

Artículo

Diseño y construcción de un dispositivo secuestrador de CO₂ a partir de energía renovable

Jorge Alberto Azuara Jiménez ¹, Donaji Jiménez Islas ^{2*}

^{1,2} Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico Superior de Huichapan; División de Ingeniería en Energías Renovables.

* Correspondencia: djimenez@iteshu.edu.mx

Resumen: El presente artículo aborda el desarrollo de un dispositivo para la captura de dióxido de carbono (CO₂) mediante el uso de la microalga *Chlorella vulgaris*. Este sistema se compone de un reactor de vidrio que alberga el cultivo biológico, un sistema de aireación y un sistema de iluminación alimentado por energía fotovoltaica, lo que permite su operación autónoma. La automatización del proceso incluye el control de la iluminación y el burbujeo, optimizando así las condiciones para la fotosíntesis y la absorción de CO₂. El objetivo fue diseñar y construir un dispositivo que incorpore energía fotovoltaica al fotoreactor para la reducción de CO₂. Los resultados preliminares indican el crecimiento de *Chlorella vulgaris* y por lo tanto la absorción del CO₂. El crecimiento resalta la capacidad del alga para transformar CO₂ en biomasa, mejorando simultáneamente la calidad del aire al liberar oxígeno. Este sistema no solo representa una solución viable para la reducción de gases de efecto invernadero, sino que también abre oportunidades para su implementación en espacios urbanos y cerrados, donde la calidad del aire es crítica. La integración de tecnologías sostenibles, como la energía solar, y el potencial escalamiento del sistema podrían posicionar a *Chlorella vulgaris* como una herramienta clave en estrategias globales para combatir el cambio climático y mejorar la salud ambiental.

Keywords: Dióxido de carbono, *Chlorella v.*, Energía fotovoltaica, Control

Citar este trabajo: Azuara Jiménez, J. A.; Jiménez Islas, D. *Diseño y construcción de un dispositivo secuestrador de CO₂ a partir de energía renovable*. RELITEC'S, 2024, 7ma, edición.

ISSN 2395-972X

<https://relitecs.iteshu.edu.mx>

Recibido: 18-10-2024
Aceptado: 11-11-2024
Publicado: 30-11-2024

1. Introducción

La quema de combustibles fósiles es la principal fuente de emisiones de dióxido de carbono (CO₂), lo que altera significativamente el equilibrio energético de la Tierra y contribuye al calentamiento global [1]. Otros factores que contribuyen a ello son la agricultura, la deforestación y los procesos industriales, que liberan metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) [2].

Para reducir eficazmente las emisiones de CO₂ y mitigar los impactos del cambio climático, es esencial un enfoque multifacético que integre la adopción de energía renovable, la innovación tecnológica y las prácticas sostenibles en varios sectores. La transición a fuentes de energía renovables, como la solar, la eólica y la hidroeléctrica, puede reducir significativamente la dependencia de los combustibles fósiles, que representan más del 75% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero [3].

Los avances recientes en las tecnologías de energía solar han abierto nuevas vías para la captura de carbono y la conversión de residuos. Los investigadores han desarrollado sistemas innovadores que utilizan la energía solar no solo para la generación de electricidad, sino también para transformar el CO₂ y los residuos plásticos en combustibles sostenibles. Este enfoque dual aborda los desafíos del cambio climático y de la gestión de residuos. Algunas investigaciones destacadas en el campo de estudio consideraron que

un reactor alimentado con energía solar puede convertir el CO₂ capturado de la atmósfera en sustancias químicas valiosas como el etileno, utilizando materiales absorbentes conductivos [4]. La integración de la energía solar fotovoltaica con los procesos termoquímicos permite la captura eficiente del CO₂ y su conversión en metanol, lo que promueve una economía circular del carbono [5]. Se han propuesto reactores solares térmicos para la pirólisis de residuos plásticos, convirtiéndolos en combustibles, abordando así los problemas relacionados con la eliminación de residuos plásticos [6]. Este método aprovecha la energía solar para lograr condiciones favorables para el proceso de pirólisis, lo que demuestra el potencial de las aplicaciones a pequeña escala. Si bien estas tecnologías son prometedoras, siguen existiendo desafíos para optimizar la eficiencia y la escalabilidad, por lo que es necesario seguir investigando y desarrollando para aprovechar al máximo su potencial en los sistemas de energía sostenibles.

Otros sistemas de absorción de CO₂ son las soluciones alcalinas, especialmente las basadas en hidróxido y carbonato, son eficaces para la absorción de CO₂ debido a su alta capacidad de carbono y su resistencia a la degradación, además de los sistemas innovadores, como los contactores de membrana, mejoran la eficiencia de la captura de CO₂ al tiempo que reducen el consumo de energía en comparación con los métodos tradicionales [7].

Para mejorar los sistemas de captura de carbono, los microorganismos por excelencia son conocidos por su capacidad de asimilación. *Chlorella vulgaris* se ha convertido en una microalga prometedora para la captura de CO₂ en fotobiorreactores, demostrando un potencial significativo en el secuestro de carbono y la producción de biomasa. Diversos estudios destacan la optimización de las condiciones de crecimiento y métodos de cultivo innovadores que potencian su eficiencia en la captura de CO₂. Los factores ambientales que mejoran la capacidad fotosintética de *Chlorella vulgaris* han sido reportados, las investigaciones indican que la temperatura y la intensidad luminosa óptimas para el crecimiento se sitúan en torno a 28.74 °C y 225 μmol/m²/s, respectivamente [8]. La *C. vulgaris* en fotobiorreactores cerrados captura dióxido de carbono de forma efectiva, con estabilidad y control de la concentración conseguidos mediante un controlador proporcional integral bajo restricciones específicas de la tasa de dilución [9-11].

La energía fotovoltaica es cada vez más reconocida no solo por su capacidad para generar electricidad limpia, sino también por su potencial en la captura y conversión de dióxido de carbono. A medida que surgen los avances en la tecnología fotovoltaica y los métodos de reciclaje, se hace más claro el camino hacia una economía sostenible y baja en carbono.

Tomando en consideración la integración de las tecnologías fotovoltaica y de cultivos biológicos, el objetivo del trabajo es diseñar y construir un sistema funcional para la asimilación de CO₂ en un fotobiorreactor, en la que se mantenga la autonomía energética empleando un sistema de control de iluminación y burbujeo del cultivo el cual se alimenta de un panel fotovoltaico.

2. Materiales y Métodos

Para el desarrollo del sistema, se consideraron tres etapas: 1) Dimensionamiento del sistema fotovoltaico, 2) Simulación del sistema, 3) Construcción y control del sistema y 4) Puesta en marcha del dispositivo en condiciones reales.

1. Dimensionamiento del sistema fotovoltaico aislado

Se llevó a cabo el dimensionamiento de un Sistema Fotovoltaico Autónomo (SFVA) para suministrar energía tanto al sistema de iluminación como al proceso de burbujeo en un sistema biológico destinado al crecimiento de algas en una columna de vidrio.

Inicialmente, se elaboró un cuadro de cargas que contiene información respecto a la potencia, horas de uso y el consumo energético de los equipos a alimentar. Los dispositivos que se consideraron son: placa Arduino Mega 2560, así como tira LED y bomba de agua de corriente alterna.

El sitio de implementación del proyecto fue en el Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, por lo que se analizó la plataforma Solar app del Centro de Capacitación Eléctrica y Energías Alternas (CCEEA) para obtener los parámetros de radiación solar en la zona.

Para el dimensionamiento se utilizó la metodología propuesta por [12]. Se calculó la potencia del módulo fotovoltaico a instalar tomando como referencia el cuadro de cargas, enfocándose en la energía requerida por los equipos en Watts*hora (Wh) y considerando el porcentaje de pérdidas, a partir de la ecuación 1.

$$PFV = (E_{requerida} + \%Pérdidas) / HSP \quad (1)$$

Donde:

PFV= Potencia Fotovoltaica (Wpico)

E_{requerida}= Energía Requerida (Wh)

%Pérdidas= Porcentaje de pérdidas del sistema Fotovoltaico

HSP = Horas solares pico

De igual manera se calculó el número de módulos fotovoltaicos de acuerdo a la ecuación 2.

$$Np = (PFV / Pm) \quad (2)$$

Donde:

Np= Número de módulos fotovoltaicos

Pm= Potencia del módulo (Watts)

Se realizó el cálculo del banco de baterías destinado al almacenamiento de la energía generada por los paneles solares, tomando en cuenta la demanda energética total en Wh, el porcentaje de pérdidas esperadas y la tensión del sistema de baterías.

$$BB = (E_{requerida} + \%Pérdidas) / (Tb + Pd) \quad (3)$$

Donde:

BB= Banco de baterías (Amperios-hora)

Tb= Tensión de la batería (Volts)

Pd= Profundidad de descarga de la batería (%)

Se llevó a cabo el cálculo del número de baterías considerando las características de una batería comercial.

$$NB = (BB / CapBC) \quad (4)$$

Donde:

NB= Número de baterías

Tb= Tensión de la batería (Volts)

Pd= Profundidad de descarga de la batería (%)

2. Simulación del sistema

Se llevó a cabo el diseño y modelado tridimensional del prototipo utilizando el software SketchUp versión 2023. En este proceso, se diseñó tanto la estructura de soporte del biorreactor como la del sistema fotovoltaico aislado, con el objetivo de obtener una visualización detallada del prototipo y realizar un análisis de sombreado en función de las variaciones a lo largo de los diferentes meses del año.

3. Construcción y control del sistema

Se realizó la selección de los materiales necesarios para la construcción, utilizando tubos PTR de 2 pulgadas, los cuales fueron cortados siguiendo las dimensiones especificadas en el modelo CAD.

Posteriormente se procedió a soldar la estructura de soporte tanto para el biorreactor como para el panel fotovoltaico, empleando electrodos 6013 de 1/8 ". Se utilizó una esmeriladora para pulir la superficie metálica, eliminando imperfecciones generadas durante la etapa de soldadura. Finalmente, se aplicó pintura a las estructuras de soporte, para luego proceder al ensamblaje y la fijación del panel fotovoltaico.

Se desarrolló el código de programación en el software Arduino con el objetivo de controlar la luminosidad en la columna y el encendido de la bomba de burbujeo. Para lograrlo, se identificaron y definieron como variables: el tiempo de inicio y apagado, la duración del encendido de la bomba y el color de la iluminación.

Se estableció un periodo de funcionamiento de 12 horas diarias para el sistema de iluminación y 24 horas continuas para el sistema de burbujeo. Se realizaron pruebas para calibrar la medición de luminosidad utilizando una fotorresistencia. El montaje del circuito se realizó sobre una protoboard, se empleó un módulo relé de dos canales, una fotorresistencia de 2 M Ω y una resistencia de 330 Ω .

Se desarrolló un diagrama de conexión para el sistema fotovoltaico, integrando los siguientes componentes: un panel fotovoltaico policristalino de 100 W, un controlador de carga de 12-24 V y 20 amperios (A), un inversor de 400 W (12 V) y una batería de 12 V con una capacidad de 140 Ah. Se procedió a interconectar los elementos utilizando cable de calibre 12. El controlador de carga suministró energía a la tarjeta Arduino a través de un puerto USB de 5 V, mientras que el inversor se empleó para alimentar tanto el sistema de iluminación como una bomba de agua. Finalmente, se llevaron a cabo pruebas para verificar el correcto funcionamiento del sistema.

3. Resultados y discusión

3.1. Dimensionamiento del sistema fotovoltaico

Se elaboró un cuadro de cargas especificando el número de equipos, potencia y horas de uso, se consideró el sistema de iluminación que funcionara durante la noche y el sistema de burbujeo a través de una bomba y un difusor, Tabla 1.

Tabla 1. Cuadro de cargas de los equipos utilizados en el sistema autónomo

Equipo	Número	Potencia (W)	Uso (Horas)	Energía (Wh)
Tira de iluminación LED	4	24	12	288
Bomba	1	3	24	72
Tarjeta Arduino	1	0.2	24	4.8

* Fuente: Elaboración propia

De las condiciones ambientales, se determinó la radiación solar y el número de horas solares pico para el sitio de El Saucillo, Huichapan, Hgo. para el mes más crítico del año que fue septiembre.

**Figura 1.** Radiación solar promedio (Horas solares pico) en el Instituto Tecnológico Superior de Huichapan

Fuente. Elaboración propia con información de Solar app, 2023

El proceso de dimensionamiento del sistema permitió definir las características técnicas y la cantidad de componentes que conforman el sistema fotovoltaico. A continuación, se detallan los equipos en la Tabla 2. Para el sistema se propuso un panel policristalino que ofrece varias ventajas en los sistemas de energía renovable, principalmente debido a su rentabilidad, eficiencia y durabilidad. Estos paneles son cada vez más reconocidos por su potencial en aplicaciones fotovoltaicas a gran escala, lo que los convierte en una opción popular para la generación de energía solar, además El rendimiento de estos paneles se ve influido positivamente por la energía y el flujo solares, y las condiciones óptimas permiten obtener salidas de voltaje estables [13].

Tabla 2. Componentes del sistema fotovoltaico aislado

Equipo	Cantidad	Descripción
Módulo fotovoltaico	1	Policristalino de 100 W
Batería	1	12 V, 110 Ah
Controlador de carga	1	12/24 V, 10 A
Inversor	1	12V, 400 W

* Fuente: Elaboración propia

3.2. Simulación del sistema

Se generó un modelo tridimensional del prototipo del sistema fotovoltaico aislado, diseñado específicamente para integrarse con el sistema biológico, destinado a las funciones de iluminación y burbujeo.

Se asignaron texturas a los componentes en el software Sketchup 2023, y se efectuó una simulación de la trayectoria solar para determinar las sombras proyectadas del prototipo durante el transcurso de un día y a lo largo de todo el año, en la Figura 2.

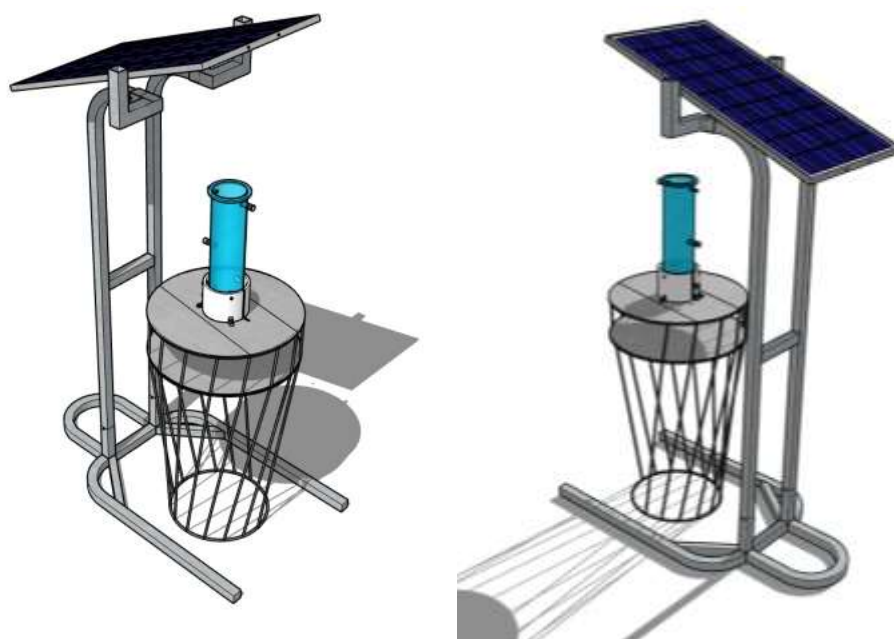


Figura 2. Simulación de la propuesta en el software Sketchup
Fuente: Elaboración propia

3.3. Construcción y programación para el control

La construcción del prototipo inició con el corte de Perfil Tubular Rectangular (PTR) de 2" y el redondo de 1/2", el cual fue soldado y ensamblado para formar el arco y la mesa donde se colocaría el módulo fotovoltaico y el fotorreactor de vidrio, respectivamente, además se construyó una caja metálica para el sistema de control, que lo mantiene aislado de las condiciones ambientales, Figura 3.



Figura 3. Construcción y ensamble del prototipo
Fuente: Elaboración propia

El código de programación fue desarrollado en el entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino. Se llevaron a cabo las configuraciones necesarias para ajustar los tiempos de operación tanto del sistema de iluminación como del sistema de burbujeo.

En este mismo sentido, con las características y número de equipos, se desarrolló el diagrama de interconexión para el sistema fotovoltaico aislado (SFVA), Figura 4a). Se armó el circuito interconectando el módulo fotovoltaico, batería, controlador de carga e inversor, se realizaron pruebas de conexión y se verificó el funcionamiento del código de programación, ver Figura 4b).

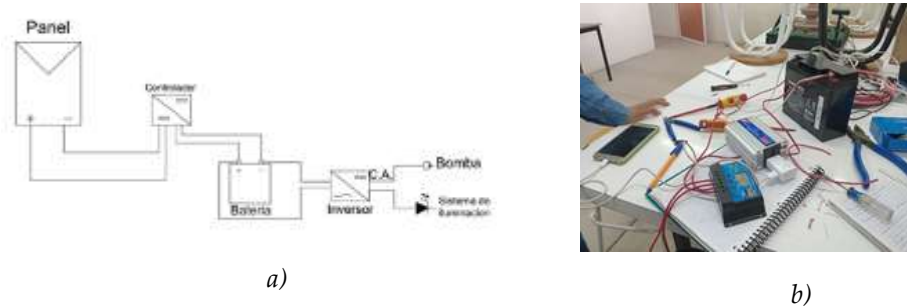


Figura 4. Diagrama de conexión del SFVA y pruebas de conexión del sistema
Fuente: Elaboración propia

3.4. Implementación en sitio y pruebas de funcionamiento

Como el objetivo del proyecto es la asimilación de CO_2 presente en el ambiente, se puso en marcha la implementación del sistema como se muestra en la Figura 5. El PTR fue anclado al piso a través de taquetes de expansión y fue montado el panel junto con la mesa de soporte, Figura 5a). Para garantizar que la iluminación de las algas se mantenga durante la noche, la energía fue almacenada en la batería, Figura 5b). El control de iluminación y de burbujeo fue contenido en una caja metálica y conectado desde el módulo fotovoltaico, batería, controlador de carga e inversor, Figura 5c).

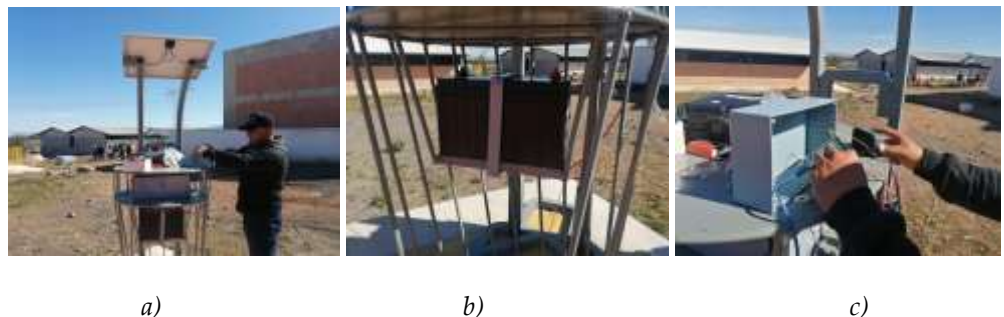


Figura 5. a) Montaje mecánico, b) Instalación de batería de ciclo profundo, c) Instalación del sistema de control de iluminación y burbujeo
Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se realizaron pruebas de funcionamiento durante 1 semana para determinar y ajustar el nivel de iluminación y el burbujeo. Posteriormente el sistema se

monitoreó por 7 meses hasta el 14 de octubre de 2024, identificando que tiene autonomía energética y es evidente el crecimiento de la microalga bajo las condiciones establecidas en el sistema de control. El resultado más significativo es que la implementación de este tipo de sistemas abona al trabajo realizado por los árboles y algunos otros sistemas acuáticos que minimizan el efecto invernadero. En la Figura 6a) se muestra el dispositivo a las 8 horas de inoculada la cepa *Chlorella vulgaris* procedente del cultivo biológico mantenido en el laboratorio de Ingeniería en Energías Renovables. En la Figura 6 b, c) se muestra el proyecto funcional en diferentes espectros de luz, en los que se identifica el funcionamiento autónomo abastecido con energía fotovoltaica y asimilando el CO₂ del ambiente.

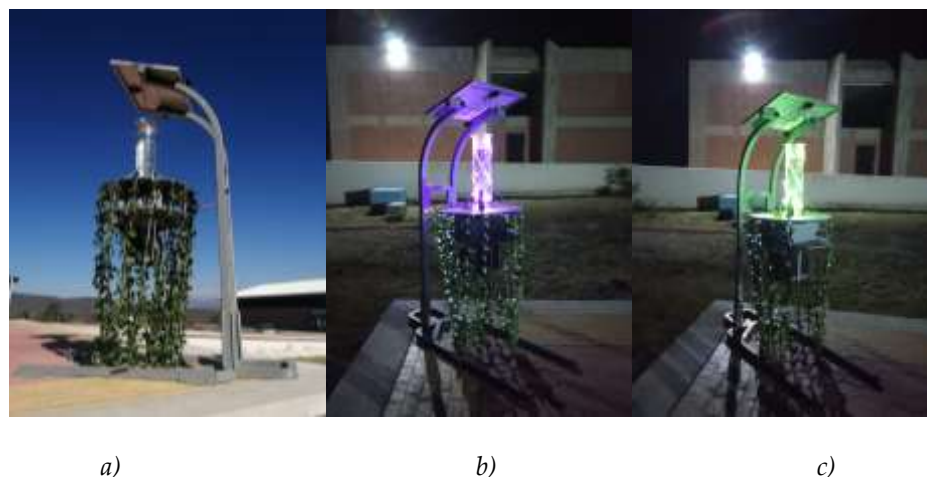


Figura 6. a) Sistema de asimilación de CO₂ operando en las instalaciones del Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, b, c) Sistema funcionando de noche con iluminación púrpura y verde.
Fuente: Elaboración propia

Con el crecimiento del alga tras un año continuo de operación, ha permitido demostrar que la integración de las tecnología fotovoltaica y biológica pueden combinarse para dar solución a problemas ambientales y contribuir a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Socialmente el dispositivo instalado en el Instituto ha permitido que visitantes como alumnos de educación básica, media superior y superior identifiquen la posibilidad de replicar el mismo sistema en sus instituciones contribuyendo a educar en materia ambiental.

4. Conclusiones

La investigación desarrolló e instaló con éxito un sistema autónomo para la asimilación de CO₂ que funciona sin depender de la electricidad de origen fósil. Este sistema utiliza energía renovable para apoyar el crecimiento de la microalga *Chlorella vulgaris*, lo que demuestra un enfoque sostenible para la captura de carbono.

El sistema de control integrado en el dispositivo permite ajustar la longitud de onda de la luz y el tiempo de burbujeo, que son fundamentales para optimizar las condiciones de cultivo de la *Chlorella vulgaris*. Esta flexibilidad permite a los investigadores experimentar con varios parámetros para mejorar la eficiencia de la absorción de CO₂.

Si bien el sistema está actualmente en funcionamiento, se necesitan métodos analíticos futuros para cuantificar su capacidad de asimilación de CO₂. Este paso es esencial para validar la eficacia del sistema e identificar posibles mejoras en su diseño y funcionalidad.

El dispositivo no solo sirve como una solución viable para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también tiene el potencial de implementarse en espacios urbanos y cerrados donde la calidad del aire es un problema importante. Este aspecto destaca el doble beneficio de mejorar la calidad del aire y, al mismo tiempo, abordar el cambio climático.

La integración de tecnologías de energía renovable, como la energía solar, en el proceso de secuestro de CO₂ posiciona a la *Chlorella vulgaris* como un actor clave en las estrategias globales destinadas a combatir el cambio climático. Esta investigación contribuye al objetivo más amplio de desarrollar prácticas sostenibles que puedan reducir eficazmente los niveles de CO₂ en la atmósfera y promover la salud ambiental.

Contribución: “Conceptualización, metodología y software JAAJ; validación, escritura y revisión DJL.

Financiamiento: “Esta investigación no recibió financiamiento externo”.

Agradecimientos: Al TecNM/Instituto Tecnológico Superior de Huichapan

Conflicto de interés: “Los autores declaran no tener conflicto de intereses”.

Referencias

1. Rahmani, Z.; Ahmadi, J.. The impact of human activities on climate change. *Sprinj Journal of Arts, Humanities and Social Sciences* **2024**, 3(6), 24–27. <https://doi.org/10.55559/sjahss.v3i6.362>
2. Filonchyk, M., Peterson, M. P., Zhang, L., Hurynovich, V., & He, Y. (2024). Greenhouse gases emissions and global climate change: Examining the influence of CO₂, CH₄, and N₂O. *Science of The Total Environment*, 935, 173359. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173359>
3. Marouani, I. Contribution of renewable energy technologies in combating phenomenon of global warming and minimizing GHG emissions. *Clean Energy Science and Technology* **2024**, 2(2), 164. <https://doi.org/10.18686/cest.v2i2.164>
4. Li, H. Continuous Direct Air Capture and Electrochemical Conversion of CO₂ and H₂O into Ethylene and Oxygen in Solid Electrolyte Reactor. *ECS Meeting Abstracts* **2024**, MA2024-01(7), 776–776. <https://doi.org/10.1149/ma2024-017776mtgabs>
5. Li, S.; Chen, R.; Wang, J. et al. Solar thermal energy-assisted direct capture of CO₂ from ambient air for methanol synthesis. *NPJ Mater. Sustai.* **2024**, 2, 11. <https://doi.org/10.1038/s44296-024-00014-y>
6. McLachlan, G.; Dau, V. T.; Woodfield, P. Solar thermal reactor model for pyrolysis of waste plastic. *Australian Journal of Mechanical Engineering* **2023**, 1–13. <https://doi.org/10.1080/14484846.2023.2275034>
7. Salmón, I.; Cambier, N.; Luis, P. CO₂ Capture by Alkaline Solution for Carbonate Production: A Comparison between a Packed Column and a Membrane Contactor. *Applied Sciences* **2018**, 8(6), 996. <https://doi.org/10.3390/app8060996>

8. Janjua, M. Y.; Azfar, A.; Asghar, Z.; Shehzad Quraishi, K. Modeling and optimization of biomass productivity of *Chlorella vulgaris* using response surface methodology, analysis of variance and machine learning for carbon dioxide capture. *Bioresource Technology* **2024**, 400, 130687. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130687>
9. Nguyen, D. H. Stability Assessment of Microalgal Photobioreactors for Carbon Dioxide Capture under Dilution Rate Constraints. *Sustainability* **2023**, 15(21), 15269. <https://doi.org/10.3390/su152115269>
10. Manusiwa, B. C.; Purwono, S.; Nugroho, A. P. CO₂ Uptake and Domestic Wastewater Treatment by *Chlorella vulgaris*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* **2024**, 1313(1), 012007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1313/1/012007>
11. Dasan, Y. K.; Lam, M. K.; Lim, J. W.; Tan, I. S.; Foo, H. C. Y.; Kiew, P. L.; Show, P. L.; Lee, K. T. The impact of using recycled culture medium to grow *Chlorella vulgaris* in a sequential flow system: Evaluation on growth, carbon removal, and biochemical compositions. *Biomass and Bioenergy* **2022**, 159, 106412. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106412>
12. Cantos, S. Configuración de instalaciones solares fotovoltaicas **2016**, 2 Ed. Paraninfo. España
13. Njok, A. O.; Kamgba, F. A.; Panjwani, M. K.; Mangi, F. H. The influence of solar power and solar flux on the efficiency of polycrystalline photovoltaics installed close to a river. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science* **2020**, 17(2), 988. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v17.i2.pp988-996>