

Diseño conceptual de sistema para el cultivo intensivo de macroalgas marinas

Conceptual Design System for the Intensive Cultivation of Seaweeds

Dr. C. Agustín García-Rodríguez, agarcia@uclv.edu.cu, Dr. C. Juan Pedro
Hernández-Touset, juanpedro@uclv.edu.cu

Departamento de Ingeniería Química, Universidad Central de Las Villas, Cuba

En los estudios iniciales de una estrategia de evaluación tecnológica ambiental del proyecto de una tecnología para la fabricación de Urea en la región de Calicito, en la bahía de Cienfuegos, se identifica como impacto ambiental principal; la contaminación por CO₂ provocada por la emisión de un considerable excedente del gas. El resultado de la evaluación tecnológica es un proyecto para la reducción de la contaminación por CO₂, mediante su captura en una estación de cultivo de algas marinas en la región costera cercana a la fábrica de fertilizantes, capaz de consumir la producción diaria de CO₂ residual de la planta de fertilizantes en proceso de inversión. Se realiza la selección de la especie alga, teniendo en cuenta los estudios de caracterización y morfología de algas realizados en Cuba sobre especies cultivables más abundantes y resistentes, haciendo mayor énfasis en las especies Ulvales. En este trabajo se presentan los estudios preliminares, que incluyen el balance de materiales; a partir de los cuales se desarrolla una propuesta preliminar de diseño un biorreactor para el cultivo intensivo de algas, utilizando ese CO₂ industrial como materia prima fundamental en la producción intensiva de biomasa de alga para la producción de biocombustibles, piensos para la alimentación animal, y productos químicos y naturales de alto valor agregado para la economía cubana.

Palabras clave: alga marina, cultivo, biorreactor.

In the initial studies of a strategy of environmental technology assessment of the project of a technology for Urea production in the region of Calicito, at Cienfuegos bay; the contamination for CO₂, caused by the emission of a considerable surplus of the gas the main is identified as the main environmental impact. The result of the technological assessment is a project for the reduction of CO₂ pollution, by means of its capture in the coastal region near to a fertilizer plant, able to consume the residual daily production of CO₂ of the fertilizer plant in process of investment. The selection of the appropriate specie of alga, keeping in mind the studies of characterization and morphology of algae in Cuba, abundance, resistance and keeping bigger emphasis in the Ulval species, was carried out. In this work the preliminary studies are presented that include the mass balance; a preliminary proposal of a biorreactor design for intensive algae culture, using industrial CO₂ as the main raw material in the production of alga biomass for biofuel production, animal feeding, and chemical and natural products of high value added for the Cuban economy.

Key words: marine algae, culture, biorreactor.

Introducción

La creciente preocupación de las instituciones gubernamentales, políticas y científicas cubanas por la salud y el medio ambiente, junto a la influencia que sobre ambos ejercen los gases nocivos producidos por el hombre obliga a una gestión lo más adecuada posible de los mismos para reducir sus efectos negativos. Es así mismo necesario, tanto por razones de seguridad como económicas, que se contemplen las posibilidades de minimización de las emanaciones de CO₂ a la atmósfera, procurando productos cuando sea posible, así como optimizando la gestión.

La captura y el almacenamiento de dióxido de carbono constituyen un proceso consistente en la separación del CO₂ emitido por la industria y fuentes relacionadas con la energía, su transporte a un lugar de almacenamiento y su aislamiento de la atmósfera a largo plazo, este proceso se considera como una de las opciones para mejorar las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero /1/.

Una de las opciones que permiten aprovechar de forma más beneficiosa ese contaminante es su utilización como materia prima de otros productos que impidan su expulsión a la atmósfera.

La Planta del fertilizante Urea, actualmente en proceso inversionista, se ubicará en las márgenes de la Bahía de Cienfuegos. Como resultado de la síntesis de la Urea se produce un significativo excedente de dióxido de carbono, que de no ser aprovechado adecuadamente contaminarían de forma apreciable la atmósfera.

Las algas son grandes consumidoras de Dióxido de Carbono en el proceso metabólico característico de las plantas y que son como ellas reguladores naturales de este gas es nuestro sistema ecológico. Por tanto, un ecosistema favorable con alto contenido de este gas disponible, constituye una zona que estudiada y controlada se puede transformar en un área para la instalación de sistemas en ambiente natural de biorreactores para el cultivo controlado de especies de microalgas, compatibles con las características marinas de la zona. Por tanto, el desarrollo de un proceso intensivo de cultivo de las mismas para obtener de forma económicamente viable las cantidades necesarias para su industrialización posterior, requiere de zonas marinas y métodos de cultivo de algas efectivos que permitan producir a bajo costo las grandes cantidades que el desarrollo de la industria a partir de esta materia prima requiere.

Se ha desarrollado un proyecto con el objetivo de aprovechar el CO₂ residual generado por la Planta de Fertilizantes de Calicito, Cienfuegos para obtener cantidades suficientes de biomasa de algas marinas a partir del cultivo intensivo de algas en zonas aledañas a la Planta, mediante una tecnología técnica y económicamente factible y ambientalmente compatible; con fines como la producción de biocombustibles, piensos para la alimentación animal y/o productos químicos y naturales de alto valor agregado para la economía.

En el presente trabajo se presenta un resumen de los estudios de evaluación tecnológica y el diseño conceptual de una estación para el cultivo intensivo de macroalgas.

Fundamentación teórica

En la provincia de Cienfuegos se ha propuesto una planta para producir 600 000 t/a de amoníaco para satisfacer la demanda de Urea, utilizando el

gas natural como materia prima. La urea es el resultado de la reacción del amoníaco y el dióxido de carbono, requiriendo para esto un 70 % del dióxido de carbono obtenido del gas natural.

Para la producción antes mencionada se obtienen 96 t/h de dióxido de carbono, de la cual se consumen 70 t/h en la síntesis de urea y por tanto existe un excedente de 26 t/h o 200 000 t/a. La cantidad de CO₂ producido en las plantas modernas a partir del gas natural es de 1,27 t CO₂/ t NH₃, utilizando 70 – 90 % para la producción de urea.

Para producir un 1 kg de algas es necesario aplicar de 2 a 3 kg de CO₂, por lo que los cultivos de algas podría ser un complemento adecuado al lado de fábricas que por su proceso industrial deban eliminarlo, reduciendo así las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Además, las algas absorben cantidades limitadas de iones sulfato y nitrato, participantes de las lluvias ácidas. /2/

El cultivo de algas marinas se realiza mediante métodos extensivos (mar abierto) y en tierra (estanques o recipientes). En estos últimos, el objetivo es mantener un flujo igual o mayor de 25 l/m²h, garantizar exposición periódica a la luz, prevenir la estratificación térmica, minimizar la capa difusiva para la transferencia de nutrientes y transferir gases /3/.

La selección de las especies o cepas más apropiadas es un paso importante en el desarrollo de los sistemas de cultivos algales y es un paso tedioso, consumidor de tiempo y costoso. Los aspectos de la ecología de la producción del modelo de forma funcional de Little y Little, citado por Hanisak /4/, son particularmente útiles para aplicaciones donde el producto deseado no es la especie específica, es decir, sistemas en los cuales el énfasis es en la producción algal, tales como granjas de biomasa algal y el tratamiento de aguas.

La especie de alga verde del género *Ulva* es la más abundante en el litoral costero al sur del Macizo Guamuaya; sus altos rendimientos en cortos tiempos de cultivo fueron consistentes con el modelo que predijo que la *Ulva*, con sus hojas planas consistentes en solo dos capas de celdas fotosintéticas debían estar entre las microalgas más productivas.

El cultivo en tanque es el sistema más comúnmente utilizado para la producción de macro-algas en tierra. Los tanques pueden ser de diversos tipos y materiales, de obra, ladrillos, hormigón, bloques, cemento, etcétera o bien prefabricados, de fibra de vidrio, metal, etcétera. Las formas son, fundamentalmente, rectangulares o circulares, si bien, en ocasiones particulares se fabrican bajo otras estructuras, tales como helicoidales, siloidales, cóncava etcétera. La instalación puede ser en serie o en paralelo, según las características de la zona y de las especies.

Las mayores producciones en sistemas intensivos, se han obtenidos en tanque con agitación

vigorosa, con agitación se pretende conseguir un efecto hidrodinámico que evite fenómenos de auto sombreado, aumentando el tiempo de exposición a la luz/oscuridad; elimine la capa limitante de difusión para favorecer el intercambio de gases y nutrientes y homogenice el medio, eliminando gradientes de pH, temperatura y concentración de nutrientes.

Materiales y métodos

El diseño conceptual de un sistema de recipientes para el cultivo de microalgas marinas se basa en el modelo de reactor de mezcla perfecta.

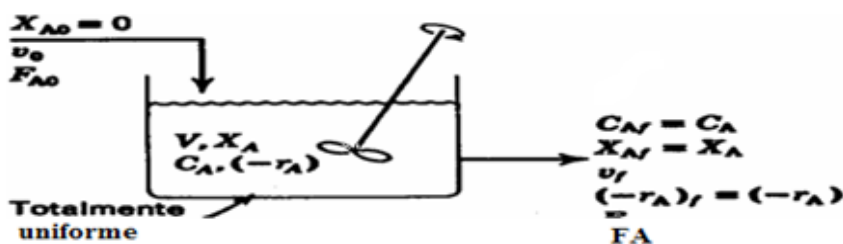


Fig. 1 Modelo de reactor de mezcla perfecta.

Como se muestra en la figura 1 en un modelo de tanque agitado (RMP) la concentración del reactante limitante, la conversión del mismo y la velocidad de reacción son idénticas dentro del reactor y a la descarga del mismo cuando se alcance comportamiento estacionario del sistema de reacción.

Para cada flujo de operación en dependencia de la concentración del reactante en la alimentación habrá una conversión de equilibrio y por tanto una velocidad de reacción constante en el reactor, relacionada con el tamaño del tanque, que delimitará el tiempo de permanencia del fluido en el reactor. El modelo ideal obtenido a partir de un balance de materiales en el sistema de reacción será:

$$F_{Ao}X_A = (-r_A) V \quad F_{Ao} = C_{Ao} v_o \quad X_{Ao} = 0 \quad T = V/v_o$$

Efectuando operaciones, resulta:

$$V/F_{Ao} = T/C_{Ao} = \frac{X_A}{-r_A} = \frac{X_A}{-r_A} \text{ y } T = C_{Ao} \left(\frac{X_A}{-r_A} \right)$$

(Ecuación de diseño de un reactor RMP)

donde:

F_{Ao} es el flujo másico de alimentación A, X_A es la conversión de A en el reactor, V es el volumen del reactor, v_o es el flujo volumétrico

de alimentación, C_{Af} es la concentración final de A y T el tiempo espacial (parámetro de diseño de un reactor RMP)

Resultados y discusión

Diseño conceptual de la estación para el cultivo de algas

Se reporta que para producir un kilogramo de alga seca en una unidad de prueba (después 12 h), se necesitan 1,7 kg de CO_2 , de 20 a 30 litros de agua con una temperatura entre 22 y 35 °C, 40 g de Nitrógeno, 4 g de Fósforo y una temperatura ambiental entre 18 y 35 °C.

En el caso particular del diseño de Biorreactores tipo tanque para el cultivo intensivo de algas, no han encontrado indicaciones de las consideraciones efectuadas y en general no hay referencias del diseño del equipamiento. El desarrollo empírico, sin dudas tiene una incidencia apreciable en este caso por la naturaleza compleja

del proceso. No obstante como una base preliminar que permita proponer un modelo de biorreactor tipo tanque para el cultivo intensivo de macroalgas se hace necesario realizar algunas consideraciones fundamentales tales como:

- El biorreactor tipo tanque tiene una profundidad efectiva de 20 cm para los cálculos del diseño del biorreactor y la instalación del parque en general.
- El tanque debe poseer una profundidad varias veces superior al considerado en el diseño, de manera que permita que se desarrolle un volumen la biomasa de alga en el resto del tanque que asegure que el fondo del biorreactor (20cm) este constituido por una fuente permanente de inóculo (alga renovada) al biorreactor.
- La densidad de la biomasa de alga en el tanque y la profundidad del mismo debe ser suficiente para que sea removido el 90 % del CO₂ suministrado por el distribuidor en el fondo del tanque, determinado en la atmósfera que rodea la superficie del biorreactor.
- Se considera que la variación de la concentración de N₂ en el flujo de agua de mar es un indicador adecuado para desarrollar el diseño del modelo ideal, ya que constituye un nutriente fundamental de las algas para su crecimiento.
- El flujo permanente de agua debe arrastrar la producción de biomasa de alga que se considera el producto generado por la operación continua del biorreactor.
- El modelo cinético responde a una reacción de primer orden, característico de las reacciones biológicas como una adecuada aproximación.
- Se considera que la concentración mínima de N₂ en agua de mar en el reactor debe ser mayor de un 70 % de la concentración de N₂ en el agua de mar de la zona marina seleccionada para su instalación.
- Se considera que el tiempo mínimo de permanencia o tiempo espacial en el sistema de reacción debe ser superior a las 12 h a partir de reportes experimentales reportados en otros sistemas para obtener un kilogramo de biomasa de alga seca.

La masa de alga seca es de 547 945 kg/d para 200 000 t CO₂/a. Los resultados de la estimación

de la cantidad de los principales nutrientes necesarios en el crecimiento de las algas empleando como sustrato la corriente de CO₂ excedente de la fábrica de fertilizante se muestran en la tabla 1.

Tabla 1
Nutrientes para el crecimiento (estimados)

Sustratos	Cantidad (t/día)
Agua	8
Nitrógeno	12
Fósforo	1,3

A partir del carbono orgánico disponible, teniendo en cuenta que la biomasa algal generada debe consumir un 90 % del CO₂ y el otro 10 % sobrante se expulsa a la atmósfera y se producen 200 000 t CO₂/a (F_{CO₂}), el balance de materiales determina que 49 140 t/a Carbono (F_b) pasan a la biomasa generada y 54 60 t/a Carbono (F_{atm}) se emiten a la atmósfera.

donde:

$$F_{CO_2} * (12/44) = F_b * (12/44) + F_{atm} (12/44)$$

$$F_b = 0,9 * F_{CO_2} * (12/44) \text{ y } F_{atm} = 0,1 * F_{CO_2} * (12/44)$$

Los principales nutrientes presentes en el agua de mar que se alimentan a la estación son 0,002mg/l de nitrógeno en forma de nitrito N-NO₂, 0,045mg/l de nitrógeno en forma de amonio N-NH₄, 0,005mg/l de nitrógeno en forma de nitrato N-NO₃, 0,045mg/l de nitrógeno jhelda y 2,40 mg/lDBO5 carbono orgánico. El contenido de nitrógeno, como principal nutriente en la biomasa de alga es de 9,605 0 g /100g alga seca como proteína bruta y el por ciento de nitrógeno en la proteína oscila entre 15 y 18 %; para 16 % se obtiene 0, 015 4 g de nitrógeno/g alga seca (X).

El nitrógeno puede considerarse el criterio principal para el diseño del sistema de reacción, en este caso se proponen los cálculos previos para determinar el mismo a partir de este elemento contenido en el agua de mar y consumido por el alga en su proceso metabólico.

En cuanto al balance de Nitrógeno disuelto en el agua, se toman como referencia los datos del nitrógeno presente en el agua de mar y la que consume las algas a partir de los datos referidos anteriormente.

donde:

Conc N_2 inicial = 0,000 097 (g/l)

Conc N_2 final = ligeramente variable (g/l) (valor supuesto)

F (l/h) = flujo de agua de mar

El Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC) ha reportado en cultivos extensivos, una producción de 3 000 kg/ha » 3 meses de biomasa de alga en la zona de estudio, que es igual a 0,0138 kg/m² » h. A partir de esa información y de la concentración de N_2 total en la biomasa de alga *Ulva* se determina el consumo de nitrógeno por la biomasa:

Su supone un biorreactor de 100 m de largo, 100 m de ancho y 0,1 m de espesor; esto determina un área de 10 000 m² y un volumen de 1000 m³

Con una relación área/ volumen (Fa) de 10 m²/m³ (factor de conversión) se obtienen 0,138 kg/m³ » h (Fb) de biomasa ó 0,138 g/l » h.

Teniendo la cantidad de biomasa generada en 1 h a partir de la información del CEAC y la cantidad de nitrógeno en 100 g, se calcula la cantidad de nitrógeno en dicha biomasa a partir de la expresión:

$$F_c = X * F_b$$

Siendo el consumo de nitrógeno por la biomasa de 2,125 » 10⁻³ g / l » h

En la tabla 2 se muestran los resultado del balance de nitrógeno.

Tabla 2
Resultados del balance de nitrógeno

Volumen (l)	Flujo (l/h)	Concentrac final N_2 (g/l)
0,941 1765	1000	0,000 095
2,3529412	1000	0,000 092
3,7647059	1000	0,000 089
5,1764706	1000	0,000 086
6,5882353	1000	0,000 083
8,0	1000	0,000 08
10,352941	1000	0,000 075
12,705882	1000	0,000 07

En la tabla 2 se muestra como varía el volumen cuando se mantiene el flujo constante y se varían las composiciones de salida del nitrógeno disuelto en el agua. Hay un notable aumento del volumen a medida que disminuye la concentración del nitrógeno a la salida del reactor. En la tabla 3 de se muestra la variación de las concentraciones de

salida manteniendo el volumen constante; se observa como disminuye el flujo a medida que disminuye la concentración de N_2 a la salida, o viceversa. A mayor concentración de operación del reactor mayor es el flujo de agua que entra al sistema y menor el consumo del N_2 por disminuir el tiempo espacial o tiempo de residencia en el reactor.

Tabla 3
Variación de la concentración de N₂ con el flujo

volumen (L)	flujo (L/h)	concentrac N (g/L)
1	1 062,5	0,000 095
1	425,0	0,000 092
1	265,6	0,000 089
1	193,1	0,000 086
1	151,7	0,000 083
1	125,0	0,000 08
1	96,5	0,000 075
1	78,7	0,000 07

En la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos de la velocidad de reacción. Estos tiempos espaciales fueron calculados con los

volúmenes que aparecen en la tabla 3 para las concentraciones de nitrógeno en la salida del agua de mar.

Tabla 4
Velocidad de reacción

Velocidad de reacción	Conc. inicial N ₂	Conc. final N ₂	Tiempo espacial
0,002 125 173	0,000 097	0,000 095	0,000 941 1
0,002 125 037	0,000 097	0,000 092	0,002 352 9
0,002 125 003	0,000 097	0,000 089	0,003 764 7
0,002 125 029	0,000 097	0,000 086	0,005 176 4
0,002 125 011	0,000 097	0,000 083	0,006 588 2
0,002 125 008	0,000 097	0,000 075	0,010 352 9
0,002 125 007	0,000 097	0,000 070	0,010 705 8
0,002 125 007	0,000 097	0,000 067	0,014 117 6

Como se puede apreciar, los resultados de la tabla de velocidad de reacción son casi constantes, debido a que el flujo tomado es el mismo y los valores de concentración varían en escalas muy pequeñas. A partir de las consideraciones realizadas basadas en la información bibliográfica, el valor de constante de veloc. de reacción (k) se puede obtener con los datos del tiempo espacial (\hat{t}) de 12 h, necesario para producir 1 kg de biomasa seca y tomando 0,007 (g/l) como valor de la concentración de nitrógeno a la salida, se obtiene una constante de veloc. de reacción de 0,032 14 (h⁻¹).

donde:

$$Y = \frac{\text{conc}_{\text{inicial}} - \text{conc}_{\text{final}}}{k * \text{conc}_{\text{final}}}$$

$$k = \frac{\text{conc}_{\text{inicial}} - \text{conc}_{\text{final}}}{\hat{t} * \text{conc}_{\text{final}}}$$

Entonces, el modelo del reactor tanque agitado es:

$$Y = (0,009 7 - CA) / 0,032 14 CA$$

De acuerdo con los resultados alcanzados para asimilar todo el CO₂ que se genera anualmente en la planta de fertilizantes como residual contaminante de la atmósfera; empleando exclusivamente un parque de producción intensiva

de biomasa algal; considerando un biorreactor con un volumen (V) de 1 m³ se requiere:

- Un tiempo espacial (Y) de 12 h
- Un flujo (v₀) de 83 l/h, donde $Y = V/v_0$

Considerando al menos 0,2 m de profundidad efectiva para el diseño del biorreactor, el mismo podrá dimensionarse como un modelo tipo tanque rectangular de 5 x 1 x 0,2 metros.

Conforma el parque una batería de celdas constituidas por 10 biorreactores de 1m³ cada una. Para lograr responder a los intereses que se persiguen deberá determinarse número de celdas según los resultados reportados referidos anteriormente donde se obtiene 1 kg de biomasa seca / 12 h y se consumen 0,025 m³ de agua de mar y 1,7 kg de CO₂, de manera que con el CO₂ disponible en la planta de fertilizantes se pueden obtener 322 332 kg/d de biomasa seca, consumiendo 8030 m³/d de agua mar, con un volumen total de reacción de 4 015 m³.

Por tanto el área requerida para el cultivo es de 20 075 m² aproximadamente 2 Hectáreas, el centro de cultivo requiere 400 celdas de 10 biorreactores de 1 m³ de capacidad cada uno operando en paralelo.

Las características técnicas como forma del tanque y el movimiento del agua, bombeo, aeración y dispersión de CO₂, pueden ajustarse de acuerdo a la naturaleza de las algas y las condiciones y recursos disponibles. Se ha demostrado que uno de los factores técnicos más importantes para el crecimiento de las algas, es la superficie del tanque y no su volumen, debido principalmente a la absorción de la luz por la columna del agua. Además, los sistemas de cultivo requieren mayor energía para producir agitación. Comúnmente, la agitación se logra utilizando aereadores, o mediante tuberías localizadas en el fondo del tanque, las que generan una circulación adecuado del agua y permiten la exposición periódica de las plantas a la luz en la superficie.

Las condiciones de operación serán:

Temperatura del agua.... 4 - 22 °C
Salinidad.....25 - 32 ppt
Período..... 8,5 -16 h
Intensidad de la luz.....<5-50 mol fotón/m²/día

Conclusiones

1. Se selecciona para el cultivo la microalga verde *Ulva*, atendiendo a su abundancia, localización cercana a la industria y rápido crecimiento y el sistema de cultivo intensivo en biorreactores del tipo tanque, atendiendo a la facilidad para el control de las variables.
2. Mediante balances de materiales, reportes bibliográficos y características particulares de la zona de instalación de la estación de cultivo intensivo de algas se han obtenido la cantidad de biomasa generada al absorber teóricamente todo el CO₂ producido por la planta de fertilizantes, los consumos de agua y nutrientes requeridos.
3. Considerando el contenido nitrógeno en agua de mar en las corrientes de entrada y salida del reactor como elemento de referencia se propone la cinética de la reacción que caracteriza el proceso y un modelo de reactor de tipo tanque (RMP) que permite obtener los parámetros de diseño y operación del sistema de reacción, bajo consideraciones argumentadas.
4. Se realiza un dimensionamiento preliminar de un parque para el cultivo intensivo de algas marinas con una extensión de 2 ha con 400 celdas de 10 biorreactores de 1 m³ de capacidad, capaz de consumir la producción diaria de CO₂ residual de la planta de Fertilizantes de Cienfuegos en actual proceso inversionista y de reducir los niveles de contaminación ambiental.

Bibliografía

1. METZ, D, Davidson, O. *Informe especial del IPCC. La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono*, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, ISBN 92-9169-319, 2005
2. BUSCAGRO. *Producción de algas en forma masiva a alta velocidad*. 2009. <http://www.buscagro.com/blog/>
3. DOUG, E. *Marine Macroalgae Aquaculture*. Soliv International, USA. 2009. http://www.pacaqua.org/Documents/Marine_Macroalgae_Culture.pdf
4. HANISAK, M. D., LITTLER, M. M. *Application of the Functional – form model to the Culture of seaweeds*. Hydrobiologia 201/205. 13th International Seaweeds Symposium, Belgium. 1990. Págs. 73 – 77.