

# ESTUDIO DE LA FOTOSÍNTESIS ARTIFICIAL. PRODUCCION DE COMPUESTOS CARBÓN-HIDRÓGENO A TRAVÉS DE LA REDUCCIÓN FOTOCATALÍTICA DE CO<sub>2</sub>

ARTIFICIAL PHOTOSYNTHESIS STUDY PRODUCTION OF  
CARBON-HYDROGEN COMPOUNDS THROUGH THE  
PHOTOCATALYTIC REDUCTION OF CO<sub>2</sub>

\*Franco Leonardo Gracia Cazarin (1)  
Griselda Corro (2)  
Fortino Bañuelos (3)

<https://orcid.org/0009-0006-2042-4849>  
<https://orcid.org/0000-0002-8049-7648>  
<https://orcid.org/0000-0001-8568-6133>

Recibido: 1 de Diciembre 2024

Revisado: 2 de Enero 2025

Publicado: 20 de Enero 2025

FOLIO A11N27.25/945

(1)gc223470230@alm.buap.mx

(2)griselda.corro@correo.buap.mx

(3)fortino.banuelos@correo.buap.mx

Filiación en orden de aparición

(1): Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Laboratorio de  
Catálisis y Energía, Maestría en Ciencias en Energías Renovables

ICUAP BUAP

La demanda energética en la actualidad es un factor importante que origina y se enlaza con muchas de las problemáticas que nos aquejan como sociedad a nivel mundial. Cobra importancia debido a que las tecnologías y fuentes de energía utilizadas para satisfacer la demanda energética son principalmente de origen fósil. Esto se traduce, en consecuencia, en grandes emisiones de CO<sub>2</sub>, generando una constante carga de emisiones que se liberan al ambiente a nivel global. Esto, aunado a un aumento en la demanda energética por el crecimiento demográfico, nos lleva a un ciclo en el cual, el impacto por dicha contaminación es palpable en los efectos ocasionados por el cambio climático. Es por ello que la disminución de CO<sub>2</sub>, un gas de efecto invernadero (GEI), se convierte en un tema de estudio altamente relevante. Establecidas estas problemáticas, la fotocatalisis surge como un método a través del cual es posible aprovechar el CO<sub>2</sub> emitido y transformarlo en hidrocarburos y alcoholes de valor agregado. Esto es posible mediante la fotosíntesis artificial que comprende la oxidación de agua y reducción de la molécula de CO<sub>2</sub> acelerada por fotocatalizadores y luz.

Palabras clave Demanda energética, Energía fósil, Cambio Climático, Emisiones de CO<sub>2</sub>, Reducción de CO<sub>2</sub>, Fotocatalisis, Fotosíntesis artificial, Hidrocarburos, Alcoholes, Oxidación, Reducción, Fotocatalizadores.

## **Abstract**

The current energy demand is an important factor that originates and intertwines with many of the issues that afflict us as a global society. It gains significance because the technologies and energy sources used to meet this demand are mainly fossil-based. This translates into significant CO<sub>2</sub> emissions, generating a constant burden of emissions released into the global environment. Coupled with an increase in energy demand due to demographic growth, leads to a cycle where the impact of such pollution becomes increasingly noticeable by the global warming effects. Hence, the reduction of greenhouse gases (GHGs), becomes a highly relevant area of study. With these issues established, photocatalysis emerges as a method through which it is possible to harness emitted CO<sub>2</sub> and transform it into value-added hydrocarbons and alcohols. This is achievable through artificial photosynthesis, which involves the oxidation of water and reduction of the CO<sub>2</sub> molecule accelerated by a photocatalyst and light.

### **Keywords**

Energy demand, Fossil energy, Climate change, CO<sub>2</sub> emissions, CO<sub>2</sub> reduction, Photocatalysis, Artificial photosynthesis, Hydrocarbons, Alcohols, Oxidation, Reduction, Photocatalysts.

## Introducción

Actualmente, existe una gran demanda de energía a nivel mundial, donde su obtención está basada principalmente en la quema de combustibles fósiles, tales como petróleo, carbón o gas natural. Este aumento de consumo de energía nos ha llevado a una inevitable escasez de estos valiosos recursos con consecuencias económicas, sociales y políticas, y a su vez generando niveles inaceptables de contaminación ambiental debido a la emisión de  $\text{CO}_2$ , causando el efecto invernadero en la tierra. De acuerdo con el informe de Global Carbon Project Friedlingstein et al. (2023), en el año 2022 hubo una emisión de 36.4 mil millones de toneladas de  $\text{CO}_2$ , una medida muy similar a las que se tenían previamente al confinamiento ocasionado por el Covid en 2019, a la par las emisiones generadas únicamente por carbón, petróleo y gas prevén un aumento (1.1%, 1.5%, 0.5%) llevándonos a 36.8 mil millones de toneladas de  $\text{CO}_2$ , una cifra 1.4% mayor a la obtenida en 2019.

El incremento en la concentración de  $\text{CO}_2$  debido a la obtención de energía ha impulsado la búsqueda de nuevos procesos que aprovechen el  $\text{CO}_2$  como una fuente de materia prima renovable y de bajo costo para la obtención de energéticos. Un proceso viable que satisfará parte de la demanda energética y disminuirá la concentración del  $\text{CO}_2$  es el proceso fotocatalítico de reducción del  $\text{CO}_2$  por  $\text{H}_2\text{O}$  como agente reductor, mediante el empleo de un semiconductor especializado, bajo la irradiación de luz. Este método asemeja la fotosíntesis natural como método directo para disminuir tanto los gases de efecto invernadero, como para suministrarnos energía sostenible y limpia que parte de un proceso de ciclo cerrado de cero emisiones de  $\text{CO}_2$ .

Lo anterior, a simple vista, parecería que resuelve el grave problema de escasez mundial de energía y el efecto negativo que conlleva la quema de combustibles

fósiles, pero debido a lo complejo que es el proceso de fotosíntesis artificial (foto-reducción de  $\text{CO}_2$ ) y a su baja eficiencia, el proceso requiere muchos estudios en el área de fotocatalisis (cinética, síntesis de fotocatalizadores, diseño de fotoreactores, distribución de luz, temperatura) para llevarlo a soluciones prácticas.

La fotocatalisis ha sido el foco de atención de muchos científicos del mundo desde que Fujishima y Honda informaron de la primera fotoelectrólisis de agua a hidrógeno. La función de esta investigación científica está en el campo de la energía renovable y en el tratamiento ambiental, por ejemplo, en el tratamiento de la fotodegradación de varios tipos de descargas contaminantes de la industria textil (Nguyen et al., 2008).

Dentro de los estudios fotocatalíticos y de gran importancia que se tienen que realizar para lograr altas conversiones de  $\text{CO}_2$ , es el desarrollo de fotocatalizadores eficientes y la distribución de luz, ya que el fotocatalizador participa en la transformación química de las especies reactivas absorbiendo la luz (ultravioleta, visible o infrarroja). Entre los catalizadores más extensamente utilizados y estudiados está el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y se le ha considerado como uno de los mejores fotocatalizadores para la reducción de  $\text{CO}_2$ , también, está siendo ampliamente estudiado en la conversión de energía solar y en su almacenamiento, entre otros campos.

## Desarrollo

### Dióxido de carbono, $\text{CO}_2$

El dióxido de carbono es un gas compuesto por dos átomos de oxígeno y un átomo de carbono unidos por enlaces covalentes dobles, y presenta las siguientes características:

- Inodoro
- Incoloro
- Es soluble en agua
- En condiciones de temperaturas y a presión estándar (TPS.) se encuentra en estado gaseoso
- Estado líquido a presiones bajas
- Es utilizado como un propelente

Es también uno de los principales actores de los procesos que generan el efecto invernadero ("Composición Química - Calidad Ambiental - Generalitat Valenciana," 2019) pese a existir de manera natural en la atmósfera y en procesos biológicos o naturales como la absorción de este compuesto por plantas para realizar fotosíntesis o encontrarlo contenido en yacimientos naturales subterráneos. También es un componente de los gases que conforman la atmósfera terrestre siendo entre un 0.04 y 0.035% del volumen que representa en la composición total de la atmósfera.

#### Generalidades del carbono

Como se mencionó previamente, el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) es un gas predominante en los gases que influyen en el efecto invernadero ya que presenta la capacidad de absorber y emitir radiaciones infrarrojas, lo cual provoca que sea un gas que aumenta la temperatura de la atmósfera con facilidad. Aunado a su larga vida, su presencia representa una mayor capacidad de calentar la atmósfera que el resto de los gases de efecto invernadero (GEI) combinados por lo que se le considera el principal causante del efecto invernadero y del aumento de la temperatura global visto durante el siglo XX (CK-12 Foundation, 2015).

El  $\text{CO}_2$  no solo es un gas dañino para el planeta, también es un gas con diversos usos industriales desde la industria mé-

dica hasta la industria agroalimentaria. Un ejemplo cotidiano es el extintor que tenemos en zonas de trabajo o entornos transitados. Existen extintores de  $\text{CO}_2$  que eliminan el oxígeno de la zona en que exista una posible combustión.

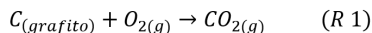
En la industria alimentaria es común encontrar al  $\text{CO}_2$  en bebidas carbonatadas ya que este gas tiene efecto de efervescencia, o en los procesos de la industria de transformación de lácteos es un coadyuvante a la etapa de cuajado de algunos productos, dando el beneficio de generar menos contaminación al producto final, eliminando la modificación al sabor por algún otro compuesto siendo esta una opción más veloz y económica que un ácido más contaminante. Es un excelente gas refrigerante debido a que en su forma sólida forma hielo seco el cual es un refrigerante de alta eficiencia, ya que, al dejar de exponerse a altas temperaturas, permanece en estado gaseoso, sin ingresar líquido al sistema que puede propiciar la contaminación microbiana.

Finalmente podemos verlo presente también en procesos médicos como son las cirugías de laparoscópicas donde se ingresa en el paciente para ser un agente de insuflación que da espacio para realizar los procedimientos al cirujano. En la industria radiológica se usa como agente contrastante en vasos sanguíneos o como agente de ventilación mecánica en diversos tipos de cirugías.

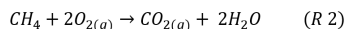
#### ESTRUCTURA DE $\text{CO}_2$

El  $\text{CO}_2$  es una molécula formada por un átomo de carbono con dos átomos de oxígeno unidos por enlaces covalentes. El peso molecular del  $\text{CO}_2$  lo determina los átomos que la conforman. Para el caso del carbono (C), su peso atómico es 6 unidades atómicas (u.a.) mientras que los dos oxígenos que conforman la molécula presentan un peso atómico de 16 u.a. (8 u.a. para cada átomo de oxígeno respectivamente).

Uno de los procesos para la producción del  $\text{CO}_2$ , está representado por la Reacción R1.

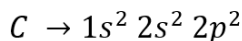


El  $\text{CO}_2$  generado por la combustión de hidrocarburos ( $\text{CH}_4$ ) está descrito en la Reacción R 2.



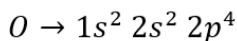
Configuración electrónica del Carbono (C).

Para el caso del átomo de Carbono elemental (C) la configuración electrónica es la siguiente.



Configuración electrónica del Oxígeno elemental (O).

En la molécula de dióxido de carbono encontramos dos átomos de oxígeno. La configuración de sus electrones es la siguiente.



Modelo de la molécula de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).

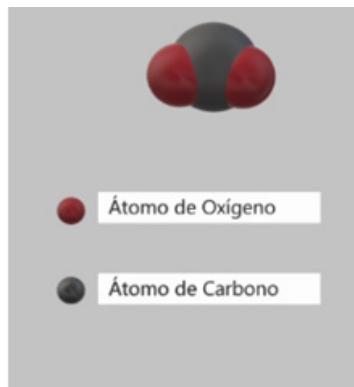


Figura 1., Molécula de ( $\text{CO}_2$ ) Dióxido de Carbono. (Protocolo Tesis F. Gracia, 23/09/2023)

Hibridación de Orbitales de la molécula  $\text{CO}_2$

La molécula de  $\text{CO}_2$  está conformada por un átomo de Carbono (C) y dos átomos de Oxígeno ( $\text{O}_2$ ) los cuales se enlazan a los lados del carbono con dos enlaces dobles respectivamente.

Para que se pueda comprender el enlace atómico del carbono con los átomos de oxígeno se debe considerar que internamente existe una hibridación entre los orbitales  $2s$  y  $2p_x$  dando como resultado un orbital  $sp$  y dos orbitales  $p$  puros sin hibridar ( $p_y$ ,  $p_z$ ). Para el caso de ambos átomos de oxígeno es necesario que se realice una hibridación de sus Orbitales  $2s$  y  $2p_x$ ,  $2p_y$  formando así un Orbital hibridado  $sp^2$  y un orbital  $2p_z$  sin hibridar.

Molécula de  $\text{CO}_2$  con orbitales  $sp$  y  $sp^2$  hibridados

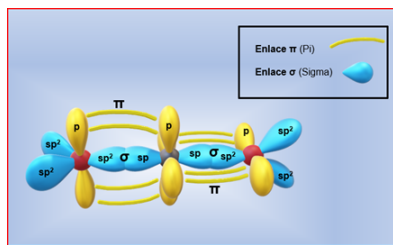


Figura 2. Molécula de CO<sub>2</sub> con (Protocolo Tesis F. Gracia, 23/09/2023)

### Formas alotrópicas del Carbono

El carbono es un elemento muy versátil, esencial para los seres vivos cuya estructura está basada en compuestos de carbono. Al ser un elemento con alta afinidad para unirse con una amplia variedad de elementos, permite formar compuestos que dieron pie a la vida, tal cual se conoce hoy en día. El Carbón es un elemento tan versátil que en la naturaleza es posible verlo en distintas formas alotrópicas. Alotropía es la capacidad que tienen algunos elementos de poder organizar sus átomos de distinta manera en un mismo estado de agregación de la materia.

#### Grafito

Una de las formas alotrópicas del carbono es el grafito el cual presenta una estructura organizada por capas cuyos átomos se forman a manera de hexágono con enlaces fuertes entre sí. Esa organización esta repetida en las distintas capas que la conforman generando así una estructura con habilidades de un conductor tanto térmico y eléctrico (Abellán, J. 2015).

#### Grafeno

El grafeno es una estructura de átomos de carbono en la cual también observamos una organización hexagonal y una fuerte unión entre los mismo, pero esta solo se presenta en una capa o lamina. Esta organización al igual que el grafito presenta facilidad como un conductor térmico y eléctrico, pero a su vez presenta una alta

elasticidad, dureza y resistencia. Características que compiten con materiales como el acero y la fibra de carbono en la industria actual (Abellán, J. 2015).

#### Diamantes

Cuando se encuentra al carbono en forma de diamante se observan que es una estructura más dura, la organización que se observa es mediante orbitales sp<sup>3</sup> con uniones de enlace covalentes. Esta forma alotrópica no presenta beneficios como un conductor eléctrico, pero si posee cualidades de conductor térmico, es posible encontrarlo de manera natural y también es posible su fabricación artificial lo que resulta en una disminución de costos con un producto de características muy similares (Abellán, J. 2015).

#### Fullerenos

Los fullerenos son estructuras esféricas en las que presentan uniones a través de enlaces covalentes entre sus átomos y también se observan formas de pentágonos y hexágonos en las uniones. Se pueden encontrar con 60 átomos de carbono o variantes con menor o mayor cantidad de átomos. Los fullerenos se utilizan en la industria eléctrica principalmente para elaborar conductores y superconductores (Abellán, J. 2015).

#### Nanotubos

Los nanotubos son estructuras que se pueden entender como un grafeno organizado a manera de tubo unido por sus extremos con estructuras internas completamente formadas por pentágonos. Existen tubos de una sola pared y también nanotubos de múltiples paredes o tubos en forma concéntrica. Las características que presentan los nanotubos es que tienen una alta resistencia, una densidad baja con eficiencia para conducir la temperatura y electricidad. Es por lo cual es utilizado en la industria electrónica, biotecnología e instrumentación (Abellán, J. 2015).

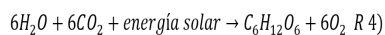
#### FOTOSÍNTESIS ARTIFICIAL

La fotosíntesis artificial se plantea en la actualidad como una alternativa para llegar a fuentes de energía menos nocivas con el medio ambiente, esto se realiza mediante la reducción de moléculas de  $\text{CO}_2$  y la Oxidación de la molécula de Agua  $\text{H}_2\text{O}$ . El proceso para llevar a cabo esta reacción acelerada por fotocatalizadores es el principal tema de esta investigación. La fotosíntesis artificial se lleva a cabo mediante el uso de la luz, agua y  $\text{CO}_2$  para la obtención de compuestos que pueden ser combustibles, Entre ellos, el metano o alcoholes de bajo peso molecular, a diferencia de la fotosíntesis natural que las plantas llevan a cabo obteniendo glucosa o azúcares (Barrios, Celina E., Albiter, Elim, & Zanello, Rodolfo. 2015), (Asociación Española de Operadores de Productos Petrolíferos. 2021, May 7).

#### Fotoreactores

En la foto síntesis artificial es esencial usar parámetros específicos y controlados que permitan estudiar de forma acertada la reacción de reducción de  $\text{CO}_2$  con agua, acelerada por un fotocatalizador incluido en el medio. Estos parámetros controlados se inducen principalmente en reactores que se denominan reactores fotocatalíticos. Ya que en estos se llevan a cabo los procesos foto catalíticos, estos se adecuan en forma y tamaño según sea la disposición de luz en el experimento a realizar

La fotosíntesis de carbohidratos es uno de los procesos más complejos que existe en la naturaleza, donde a partir de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , y energía solar se forman moléculas orgánicas con el desprendimiento de  $\text{O}_2$  (Ec. 1) (Benniston y Harriman, 2008) como lo muestra la Reacción R 4.



La fotosíntesis artificial se define como

el uso de la tecnología, especialmente biología sintética y nanotecnología para capturar la luz, transportar electrones, romper la molécula de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) y capturar dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) con el fin de generar combustibles (Sovacool y Gross., 2015).

Aun cuando se utilizan los mismos ingredientes que la fotosíntesis natural: luz,  $\text{H}_2\text{O}$ , y  $\text{CO}_2$ , el producto final no es azúcar, sino combustibles como el hidrógeno, metano, etano, propano o alcoholes. Estos combustibles almacenan energía que liberan cuando se queman. Por ello, un estudio reciente proclama que "ninguna tecnología nueva tiene el potencial a largo plazo de transformar radicalmente el planeta hacia la sostenibilidad como la fotosíntesis artificial (sola o junto con otras tecnologías) en forma más eficiente como una energía de cero carbonos".

#### Viabilidad de proyectos en Fotosíntesis Artificial.

Económicamente el proyecto demuestra ser viable debido a que la materia prima ( $\text{CO}_2$ ) es un subproducto gratuito que se origina de la quema del biodiesel producido en el Laboratorio de Catálisis y Energía. Por otra parte, el Laboratorio de Catálisis y Energía cuenta con los equipos y materiales suficientes para llevar a cabo el proceso de reducción fotocatalítica de  $\text{CO}_2$  con  $\text{H}_2\text{O}$  para la obtención de combustible (Fotosíntesis artificial).

## conclusiones

Esta investigación es un estudio de la aplicación de la energía solar incidente en la superficie terrestre, a la solución de dos problemas principales que necesitan ser resueltos con prioridad. El primero es la disminución del CO<sub>2</sub> en la atmósfera, para controlar el calentamiento global y el segundo la generación de biocombustibles para la disminución del uso de combustibles fósiles.

La presente investigación combina los procesos foto catalíticos, con procesos sintéticos, los cuales están inspirados de la fotosíntesis natural.

## Declaración de no Conflicto de intereses

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

## Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a rd-icup se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por el apoyo otorgado a la ejecución de los Proyectos: 314 y 394 y al CONAHCYT por la Beca otorgada a Franco Leonardo Gracia Cazarin.



## INTRODUCTION

Currently, there is a high global demand for energy, which is primarily obtained through the burning of fossil fuels, such as oil, coal, or natural gas. This increase in energy consumption has led to an inevitable scarcity of these valuable resources, with economic, social, and political consequences, while also generating unacceptable levels of environmental pollution due to CO<sub>2</sub> emissions, causing the greenhouse effect on Earth. According to the Global Carbon Project report by Friedlingstein et al. (2023), in 2022, there were 36.4 billion tons of CO<sub>2</sub> emissions, a figure very similar to the levels recorded before the COVID-19 lockdown in 2019. Additionally, emissions generated solely from coal, oil, and gas are expected to increase (1.1%, 1.5%, 0.5%), reaching 36.8 billion tons of CO<sub>2</sub>, a 1.4% increase compared to 2019 levels.

The rise in CO<sub>2</sub> concentration due to energy production has driven the search for new processes that utilize CO<sub>2</sub> as a renewable and low-cost raw material for energy generation. A viable process that can meet part of the energy demand and reduce CO<sub>2</sub> concentration is the photocatalytic reduction of CO<sub>2</sub> using H<sub>2</sub>O as a reducing agent, with the help of a specialized semiconductor under light irradiation. This method mimics natural photosynthesis as a direct approach to reducing greenhouse gases while providing sustainable and clean energy through a closed-loop process with zero CO<sub>2</sub> emissions.

At first glance, this may seem like a solution to the global energy shortage and the negative effects of burning fossil fuels. However, due to the complexity of artificial photosynthesis (CO<sub>2</sub> photoreduction) and its low efficiency, the process requires extensive research in the field of photocatalysis (kinetics, photocatalyst synthesis, photoreactor design, light distribution, temperature) to make it practical. Photocatalysis has been the focus of attention for many scientists worldwide since Fujishima and Honda reported the

first photoelectrolysis of water to hydrogen. The aim of this scientific research lies in the field of renewable energy and environmental treatment, for example, in the photocatalytic degradation of various types of industrial waste discharges from the textile industry (Nguyen et al., 2008).

Among the important photocatalytic studies required to achieve high CO<sub>2</sub> conversion is the development of efficient photocatalysts and light distribution, as the photocatalyst participates in the chemical transformation of reactive species by absorbing light (ultraviolet, visible, or infrared). One of the most extensively used and studied catalysts is titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>), which has been considered one of the best photocatalysts for CO<sub>2</sub> reduction.

## DEVELOPMENT

### Carbon Dioxide, CO<sub>2</sub>

Carbon dioxide is a gas composed of two oxygen atoms and one carbon atom, bonded by double covalent bonds. It has the following characteristics:

- Odorless
- Colorless
- Soluble in water
- In gaseous state under standard temperature and pressure (STP)
- Liquid state at low pressures
- Used as a propellant

It is also one of the main contributors to the processes that generate the greenhouse effect ("Composición Química - Calidad Ambiental - Generalitat Valenciana," 2019).

Although it naturally exists in the atmosphere and plays a role in biological and natural processes, such as its absorption by plants for photosynthesis or its presence in underground natural deposits,

CO<sub>2</sub> is still a key component of the gases that form the Earth's atmosphere, making up about 0.04 to 0.035% of the total atmospheric volume.

### General Overview of Carbon

As previously mentioned, carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) is a predominant gas among those that contribute to the greenhouse effect, as it has the ability to absorb and emit infrared radiation, which makes it a gas that can easily increase atmospheric temperature. Coupled with its long lifespan, its presence in the atmosphere gives it a greater capacity to heat the atmosphere than the rest of the greenhouse gases (GHG) combined. For this reason, it is considered the main contributor to the greenhouse effect and the global temperature increase observed during the 20th century (CK-12 Foundation, 2015).

CO<sub>2</sub> is not only harmful to the planet but also has various industrial uses, ranging from the medical industry to the agro-food industry. A common example is the fire extinguisher found in workplaces or high-traffic areas. CO<sub>2</sub> extinguishers work by removing oxygen from the area where a potential fire may occur.

In the food industry, CO<sub>2</sub> is often found in carbonated beverages, where it provides the effervescence effect. In the dairy industry, it is used in the coagulation stage of some products, offering the benefit of reducing contamination in the final product while avoiding any alteration in flavor caused by other compounds. This makes it a faster and more economical option compared to more polluting acids. CO<sub>2</sub> is also an excellent refrigerant gas because, in its solid form, it creates dry ice, which is a highly efficient refrigerant. When no longer exposed to high temperatures, it transitions into a gaseous state without becoming liquid, thereby preventing microbial contamination in refrigeration systems.

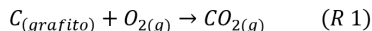
Finally, CO<sub>2</sub> is used in medical procedures,

such as laparoscopic surgeries, where it is introduced into the patient as an insufflation agent, providing space for the surgeon to perform the procedure. It is also used in radiology as a contrast agent in blood vessels and as a ventilation agent in various types of surgeries.

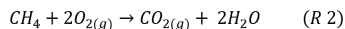
### STRUCTURE OF CO<sub>2</sub>

CO<sub>2</sub> is a molecule composed of one carbon atom and two oxygen atoms, linked by covalent bonds. The molecular weight of CO<sub>2</sub> is determined by the atoms that constitute it. For carbon (C), the atomic weight is 6 atomic units (a.u.), while the two oxygen atoms in the molecule have an atomic weight of 16 a.u. (8 a.u. for each oxygen atom, respectively).

One process for producing CO<sub>2</sub> is represented by Reaction R1:

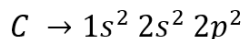


The CO<sub>2</sub> generated by the combustion of hydrocarbons (CH<sub>4</sub>) is described in Reaction R2:



### Electronic Configuration of Carbon (C)

For the elemental carbon (C) atom, the electronic configuration is as follows:



### Electronic Configuration of Elemental Oxygen (O)

In the carbon dioxide molecule, there are two oxygen atoms. Their electron configuration is as follows:

## Model of the Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) Molecule

FIGURA 1

Figure 1. Molecule of Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>). (Thesis Protocol F. Gracia, 09/23/2023)

## Hybridization of Orbitals in the CO<sub>2</sub> Molecule

The CO<sub>2</sub> molecule consists of one carbon atom (C) and two oxygen atoms (O), which are bonded to the sides of the carbon with two double bonds, respectively.

To understand the atomic bonding of carbon with the oxygen atoms, it is essential to consider that there is hybridization between the 2s and 2p orbitals, resulting in one sp hybrid orbital and two pure, unhybridized p orbitals (Py and Pz). For both oxygen atoms, hybridization of their 2s, 2p<sub>x</sub>, and 2p<sub>y</sub> orbitals is necessary, forming one sp<sup>2</sup> hybrid orbital and one unhybridized 2p<sub>z</sub> orbital.

## O<sub>2</sub> Molecule with sp and sp<sup>2</sup> Hybridized Orbitals

FIGURA 2

Figure 2. Molecule of CO<sub>2</sub> with sp and sp<sup>2</sup> Hybridized Orbitals (Thesis Protocol F. Gracia, 09/23/2023).

## Allotropic Forms of Carbon

Carbon is a highly versatile element, essential for living beings, whose structure is based on carbon compounds. As an element with a high affinity for bonding with a wide variety of elements, it allows the formation of compounds that have given rise to life as we know it today. Carbon is so versatile that it can be found in various allotropic forms in nature. Allotropy is the ability of certain elements to arrange their atoms in different ways while in the same state of matter.

## Graphite

One of the allotropic forms of carbon is graphite, which has a layered structure where atoms are arranged in a hexagonal pattern with strong bonds between them. This organization is repeated across the different layers, resulting in a structure that exhibits both thermal and electrical conductivity (Abellán, J. 2015).

## Graphene

Graphene consists of a structure of carbon atoms that also shows a hexagonal arrangement with strong bonds among them, but it exists as a single layer or sheet. Like graphite, this arrangement makes graphene an excellent thermal and electrical conductor, while also exhibiting high elasticity, hardness, and strength. These characteristics compete with materials such as steel and carbon fiber in today's industry (Abellán, J. 2015).

## Diamonds

When carbon is found in the form of a diamond, it exhibits a much harder structure. The arrangement observed is through sp<sup>3</sup> orbitals with covalent bond connections. This allotropic form does not possess the benefits of electrical conductivity, but it does have thermal conductivity properties. Diamonds can be found naturally and can also be manufactured artificially, resulting in reduced costs while maintaining very similar characteristics (Abellán, J. 2015).

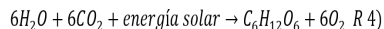
## Fullerenes

Fullerenes are spherical structures in which covalent bonds connect their atoms, and they also display pentagonal and hexagonal arrangements. They can contain 60 carbon atoms or variants with fewer or more atoms. Fullerenes are primarily used in the electrical industry to manufacture conductors and superconductors (Abellán, J. 2015).

## Nanotubes

Nanotubes are structures that can be understood as graphene organized in a tubular formation, connected at their ends, with internal structures completely made up of pentagons. There are single-walled tubes as well as multi-walled nanotubes or concentric tubes. The characteristics of nanotubes include high strength, low density, and efficiency in conducting heat and electricity, which makes them useful in the electronics, biotechnology, and instrumentation industries (Abellán, J. 2015).

energy, with the release of O<sub>2</sub> (Ec. 1) (Benniston and Harriman, 2008), as shown in Reaction R4.



Artificial photosynthesis is defined as the use of technology, particularly synthetic biology and nanotechnology, to capture light, transport electrons, break down water (H<sub>2</sub>O), and capture carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) in order to generate fuels (Sovacool and Gross, 2015).

## ARTIFICIAL PHOTOSYNTHESIS

Artificial photosynthesis is currently being explored as an alternative to achieve less harmful energy sources for the environment. This process involves the reduction of CO<sub>2</sub> molecules and the oxidation of water (H<sub>2</sub>O). The process for carrying out this reaction, accelerated by photocatalysts, is the main focus of this research. Artificial photosynthesis is carried out using light, water, and CO<sub>2</sub> to obtain compounds that can be used as fuels, such as methane or low molecular weight alcohols, unlike natural photosynthesis, which plants perform to produce glucose or sugars. (Barrios, Celina E., Albiter, Elim, & Zanella, Rodolfo, 2015; Asociación Española de Operadores de Productos Petrolíferos, 2021, May 7).

### Photoreactors

In artificial photosynthesis, it is essential to use specific and controlled parameters that allow for an accurate study of the CO<sub>2</sub> reduction reaction with water, accelerated by a photocatalyst included in the medium. These controlled parameters are mainly induced in reactors called photocatalytic reactors. Since these reactors carry out photocatalytic processes, they are designed in various shapes and sizes depending on the light arrangement for the experiment being conducted.

The photosynthesis of carbohydrates is one of the most complex processes that exist in nature, where organic molecules are formed from CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, and solar

Although the same ingredients as natural photosynthesis is used—light, H<sub>2</sub>O, and CO<sub>2</sub>—the final product is not sugar, but fuels such as hydrogen, methane, ethane, propane, or alcohols. These fuels store energy that is released when they are burned. For this reason, a recent study proclaims that "no new technology has the long-term potential to radically transform the planet toward sustainability like artificial photosynthesis (alone or in conjunction with other technologies) in a more efficient way as a zero-carbon energy source."

### Viability of Projects in Artificial Photosynthesis

Economically, the project proves to be viable since the raw material (CO<sub>2</sub>) is a free byproduct that originates from the burning of biodiesel produced in the Catalysis and Energy Laboratory. Furthermore, the Catalysis and Energy Laboratory has sufficient equipment and materials to carry out the photocatalytic reduction process of CO<sub>2</sub> with H<sub>2</sub>O for fuel production (artificial photosynthesis).

## CONCLUSIONS

This research is a study on the application of solar energy incident on the Earth's surface to solve two main problems that need to be addressed with priority. The first is the reduction of CO<sub>2</sub> in the atmosphere to control global warming, and the second is the generation of biofuels to reduce the use of fossil fuels. This research combines photocatalytic processes with synthetic processes, which are inspired by natural photosynthesis.

## Conflict of Interests

The authors of this manuscript declare that they have no conflicts of interest.

## Privacy Statement

The data from this article, as well as the technical details for conducting the experiment, can be shared upon direct request to the corresponding author. The personal data provided by the authors to rd-icuap will be used exclusively for the purposes declared by it and will not be available for any other purpose or provided to third parties.

## Acknowledgments

The authors thank the Vice-Rectorate of Research and Graduate Studies of the Benemérita Universidad Autónoma de Puebla for the support provided for the execution of Projects: 314 and 394, and CONAHCYT for the scholarship awarded to Franco Leonardo Gracia Cazarin.

## Referencias

- [1.] Abellán, J. (2015, septiembre 30). Introducción a las formas alotrópicas del carbono. El Rincón de Maxwell. <https://elrincondemaxwell.wordpress.com/2015/09/30/introduccion-a-las-formas-alotropicas-del-carbono/>
  
- [2.] Asociación Española de Operadores de Productos Petrolíferos. (2021, mayo 7). Fotosíntesis artificial, la tecnología para crear hidrocarburos. AOP. <https://www.aop.es/blog/2021/05/06/fotosintesis-artificial-hidrocarburos/>
  
- [3.] Barrios, C. E., Albiter, E., & Zanella, R. (2015). La fotosíntesis artificial, una alternativa para la producción de combustibles. *Mundo Nano*, 8(15), 6–21. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2015.15.53813>
  
- [4.] CK-12 Foundation. (2015, noviembre 16). La importancia del carbono. <https://www.ck12.org/book/ck-12-conceptos-biología/section/1.9/>
  
- [5.] Generalitat Valenciana. (2019, diciembre 13). Composición química - Calidad ambiental. <https://mediambient.gva.es/es/web/calidad-ambiental/composicion-quimica>
  
- [6.] Generalitat Valenciana. (n.d.). Composición química - Calidad ambiental. *Calidad Ambiental*. <https://mediambient.gva.es/es/web/calidad-ambiental/composicion-quimica>
  
- [7.] United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2023, junio 7). Emisiones de dióxido de carbono. <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono>
  
- [8.] Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., ... & Sitch, S. (2023). Global carbon budget 2023. *Earth System Science Data*, 15(12), 5301–5369. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>

- [9.] Nguyen, T., Wu, J. C., & Chiou, C. (2008). Photoreduction of CO<sub>2</sub> over ruthenium dye-sensitized TiO<sub>2</sub>-based catalysts under concentrated natural sunlight. *Catalysis Communications*, 9(10), 2073–2076. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2008.04.004>
- [10.] Clickmica. (2018, octubre 19). ¿Qué son las formas alotrópicas? Fundación Descubre. <https://clickmica.fundaciondescubre.es/conoce/100-preguntas-100-respuestas/las-formas-alotropicas/>