

Introducción

Debido a las consecuencias del calentamiento global y a las importantes emisiones de gases de efecto invernadero, actualmente se están llevando a cabo reflexiones y acciones internacionales para proponer soluciones para el desarrollo sostenible y la protección de los recursos terrestres. Uno de los principales ejes de acción es la estabilización, o incluso la reducción, de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera. El dióxido de carbono es el gas de efecto invernadero más importante, debido al aumento de la producción mundial, la deforestación y el uso intensivo de energía fósil [CAP 07]. Además, un área de investigación en rápida expansión se refiere a la estrategia propuesta para reducir la concentración de CO₂ en la atmósfera. Se proponen varios enfoques, como la reducción de las emisiones de este gas, su almacenamiento (geológico, en los océanos o por mineralización), su adsorción o su absorción por medios químicos, geológicos o biológicos [PIR 11].

Este libro está particularmente interesado en la fijación biológica del CO₂ mediante el uso de microalgas para, en la medida de lo posible, reducir el impacto ambiental de dicha captura. La biofijación de CO₂ por microalgas es la vía más prometedora, ya que estos microorganismos son los más eficientes en la captura de CO₂, en comparación con las plantas terrestres. En presencia de luz, las microalgas son capaces de asimilar el CO₂ para crecer mientras producen oxígeno y metabolitos secundarios a través de la fotosíntesis. La aplicación de microalgas con fines medioambientales representa, por tanto, una solución muy prometedora dado su potencial, las diversas ventajas relacionadas con su tasa de crecimiento y su alta tolerancia a las altas concentraciones de CO₂. Además, tienen un gran número de aplicaciones a escala científica e industrial en diferentes campos: la producción de moléculas de alto valor agregado utilizadas en el campo farmacéutico y cosmético, la nutrición humana y animal y la producción de energía renovable, mediante la síntesis biológica del hidrógeno, el metano y el combustible. Por lo tanto, el objetivo

principal de la biofijación de CO₂ por microalgas es combinar esta captura con la producción de moléculas de valor agregado.

La estrategia para la fijación óptima del CO₂ por microalgas se basa en un enfoque específico basado en una fase de selección de las especies de algas con las propiedades metabólicas y bioquímicas adecuadas para el consumo de CO₂; y en una segunda fase, el foco se ubica en la optimización de las condiciones de funcionamiento del proceso de cultivo y el mantenimiento del bioproceso en condiciones óptimas.

En la actualidad, existe poca explotación industrial del cultivo de microalgas para la captura de CO₂, debido principalmente a las dificultades de instrumentación, medición y modelización para este tipo de aplicaciones. Además, un paso importante e inevitable es el cultivo de microalgas a pequeña escala (a escala de laboratorio), con el fin de desarrollar herramientas adecuadas y sólidas, capaces de controlar el sistema de cultivo de microalgas, para capturar eficazmente el CO₂, por un lado, y que puedan ser transpuestas y aplicadas a sistemas de cultivo a gran escala, por otro.

En este contexto, el propósito de este libro consiste no sólo en proporcionar una visión general no exhaustiva de los trabajos de investigación recientes sobre el cultivo de microalgas para la captura de CO₂, sino también proponer estrategias avanzadas de estimación y control, ilustradas mediante ensayos experimentales de cultivo de *Chlorella vulgaris* en un fotobiorreactor instrumentado.

El diseño de un bioproceso eficiente para el cultivo de microalgas para la biofijación de CO₂ sigue el siguiente enfoque de implementación:

– modelización: un paso crucial, que determina la eficacia de las fases posteriores, es el desarrollo de un modelo pertinente de crecimiento de microalgas en el reactor. Esta etapa es la más delicada ya que el sistema a modelar es muy complejo y puede variar con el tiempo. El reto aquí es desarrollar un modelo simple pero suficientemente preciso para reproducir con fidelidad el comportamiento del sistema y poder controlarlo. En general, se proponen dos tipos de modelización: la modelización macroscópica, basada en el equilibrio de la materia [BAS 90] y la modelización metabólica [BAR 13]. El enfoque macroscópico es el preferido en el desarrollo de la ley de control puesto que converge hacia un modelo más simple con menos parámetros, de manera que su identificación resulta menos compleja que para el modelo metabólico [HEI 13]. El modelo macroscópico para el crecimiento de microalgas es altamente no lineal, e involucra no sólo elementos biológicos utilizados convencionalmente en bioprocesos de cultivo bacteriano, sino también la iluminación, cuya intensidad/calidad/duración determina el consumo de CO₂. La

fase de identificación de los parámetros de este modelo es una fase delicada debido a la no linealidad del modelo y al hecho de que el sistema estudiado está vivo, y por lo tanto puede evolucionar con el tiempo. Al final de este paso, tenemos un modelo no lineal capaz de reproducir eficazmente el comportamiento macroscópico del bioproceso;

– estimación: la medición de la concentración de microalgas en un reactor, un dato importante para la realización del bioproceso, generalmente sólo está disponible fuera de línea, mediante análisis por muestreo. De hecho, hay una falta de sensores físicos, ya sea a un precio razonable o lo suficientemente precisos para la medición de este parámetro en línea. Por lo tanto, es necesario desarrollar observadores que combinen el modelo de bioproceso previamente identificado con mediciones físicas simples y en línea (por ejemplo, pH, intensidad lumínica, presión parcial de CO_2 y O_2 , concentraciones de variables biológicas, etc.), a fin de estimar las variables del sistema que no son accesibles en tiempo real. La calidad y precisión de la estimación depende en gran medida de la calidad del modelo considerado y condiciona la eficacia de la ley de control;

– control: el propósito de este último paso es implementar estrategias de control rigurosas contra las incertidumbres de los parámetros del modelo y las perturbaciones externas con el fin de mantener el bioproceso en condiciones óptimas de funcionamiento. En efecto, para maximizar la biofijación del CO_2 , es necesario considerar estrategias de control avanzadas, las únicas capaces de garantizar el buen funcionamiento de los bioprocesos. Los bioprocesos instrumentados a escala industrial suelen utilizar leyes de control sencillas, especialmente para el cultivo de microalgas [BER 11, ZHA 14], lo que limita el rendimiento de la biocaptura de CO_2 . Dado que el modelo macroscópico del bioproceso es no lineal, las últimas investigaciones en la literatura se centran en el uso de estrategias de control dedicadas a sistemas no lineales (los controles lineales han sido probados, destacando sus limitaciones frente a la alta no linealidad y la naturaleza incierta del modelo de proceso).

Este libro propone un procedimiento para implementar una estrategia de control óptima para la biofijación de CO_2 por microalgas cultivadas en un fotobiorreactor. Allí se estudia más específicamente la microalga *Chlorella vulgaris*, con el fin de evaluar el rendimiento de las estrategias propuestas sobre su crecimiento. El libro está organizado de la siguiente manera:

– El capítulo 1 presenta las microalgas y sus campos de uso y aplicación. A continuación, se describen los diferentes tipos de sistemas de cultivo de microalgas y se enumeran los factores más importantes que influyen en su crecimiento;

– El capítulo 2 se centra en la biofijación de CO_2 por microalgas, destacándose los parámetros más influyentes para optimizar el bioproceso;

– En el capítulo 3, la modelización del cultivo de microalgas en un fotobiorreactor es presentada en casos generales a partir de un estado del arte, para luego discutir más específicamente el caso del cultivo de *C. vulgaris*;

– En el capítulo 4, se considera la estimación de la concentración celular a partir de las mediciones disponibles en línea, proponiendo tres tipos de estrategias de estimación: el filtro de Kalman extendido, el observador asintótico y el observador por intervalos. Estos estimadores se aplican a datos experimentales de cultivos de *C. vulgaris*, y luego se compara su desempeño;

– El capítulo 5 trata de la gestión óptima del cultivo de microalgas. En primer lugar, se determinan las condiciones óptimas de funcionamiento. A continuación, se estudia el mantenimiento del bioproceso en torno a este punto óptimo de funcionamiento. Finalmente, se presentan e implementan tres tipos de leyes de control: el control de modelo genérico, el control de entrada/salida lineal y el control predictivo no lineal;

– Por último, una conclusión destaca los resultados obtenidos y ofrece una visión general del procedimiento propuesto. En particular, aborda la transposición de las estrategias desarrolladas para el cultivo de microalgas a escala industrial.

Este trabajo de investigación multidisciplinar se sitúa en la confluencia de dos campos principales: la ingeniería de procesos y la automatización. Los desarrollos teóricos presentados en el resto de este libro, por lo tanto, requieren de habilidades y conocimientos de estos dos campos, para finalmente conducir a una solución fiable y sólida que optimice el mecanismo de consumo de CO₂. También se rememoran algunos conceptos básicos relacionados con los dos campos a fin de facilitar la lectura del libro.