

RESEÑA

CONTRIBUCION AL ESTUDIO DE LA HIDRODINAMICA Y LA TRANSFERENCIA DE MASA EN REACTORES TIPO TANQUE AGITADO MEDIANTE UN ENFOQUE GLOBAL Y LOCAL EN SISTEMAS GAS-LIQUIDO

Ing. Daniel García-Cortés, Investigador Agregado.

Dpto. de Desarrollo Tecnológico, Centro de Química Farmacéutica, Calle 200 y 21, Apartado Postal 16042, Atabey, Playa, Ciudad de La Habana, Cuba. E-mail: daniel.garcia@infomed.sld.cu.

27 de agosto de 2003.

TRABAJO PRESENTADO EN OPCION AL GRADO CIENTIFICO DE DOCTOR EN CIENCIAS TECNICAS.

Los tanques agitados han sido utilizados históricamente en la industria biotecnológica, en la alimenticia y en la química. En Cuba constituye el tipo de reactor utilizado por excelencia para la mayoría de las producciones, tanto biotecnológicas como químicas, de ahí la importancia que tiene continuar profundizando en las investigaciones básicas sobre este tipo de reactor.

La función principal de la agitación es acelerar los procesos de transferencia de calor y de masa, lo cual se consigue mediante la introducción de energía en el volumen del fluido por medio de la rotación del impelente y la conversión de esta energía en movimiento hidrodinámico. Es por ello que la comprensión detallada de la hidrodinámica (los campos de velocidades, la turbulencia, la distribución de la velocidad de disipación de energía cinética turbulenta, etc.) es esencial para la síntesis de los procesos a llevar a cabo en los tanques agitados. Por ejemplo, los estudios de la disipación de la energía turbulenta en los tanques agitados, especialmente en la región del impelente y en la región de descarga de este último, son necesarios para avanzar en la comprensión de fenómenos de mezclado como la formación de dispersiones de burbujas y, por tanto, en la síntesis de procesos de fermentación aerobia y de reacciones gas-líquido, entre otros.

La caracterización de los campos de flujo generados por los impelentes en los tanques agitados tiene una gran relevancia, ya que permite identificar el efecto de varios parámetros sobre el desempeño de estos en términos del tiempo de mezclado, o rendimiento y selectividad de los esquemas de reacción, y en particular: a) si una pieza específica del equipo (el impelente, o algún serpentín de calentamiento o enfriamiento) afecta el proceso, si es su tamaño o su forma, o en el caso del agitador su velocidad de agitación; b) en qué extensión el volumen de la vasija es utilizado efectivamente o si alguna zona se comporta como una zona muerta. De ahí que un mejor conocimiento de la dinámica del fluido en el reactor permite mejorar los resultados de un proceso en términos de una reducción de los costos de operación o aumentar la productividad y la calidad del producto con el mismo gasto energético.

En los últimos años, las investigaciones relacionadas con la turbulencia en tanques agitados han estado dirigidas hacia dos objetivos: el primero, la caracterización de la turbulencia, y el segundo, el impacto de la turbulencia sobre los resultados de los procesos. De esta forma, se puede encontrar que variables que dependen de la energía turbulenta han sido relacionadas con el daño a las células, la dispersión de gas, el tiempo de mezclado, la ruptura de gotas, la cristalización y la floculación y coagulación. Dada la interconexión existente entre la turbulencia y los resultados de estos procesos, resulta evidente la importancia de la caracterización de la turbulencia en los tanques agitados.

Los progresos realizados en la caracterización de los campos de flujo en tanques agitados han conducido a la aplicación de modelos de procesos más racionales y a reglas de escalado con más sentido físico que lo que era posible previamente. Esto, a su vez, ha conducido a mejores predicciones de los resultados de los procesos para una geometría del tanque dada y ha elevado las posibilidades de éxito en la selección del impelente, en la especificación de la geometría del tanque y en los escalados de los procesos.

No obstante, en la actualidad, continúan los esfuerzos dedicados a la modelación matemática de la hidrodinámica en los tanques agitados debido a la necesidad de lograr una mayor comprensión de los procesos que tienen lugar en estos. Para ello, se requieren modelos que logren describir fenómenos locales y, que a su vez, sean lo suficientemente simples para no dar lugar a un esfuerzo de cómputo excesivo como por ejemplo, el modelo de la red de zonas. Estos modelos son de gran importancia para la evaluación de la interacción entre el flujo, la turbulencia y las reacciones químicas y bioquímicas durante la simulación de tanques agitados parcialmente segregados donde la formación de perfiles de concentración es una consecuencia de la interacción entre el mezclado, la transferencia de masa y la cinética de las reacciones que tienen lugar en ellos. Un ejemplo de este tipo de proceso lo constituyen las fermentaciones semi-continuas en tanques agitados industriales donde es posible encontrar perfiles de concentración de nutrientes y de oxígeno en los cuales la reactividad del sistema depende del acople de los campos segregados de nutrientes y oxígeno, con la cinética compleja de las biorreacciones, y donde la calidad del mezclado puede influir en la selectividad del proceso y, por ende, en el rendimiento del producto de interés.

Por otra parte, en la industria biotecnológica, los procesos aerobios son llevados a cabo fundamentalmente en medios acuosos, con sales iónicas, donde la transferencia de oxígeno está limitada debido a su baja solubilidad, es por ello que la velocidad de transferencia de oxígeno puede constituir una etapa limitante para los bioprocesos. Por tanto, constituye un objetivo de los ingenieros modificar los parámetros geométricos y de operación para mejorar el proceso de transferencia de masa gas – líquido. En este caso, si se logra mejorar la velocidad de transferencia modificando los parámetros geométricos, se puede obtener la misma velocidad de transferencia a una menor velocidad de agitación y como consecuencia, disminuir el consumo de potencia en los sistemas de agitación, lo cual conduce también a un ahorro en los costos de producción. Los consumos de potencia en los tanques agitados son elevados (típicamente de 1 a 5 kW/m³) y por ello, cualquier ahorro de energía es bien recibido. Esto es especialmente válido para las

fermentaciones, las cuales frecuentemente duran varios días. Por ejemplo, un fermentador típico de 10 m³ con un tiempo de residencia de 6 d consume alrededor de 3 000 kW · h por lote.

A pesar de que la geometría estándar en tanques agitados con turbinas Rushton ha sido ampliamente estudiada, existe una gran diversidad de posibles geometrías a implementar en los reactores tipo tanque agitado, teniendo en cuenta que la geometría óptima del reactor para realizar un proceso determinado depende del proceso que se va a llevar a cabo. Como consecuencia de esto, todavía persiste un campo de investigación básica y aplicada relacionada con los tanques agitados del cual podrían surgir diseños alternativos, más eficientes económicamente para los diferentes procesos a introducir en la industria, partiendo del conocimiento básico de la hidrodinámica y la transferencia de masa en los sistemas de agitación.

Para la realización de esta tesis sirvió de motivación la presencia en biorreactores comerciales de sistemas de agitación como la turbina de disco de cuatro paletas planas cuadradas y sistemas de doble turbina de disco con seis paletas planas cuadradas de los cuales se encuentra muy poca información en la bibliografía especializada sobre agitación y mezclado. Teniendo como premisa esta realidad, este trabajo constituye una contribución al estudio de la hidrodinámica y la transferencia de masa en tanques agitados. En ella se exponen los resultados de las investigaciones realizadas mediante un enfoque global y local de varias configuraciones geométricas de biorreactores comerciales con sistemas de agitación monofásicos y bifásicos, y se define la influencia que estas configuraciones geométricas ejercen sobre la hidrodinámica y la transferencia de masa en estos biorreactores.

La tesis está estructurada en cinco capítulos, además de Introducción, Conclusiones, Recomendaciones, Bibliografía y Agradecimientos. Consta de 166 páginas, 41 figuras y 21 tablas. Se refieren 136 trabajos, de los que más del 70 % corresponde a la última década y más del 90 % a los últimos veinte años. En los anexos se aporta el fundamento teórico de la velocimetría láser de efecto Doppler, varias tablas de resultados y dos programas utilizados.

La introducción aborda los antecedentes, las hipótesis y los objetivos del trabajo. El primer capítulo corresponde a la revisión bibliográfica y presenta un conjunto de conceptos básicos sobre hidrodinámica, transferencia de masa, turbulencia y modelación matemática de la dinámica de fluidos en tanques agitados, así como un análisis riguroso de los avances logrados en el estudio de cada uno de estos aspectos. En el segundo capítulo, se reporta la caracterización del flujo inducido por una turbina tipo disco con cuatro paletas cuadradas planas en un biorreactor tipo tanque agitado usando un velocímetro láser de efecto Doppler (LDV) en sistemas monofásico (líquido) y bifásico (gas-líquido), así como a la obtención de los parámetros adimensionales que lo caracterizan. Además, se analiza la influencia del incremento del área adimensional de cada paleta y el número de paletas sobre las diferentes características hidrodinámicas del flujo inducido por el impelente. El tercero presenta y discute los resultados de la caracterización hidrodinámica con un LDV de un biorreactor con el fondo semiesférico, con cuatro deflectores con claridad con respecto al fondo y a su pared, equipado con dos turbinas de disco con seis paletas cuadradas planas de iguales dimensiones en un régimen de flujos mezclados en un sistema monofásico y bifásico, así como con dos turbinas de disco con seis paletas cuadradas planas de diferentes dimensiones en un régimen de flujos mezclados en un sistema bifásico. En el cuarto capítulo se presenta la evaluación realizada en el biorreactor anterior de la influencia de la claridad entre las dos turbinas, el diámetro de la turbina superior, el diámetro del anillo del difusor y la posición de este último con respecto al impelente inferior sobre el consumo de potencia, el coeficiente global de transferencia de oxígeno y la eficiencia global de transferencia de oxígeno. El quinto capítulo está dedicado a la implementación del modelo de la red de zonas para modelar el flujo de líquido dentro de los biorreactores y determinar, utilizando las mediciones realizadas con el LDV, el parámetro del modelo "coeficiente de intercambio turbulento" para los sistemas de agitación caracterizados.

Entre los nuevos aportes al conocimiento científico del trabajo se encuentra la caracterización de la hidrodinámica en un biorreactor con una turbina de disco con cuatro paletas cuadradas planas con un LDV en un sistema monofásico y bifásico. La demostración del efecto positivo del aumento del área adimensional de cada paleta con respecto al incremento del número de paletas en las turbinas tipo disco con paletas planas sobre el índice de bombeo, el tiempo de renovación adimensional y el número de descarga de flujo; que esta influencia es similar para la eficiencia energética y negativo con respecto al número de circulación de flujo y el tiempo de circulación adimensional. Además, se propuso un nuevo parámetro para evaluar los sistemas de agitación denominado "índice de turbulencia", por medio del cual se puede valorar de forma global, la intensidad de la turbulencia en el volumen del reactor fuera del volumen de revolución del impelente.

También se reporta, por primera vez, la caracterización con un LDV de la hidrodinámica en un biorreactor con el fondo semiesférico, con cuatro deflectores con claridad con respecto al fondo y a su pared, equipado con dos turbinas de disco con seis paletas cuadradas planas de iguales dimensiones en un régimen de flujos mezclados en un sistema monofásico y bifásico, así como con dos turbinas de disco con seis paletas cuadradas planas de diferentes dimensiones en un régimen de flujos mezclados en un sistema bifásico. La comparación de los sistemas bifásicos estudiados demostró que el sistema de agitación – aireación con dos turbinas de disco con seis paletas cuadradas planas, donde el impelente superior es de menores dimensiones que el inferior, induce un flujo de líquido similar al inducido por el sistema con los dos impelentes de iguales dimensiones con una disminución del consumo de potencia. Esto tiene una aplicación práctica importante desde el punto de vista energético para sistemas bifásicos industriales donde represente un papel determinante la convección.

Por último, se determinaron los coeficientes de intercambio turbulento β , característicos del modelo de la red de zonas, que garantizan el error mínimo de las velocidades principales y secundarias para las configuraciones de los tanques agitados estudiados por comparación con los datos experimentales obtenidos con el LDV, contribuyendo de esta forma a ampliar el conocimiento sobre el impacto de la geometría de los tanques agitados sobre el valor de dicho coeficiente. Su valor para el modelo de red de zonas con diferentes flujos por lazos obtenido en el sistema de agitación con la turbina de disco con cuatro paletas planas cuadradas es ligeramente superior al reportado para sistemas con una sola turbina Rushton.