**ESTRATEGIA Y TECNOLOGÍAS PARA LA OBTENCIÓN DE NUEVOS PROCESOS QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS**

**Modelación de una instalación experimental del cultivo intensivo de *“Ulva Lactuca.s.p”***

***Modeling of an experimental facility for intensive cultivation of “Ulva Lactuca.s.p”***

**Dra.C. María Eugenia O´Farrill Pie1, Ing. Liset Roche Delgado1, Dr. Agustín García Rodríguez1**

1-Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba. E-mail: ofarrill@uclv.edu.cu

**Resumen:**

* **Problemática:** En la ciudad de Cienfuegos, producto de las emisiones de industrias como la termoeléctrica, existen grandes emisiones de gases de combustión por el uso de combustibles fósiles, entre ellos, el CO2 residual como principal causante del efecto invernadero.
* **Objetivo(s):** Proponer la modelación de una instalación experimental de cultivo intensivo de la *“Ulva Lactuca”* con el empleo de gases de combustión y agua de mar, residuales de la Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”.
* **Metodología:** La estrategia de modelación de parámetros de diseño plantea dos modelos a seguir: el modelo de (Öberg, 2005) y el modelo propuesto por (Baquerisse D., 1999) los cuales parten del modelo de (Monod, 1942) para la determinación del comportamiento de parámetros en el proceso.
* **Resultados y discusión:** Se obtiene un modelo matemático como apoyo al diseño y que considera la influencia de las variables tales como, la velocidad de crecimiento de biomasa algal, intensidad de la luz, área de iluminación, la concentración de CO2, el nivel de líquido y la concentración de nutrientes del sistema de biorreacción.
* **Conclusiones:** El modelo obtenido permite la estimación de los valores óptimos de las variables fundamentales para la solución de problemas de diseño, las condiciones de operación del sistema y los parámetros necesarios a través de la determinación del comportamiento de la velocidad de crecimiento en la producción de biomasa de la macroalga *Ulva Lactuca* con respecto al área de iluminación, la concentración de CO2, el nivel de líquido del biorreactor y la concentración de nutrientes.

***Abstract:***

* ***Problematic:*** *In the city of Cienfuegos, as a result of emissions from industries such as thermoelectric power, there are large emissions of combustion gases from the use of fossil fuels, including residual CO2 as the main cause of the greenhouse effect.*
* ***Objective (s):*** *Propose the modeling of an experimental installation for intensive cultivation of "Ulva Lactuca" with the use of combustion gases and seawater, residual from the "Carlos Manuel de Céspedes" Thermoelectric Plant.*
* ***Methodology:*** *The design parameter modeling strategy proposes two models to follow: the model of (Öberg, 2005) and the model proposed by (Baquerisse D., 1999) which are based on the model of (Monod, 1942) for the determination of the behavior of parameters in the process.*
* ***Results and discussion:*** *A mathematical model is obtained to support the design and that considers the influence of variables such as the growth rate of algal biomass, light intensity, illumination area, CO2 concentration, the level of liquid and nutrient concentration of the bioreaction system.*
* ***Conclusions:*** *The model obtained allows the estimation of the optimal values ​​of the fundamental variables for solving design problems, the operating conditions of the system and the necessary parameters through the determination of the behavior of the growth rate in production biomass of the “Ulva Lactuca” macroalgae with respect to illumination area, CO2 concentration, bioreactor liquid level and nutrient concentration.*

**Palabras Clave:** Macroalga; Ulva Lactuca; Modelación; Biorreactor

***Keywords:*** Macroalga; Ulva Lactuca; Modeling; Bioreactor.

**1. Introducción**

La modelación matemática de procesos biológicos es un instrumento para describir y verificar los procesos cinéticos que intervienen en el cultivo intensivo de macroalgas en biorreactores, y una herramienta para predecir el comportamiento de estos procesos, aplicable al diseño, evaluación y control de procesos. Los modelos de los procesos de cultivo intensivo de macroalgas varían en su complejidad, según el número de componentes y procesos biológicos considerados, según se trate de modelos de estado estacionario o dinámico; y según que el reactor biológico se considere un dominio con concentraciones homogéneas o distribuidas en el espacio. En estos últimos modelos se describe el proceso biológico a través de un número de componentes del medio de cultivo, que siguen unos procesos biológicos de transformación, y cuya concentración se expresa a través de un sistema de ecuaciones diferenciales, que se obtienen mediante balances de materia de los diferentes componentes. Entre los modelos utilizados para la modelación de procesos biológicos, el modelo de Monod sugerido por Nobel Laureate J. Monod en 1942, por más de 60 años ha sido uno de los modelos más usados en microbiología (Kovarová-Kovar, 1998) para la descripción de la cinética de crecimiento de estos procesos. Este modelo es utilizado para la descripción de la cinética del crecimiento de organismos vivos en aplicaciones como tratamientos de efluentes, biorremediaciones y varias otras aplicaciones ambientales; describe el efecto de crecimiento limitante en función de la tasa específica de crecimiento donde la producción de biomasa es dependiente de la disponibilidad de nutrientes por lo que puede ser empleado para describir el crecimiento de Macroalgas Marinas.

Otros modelos como los de (Baquerisse D., 1999) y (Öberg, 2005) permiten describir distintos parámetros que influyen en el cultivo de las macroalgas. Estos modelos parten de la velocidad de crecimiento máxima de la biomasa (µmáx) para la estimación de la producción de biomasa macroalgal. El modelo de (Baquerisse D., 1999) se basa en la determinación del Carbono Inorgánico Total (CIT) del medio de cultivo lo que permite identificar el comportamiento de variables como el área de iluminación y la concentración de CO2 en el proceso de crecimiento (Kritallidis, 1994). Por otra parte, el modelo de crecimiento de macroalgas propuesto por (Öberg, 2005) describe el desarrollo de macroalgas a través de su capacidad de absorción y crecimiento de nutrientes, limitada por el acceso a nutrientes, luz y temperatura ambiente, por lo que permite modelar el comportamiento de variables como el nivel de líquido del Biorreactor y la concentración de nutrientes en el proceso de cultivo intensivo de macroalgas.

La Empresa Termoeléctrica (ETE) “Carlos Manuel de Céspedes” de la provincia de Cienfuegos, contribuye significativamente a la economía del país, sin embargo emite a la atmósfera una gran cantidad de gases producto de la combustión de combustibles fósiles, entre ellos, el CO2, que constituye uno de los principales causantes del efecto invernadero.

Según estudios realizados se ha demostrado que las algas fijan alrededor de la mitad del carbono del planeta producto del proceso de fotosíntesis, siendo la *Ulva Lactuca* la mayor receptadora de CO2. Es por ello que se estudian tecnologías para favorecer el cultivo masivo de estas plantas, ya que crecen en una gran variedad de ambientes y condiciones.

El cultivo en tanques de la macroalga marina *Ulva Lactuca* constituye una alternativa eficaz para la reducción de las emisiones de gases de combustión, siendo a la vez, el CO2 el nutriente principal y el gas factible a reducir en la atmósfera, aunque con un riguroso control por su efecto en la disminución de la alcalinidad del medio.

El cultivo intensivo de macroalgas que no solo contribuya a la mitigación de este gas, sino que también permita la obtención de biomasa algal como fuente de obtención de numerosos subproductos en la industria química, biotecnológica y agrícola, actualmente constituye una línea de investigación en la cual se trabaja en Cuba. (García A., et al. 2019)

El proceso está regido por una serie de etapas, siendo la de mayor interés la etapa de biorreacción, por ser la más compleja y la que necesita del suministro de CO2. En ella existen diferentes factores que son de vital importancia para cultivar macroalgas marinas, entre los que se encuentra la iluminación solar, el pH, la temperatura y nutrientes, en especial el nitrógeno y fósforo, así como el incremento de la concentración de CO2 en el aire. A pesar de todas las investigaciones realizadas, aun no se conoce con exactitud la influencia de estas variables que intervienen en la etapa de biorreacción del proceso de cultivo por lo que es de gran importancia realizar de forma continua la modelación de esta sección del proceso para conocer la influencia de las variables que definen esta etapa. En el trabajo se propone un modelo que permiten simular los principales parámetros que intervienen en el crecimiento de la Ulva Lactuca con el empleo de gases de combustión y agua de mar, residuales de la Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”.

**2. Metodología**

2.1 Descripción del proceso de cultivo de la Ulva Lactuca.

El sistema experimental del cultivo intensivo de la macroalga Marina “*Ulva Lactuca*.*s.p”* se realiza en la Empresa Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes” de la provincia de Cienfuegos. La producción de biomasa algal se realiza en un reactor rectangular tipo reactor continuo con agitación (RCCA).

Para el sistema de biorreacción o de crecimiento macroalgal se alimentan dos corrientes importantes, una corriente es el medio de cultivo que para estos estudios se le denomina la Corriente Líquida y la otra corriente es una corriente compuesta por una mezcla de aire y gases de combustión que constituye la fuente de carbono y oxígeno del proceso a la cual se le denomina Corriente Gaseosa.

En la Corriente Líquida se aprovecha el agua de mar residual industrial de la salida de los condensadores de la termoeléctrica, la cual pasa por un proceso de enfriamiento hasta una temperatura menor o igual a 30°C la cual debe ser controlada en esta etapa. Seguidamente se le adiciona nitrato y fosfato de amonio como nutrientes con una concentración mayor o igual de 7 y 2ppm respectivamente para el medio de cultivo, en el cual se debe mantener un rango adecuado de pH, entre 6 y 9 aproximadamente, para el crecimiento de la macroalga y su control se realiza añadiendo nutrientes para el ajuste del mismo.

En la Corriente Gaseosa se pretende aprovechar el gas residual industrial de la termoeléctrica por su contenido de CO2. Esta corriente de gases de combustión primeramente pasa por una etapa de lavado con agua de mar en una columna de contacto directo donde disminuye su temperatura a valores menores e igual a 30°C; el control de esta etapa se ajusta con una variación en el flujo de agua de mar de lavado. Posteriormente la corriente de gases se somete a un proceso de absorción donde se pretende disminuir la concentración del SO2 presente en la corriente a valores inferiores a 0.001 con el uso del agua de mar como solvente, el control de este parámetro se pretende obtener con el del flujo de solvente. Una vez ajustados dichos parámetros se añade a esta corriente un flujo de aire en una etapa de mezclado para mantener una concentración de CO2 de 3000ppm en la corriente gaseosa para el proceso, el control de esta operación se realiza con la corriente de gases.

El sistema de biorreacción presenta un nivel de líquido en el biorreactor de 12.58 cm, un volumen de 10L, un tiempo espacial en el biorreactor de 12 horas similar al ciclo de renovación de agua de mar en la bahía y un 50% de recirculación del sistema de cultivo cuyo parámetro principal es su valor de pH que debe estar entre 6 y 9 para su aprovechamiento en el sistema, de no cumplirse dicho parámetro este porciento de recirculación se une al residual liquido del sistema cuya disposición final está destinada a la bahía.

En el proceso de biorreacción se genera una biomasa húmeda como producto final, cuyo rendimiento debe ser mayor de 70% la cual posteriormente pasa a una etapa de lavado con agua dulce y seguidamente de esta al proceso de secado y almacenamiento concluyendo así el proceso de cultivo intensivo de la macroalga *Ulva Lactuca*. En la figura 1 se muestra el diagrama de flujo de la instalación a nivel esperimental.



Figura 1. Diagrama de flujo del sistema experimental. Fuente de procedencia: elaboración propia

Si la macroalga generada en el proceso no cumple con los requerimientos se propone ajustar parámetros de biorreacción que influyen directamente en el proceso de crecimiento de la biomasa de algas como el flujo del medio de cultivo y el tiempo de residencia en el biorreactor de resultar insuficientes y se corrigen dichos parámetros en las etapas correspondientes. De no ser suficiente el ajuste de estos parámetros de operación del sistema, se propone una estrategia de modelación para ajustar parámetros de diseño del sistema tales como: área de iluminación, nivel de líquido en el biorreactor, concentración de nutrientes y la concentración de CO2 de la corriente gaseosa.

2.2 Propuesta de modelo matemático.

La estrategia de modelación de parámetros de diseño plantea dos modelos a seguir: el modelo de (Öberg, 2005) y el modelo propuesto por (Baquerisse D., 1999) los cuales parten del modelo de (Monod, 1942) para la determinación del comportamiento de parámetros en el proceso.

El modelo de (Monod, 1942), permite determinar la velocidad específica de crecimiento celular (μx), la tasa máxima de crecimiento (μmax) y la constante de saturación (ks) a partir de las expresiones:

$μx=\frac{1}{X}\*\frac{dX}{dt}$ (1)

$μx=\frac{ μm\*S}{Ks+S}$ (2)

$\frac{dX}{dt}=X\*\frac{ μm\*S}{Ks+S}$ (3)

Donde X es la cantidad de biomasa, t: es el tiempo, y S la concentración de sustrato.

 El modelo propuesto por D. Baquerisse (Baquerisse D., 1999), considera que la velocidad específica de crecimiento (μ)está influenciada, predominantemente, por la intensidad de luz (E) y la concentración del Carbono Inorgánico Total (CIT). Por consiguiente, la expresión de velocidad de crecimiento de la biomasa, está dada por:

$μ=μmáx\*\left(\frac{ E}{Eópt}\right)\*exp\left[\left(1-\frac{E}{Eópt}\right)\right]\*-(\frac{ CIT}{CITópt}) \*exp\left[1-\frac{CIT}{CITópt}\right]$ (4)

Integrando el modelo de transferencia de luz (Kritallidis, 1994) que describe la evolución de la intensidad de luz incidente y saliente; la cantidad de luz accesible por la macroalga (E) y la intensidad de luz saliente (Isal), pueden ser calculadas usando las siguientes ecuaciones:

$E=\frac{\left(Ient-Isal\right)\*Ar}{V\*X}$ (5)

$Isal=C1\*Ient\*X^{C2}$ (6)

Donde Ar es el área iluminada del biorreactor y, C1 y C2 son constantes que dependen de la geometría del biorreactor.

El balance de la concentración del Carbono Inorgánico Total (CIT) en la solución acuosa, puede ser calculada como:

$\frac{d[CIT]}{dt}=\frac{ Fent}{V}\*\left[CIT\right]ent-\frac{ Fsal}{V} \*\left[CIT\right]sal- μ\*\frac{X}{Y^{x}/\_{s}}-m\* \frac{X}{Y^{x}/\_{s}}+Kla (\left[CO\_{2}^{+}\right]-\left[CO\_{2}\right])$ (7)

Donde Yx/s es una relación de conversión másica, m es el coeficiente de mantenimiento, y kla es el coeficiente de transferencia de masa gas-líquido.

Por definición, la concentración de CO2 en el medio fresco [CO2\*] es expresado por:

$\left[CO\_{2}^{+}\right]=\frac{pCO\_{2}}{H}$ (8)

Donde pCO2 es la presión parcial del CO2 y H es denotado por la constante de la Ley de Henry. La concentración de carbono en el medio de cultivo está dada por:

$\left[CO\_{2}\right]=\frac{\left[CIT\right]}{\left[1+\frac{Kl}{\left[H^{+}\right]}+\frac{Kl\*H2}{\left[H^{+}\right]^{2}}\right]}$ (9)

Donde k1 y k2 son las constantes cinéticas, y [H+] es la concentración de iones hidrógeno en el medio de cultivo, definido por:

$\left[H^{+}\right]=10^{-pH}$ (10)

El efecto de la limitación de sustrato ha sido incorporado en esta expresión de velocidad, donde μmax, Eópt y CITópt, son parámetros del modelo y están identificados por datos experimentales

Este modelopermite la modelación del área de iluminación y concentración del CO2 vinculados a la producción de biomasa macroalgal, mediante las expresiones anteriores.

El modelo (Öberg, 2005), por su parte describe el desarrollo de macroalgas a través de su capacidad de absorción y crecimiento de nutrientes, limitada por el acceso a nutrientes, luz y temperatura ambiente. Se usa para determinar la óptima concentración de nutrientes y la altura óptima de nivel de líquido en el biorreactor.

Primeramente, se plantea que el crecimiento posterior de las macroalgas se modifica por el acceso a los nutrientes, la luz y la temperatura de modo que la tasa de crecimiento real se puede describir por la expresión:

 $μ=μ\_{max.}\*f\_{1}\left(N\right)\*f\_{2}\left(L\right)\*f\_{3}\left(T\right)$ (11)

Donde:

$μ\_{max.}$: Tasa de crecimiento maxima $\left(day^{-1}\right)$;

$N$: nutrientes $\left(NO\_{3}\right)$;

$L$: luz incidente;

 $T$: temperatura;

$f\_{1-3}$: Funciones normalizadas de las variables limitantes.

La función limitante de nutrientes $f\_{1}\left(N\right)$ controla la transferencia de nitrógeno de la reserva interna de nutrientes al crecimiento de algas a través de la expresión:

 $f\_{1}\left(N\right)=\left(\frac{Q-Q\_{min.}}{Q\_{max.}-Q\_{min.}}\right)$ (12)

Donde:

$Q$: cuota interna de nitrógeno de las algas $\left({mg N}/{gdW}\right)$;

$Q\_{max.} y Q\_{min.}$: Límites superior e inferior del tamaño de la piscina respectivamente.

La función limitante de la luz $f\_{2}\left(L\right)$, explica la reducción de la fotosíntesis de la baja irradiación y de la fotoinhibición descrita por la expresión:

$P=P\_{S}\*\left(1-e^{-a}\right)\*e^{-b}-R$ (13)

Donde:

$P$: tasa fotosintética $\left(mg Cg d w^{-1}h^{-1}\right)$;

 $P\_{S}$: tasa máxima si no hubiera fotoinhibición;

 $a=α\*\left(\frac{I}{P\_{S}}\right)$ $b=β\*\left(\frac{I}{P\_{S}}\right)$ (14), (15)

$α$: eficiencia fotosintética $\left(mg Cg d w^{-1}h^{-1}μE^{-1}\right)$;

$I$: intensidad de la luz $\left(μ E\right)$;

$β$: parámetro de fotoinhibición $\left(mg Cg d w^{-1}h^{-1}μE^{-1}\right)$;

$R$: respiración oscura $\left(mg Cg d w^{-1}h^{-1}\right)$.

Se considera que la irradiación de superficie media$ I\_{0}$, se redujo a los valores de profundidad actuales de acuerdo con la expresión:

$ I\_{Z}= I\_{0}\*e^{-Kd\*Z}$ (16)

Donde:

$ I\_{Z}$: irradiación a la profundidad z;

$Kd$: coeficiente de atenuación.

Para la función de limitación de la temperatura $f\_{3}\left(T\right)$ se puede utilizar valores reportados por la literatura de intervalos de temperatura para la especie de alga a trabajar

Para buscar la óptima concentración de nutrientes se puede determinar despejando Q de la ecuación que se muestra a continuación:

$V=V\_{max.}\*\left(\frac{N}{K\_{m}+N}\right)\*\left(\frac{Q\_{max.}-Q}{Q\_{max.}-Q\_{min.}}\right)$ (17)

Donde:

$V$: tasa de absorción de nitrógeno $\left(μmol h^{-1}g^{-1}\right)$;

$V\_{max.}$: tasa maxima de absorcion de nutrientes $\left(μmol h^{-1}g^{-1}\right)$;

$K\_{m}$: constante de saturación media para la absorcion de nitrógeno $\left(μgL^{-1}\right)$;

$N$: nutrientes $\left(NO\_{3}\right)$;

$Q$: cuota interna de nitrógeno de las algas $\left({mg N}/{gdW}\right)$;

$Q\_{max.} y Q\_{min.}$: Límites superior e inferior del tamaño de la piscina respectivamente.

Se fijan valores para las funciones limitantes $f\_{1 y 3}$,$α$,$ β$ y $ I\_{0}$; también se considera los valores respectivos de R, $P\_{S}$ para la especie de alga en cuestión, y para valores de $μ\_{max.}$ y $μ$ determinados mediante la modelación del modelo de Monod se puede buscar la altura óptima de nivel de líquido en el biorreactor.

**3. Resultados y discusión**

Como los modelos que describen la etapa de biorreacción del proceso parten de la velocidad de crecimiento máxima de la biomasa (µmáx), es necesaria la utilización de datos experimentales y de la fórmula bioquímica aproximada del crecimiento del alga que se muestra en la ecuación 22 y a su vez de la fórmula empírica de la biomasa del alga *Ulva Lactuca* mostrada en la ecuación 21, ambas obtenidas por (Carbonell, 2019).

Según estudios e investigaciones realizadas a nivel de laboratorio en el Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC), utilizando algas marinas de la especie Ulva Lactuca, se obtuvo información sobre la influencia de los nutrientes, parámetros de diseño y las condiciones de cultivo en un período de tiempo de 4 días de experimentación realizados por (Aldana, 2014) que reporta los datos experimentales obtenidos como se muestra en las tablas 1 y 2 y que pueden servir como referencia para la propuesta de modelación del sistema experimental en la ETE.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Tiempo (días) | Biomasa seca (x) (g) | K= 0,012 h-1 |
| 0 | 4,6872 |
| 1 | 5,4901 |
| 2 | 6,293 |
| 3 | 7.0959 |
| 4 | 7,8988 |

Tabla 1. Datos experimentales obtenidos. Fuente de procedencia: elaboración propia

|  |  |
| --- | --- |
| Concentración de nutrientes (mg/l)/d | Consumo de N2 (mg/l)/d |
| Entrada del biorreactor | Salida del biorreactor |
| 0,01656 | 0,0061 | 0,01046 |
| 0,02266 | 0,01082 | 0,01184 |
| 0,02738 | 0,0079 | 0,01948 |
| 0,02446 | 0,19429 | -0,16983 |
| 0,21085 | 4,07762 | 4,69436 |

Tabla 2. Resultados experimentales del sistema de biorreacción. Fuente de procedencia: elaboración propia

La fórmula empírica de la Ulva Lactuca es C210.62H420.39O192.79N0.017P0.0058, que en términos de un átomo gramo de carbono (θ= 1) resulta CH1.996O0.915N0.000081 P0.0000275. A partir de la ecuación general de la fotosíntesis mostrada en la ecuación 21 que permite lograr una correcta simulación del proceso en cuestión (Carbonell, 2019). La ecuación 22 establece el mecanismo mediante la cual la macroalga fija el CO2 en su biomasa.

$CO\_{2} + H\_{2}O + light = C\_{6}H\_{12}O\_{6} + O\_{2} $ (21)

$CO\_{2}+0,000081(NH\_{4})H\_{2}PO\_{4}+0,99783725H\_{2}O\rightarrow CH\_{1.996O0.915}N\_{0.000081}P\_{0.0000275}+1,04147363O\_{2}+0,0000535H\_{3}PO\_{4}$ (22)

Para la simulación del modelo es necesario obtener datos experimentales para la propuesta del sistema experimental en la ETE, para las condiciones de parámetros y diseño requeridas. Se debe realizar la búsqueda de los datos experimentales como son la generación de biomasa por día, la concentración de nutrientes, el consumo de nitrógeno y de CO2 y el rendimiento de la generación de biomasa. A partir de dichos datos experimentales se puede graficar la curva de crecimiento del alga, figura 2 (a), de la cual se obtienen las expresiones matemáticas que definen el efecto de crecimiento limitante en función de la tasa específica de crecimiento donde la producción de biomasa es dependiente de la disponibilidad de nutrientes se muestran en las ecuaciones 20 y 21, según Monod (1942).

Para buscar el área de iluminación se sustituye la ecuación (5) en la ecuación de la velocidad específica de crecimiento de la biomasa como se representa en la ecuación (23).

$μ=μ\_{max.}\*\left(\frac{\frac{(I\_{ent}-(C\_{1}\*I\_{ent}\*X^{C\_{2}}))}{V\*X}\*A\_{R}}{\left(\frac{(I\_{ent}-(C\_{1}\*I\_{ent}\*X^{C\_{2}}))}{V\*X}\*A\_{R}\right)\_{Ópt.}}\right)\*exp\left[\left(1-\left(\frac{\frac{(I\_{ent}-(C\_{1}\*I\_{ent}\*X^{C\_{2}}))}{V\*X}\*A\_{R}}{\left(\frac{(I\_{ent}-(C\_{1}\*I\_{ent}\*X^{C\_{2}}))}{V\*X}\*A\_{R}\right)\_{Ópt.}}\right)\right)\right]-\left(\frac{CIT}{CIT\_{Ópt.}}\right)\*exp\left[\left(1-\left(\frac{CIT}{CIT\_{Ópt.}}\right)\right)\right]$(23)

Al fijar un valor de la CIT se puede determinar el óptimo valor del área de iluminación$ (A\_{R})$ para valores de $μ\_{max.}$ y $μ$ determinados mediante el uso del modelo de Monod.

Para encontrar la óptima concentración de CIT se parte del despeje de CIT en la ecuación de la concentración de carbono en el medio de cultivo dada por la ecuación (9), reflejado en la ecuación (24).

$\left[CO\_{2}\right]\*\left[1+\frac{K\_{1}}{\left[H^{+}\right]}+\frac{K\_{2}\*H\_{2}}{\left[H^{+}\right]^{2}}\right]=\left[CIT\right]$ (24)

Figura 2. Modelo de Monod. (a) Comportamiento de la biomasa con respecto al tiempo. (b) Tasa relativa de crecimiento constante de la biomasa. (c) Comportamiento de μ respecto al tiempo. (d) Gráfico linealización del modelo de Monod. Fuente de procedencia: elaboración propia

Donde:

$K\_{1} y K\_{2}$: Constantes cinéticas;

$\left[H^{+}\right]$: Concentración de iones hidrógeno en el medio de cultivo definido por $\left[H^{+}\right]=10^{-pH}$;

Por definición la concentración de CO2 en el medio fresco $\left[CO\_{2}^{+}\right]$es expresado por :

$\left[CO\_{2}^{+}\right]=\frac{p\_{CO\_{2}}}{H}$ (25)

Donde:

$p\_{CO\_{2}}$: Presión parcial del CO2;

H: denotado por la constante de la Ley de Henry.

Sustituyendo en la ecuación de la velocidad especifica de crecimiento de la biomasa $(μ)$ representada en la expresión siguiente:

$μ=μ\_{max.}\*\left(\frac{E}{E\_{Ópt.}}\right)\*exp\left[\left(1-\left(\frac{E}{E\_{Ópt.}}\right)\right)\right]-\left(\frac{\left[CO\_{2}\right]\*\left[1+\frac{K\_{1}}{\left[H^{+}\right]}+\frac{K\_{2}\*H\_{2}}{\left[H^{+}\right]^{2}}\right]}{CIT\_{Ópt.}}\right)\*exp\left[\left(1-\left(\frac{\left[CO\_{2}\right]\*\left[1+\frac{K\_{1}}{\left[H^{+}\right]}+\frac{K\_{2}\*H\_{2}}{\left[H^{+}\right]^{2}}\right]}{CIT\_{Ópt.}}\right)\right)\right]$ (26)

Al fijar un valor de la E se puede determinar el óptimo valor de concentración de CIT (conc. CO2ópt.) para valores de $μ\_{max.}$ y $μ$ determinados mediante la modelación del modelo de Monod.

El modelo de crecimiento de macroalgas describe el desarrollo de macroalgas a través de su capacidad de absorción y crecimiento de nutrientes, limitada por el acceso a nutrientes, luz y temperatura ambiente, la simulación del modelo mediante el software PSI, permitió la obtención de varios parámetros, cuyos valores coinciden con los reportados en la literatura científica, así como el comportamiento dinámico de las variables que describen el crecimiento de la macroalga y otros indicadores del proceso del cultivo intensivo.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Parámetros** | **Unidades** | **Valores** |
| μmáx: | d-1 | 0,436 |
| Eópt | μE/d-1\*gbs-1 | 34,90 |
| TICópt | g CO2 | 7,218 |
| C1 | --- | 3,27 |
| C2 | --- | -3,02 |

Tabla 3. Parámetros del modelo matemático calculados para la U. lactuca a 290C para 6 L de cultivo. Fuente de procedencia: elaboración propia

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Parámetros** | **Unidades** | **Valores** |
| K1 | --- | 0,00000102 |
| K2 | --- | 0,00000000832 |
| Yx/s | g biomasa/g CO2 | 0,6249 |
| Kla | d-1 | 37,09 |

Tabla 4. Parámetros obtenidos del balance de la concentración de Carbono Inorgánico Total (CIT) según la simulación del modelo con el software PSI. Fuente de procedencia: elaboración propia



Figura 3. Velocidad específica de crecimiento según los datos experimentales y los ofrecidos por el modelo propuesto. Fuente de procedencia: elaboración propia

En la figura 3 se muestra que el valor máximo de la velocidad específica de crecimiento alcanzado es de aproximadamente 0,06995 d-1, el cual no rebasa el valor máximo de la velocidad específica de crecimiento (μmáx) de 0,436 d-1, lo cual evidencia que durante la experimentación, las macroalgas no se vieron afectadas por el fenómeno de la fotoinhibición. El comportamiento observado coincide con lo reportado por la literatura (Kovarová-Kovar, 1998). Se observa además que el desarrollo del crecimiento se mantiene muy alejado de la velocidad máxima de crecimiento esperado, probablemente provocado por los pocos días de los ciclos de la experimentación (4 días).

Para obtener los parámetros de cada uno de los modelos se necesita hacer una búsqueda experimental para que estos modelos sean aplicables y poder realizar la validación de los mismos para nuevas condiciones de cultivo.

**4. Conclusiones**

La propuesta de la secuencia de procedimiento del estudio y de modelación permite la estimación de los valores óptimos de las variables fundamentales para la solución de problemas de diseño, las condiciones de operación del sistema y los parámetros necesarios a través de la determinación del comportamiento de la velocidad de crecimiento en la producción de biomasa de la macroalga *Ulva Lactuca* en la ETE con respecto al área de iluminación, la concentración de CO2, el nivel de líquido del biorreactor y la concentración de nutrientes a partir de los modelos de (Baquerisse D., 1999) y (Öberg, 2005) respectivamente.

**5. Referencias bibliográficas**

1- Aldana, L. (2014). *Contribución al estudio de la reducción de emisiones industriales de CO2 mediante cultivo intensivo de macroalgas marinas* (Tesis de pregrado). Universidad ''Carlos Rafael Rodríguez'', Cienfuegos,Cuba.

2- Baquerisse, D., Nouals, S., Isambert, A., Ferreira dos Santos, P. & Durand G. (1999). Modelling of a continuous pilot photobioreactor for microalgae production. *Progress in Industrial Microbiology. 35,* p.335-342.

3- Carbonell, L. (2019). *Simulación de la etapa de biorreacción del Cultivo Intensivo de la macroalga Ulva lactuca* (Tesis de pregrado). Universidad Central ''Marta Abreu” de Las Villas, Villa Clara, Cuba.

4- García, A.,et al. (junio del 2019). Biorremediación de los gases de combusión utilizando el cultivo intensivo de la macroalga Ulva lactuca*.* *VII Simposio Internacional de Química 2019*. Simposio llevado a cabo en la II Convención Científica Internacional de la Universidad Central ''Marta Abreu'' de Las Villas, Cayo Santa Maria, Cuba.

5- Kovárová-Kovar, K., & Egli, T. (1998). Growth kinetics of suspended microbial cells: from single-substrate-controlled growth to mixed-substrate kinetics. *Microbiology and molecular biology reviews. 62*(3), 646–666. doi.org/10.1128/MMBR.62.3.646-666.1998

6- Kritallidis, A. (1994). *Application du génie des procédés aux biotechnologies marines: Estude de faisabilité, modélisation et simulation dynamique d'un procédé de culture de microalgues.*

7- Monod, J. (1942). *Recherches sur la croissance del cultures bactériennes* (Tesis de Doctorado). Universidad de París, París, Francia.

8- Öberg, J. (2005). Model simulations of conditions suitable for the establishment of Enteromorpha sp. (Chlorophyta) macroalgal mats. *Marine Biology Research.* *1*(2), 97-106. DOI: [10.1080/17451000510019042](https://doi.org/10.1080/17451000510019042)