

# Sistema de purificación y generación de oxígeno portátil e inteligente mediante el uso de algas marinas

## Portable and intelligent oxygen generation and purification system using seaweeds.

Alejandro Palani Iturburu-Saavedra <sup>a, b</sup>, Francisco Jacob Ávila-Camacho <sup>a, b</sup>, Leonardo Miguel, Moreno-Villalba <sup>a, c</sup>

<sup>a</sup> Centros de Cooperación Academia Industria, TecNM / Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, 55210, Estado de México, México.

<sup>b</sup> División de Ingeniería en Sistemas Computacionales, TecNM / Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, 55210, Estado de México, México

<sup>c</sup> División de Ingeniería Informática, TecNM / Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, 55210, Estado de México, México

### Resumen

Este artículo presenta el desarrollo de un sistema de purificación y generación de oxígeno portátil e inteligente utilizando algas marinas. El sistema está diseñado para mejorar la calidad del aire y adaptarse automáticamente a las necesidades de las algas, manteniendo su proceso de purificación mediante la medición de niveles de luz y la oxigenación de las algas. También incluye la transmisión de datos de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> vía Wi-Fi a un repositorio público. Los resultados muestran una significativa reducción en los niveles de CO<sub>2</sub> y un aumento en la concentración de O<sub>2</sub> en diversos entornos de prueba, demostrando la eficacia y viabilidad del sistema propuesto. Una de las soluciones más prometedoras es el uso de algas marinas, organismos fotosintéticos con la capacidad de absorber dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y liberar oxígeno (O<sub>2</sub>). Además de contribuir a la reducción de gases de efecto invernadero, las algas marinas mejoran la calidad del aire, lo cual es vital en entornos urbanos y cerrados. Este artículo describe el desarrollo de un sistema de purificación y generación de oxígeno portátil e inteligente que utiliza algas marinas.

**Palabras clave:** Algas marinas, calidad del aire, generación de oxígeno, purificación de aire, sistema inteligente.

### Abstract

This article presents the development of a portable and intelligent oxygen purification and generation system using seaweed. The system is designed to improve air quality and adapt automatically to the needs of the algae, maintaining its purification process by measuring light levels and oxygenating the algae. It also includes the transmission of CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> data via Wi-Fi to a public repository. The results show a significant reduction in CO<sub>2</sub> levels and an increase in O<sub>2</sub> concentration in various test environments, demonstrating the effectiveness and viability of the proposed system. One of the most promising solutions is the use of seaweed, photosynthetic organisms with the ability to absorb carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and release oxygen (O<sub>2</sub>). In addition to contributing to the reduction of greenhouse gases, seaweed improves air quality, which is vital in urban and enclosed environments. This article describes the development of a portable and intelligent oxygen purification and generation system using seaweed.

**Keywords:** Seaweed, air quality, oxygen generation, air purification, intelligent system.

### 1. Introducción

La calidad del aire es un factor crucial para la salud humana y el bienestar ambiental, enfrentando desafíos globales derivados de la contaminación atmosférica, generada principalmente por actividades industriales, tráfico vehicular y otros factores antropogénicos, afectando a millones de personas. En respuesta a esta problemática, se han explorado

diversas soluciones tecnológicas y naturales para purificar el aire [14].

Aunque existen más microorganismos que incrementan la producción de oxígeno como los son las cianobacterias que en condiciones de estrés incrementan la producción de especies reactivas y oxígeno (ERO).

El sistema está diseñado para ser altamente eficiente y adaptable, incorporando sensores para monitorear los niveles de luz, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>, y mecanismos para oxigenar y mantener iluminadas las algas. Además, el sistema transmite datos en

\*Autor para la correspondencia: josejuan@dominio1.edu.mx

**Correo electrónico:** josejuan@dominio1.edu.mx (José-Juan Sotelo-Ibarra), gabysanchez@dominio2.edu.mx (Gabriela Sánchez-Manríquez), Esta área se llena cuando el manuscrito se aceptado con los nombres completos y correos de todos los autores.

tiempo real a un servidor web, permitiendo un monitoreo continuo y remoto de su desempeño.

Los resultados obtenidos en diversas pruebas demuestran que el sistema puede reducir significativamente los niveles de CO<sub>2</sub> y aumentar la concentración de O<sub>2</sub>, subrayando su potencial como una solución innovadora y sostenible para mejorar la calidad del aire en distintos ambientes.

### 1.1. Algas Marinas

Las algas marinas juegan un papel importante en los ecosistemas costeros. Estas plantas marinas son alimento y refugio para otras especies en el mar. Limpian las aguas costeras removiendo nutrientes excesivos de aguas de escorrentía. También absorben dióxido de carbono del agua y esto protege animales con conchas (como ostras) de los impactos de la acidificación del océano [27].

Desde el punto de vista ecológico, las algas cumplen un rol extremadamente importante. Son la base de las tramas tróficas, producen oxígeno que permite la respiración de muchos de los organismos que viven en los ambientes acuáticos, absorben CO<sub>2</sub>, sirven como zonas de refugio y hábitat para miles de especies. Muchas especies pueden además absorber contaminantes orgánicos desde el agua de mar. [25].

El fitoplancton presente en los océanos (y no los bosques, como se cree habitualmente) producen entre el 50% y el 85 % del oxígeno que se libera cada año a la atmósfera [26].

### 1.2. Las Microalgas

Las algas marinas son poderosos agentes naturales de purificación del aire, gracias a su capacidad única para absorber dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y liberar oxígeno (O<sub>2</sub>) a través de la fotosíntesis. En entornos urbanos y cerrados, donde la contaminación atmosférica es prevalente debido a actividades humanas, el papel de las algas en la mejora de la calidad del aire es crucial [13,15].

El océano absorbe aproximadamente el 30% del CO<sub>2</sub> antropogénico (IPCC, 2013), mitigando el calentamiento global de manera profunda. Sin embargo, los mecanismos biológicos para el secuestro de carbono a largo plazo en el océano son no se entiende completamente [3].

La fotosíntesis es uno de los procesos más importantes del planeta. Depende de la luz solar, por lo que sólo puede producirse durante las horas de luz. Durante la fotosíntesis, la célula encargada de la fotosíntesis en las algas y demás plantas fotosintéticas absorbe dióxido de carbono, luz solar y agua, y produce oxígeno y energía en forma de glucosa. Sin embargo, ésta no es la única forma en que las plantas pueden producir energía [5,7].

Ecosistema	Kcal g <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>	gC m <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup>	g m <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup>
Bosque templado de hojas caducas	5.000		600 – 2500
Selva tropical	15.000	1.300	1.000 – 3.500
Pradera de hierbas	2.000	1.500	2.000 – 1.500
Desierto	500		10 – 250
Pantano costero	12.000		800 – 3.500
Océano cerca de la orilla	2.500		
Océano abierto	800		2 – 400
Arrecifes y praderas de algas			500 – 4.000
Estuarios			200 – 3.500
Plancton zona costera		20 - 40	
Plancton mar abierto		10 - 20	
Laminaria, Canadá		1.300 - 1.900	
Macrocystis, Océano Indico		1.200 - 2.000	
Thalassia, Caribe		600 - 800	
Macrocystis, California		400 - 700	
Spartina, Atlantico USA		100 - 350	
Zostera, Washington		50 - 300	
Zostera, Alaska		30- 1500	

Fig. 1

Productividad neta estimada de ciertos ecosistemas, algas y pastos marinos [9].

Paralelamente a la fotosíntesis, las plantas también respiran de manera similar a los seres humanos. Durante la respiración, las células de las algas absorben oxígeno y producen dióxido de carbono, en un proceso continuo que ocurre en cada minuto del día. En días soleados, las algas al igual que las demás plantas fotosintéticas realizan la fotosíntesis más rápida de lo que respiran, por lo que en esos días se considera que producen oxígeno neto, o sea que producen más oxígeno mediante la fotosíntesis que el que absorben por la respiración.[7].

Los días nublados plantean más problemas a los ecosistemas acuáticos, ya que la cantidad de fotosíntesis que realizan se ve reducida, y la respiración de las algas puede hacer que el lago sufra una escasez de oxígeno de tal magnitud que se produzca mortandad de peces e incluso de algas.[6].

El desarrollo de sistemas de purificación y generación de oxígeno basados en algas marinas ofrece una solución innovadora y sostenible para abordar los problemas de calidad del aire. Estos sistemas no solo reducen las emisiones de CO<sub>2</sub> y mejoran la calidad del aire, sino que también tienen aplicaciones prácticas en una variedad de entornos contribuyendo así a un ambiente más limpio y saludable para todos.

Una de las mayores amenazas que pesa sobre nuestro planeta es el Cambio Climático cuya causa principal es el calentamiento global de la tierra por la emisión de gases de efecto invernadero, los cuales proceden principalmente de los combustibles - petróleo, gas y carbón – destinados entre otros fines a producir electricidad y utilizados principalmente en calefacción, refrigeración y transporte [1].

El cambio climático es la modificación de la temperatura y del resto de variables del clima, que se está produciendo con una velocidad e intensidad sin precedentes en la historia de la humanidad, como consecuencia de la actividad humana [23].

### 1.3. Emisión de CO<sub>2</sub>

Las emisiones mundiales de dióxido de carbono relacionadas con la energía aumentaron un 6 % en 2021, hasta alcanzar los 36 300 millones de toneladas, su nivel más alto de la historia, ya que la economía mundial se recuperó con fuerza de la crisis de COVID-19 y dependió en gran medida del carbón para impulsar ese crecimiento.

### 1.4. ¿Qué impacto tienen las emisiones de gas en el mundo?

Si no logramos un cambio de conciencia y de acciones pronto, las consecuencias en el futuro cercano serán enormes:

- Es necesario hacer una reducción drástica en esta década para evitar en la mayor medida posible los riesgos causados en la atmósfera.
- Estos riesgos pueden ser desde problemas de abastecimiento de comida, debido al colapso de las cosechas por exceso de altas o bajas temperaturas.
- Puede existir la disminución de agua potable, lo que desencadenaría un fuerte aumento de su valor.
- El nivel del mar aumentaría de forma incontrolable y la extinción de especies o desaparición completa de ecosistemas sería inminente [24].

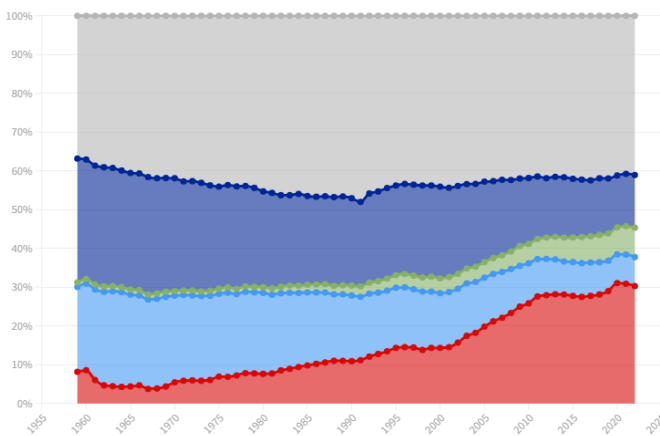


Fig. 2 Porcentaje que representan las emisiones de CO<sub>2</sub> en el mundo según origen [21].

La actividad diaria de la ciudad genera una gran cantidad de sustancias que modifican la composición natural del aire. La quema de combustibles fósiles para el transporte y la generación de energía, tanto a nivel industrial como doméstico, produce miles de toneladas de contaminantes que diariamente son emitidos a la atmósfera. Los vehículos son la principal fuente de emisión, le siguen en importancia las fuentes de área, la industria, los hogares y las emisiones de fuentes naturales (biogénicas) [2].

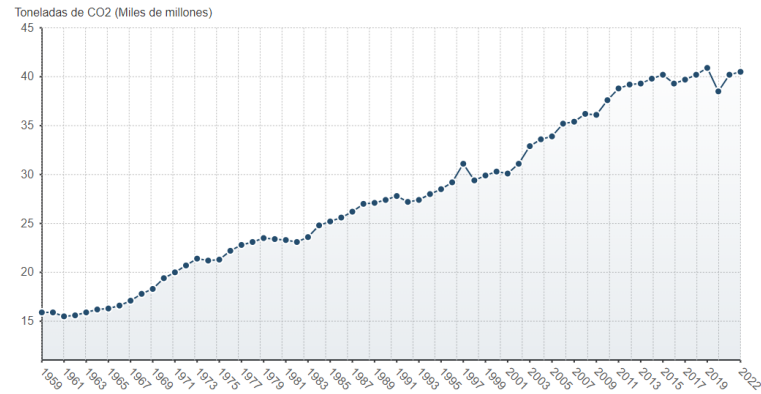


Fig. 3. Evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el mundo [22].

## 2. Materiales y Método

### 2.1. Diseño del Circuito

El sistema consiste en un circuito el cual mide los gases específicos dentro del entorno cada 30 segundos, tales datos son mostrados en pantalla y a la vez son enviados vía Wifi a un servidor web para ser posteriormente procesados.

El circuito esta armado con los siguientes componentes:

**Sensores MQ135:** Dos sensores MQ135 se utilizan para medir los niveles de CO<sub>2</sub> en el aire. Uno se coloca en la entrada del aire al acuario para registrar los niveles iniciales de CO<sub>2</sub>, y el otro en la salida para medir el aire purificado.

Se implemento específicamente el sensor MQ-135 por su versatilidad y sensibilidad a diferentes gases, es la siguiente tabla podemos ver más acerca de sus características:

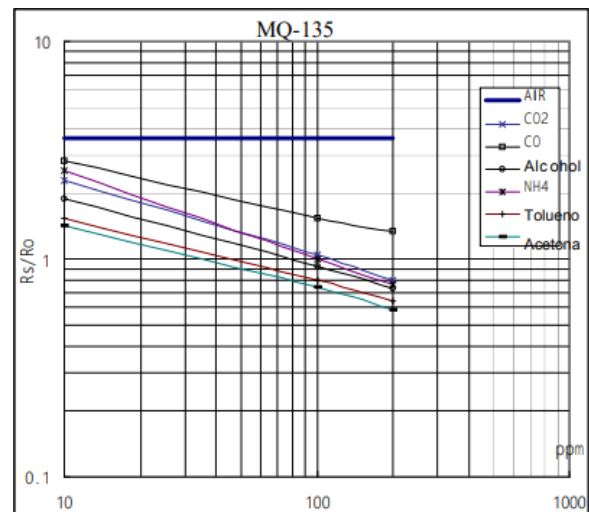


Fig. 4. Características de sensibilidad del MQ-135[22].

**Sensor ME2-O2-Φ20:** Este sensor en específico se utiliza para el oxígeno, mide la concentración de O<sub>2</sub> generada por las algas.

Se utilizo este sensor al comprar las diferentes especificaciones entre sensores llegamos a la conclusión que sería el más apropiado para este proyecto.

En la siguiente figura se puede observar el comportamiento al medir la calidad del aire, podemos observar tanto la sensibilidad, respuesta y recuperación de datos:

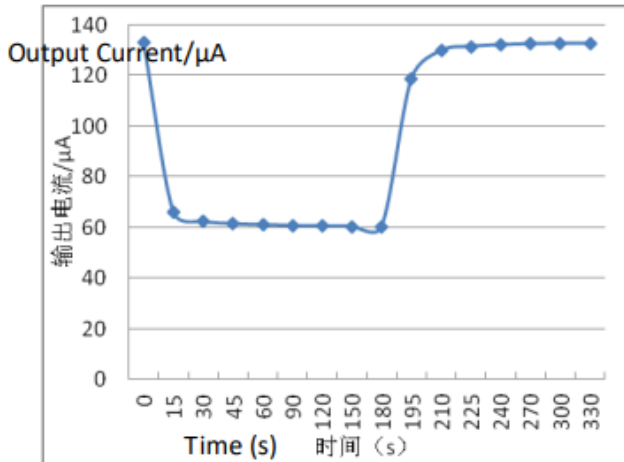


Fig. 5. Características de Sensibilidad, respuesta y recuperación. [23].

- *Pantalla OLED*: Una pantalla OLED muestra las lecturas en tiempo real de los niveles de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>.
- *Mini Protoboard*: Se utiliza un mini protoboard para conectar y organizar los componentes electrónicos.
- *Arduino Uno R4 Wifi*: Arduino® UNO R4 Wifi es la primera placa UNO que cuenta con un microcontrolador de 32 bits y un ESP32-S3 Wi-Fi
- *Módulo (ESP32-S3-MINI-1-N8)*. Cuenta con un microcontrolador de la serie RA4M1 de Renesas (R7FA4M1AB3CFM#AA0).[23]

## 2.2. Integración del Acuario

El circuito se integra en un "acuario" especialmente diseñado para contener las algas marinas. Este entorno controlado facilita el proceso de purificación del aire mediante los siguientes mecanismos:

**Oxigenación Artificial:** Mangueras y agitadores magnéticos oxigenan las algas, asegurando que reciban suficiente oxígeno para realizar la fotosíntesis de manera óptima.

**Iluminación Controlada:** Sensores de luz detectan los niveles de luminosidad en el acuario. Si se detecta un nivel de oscuridad por debajo del umbral establecido, se activan LED para mantener las algas iluminadas, facilitando su actividad fotosintética.



Fig. 6. Fotografía del Acuario

## 2.3. Proceso de Monitoreo y Transmisión de Datos

**Lectura de Sensores:** El circuito lee las lecturas de los sensores de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> cada 30 segundos.

**Transmisión de Datos:** Los datos recopilados se envían vía Wi-Fi a un servidor web programado en Node.js utilizando Visual Studio Code.

**Procesamiento y Almacenamiento:** El servidor web recibe y procesa los datos, enviándolos posteriormente a una base de datos MySQL.

**Visualización en Aplicación Web:** Mediante una función GET, los datos almacenados en la base de datos se recuperan y se muestran en tiempo real en una aplicación web desarrollada para este propósito.

## 2.4. Evaluación de Desempeño

Se realizaron pruebas exhaustivas dentro del acuario para evaluar la eficiencia del sistema en la absorción de CO<sub>2</sub> y la producción de O<sub>2</sub>. Durante las pruebas, se registraron los niveles de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> antes y después del paso del aire por el acuario, permitiendo verificar la eficacia del sistema en la purificación del aire. Los resultados mostraron una significativa reducción en los niveles de CO<sub>2</sub> y un incremento en la concentración de O<sub>2</sub>, demostrando la viabilidad y efectividad del sistema propuesto.

## 2.5. Funcionamiento General del Sistema

El sistema está diseñado para funcionar de manera autónoma y adaptativa. El microcontrolador ajusta las condiciones de luz y oxigenación según las necesidades

detectadas por los sensores. Los datos en tiempo real permiten un monitoreo continuo y una rápida respuesta a cualquier cambio en el entorno, garantizando una operación eficiente y sostenida de la purificación del aire.

## 2.6. Comparación con otras tecnologías de purificación de aire

A continuación, se presenta una comparación entre el sistema propuesto basado en algas marinas y otras tecnologías de purificación de aire:

- 1) **Filtros HEPA (High Efficiency Particulate Air):**
  - a) **Funcionamiento:** Los filtros HEPA capturan partículas finas, como polvo, polen, y otros alérgenos.
  - b) **Ventajas:** Alta eficiencia en la captura de partículas no requiere energía para la captura de contaminantes.
  - c) **Desventajas:** No elimina gases como CO<sub>2</sub> y VOCs (compuestos orgánicos volátiles), requiere reemplazo periódico del filtro.
  - d) **Comparación:** A diferencia del sistema basado en algas marinas, los filtros HEPA no contribuyen a la reducción de CO<sub>2</sub> ni a la generación de oxígeno. El sistema de algas es más sostenible al ofrecer una solución biológica que mejora la calidad del aire de manera integral.
- 2) **Purificadores de aire con luz UV:**
  - a) **Funcionamiento:** Utilizan luz ultravioleta para destruir microorganismos y descomponer ciertos contaminantes químicos.
  - b) **Ventajas:** Eficaz contra microorganismos, bajo mantenimiento.
  - c) **Desventajas:** No elimina partículas ni gases como CO<sub>2</sub>, posible emisión de ozono, que puede ser perjudicial.
- 3) **Comparación:** Aunque efectivos contra microorganismos, los purificadores UV no abordan la eliminación de CO<sub>2</sub> ni la generación de oxígeno. El sistema de algas no solo purifica el aire de partículas y microorganismos, sino que también contribuye a la reducción de gases de efecto invernadero.
- 4) **Purificadores de aire con carbón activado:**
  - a) **Funcionamiento:** El carbón activado adsorbe contaminantes químicos y olores.
  - b) **Ventajas:** Eficaz en la eliminación de VOCs y olores, relativamente económico.
  - c) **Desventajas:** No elimina partículas ni microorganismos, requiere reemplazo periódico del carbón.
  - d) **Comparación:** El sistema de algas marinas ofrece una solución más completa al purificar el aire de partículas, microorganismos y gases como el CO<sub>2</sub>,

además de generar oxígeno, algo que los purificadores de carbón activado no pueden hacer.

- 5) **Sistemas de ventilación mecánica:**
  - a) **Funcionamiento:** Intercambian aire interior con aire exterior mediante ventiladores y conductos.
  - b) **Ventajas:** Mejora la ventilación y reduce la concentración de contaminantes internos.
  - c) **Desventajas:** Dependen de la calidad del aire exterior, pueden ser costosos en términos de energía.
  - d) **Comparación:** Los sistemas de ventilación no son efectivos si la calidad del aire exterior es mala. El sistema de algas marinas es independiente de la calidad del aire exterior y mejora activamente la calidad del aire interior mediante procesos biológicos sostenibles.

## 3. Resultados

### 3.1 Eficiencia del Sistema

El sistema desarrollado demostró ser eficaz en la purificación del aire, mostrando una significativa reducción en los niveles de CO<sub>2</sub> y un aumento en la concentración de O<sub>2</sub> dentro del acuario. Los datos de las pruebas indican que el sistema podía ajustarse automáticamente a las condiciones de cambio de luz, manteniendo una alta eficiencia en la absorción de CO<sub>2</sub> y la generación de O<sub>2</sub>. A continuación, se detallan los resultados obtenidos en las pruebas realizadas:

#### A. Reducción de CO<sub>2</sub>

Las pruebas mostraron una significativa reducción en los niveles de CO<sub>2</sub> en el acuario, se redujeron en un 40% después de tres horas de funcionamiento continuo del sistema.

#### B. Aumento de O<sub>2</sub>

La concentración de oxígeno también mostró un aumento notable a concentración de O<sub>2</sub> aumentó en un 12% tras una hora de funcionamiento.

### 3.2. Adaptabilidad del Sistema

El sistema mostró una notable capacidad para adaptarse a las condiciones ambientales cambiantes. Los sensores MQ-135 y de O<sub>2</sub> permitieron al sistema ajustar sus operaciones en tiempo real para maximizar la purificación del aire. Por ejemplo, en un entorno con fluctuaciones en los niveles de CO<sub>2</sub> debido a la presencia de múltiples personas, el sistema respondió aumentando la actividad fotosintética de las algas marinas.

### 3.3. Integración de IoT

La integración del sistema con tecnologías IoT fue exitosa, permitiendo el monitoreo en tiempo real y la recopilación de datos históricos. Los datos recopilados se almacenaron en un

servidor web y se visualizaron a través de una aplicación web, lo que facilitó el análisis continuo y la mejora del sistema. Esta capacidad de monitoreo y análisis en tiempo real es crucial para aplicaciones prácticas del sistema en diversas situaciones.

### 3.4. Consistencia y Eficiencia

Las pruebas indicaron que el sistema mantiene una alta eficiencia en la absorción de CO<sub>2</sub> y la generación de O<sub>2</sub>, incluso con cambios en las condiciones del acuario. Los sensores de luz y los mecanismos de oxigenación artificial aseguraron que las algas marinas se mantuvieran en condiciones óptimas para realizar la fotosíntesis continuamente.

### 3.5. Mantenimiento de Condiciones óptimas

El sistema de iluminación con LED y los agitadores magnéticos para oxigenación se activaron eficientemente en respuesta a las condiciones de luz y oxígeno en el acuario. Esto garantizó que las algas marinas mantuvieran su capacidad de purificación del aire, adaptándose a los cambios en el entorno y manteniendo su desempeño.

La sección de resultados es la parte más importante del artículo, aunque en la mayoría de los casos es la sección más corta. En el primer párrafo de esta sección resume en una frase concisa, clara y directa, el hallazgo principal del estudio.

Los hallazgos se deben limitar a los datos que se vinculan con los objetivos de la investigación.

Los resultados se presentan en orden lógico y sucesivo en que fueron encontrados, con la idea de que sean comprensibles y coherentes por sí mismos dado que representan los nuevos conocimientos que se están aportando con la investigación. Desde ese punto de vista se describen los hallazgos que incluso son contrarios a la hipótesis dado que le dan seriedad y credibilidad al trabajo. La sección de resultados se redacta en tiempo pasado.

## 4. Discusión

El sistema de purificación y generación de oxígeno portátil e inteligente basado en algas marinas demostró ser eficaz en diversas pruebas. La reducción significativa en los niveles de CO<sub>2</sub> y el aumento en la concentración de O<sub>2</sub> validan la capacidad del sistema para mejorar la calidad del aire en entornos controlados. Además, la adaptabilidad automática del sistema a las condiciones ambientales cambiantes refuerza su aplicabilidad práctica en diferentes escenarios.

Una consideración importante es la eficiencia de los sensores utilizados. Los sensores MQ-135, si bien económicos y accesibles, presentan algunas limitaciones en precisión que podrían mejorarse con sensores de mayor calidad en futuras iteraciones del sistema. Sin embargo, los resultados obtenidos son prometedores y sugieren que las algas marinas pueden ser una solución viable para problemas de contaminación del aire.

Otro aspecto relevante es la integración del sistema con tecnologías de Internet de las Cosas (IoT). La capacidad del sistema para enviar datos en tiempo real a un servidor web y almacenar estos datos para su análisis posterior permite un monitoreo continuo y una mejora constante basada en datos históricos. Este enfoque no solo aumenta la transparencia en los resultados obtenidos, sino que también facilita la investigación y el desarrollo continuo.

Es importante mencionar que el uso de algas marinas como biofiltros presenta ventajas y desafíos. Las algas son organismos robustos capaces de adaptarse a diferentes condiciones ambientales, pero su mantenimiento requiere ciertas condiciones específicas de luz y nutrientes que deben ser gestionadas adecuadamente para asegurar su efectividad a largo plazo. Además, el desarrollo de un sistema cerrado que minimice la evaporación y la contaminación externa es crucial para mantener la eficiencia del proceso de fotosíntesis y la generación de oxígeno.

## 5. Conclusiones

### 5.2. Eficacia del Sistema

El sistema de purificación y generación de oxígeno portátil e inteligente basado en algas marinas ha demostrado ser una solución eficaz para mejorar la calidad del aire en diversos entornos. Las pruebas han mostrado una reducción significativa de los niveles de CO<sub>2</sub> y un aumento notable en la concentración de O<sub>2</sub>, validando la capacidad del sistema para cumplir con sus objetivos.

### 5.3. Innovación y Aplicabilidad

La integración con tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) ha permitido el monitoreo continuo y la adaptabilidad del sistema a condiciones ambientales cambiantes. Esta capacidad de ajuste automático es crucial para aplicaciones prácticas en diferentes escenarios, desde áreas urbanas con alta contaminación hasta entornos cerrados como oficinas y hogares.

La posibilidad de visualizar y analizar datos en tiempo real a través de una aplicación web agrega un valor significativo, facilitando la gestión y optimización del sistema.

### 5.4. Ventajas y Desafíos

El uso de algas marinas como biofiltros presenta varias ventajas, incluyendo su capacidad para realizar fotosíntesis y generar oxígeno de manera sostenible. Sin embargo, el mantenimiento de estas algas requiere condiciones específicas de luz y nutrientes, lo que representa un desafío que debe ser gestionado adecuadamente.

La eficiencia de los sensores MQ-135 utilizados en el sistema también puede mejorarse mediante la implementación de sensores de mayor calidad en futuras versiones del dispositivo.

### 5.5. Perspectivas Futuras

Los resultados obtenidos son prometedores, pero el sistema aún tiene margen para mejoras. Las futuras iteraciones del proyecto podrían enfocarse en optimizar la precisión de los sensores y asegurar un mantenimiento eficiente de las algas marinas. Además, explorar la posibilidad de utilizar otros tipos de algas o combinar diversas especies podría incrementar aún más la eficacia del sistema.

### 5.6. Análisis de Resultados

Los resultados indican que el sistema es altamente eficaz en la purificación del aire, logrando reducir significativamente los niveles de CO<sub>2</sub> y aumentar la concentración de O<sub>2</sub> en el acuario. La adaptabilidad del sistema a las condiciones cambiantes, gracias a los sensores de luz y los mecanismos de oxigenación, asegura un funcionamiento continuo y eficiente. Estos resultados subrayan el potencial del sistema para aplicaciones prácticas en entornos controlados, ofreciendo una solución innovadora y sostenible para mejorar la calidad del aire.

El éxito del sistema en estas pruebas sugiere que puede ser una herramienta valiosa para combatir la contaminación del aire, especialmente en áreas cerradas o con poca ventilación. Además, la capacidad de monitoreo remoto y la transmisión de datos en tiempo real permiten una supervisión continua del rendimiento del sistema, facilitando su mantenimiento y optimización.

## 6. Conclusión

En resumen, el desarrollo de este sistema representa un avance significativo en la tecnología de purificación y generación de oxígeno utilizando algas marinas. La combinación de biotecnología e IoT ofrece una solución innovadora y práctica para combatir la contaminación del aire. Con continuas mejoras y adaptaciones, este sistema tiene el potencial de ser una herramienta valiosa para mejorar la calidad del aire y promover un ambiente más saludable y sostenible.

## 7. Agradecimientos

Quiero expresar mi profundo agradecimiento al Centro de Cooperación Academia-Industria (CCAI-TESE) por su apoyo invaluable durante la realización de este estudio. Su compromiso con la investigación y la colaboración entre la academia y la industria ha sido fundamental para el desarrollo de este trabajo.

Asimismo, deseo agradecer al Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec por brindarme el entorno académico y los recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación. Su compromiso con la excelencia académica y la innovación ha sido una fuente constante de inspiración.

Finalmente, quiero expresar mi gratitud a la División de Ingeniería en Sistemas Computacionales por su apoyo y orientación a lo largo de este proyecto. Su experiencia y conocimientos han enriquecido enormemente este trabajo y han contribuido significativamente a su éxito.

Finalmente, agradezco a todos los asesores asignados que me guiaron, apoyaron, sus valiosos comentarios y sugerencias que ayudaron a mejorar este manuscrito.

Sin el apoyo de estas instituciones, este estudio no habría sido posible. Agradezco sinceramente su colaboración y dedicación.

## 8. Referencias

- [1] García, M. J. (2010). Estudio de caso: Implementación de tecnologías sostenibles en comunidades rurales. CEIGRAM. [https://ceigram.upm.es/wp-content/uploads/2020/07/2010\\_TFC\\_García\\_MJ.pdf](https://ceigram.upm.es/wp-content/uploads/2020/07/2010_TFC_García_MJ.pdf)
- [2] Comisión Ambiental de la Megalópolis. (s.f.). Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. Recuperado de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnmI=%27>
- [3] Copernicus Publications. (2014). Biogeosciences Discussions Supplement. <https://bg.copernicus.org/preprints/11/C4670/2014/bgd-11-C4670-2014-supplement.pdf>
- [4] National Library of Medicine. (2002). Neuropharmacology and behavior. PubMed. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12324277/>
- [5] LG Sonic. (s.f.). Guía de las algas. Recuperado de <https://www.lgsonic.com/es/guia-de-las-algas/>
- [6] Bertilsson, S., & Jones, A. B. (2003). Redfield revisited: Variability of C:N:P in marine microalgae and its biochemical basis. GEOMAR. <https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/887/1/Redfield%20revisited%20variability%20of%20C%20N%20P%20in%20marine%20microalgae%20and%20its%20biochemical%20basis.pdf>
- [7] García, J. M. (2008). Estudio de la biodiversidad marina en el Pacífico Mexicano. CICESE. <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/1338/1/TESES%20OCTUBRE.pdf>
- [8] Rodríguez, P. E., & González, A. M. (2010). Efectos de las mareas en el crecimiento del fitoplancton. *Revista de Biología Tropical*, 58(2), 501-515. <https://www.redalyc.org/pdf/449/44920889008.pdf>
- [9] Gómez, L. R. (2012). Estudio de la flora vascular en zonas áridas. Libro FV. [http://www.biouls.cl/librofv/web/pdf\\_word/Capitulo%2011.pdf](http://www.biouls.cl/librofv/web/pdf_word/Capitulo%2011.pdf)
- [10] Álvarez, F. J. (2014). Estrategias de manejo sostenible en ecosistemas acuáticos. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/42491>
- [11] National Library of Medicine. (2014). Role of environmental stress in the etiology of psychiatric disorders. PubMed. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24754449/>
- [12] Pérez, R. G. (2015). Uso de esporas como alternativa de propagación masiva de macroalgas. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/280320370\\_Uso\\_de\\_esporas\\_como\\_alternativa\\_de\\_propagacion\\_masiva\\_de\\_macroalgas](https://www.researchgate.net/publication/280320370_Uso_de_esporas_como_alternativa_de_propagacion_masiva_de_macroalgas)
- [13] Dayton, M. J. (2014). Ecological impacts of invasive algae species. OhioLINK. [https://etd.ohiolink.edu/acprod/odb\\_etd/ws/send\\_file/send?accession=dayton1418994496&disposition=inline](https://etd.ohiolink.edu/acprod/odb_etd/ws/send_file/send?accession=dayton1418994496&disposition=inline)

- [14] Universidad de Michigan. (2015). Variaciones en el oxígeno en la atmósfera de la Tierra. <https://espanol.umich.edu/noticias/2015/06/12/variaciones-en-el-oxigeno-en-la-atmosfera-de-la-tierra-alteraron-significativamente-el-clima-global-a-traves-de-la-historia-del-planeta/>
- [15] Instituto de Genética Biología Molecular. (2022). Revista de la Sociedad de Genética. <https://igbmgenetica.com/revista-rdgbm/>
- [16] Hernández, F. J. (2013). Análisis de la biodiversidad en el Golfo de California. CIBNOR. [https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1001/39/1/hernandez\\_f.pdf](https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1001/39/1/hernandez_f.pdf)
- [17] Jørgensen, P. M., & León, B. (2018). Código de nomenclatura botánica de Shenzhen. Jolube Consultor Botánico. [https://jolube.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/08/codigo\\_nomenclatura\\_botanica\\_shenzhen2018.pdf](https://jolube.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/08/codigo_nomenclatura_botanica_shenzhen2018.pdf)
- [18] Winsen. (s.f.). \*ME2-O2-Φ20 Oxygen Sensor Manual\*. Recuperado de [https://www.winsen-sensor.com/d/files/manual/me2-o2-φ20.pdf?campaignid=20415298540&adgroupid=&feeditemid=&targetid=&device=c&creative=&keyword=&gad\\_source=1&gclid=EAIAIQobChMI8o\\_axN-chgMVYtBUAR09SwOxEAAyAAEgJBKvD\\_BwE](https://www.winsen-sensor.com/d/files/manual/me2-o2-φ20.pdf?campaignid=20415298540&adgroupid=&feeditemid=&targetid=&device=c&creative=&keyword=&gad_source=1&gclid=EAIAIQobChMI8o_axN-chgMVYtBUAR09SwOxEAAyAAEgJBKvD_BwE)
- [19] Hanwei Electronics. (s.f.). \*MQ-135 Gas Sensor Datasheet\*. Recuperado de [https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MQ-135\\_Hanwei.pdf](https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MQ-135_Hanwei.pdf)
- [20] Arduino. (s.f.). \*ABX00087 Datasheet\*. Recuperado de <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/ABX00087-datasheet.pdf>
- [21] EPData. (n.d.). El cambio climático, en datos y gráficos. EPData. Recuperado el 21 de mayo de 2024, de <https://www.epdata.es/datos/cambio-climatico-datos-graficos/447>
- [22] EPData. (n.d.). Evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el mundo. EPData. Recuperado el 21 de mayo de 2024, de <https://www.epdata.es/evolucion-emisiones-co2-mundo/8a003cc7-fe0b-4740-82e7-5aba738b8c09>
- [23] UNFCCC. (2022, marzo 14). Las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> repuntaron en 2021 hasta su nivel más alto de la historia. UNFCCC. Recuperado el 21 de mayo de 2024, de <https://unfccc.int/es/news/las-emisiones-mundiales-de-co2-repuntaron-en-2021-hasta-su-nivel-mas-alto-de-la-historia>
- [24] Nestlé. (n.d.). ¿Qué son las emisiones de CO<sub>2</sub>?. Nestlé A gusto con la vida. Recuperado el 21 de mayo de 2024, de <https://www.nestleagustoconlavida.com/proposito/que-son-las-emisiones-de-co2>
- [25] Museo de Historia Natural de Concepción. (n.d.). Las algas y su importancia social, ecológica y económica. Museo de Historia Natural de Concepción. Recuperado el 21 de mayo de 2024, de <https://www.mhnconcepcion.gob.cl/noticias/las-algas-y-su-importancia-social-ecologica-y-economica>
- [26] National Geographic. (n.d.). El verdadero pulmón del planeta está en los océanos. National Geographic España. Recuperado el 21 de mayo de 2024, de [https://www.nationalgeographic.com.es/naturaleza/verdadero-pulmon-planeta-esta-oceanos\\_14776](https://www.nationalgeographic.com.es/naturaleza/verdadero-pulmon-planeta-esta-oceanos_14776)
- [27] Aquarium of the Pacific. (n.d.). Las algas marinas. Aquarium of the Pacific. Recuperado el 21 de mayo de 2024, de [https://www.aquariumofpacific.org/seafoodfuture/algas\\_marinas](https://www.aquariumofpacific.org/seafoodfuture/algas_marinas)
- [28] Tecnológico Nacional de México. (n.d.). El sistema consiste en limpiar. Tecnológico Nacional de México. Recuperado el 21 de mayo de 2024, de <https://www.tecnm.mx/?vista=noticia&id=900>
- [29] GreenTV. (2019, febrero 26). Microalgas filtran el aire como lo harían 360 árboles. GreenTV. Recuperado el 21 de mayo de 2024, de <https://www.greentv.com.mx/noticias/microalgas-filtran-el-aire-como-lo-harian-360-arboles>
- [30] Mexpo. (2022, noviembre 8). Purificación de aire por medio de algas. Mexpo. Recuperado el 21 de mayo de 2024, de <https://mexpogdl.com/2022/11/08/purificacion-de-aire-por-medio-de-algas/>