculadas, mejorando por tanto el rendimiento de clarificación global en una centrífuga de escala industrial, lo cual fue verificado por medio de una centrífuga de discos de escala piloto.

En ⁽²⁶⁾ se propuso una metodología para la determinación rápida de las condiciones de operaciones adecuadas para el recobrado centrífugo de caldos de fermentación de alta densidad celular. También se presentó un método de ultra *scale-down* para la predicción de los niveles de clarificación y deshidratación logrados en un rango de centrífugas típicas de alta velocidad. También, junto con una herramienta de visualización, denominada Ventana de Operación, este método suministra un análisis rápido del desempeño de separación y evaluación de las condiciones de operación disponibles, como una ayuda en la selección del equipamiento de centrifugación más apropiado para un proceso determinado. Este estudio examinó centrífugas de disco semicontinuas y máquinas operadas por lote tales como tazones multicámaras y CarrPowerfuges[®], mientras que el método fue demostrado procesando cultivos de *Pichia pastoris* de elevada densidad celular.

En ⁽²¹⁾ se aplicó una metodología de USD para la clarificación de caldo celular con centrífugas industriales en dos líneas celulares comunes (NSO y GS-CHO) que expresan varios anticuerpos monoclonales terapéuticos. Se encontró que la metodología USD aplicada fue efectiva en tomar en cuenta tanto los esfuerzos de corte como gravitacionales en el desempeño de la clarificación con tres centrífugas de disco continuas a escala piloto e industrial. También, se observaron diferentes respuestas al corte con las dos líneas celulares diferentes y aún en la misma línea celular expresando diferentes productos.

En Lopes y Keshavarz-Moore ⁽⁴⁴⁾ se estudió el desarrollo de un método de USD de pequeña escala (< 50 mL) para predecir los niveles de deshidratación en un rango de centrífugas a escala piloto usualmente utilizadas en la industria biofarmacéutica, las cuales fueron una centrífuga de tazón tubular y centrífuga de discos, involucrando el empleo de suspensiones de levadura panadera en la experimentación y verificación inicial. Ambos tipos de centrífugas tuvieron descarga intermitente de sólidos. Luego, este método de USD novedoso fue aplicado para predecir la deshidratación de un caldo de fermentación fresco de *Pichia pastoris* usando el mismo tipo de equipamiento de escala piloto. Finalmente, las variables tiempo de residencia, fuerza centrífuga relativa y altura de sólidos fueron empleadas para el desarrollo de la metodología de USD para imitar la deshidratación a lo largo de un rango de tipos de centrífugas y caudales de alimentación.

Stoffels *et al* ⁽⁴⁵⁾ utilizaron dos centrífugas de discos para estudiar la cosecha de células de la microalga *Chlamydomonas reinhardtii* cepa TN72. También aplicaron una plataforma de USD para examinar además el procesamiento de la microalga con el objetivo de establecer ventanas de operación para su posterior escalado. En este estudio, el recobrado de sólidos excedió el 99,5 %, mientras que la pérdida de producto (antibiótico basado en proteína, ABP) en el sobrenadante estuvo por debajo de 2 % -3 %. También se observó que la cepa TN72 es intacta seguido de las elevadas condiciones de cizallamiento de la zona de alimentación, sin embargo, la descarga en ambas centrífugas trajo consigo la ruptura celular completa y, para el caso del ABP, ocurrió su degradación parcial en las horas subsiguientes. Se encontró que las metodologías de USD pueden predecir la eficiencia de clarificación en la liberación de producto debido a las fuerzas de cizallamiento en la entrada de la centrífuga. Sin embargo, la centrifugación USD no puede predecir la ruptura celular en la descarga.

En Boychyn *et al* ⁽⁴⁾ se empleó la DFC para modelar las elevadas fuerzas de flujo en la zona de alimentación de una centrífuga de tazón multicámara y reproducir estas en un separador de discos

pequeño de elevada velocidad de rotación. La conexión del dispositivo con la centrifugación **scale-down** permitió la buena estimación del rendimiento y comportamiento de varias centrífugas de flujo continuo (de discos, tazón multicámara y CARR Powerfuge®) para el procesamiento precipitados de proteínas sensibles al esfuerzo cortante. Finalmente, y de manera importante, el rendimiento y comportamiento de la centrífuga de tazón multicámara de escala productiva fue predicho con más exactitud por el proceso de **scale-down** que el de escala piloto.

Joseph *et al* ⁽⁶⁾ aplicaron una técnica **scale-down** basada en el uso de un dispositivo de esfuerzo cortante y una centrífuga de escala de banco para obtener una metodología preparativa que pronostique satisfactoriamente el rendimiento de una centrífuga continua y filtros de pulido. El uso de esta metodología permitió evaluar los efectos de las condiciones de cultivo celular y los parámetros de los procesos de centrifugación a gran escala en el rendimiento de la filtración subsiguiente en una etapa temprana del desarrollo de proceso donde la disponibilidad de material es limitada.

Finalmente, Felber ⁽⁴⁸⁾ desarrolló un proceso a escala de laboratorio que imita las características de proceso de una centrífuga de discos de escala industrial. El diseño de este proceso de escala de laboratorio fue realizado mediante una técnica de USD el cual se basó en un estudio de la literatura y la simulación del flujo en el proceso de separación.

Para Tustian *et al* ⁽⁴⁶⁾ el **scale-down** de procesos industriales es una herramienta valiosa para minimizar el tiempo y costo requerido para el desarrollo de bioprocesos. La habilidad para predecir el rendimiento y desempeño de procesos a gran escala, usando equipamiento de escala de laboratorio, es importante para asegurar la evaluación rápida del proceso y por consiguiente del desarrollo rápido de exitosas operaciones a escala industrial. Los estudios recientes se han enfocado en el concepto del USD y su habilidad para predecir con exactitud el desempeño de operaciones a escala industrial usando cantidades en mililitros de material de proceso en combinación con la modelación matemática y ventanas de operación.

- Otros estudios

En ⁽¹⁹⁾ se consideró la caracterización reológica de la fase sólida en centrífugas de discos aplicadas en la bio-industria, en donde se investigaron tres propiedades discriminatorias de la fase de sólidos: velocidad de sedimentación de la partícula, ángulo de reposo y la viscosidad de la fase de sólidos. La caracterización reológica resultante puede ser usada para propósitos de diagnóstico en el proceso de selección de las centrífugas industriales y para la optimización del manejo de sólidos de la centrífuga en el procesamiento de biomasa de sistemas en suspensión.

König *et al* ⁽²³⁾ visualizaron el proceso de separación dentro de la abertura del disco superior de una centrífuga de discos con un tazón superior transparente usando una cámara de alta velocidad. También analizaron y determinaron la influencia de los parámetros de la geometría del disco en el caudal y la separación de partícula mediante el procesamiento de imagen y las áreas de clarificación sin usar, llegando a la conclusión que la relación del área de clarificación sin usar es significativa, mostrando además que el potencial existente para incrementar el área de clarificación equivalente en estas centrífugas radica en el uso eficiente del área de clarificación que ya se encuentra disponible en los discos. Muralidharan *et al* ⁽⁷⁾ discuten tres métodos para la evaluación del esfuerzo cortante en una centrífuga de discos en función del diseño de la centrífuga y los parámetros operacionales: la longitud del remolino,

velocidad periférica y los modelos de disipación de potencia. Además, estos autores ilustran el espacio de diseño operacional para una centrífuga de discos, mostrando un balance entre la capacidad de sedimentación de la partícula y el esfuerzo constante.

En Dong *et al* ⁽³⁾ se estudió el proceso de flujo de dos fases (oleosa y acuosa) dentro de una centrífuga de discos y se exploró el proceso de fragmentación y acumulación de las gotas de agua. Para llevar a cabo esta investigación se empleó el Modelo de Balance de Población con el objetivo de simular numéricamente el flujo de dos fases de aceite y agua en la centrífuga de discos y comparar sus resultados con los ensayos realizados. Se encontró que, con el incremento de la velocidad rotacional, la eficiencia de separación se incrementa tanto en los ensayos como la simulación numérica, existiendo una diferencia entre los ensayos y la simulación por debajo del 1%. También la coalescencia de las gotas de agua ocurrió principalmente en el canal de separación, según se encontró mediante el análisis de las leyes del flujo interno en la centrífuga de discos, lo cual suministra las bases para mejorar la estructura de la centrífuga de discos, incrementar la eficiencia de separación y reducir el espacio del piso.

Finalmente, en ⁽⁵⁰⁾ se midieron las vibraciones de una centrífuga de discos y aplicaron técnicas de *Machine Learning* (ML) para detectar si el separador contiene solo agua o si existen partículas presentes. También se combinaron siete algoritmos de clasificación de ML con tres estrategias de ingeniería y evaluaron satisfactoriamente su modelo con datos de vibración en una centrífuga de discos experimental.

Conclusiones

La presente revisión proporciona una comprensión integral y profunda acerca de la importancia de las centrífugas de discos en la industria de procesamiento química, farmacéutica, alimenticia y biotecnológica. También examina diversos tópicos relacionados con las centrífugas de discos, entre los cuales se pueden mencionar su operación, tipos, características operacionales y geométricas, las correlaciones y ecuaciones que las representan, su evaluación para diferentes tipos de procesos y operaciones, los métodos de escalado y *scale-down* empleados para predecir su desempeño y rendimiento, y otros estudios específicos realizados sobre estos tipos de centrífugas. Lo anterior se realizó mediante una revisión exhaustiva y sistémica de la literatura disponible relacionada con estas temáticas. La centrífuga de discos ha sido aplicada no solo para separar sólidos/líquidos sino además líquidos/líquidos entre sí mediante el uso de elevadas fuerzas centrífugas en un proceso continuo, cuya descarga de la fase sólida puede ser manual, intermitente o continua. La naturaleza continua de las centrífugas de discos permite el procesamiento de volúmenes elevados de material de alimentación sin que ocurra su atascamiento o atoramiento. Sin embargo, la habilidad de deshidratación decreciente de la operación de descarga continua puede conducir a elevadas pérdidas de producto y un incremento de los sólidos escapando en la corriente de sobrenadante cuando se compara con la operación de descarga intermitente o semicontinua.

Una preocupación potencial relacionada con la cosecha de cultivos de células de mamíferos es el impacto del cizallamiento o esfuerzo cortante sobre la clarificación, ya que en particular la centrífuga de discos puede introducir un ambiente de elevado cizallamiento que puede llegar a ser destructivo para las células

de mamíferos, conduciendo por tanto a la aparición de impurezas en las operaciones de purificación posteriores, así como también problemáticas latentes en la calidad del producto global. A pesar de que menores caudales de alimentación a menudo se traduce en una mayor separación, esto puede llegar a incrementar la lisis celular debido a mayores tiempos de residencia en la zona de alimentación. Por tanto, se recomienda encontrar un balance entre la velocidad de rotación de la centrífuga de discos y el caudal de alimentación. La DFC ha demostrado ser un elemento clave en el desarrollo del rango óptimo de operación y puede jugar un rol mayor en la optimización de proceso de sistemas complejos tales como las centrífugas de discos.

El proceso de escalado de las centrífugas de discos tiene como objetivo modelar la eficiencia de clarificación basadas en el caudal de alimentación, velocidad rotacional y tamaño de la centrífuga. El método principal de modelación de la centrífuga de discos es mediante el concepto de la teoría Sigma, la cual se basa en el caudal y a lo que se refiere como el área de sedimentación equivalente o factor Sigma, que toma en cuenta la geometría de la centrífuga y las velocidades de rotación. A pesar de la ayuda potencial del factor Sigma, el escalado de centrífugas de discos se mantiene como un desafío considerable debido a la ausencia de modelos a escala de banco.

Para aplicaciones a escala industrial con volúmenes de caldo de cultivo superiores a los 5 000 L, las centrífugas de discos son a menudo la única opción debido a su elevada capacidad de procesamiento, robustez y flexibilidad de operación. Las centrífugas de discos se mantendrán probablemente como el método de cosecha más popular y de uso extensivo en la industria biofarmacéutica en aquellas etapas de cosecha que conlleven el procesamiento de elevados volúmenes de caldos de fermentación.

Contribuciones de los autores: Conceptualización, A.P.S. y R.M.S.S.; Metodología, A.P.S., R.M.S.S. y E.E.B.F.; Software, A.P.S.; Validación, A.P.S., E.E.B.F. y L.C.A.A.; Análisis formal, R.M.S.S., E.E.B.F., L.J.G., y L.T.A.L.; Investigación, A.P.S., R.M.S.S., E.E.B.F., L.C.A.A., L.J.G., L.T.A.L.; Recursos, A.P.S., R.M.S.S., y E.E.B.F.; Curación de datos, A.P.S., R.M.S.S., y L.T.A.L.; Redacción—preparación del borrador original, E.E.B.F., L.C.A.A., L.J.G., y L.T.A.L.; Redacción—revisión y edición, A.P.S., y R.M.S.S.; Visualización, L.J.G. y L.T.A.L.; Supervisión, A.P.S.; Administración del proyecto, A.P.S., y R.M.S.S.; Adquisición de fondos, A.P.S., L.J.G., y R.M.S.S. Todos los autores han leído y aprobado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Agradecimientos: Los autores del manuscrito desean reconocer y agradecer la ayuda de operarios y tecnólogos que laboran en el Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología de Camagüey por sus valiosas contribuciones y recomendaciones con el fin de actualizar y mejorar este manuscrito.

Referencias

1. Richardson A, Walker J. Continuous Solids-Discharging Centrifugation. *BioProcess International*. 2018;16(4):38-48. <https://doi.org/https://www.bioprocessintl.com/separation->

[purification/continuous-solids-discharging-centrifugation-a-solution-to-the-challenges-of-clarifying-high-cell-density-mammalian-cell-cultures](#)

2. Tebbe H, Liitkemeyer D, Gudermann E, Heidemann R, Lehmann J. Lysis-free separation of hybridoma cells by continuous disc stack centrifugation. *Cytotechnology*. 1996;22:119-27. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF00353931>
3. Dong H, Wan R, Huang C, Liu S, Luo S, Chen L, et al. Numerical Study of Internal Flow Field in a Disc Stack Centrifuge Based on Mixture-PBM Model. *Applied Sciences*. 2024;14:8070. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app14178070>
4. Boychyn M, Yim SSS, Bulmer M, More J, Bracewell DG, Hoare M. Performance prediction of industrial centrifuges using scale-down models. *Bioprocess and Biosystems Engineering*. 2004;26(6):385-91. <https://doi.org/10.1007/s00449-003-0328-y>
5. Zhang J, Senica I, Anjum F, Nourafkan E, Mattia D, Xie M, et al. Downstream processing strategies for the sustainable production of cultivated meat. *Trends in Food Science & Technology*. 2026;172:105665. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2026.105665>
6. Joseph A, Kenty B, Mollet M, Hwang K, Rose S, Goldrick S, et al. A Scale-Down Mimic for Mapping the Process Performance of Centrifugation, Depth, and Sterile Filtration. *Biotechnology and Bioengineering*. 2016;113(9):1934-41. <https://doi.org/10.1002/bit.25967>
7. Muralidharan N, Younger T, Chan G, Davis M. Shear Assessment for Cell-Culture Clarification in a Disc-Stack Centrifuge. *BioProcess International*. 2024;22(3):23-8. <https://www.bioprocessintl.com/separation-purification/shear-assessment-for-cell-culture-clarification-in-a-disc-stack-centrifuge>
8. Chlup PH, Bernard D, Stewart GG. Disc Stack Centrifuge Operating Parameters and Their Impact on Yeast Physiology. *Journal of the Institute of Brewing*. 2008;114(1):45-61.
9. Milledge JJ, Heaven S. Disc Stack Centrifugation Separation and Cell Disruption of Microalgae: A Technical Note. *Environment and Natural Resources Research*. 2011;1(1):17-24. <https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.2008.tb00305.x>
10. Felfoul I, Lopez C. Milk fat globule fractions recovered by disc stack centrifugal separation of camel milk: Process-induced fat balance, microstructure and lipid composition as a function of size. *LWT - Food Science and Technology*. 2025;215:117223. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.117223>
11. Márquez AJ, Maza GB. Machine Learning Application in Process on Extra Virgin Olive Oil Elaboration Disk Stack Vertical Centrifuge Modeling. *International Journal of Computer Applications*. 2020;176(37):30-5. <https://doi.org/10.5120/ijca2020920511>
12. Majekodunmi SO. A Review on Centrifugation in the Pharmaceutical Industry. *American Journal of Biomedical Engineering*. 2015;5(2):67-78. <https://doi.org/10.5923/j.ajbe.20150502.03>
13. Costagli G. The use of disc stack centrifuge in the virgin olive oil industry. *Journal of Agricultural Engineering*. 2018;XLIX(784):75-80. <https://doi.org/10.4081/jae.2018.784>
14. Dryden WA, Larsen LM, Britt DW, Smith MT. Technical and economic considerations of cell culture harvest and clarification technologies. *Biochemical Engineering Journal*. 2021;167:107892. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2020.107892>

15. Ortiz CC, Arcos PP, Feijoo RJH, Ma W, Logroño W, Tian H, et al. Waste-to-Energy technologies for municipal solid waste management: Bibliometric review, life cycle assessment, and energy potential case study. *Journal of Cleaner Production*. 2024;480:143993. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143993>
16. Baust HK, Lam Z, Hay M, Nirschl H, Gleiß M. Development of a dynamic process model for the mechanical fluid separation in disk stack centrifuges. *Separation and Purification Technology*. 2025;377:134230. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.134230>
17. Harrison RG, Todd PW, Rudge SR, Petrides DP. *Bioseparations science and engineering*. 2nd ed. New York, USA: Oxford University Press; 2015.
18. Leung WW-F. *Centrifugal Separations in Biotechnology*. 2nd ed. Oxford, United Kingdom: Elsevier; 2020.
19. Häggmark C, Königsson S. Rheological Characterization of Solids Phase in Biomass Processes of Disc-Stack Centrifuges. *Chemical Engineering and Technology*. 2018;41(12):2289–97. <https://doi.org/10.1002/ceat.201800288>
20. Maybury JP, Mannweiler K, Titchener-Hooker NJ, Hoare M, Dunnill P. The performance of a scaled down industrial disc stack centrifuge with a reduced feed material requirement. *Bioprocess Engineering*. 1998;18:191-9. <https://doi.org/10.1007/s004490050430>
21. Zaman F, Allan CM, Ho SV. Ultra Scale-Down Approaches for Clarification of Mammalian Cell Culture Broths in Disc-Stack Centrifuges. *Biotechnol Prog*. 2009;25(6):1709-16. <https://doi.org/10.1002/btpr.275>
22. Merkel T, Blättler O, Königsson S. Flocculant Screening Method at Lab Scale for Application in Disc Stack Centrifuges with Hermetic Design. *Chemical Engineering and Technology*. 2018;41(12):2312-22. <https://doi.org/10.1002/ceat.201800202>
23. König J, Janssen N, Janoske U. Visualization of the deposition mechanisms in disk stack centrifuges with an acrylic glass bowl top and high-speed image processing. *Separation Science and Technology*. 2020. <https://doi.org/10.1080/01496395.2020.1728326>
24. Iammarino M, Nti-Gyabaah J, Chandler M, Roush D, Göklen K. Impact of Cell Density and Viability on Primary Clarification of Mammalian Cell Broth. *BioProcess International*. 2007:38-50. <https://www.bioprocessintl.com/filtration/impact-of-cell-density-and-viability-on-primary-clarification-of-mammalian-cell-broth>
25. Cambiella A, Benito JM, Pazos C, Coca J. Centrifugal separation efficiency in the treatment of waste emulsified oils. *Chemical Engineering Research and Design*. 2006;84(A1):69-76. <https://doi.org/10.1205/cherd.05130>
26. Salte H, King JMP, Baganz F, Hoare M, Titchener-Hooker NJ. A Methodology for Centrifuge Selection for the Separation of High Solids Density Cell Broths by Visualisation of Performance Using Windows of Operation. *Biotechnology and Bioengineering*. 2006;95(6):1218-27. <https://doi.org/10.1002/bit.21102>

27. Yang M, Liu X, Howell JA, Chengb H. Analysis and estimation/prediction of the disk stack centrifuge separation performance – Scaling from benchtop fixed rotor type to disk stack centrifuges. *Separation Science and Technology*. 2019;1-7. <https://doi.org/10.1080/01496395.2019.1636820>
28. Ninga KA, Desobgo SCZ, Nso EJ, Kayem J. White-flesh guava juice clarification by a fixed-angle conical rotor centrifuge laboratory and characterization of continuous disk stack centrifuges. *Heliyon*. 2022;8:e11606.
29. Ekin O, Çerçi Y. A discrete element modeling investigation of the centrifugal separation process of bovine milk somatic cells. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*. 2020;38(1):95-109. <https://sigma.yildiz.edu.tr/storage/upload/pdfs/1629806441-en.pdf>
30. Kempken R, Preissmann A, Berthold W. Assessment of a Disc Stack Centrifuge for Use in Mammalian Cell Separation. *Biotechnology and Bioengineering*. 1995;46(2):132-8. <https://doi.org/10.1002/bit.260460206>
31. Schmidt M, Krützfeldt R, Roß A. Validation of a separator CSA8 regarding sterilization for aseptic processes. *Process Biochemistry*. 1999;34(8):769-76. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(98\)00151-4](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(98)00151-4)
32. Wang Y, Forssberg E, Li J, Pan Z. Continuous ultra-fine classification in a disk-stack nozzle centrifuge - effects of G-forces and disc geometry. *China Particuology*. 2003;1(2):70-5. [https://doi.org/10.1016/S1672-2515\(07\)60111-0](https://doi.org/10.1016/S1672-2515(07)60111-0)
33. Shekhawata LK, Sarkara J, Gupta R, Hadpeb S, Rathorea AS. Application of CFD in Bioprocessing: Separation of mammalian cells using disc stack centrifuge during production of biotherapeutics. *Journal of Biotechnology*. 2018;267:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2017.12.016>
34. Esmaeilnejad-Ahranjani P, Hajimoradi M. Optimization of industrial-scale centrifugal separation of biological products: comparing the performance of tubular and disc stack centrifuges. *Biochemical Engineering Journal*. 2022;178:108281. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2021.108281>
35. Ott V, Müller J, Schirmer C, Weiss N, Göhmann R, Biewald A, et al. Qualification of a Single-Use Disk Stack Separator for Cell Separation in Mammalian Cell-Based Antibody Production. *Chemie Ingenieur Technik*. 2022;94(12):1-9. <https://doi.org/10.1002/cite.202200096>
36. D'Incecco P, Bancalari E, Gatti M, Ranghetti A, Pellegrino L. Low-temperature centrifugation of milk for manufacture of raw milk cheeses: Impact on milk debacterization and cheese yield. *LWT - Food Science and Technology*. 2020;118:108789. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108789>
37. Jukkola A, Hokkanen S, Kämäräinen T, Partanen R, Heino A, Rojas OJ. Changes in milk fat globules and membrane lipids under the shear fields of microfiltration and centrifugation. *Journal of Membrane Science*. 2019;573:218-25. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.12.007>
38. Espuny G. Scale-Down Characterisation of Post-Centrifuge Flocculation Processes and the Study of its Impact upon Downstream Processing during Mammalian Cell Antibody Production. London, U.K: University College London; 2016.
39. Agarwal H, Thwin C, Kumar BT. Single-use centrifugal separator enables intensification of the clarification process in biomanufacturing of recombinant proteins. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. 2023;98(5):1321-32. <https://doi.org/10.1002/jctb.7351>

40. Walker J, Lam Y, Loman A, Smelko JP, Rohr M. Evaluation of a single-use disk stack centrifuge for improved efficiency and sustainability at 1000 L GMP manufacturing scale. *Biotechnology and Bioengineering*. 2023;120(11):3347-56. <https://doi.org/10.1002/bit.28519>
41. Xu A, Gong L, Deng C, Sheng W, Hua C, Lu B, et al. Evaluation of single-use disk stack continuous centrifuge to harvest monoclonal antibody from cell culture fluid. *Biotechnology Progress*. 2025;e70084. <https://doi.org/10.1002/btpr.70084>
42. Pimentel RM, Sánchez AP, Zamora J, López Y, Segura RM, Olazábal A. Evaluation of a Semi-Continuous Disk-Stack Centrifuge for the Harvest of *Tsukamurella Paurometabola* C-924 Bacterium. *Tecnológicas*. 2025;28(62):e3263. <https://doi.org/10.22430/22565337.3263>
43. Mannweiler K, Hoare M. The scale-down of an industrial disc stack centrifuge. *Bioprocess Engineering*. 1992;8:19-25. <https://doi.org/10.1007/BF00369259>
44. Lopes AG, Keshavarz-Moore E. Prediction and Verification of Centrifugal Dewatering of *P. pastoris* Fermentation Cultures Using An Ultra Scale-Down Approach. *Biotechnology and Bioengineering*. 2012;109(8):2039-47. <https://doi.org/10.1002/bit.24478>
45. Stoffels L, Finlan A, Mannall G, Purton S, Parker B. Downstream Processing of *Chlamydomonas reinhardtii* TN72 for Recombinant Protein Recovery. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2019;7:1-13. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00383>
46. Tustian AD, Salte H, Willoughby NA, Hassan I, Rose MH, Baganz F, et al. Adapted Ultra Scale-Down Approach for Predicting the Centrifugal Separation Behavior of High Cell Density Cultures. *Biotechnol Prog*. 2007;23:1404-10. <https://doi.org/10.1021/bp070175d>
47. Berrill A, Ho SV, Bracewell DG. Ultra Scale-Down To Define and Improve the Relationship between Flocculation and Disc-Stack Centrifugation. *Biotechnol Prog*. 2008;24:426-31. <https://doi.org/10.1021/bp070305i>
48. Felber M. Ultra Scale-Down of a Disc Stack Separator. Graz: Graz University of Technology; 2010.
49. Gupta SK. Scale-up Procedures for Disc-Stack Centrifuges. *Chemical Engineering Journal*. 1981;22(1):43-9. [https://doi.org/10.1016/0300-9467\(81\)85004-6](https://doi.org/10.1016/0300-9467(81)85004-6)
50. Merkelbach S, Afroze L, Janssen N, Enzberg Sv, Kühn A, Dumitrescu R. Using vibration data to classify conditions in disk stack separators. *Vibroengineering Procedia*. 2022;46:21-6. <https://doi.org/10.21595/vp.2022.23000>

| **Received:** [30 abril 2026] | **Accepted:** [12 junio 2026] | **Published:** [15 septiembre 2026] |

Citation: Pérez, A; Segura, R; Bover, E; Arias, L; Jiménez, L; Álvarez, L. Las centrífugas de discos: una revisión global *Bionatura*. 2026. Volumen 11, No 2. <https://doi.org/10.70373/RB/2026.11.02.6>

Peer review information: Bionatura thanks the anonymous reviewers for their contribution to the peer review of this work using <https://reviewerlocator.webofscience.com/>

All articles published by Bionatura Journal are freely and permanently accessible online immediately after publication, without subscription charges or registration barriers.

Publisher's Note: Bionatura stays neutral concerning jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)