

**ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE CEL-  
DAS SOLARES USANDO LA SECUENCIA FIBONACCI APLICADA A UN FOTO-  
BIORREACTOR PARA LA CAPTURA DE CO<sub>2</sub>**

**David Vallejo Mejía**

**Asesor:**

**Francisco Javier Botero Herrera**

**Universidad EAFIT**

**Maestría en Ingeniería**

**Medellín**

**2021**

## 1 AGRADECIMIENTOS

A madre y padre.

El presente manuscrito fue desarrollado en conjunto con el asesor de grado Francisco Botero, quien guío desde el comienzo todo el proceso de esta experiencia, junto con varios colaboradores en diferentes áreas como Juan Diego Ramos, al presentar en épocas de pregrado la secuencia Fibonacci en el área del diseño y las implicaciones de esta en la ingeniería. A Jaime Osorio, quien desde su visión en la física hizo un gran aporte en todo lo que corresponde al área de captación de energía solar. Al ex decano de la facultad de ingeniería, Alberto Rodríguez, por permitir el uso de los recursos y espacios dentro de la universidad, ocasionando de manera positiva desarrollo de proyectos. Al ingeniero Fernando Montoya por dar conocimientos en el área de la ingeniería. Finalmente, al decano actual Ricardo Taborda, por permitir continuar con el uso de espacios y recursos para la generación de ideas, también para comprobar principios y conceptos.

## 2 RESUMEN

Este trabajo presenta un enfoque experimental para estudiar el efecto de la distribución espacial de celdas solares en usando la secuencia Fibonacci aplicada a un fotobiorreactor para la captura de CO<sub>2</sub>.

La propuesta surge de la necesidad de mejorar la captación de energía solar por parte de microalgas confinadas en un fotobiorreactor y de paneles solares que alimentan un sistema basculante de aireación. El Fotobiorreactor fue diseñado para trabajar en espacios reducidos y con ambientes ruidosos y contaminados como los centros de grandes ciudades. Generalmente, el arreglo fijo de paneles solares comerciales requerido representa una superficie tal que terminan interfiriendo y compitiendo contra las microalgas por la captación de la luz; es decir, resulta casi inevitable que los unos produzcan sombra sobre las otras, o viceversa, a diferentes momentos del día. El objetivo será entonces evitar que las sombras propias del biorreactor no afecten ni a los paneles ni a las microalgas.

Como estrategia se crea un prototipo, automático e inspirado en la secuencia de Fibonacci para la distribución tridimensional de paneles solares, que permite estudiar experimentalmente la captación de energía solar de microalgas, en un fotobiorreactor, con tres grados de libertad: *azimut solar* ( $\alpha$ ), *ángulo de elevación solar* ( $\beta$ ) y *nivel* del contenedor de algas ( $z$ ).

Adicionalmente se establece el reto de mantener la simplicidad y escalabilidad de los paneles de captación de energía solar. Encontrar una posible solución que asegure un mayor acceso de energía solar a menor costo, aliviar la necesidad de grandes superficies y, así, reducir el espacio al tiempo que se aumenta la capacidad de captación efectiva tanto de CO<sub>2</sub> como de la luz. Por tanto, se formula la tesis: “Un arreglo de paneles gobernado en forma y distribución por la secuencia de Fibonacci permite la captura de luz sin comprometer la captación de CO<sub>2</sub> de un fotobiorreactor”.

### 3 INTRODUCCIÓN

Estamos en un mundo donde los ingenieros se encuentran permanentemente interesados en mejorar y rediseñar las cosas, buscando herramientas que permitan abordar retos que combinen la función de los objetos con la forma de estos. De igual manera, que puedan ser integrados a soluciones existentes con el ánimo de combinar diferentes diseños que puedan cumplir con los requerimientos de dispositivos existentes para generar propuestas, herramientas, métodos y conceptos que puedan contribuir a la solución de retos actuales y futuros. El presente texto muestra una propuesta experimental que explora la distribución de celdas solares en un espacio de tres dimensiones, usando como herramienta la secuencia Fibonacci. Para esto, en primer lugar, se generan códigos en los cuales se introduce la matemática de dicha secuencia bajo el lenguaje de programación Python. Esto con el fin de crear gráficas que permitan generar estrategias de diseño, así como visualizar en tres dimensiones la posición de las celdas basadas en dichas proporciones, esto para establecer un marco de diseño y luego hacer propuestas de forma, para aumentar la absorción de luz en espacios reducidos.

Dicha estrategia también permite acercarse a situaciones más específicas, como materiales y procesos de instalación. La idea es demostrar que es posible usar técnicas para la obtención de energía solar con eficiencia fotovoltaica no sólo desde grandes áreas comúnmente analizadas (planos  $x, y$ ), o desde tecnologías de construcción propias de las celdas solares (celdas monocristalinas, policristalinas, con substratos poliméricos, etc.); sino donde primaría la disposición geométrica de las celdas en el espacio compuesto por tres dimensiones. Para ello, el punto de partida viene dado por una investigación que arrojó la construcción de un prototipo de fotobiorreactor que tenía como único fin la captura de  $\text{CO}_2$  para la limpieza del aire aprovechando el uso de microalgas. Este dispositivo trabaja de manera vertical y el sistema de funcionamiento eléctrico es nutrido por energía solar, no sólo desde sus funciones mecánicas, sino también desde los procesos fisicoquímicos que ocurren dentro del sistema. Esto arrojó la necesidad de una propuesta de diseño como complemento del sistema ya creado, el cual tendría que ser un dispositivo que cumpliera con la función de ser integrado al fotobiorreactor y con las funciones de entrega energética para las condiciones de movimiento mecánico. También debe ser un dispositivo que no cree sombra entre los contenedores del fotobiorreactor y los paneles solares evitando que compitan entre ellos por la luz, pues esto influiría negativamente en los procesos que ocurren dentro de equipo.

El diseño y construcción de un fotobiorreactor que trabaja con energía solar para la limpieza del aire en espacios reducidos, creado en la universidad EAFIT y patentado como “mecanismo basculante de bombeo” (anexo 1), mostró la necesidad de nuevos planteamientos y aplicaciones para la captación de luz solar desde un punto de vista geométrico. Esto deja a un lado la construcción y procesos vinculados directamente con las celdas solares. Sin embargo, se tendrán en cuenta las áreas de captación en Colombia ya que el diseño del equipo

que necesita de este desarrollo exige también áreas reducidas de captación energética, específicamente zonas urbanas donde las áreas disponibles son pequeñas y de costo elevado. Estas condiciones de área y costos exigen un estudio de optimización de espacios para la captación de energía solar con propuestas basadas en la geometría para la disposición de las celdas más que en la eficiencia de la celda solar en sí.

## 4 TABLA DE CONTENIDO

1	AGRADECIMIENTOS .....	2
2	RESUMEN.....	3
3	INTRODUCCIÓN .....	4
4	TABLA DE CONTENIDO.....	6
5	TABLA DE ILUSTRACIONES.....	8
6	ANTECEDENTES.....	9
7	OBJETIVOS .....	23
7.1	General.....	23
7.2	Específicos .....	23
8	METODOLOGÍA .....	24
8.1	La secuencia de Fibonacci .....	24
8.2	Generación de las geometrías.....	25
8.3	Disposición de paneles.....	28
8.4	El prototipo.....	30
8.4.1	La estructura.....	30
8.4.2	Instrumentación y control.....	33
8.4.3	La fuente de luz .....	35
8.5	Optimización de la orientación del sistema .....	36
9	RESULTADOS.....	38
9.1	Muestras de Intensidad Luminosa en función de $\alpha$ , $\beta$ , $z$ . .....	38
9.2	Superficies de intensidad luminosa.....	38
9.3	Comportamiento de cada configuración de las celdas ( $\alpha$ ) para diferentes momentos del día ( $\beta$ )	39
9.4	Comportamiento de cada configuración durante un día típico.....	40
9.5	Coeficiente adimensional de exposición.....	40
10	CONCLUSIONES.....	42
11	BIBLIOGRAFIA.....	44
12	Anexos.....	46
12.1	Anexo 1 Patente.....	46

12.2	Anexo 2. Programas en Python .....	59
12.2.1	Anexo 2.1. Programas en Python del algoritmo para construir la espiral de Fibonacci 2d sin marcadores. ....	59
12.2.2	Anexo 2.2: Programas en Python del algoritmo para construir la espiral de Fibonacci en plano 2d ubicada en un espacio 3d. ....	60
12.2.3	Anexo 2.3: Programas en Python del algoritmo para construir la espiral de Fibonacci 3d sin marcadores. ....	61
12.2.4	Anexo 2.4: Programas en Python de para construir espira 3d con marcadores.....	63
12.2.5	Anexo 2.5: Programas en Python del algoritmo para construir la espiral de Fibonacci 2d con marcadores.....	64

## 5 TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1, Kurnool ultra mega solar park en india. Tomado de: <a href="https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-fotovoltaicas-del-mundo/">https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-fotovoltaicas-del-mundo/</a> .....	10
Ilustración 2, Primera granja solar en Colombia situada en Yumbo, Valle del Cauca .....	10
Ilustración 3, Granja solar en el departamento de Bolívar. Instalada por Celsia .....	11
Ilustración 4, granja solar en Tolima. Instalada por Celsia .....	12
Ilustración 5, Parque solar piloto EPM el Peñol Antioquia .....	13
Ilustración 6, Ceiba solar universidad EAFIT. ....	13
Ilustración 7, Esquema funcionamiento mecánico del fotobiorreactor. ....	18
Ilustración 8, Esquema de dispositivo nutrido por energía solar. ....	19
Ilustración 9, Fotobiorreactor en vista isométrica. ....	21
Ilustración 10, Fotobiorreactor en vista frontal .....	21
Ilustración 11, Fotobiorreactor en vista lateral. ....	21
Ilustración 12, Secuencia Fibonacci en dos dimensiones. (Anexo 10.2.1). ....	25
Ilustración 13, trayectoria Fibonacci ubicada en un plano tridimensional. (Anexo10.2.2). .....	25
Ilustración 14, Trayectoria Fibonacci aplicando la misma proporción en eje z y ubicada en un espacio tridimensional. ....	26
Ilustración 15, trayectoria Fibonacci posicionando marcadores con la misma proporción ubicada en un espacio tridimensional. (Anexo 10.2.4). ....	27
Ilustración 16, Trayectoria Fibonacci en vista superior con marcadores (Anexo10.2.5)....	28
Ilustración 17, diagrama de trabajo .....	29
Ilustración 18, Sistema y ángulos de referencia. ....	30
Ilustración 19, Acrílico cortado por laser .....	31
Ilustración 20, Posición de Celdas sobre el acrílico en 2D .....	31
Ilustración 21, Vista frontal del equipo .....	32
Ilustración 22, Fotorresistencias RDL .....	33
Ilustración 23, Conjunto de tres sensores .....	34
Ilustración 24, Vista del equipo con fuente de luz .....	35
Ilustración 25- Coeficiente adimensional de Intensidad Luminosa Normalizada (ILN) para cada configuración de las celdas ( $\alpha$ ) en función del momento del día ( $\beta$ ).....	40
Ilustración 26, Tabla para cada momento del día.....	40
Ilustración 27, Exposición luminosa para cada configuración .....	41



## 6 ANTECEDENTES

La energía solar ha tenido en los últimos años un gran reconocimiento como modelo de generación energética en el mundo por su simplicidad y escalabilidad. Grupos de investigación públicos y privados dentro del marco académico y empresarial han desarrollado y estudiado las técnicas, materiales y todo lo referente a tecnologías de celdas fotovoltaicas. En principio y tradicionalmente, solo se requiere el montaje de celdas fotovoltaicas en disposiciones diferentes a como habitual y actualmente se realizan los montajes. Celdas instaladas en configuraciones de circuitos típicos de “serie” y/o “paralelo” para lograr voltajes e intensidades específicas para las zonas donde irán instalados y los requerimientos de exigencia energética. Es decir, en aplicaciones domésticas de poca exigencia o áreas de generación con el fin de comercializar la energía, teniendo en cuenta diversos factores como horas útiles de sol, posición geográfica, temperaturas a las cuales serán expuestas dichas celdas, etc.

Estos paneles planos son, a su vez, dispuestos de diversas formas y por medio de la utilización de diferentes métodos se busca lograr la mayor captación de luz posible, dependiendo de su ubicación en el planeta. Dependiendo de las horas útiles de luz habrá un mejor aprovechamiento del sol, lo que finalmente deriva en diferentes formas de almacenamiento y manejo de esta energía.

Así mismo, los avances relacionados con la energía solar se ocupan actualmente de la búsqueda de “materiales y sus características ópticas para su uso eficiente” (Huerta Mascotte, y otros, 2016). Es decir, hoy en día no se trata solo de obtener energía, sino que se trata de buscar soluciones energéticas que tengan la capacidad de asegurar factores como la posibilidad de acceso a menores costos, que constituyan soluciones óptimas en la utilización de los espacios.

Existen varios tipos de celdas, por ejemplo, las monocristalinas, policristalinas, celdas solares basadas en dióxido de titanio, cobre y perovskita. “sin embargo, la eficiencia como medida de la energía eléctrica producida por una cantidad de radiación solar incidente, es baja” (Noguera Salas, Villareal Padilla, & Pinto Garcia, 2018).

Además, existe otro aspecto que juega un rol determinante en cuanto a la utilización efectiva y accesible de la energía solar que tiene que ver directamente con el área necesaria para la captación. El aeropuerto internacional de Cochin en Kerala, India, fue el primer aeropuerto del mundo que funcionó totalmente gracias a los paneles solares. Sin embargo, su planta de energía solar comprende 46.150 paneles solares colocados en 1.821.090 metros cuadrados, produciendo 50.000-60.000 unidades de electricidad por día, utilizadas por el aeropuerto en sus funciones operativas (Adler Group, 2016).

Otro caso que puede ejemplificar lo anteriormente dicho es el caso del Kurnool ultra mega solar park en India (ver Ilustración 1), el parque ocupa una superficie de 2.400 hectáreas en Panyam Madal, en el distrito de Kurnool, donde se utilizan de 4 millones de paneles solares

con una capacidad de 315 vatios cada uno. Se generan aproximadamente 8 GWh al día, producción suficiente para satisfacer el 80% de la demanda eléctrica del distrito de Kurnool (Roca, 2018).



*Ilustración 1, Kurnool ultra mega solar park en india. Tomado de: <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-fotovoltaicas-del-mundo/>*

La primera granja solar de Colombia fue puesta en marcha el 3 de septiembre de 2017 por la empresa Celsia (Ilustración 2), está acoplada al Sistema Interconectado Nacional. De esta forma, se empezó incorporar a la estructura energética del país nuevas fuentes de generación de energía renovable, como lo es el sol, un recurso abundante gracias a la privilegiada ubicación geográfica de nuestro país en el ecuador terrestre.



*Ilustración 2, Primera granja solar en Colombia situada en Yumbo, Valle del Cauca*

(<https://www.celsia.com/es/Granjas-Solares/>)



Actualmente, la granja le entrega su energía a la planta de producción de Postobón en el municipio de Yumbo, una de las plantas más modernas de Latinoamérica y uno de los principales centros de trabajo de la compañía líder de bebidas en Colombia.

La granja solar Celsia en Yumbo cuenta con 35.000 módulos fotovoltaicos, tiene una capacidad instalada de 9,8 MW y creará cerca de 16,5 GWh año de energía que equivale al consumo de 8 mil hogares, lo cual evitará la emisión 160 mil toneladas de CO<sub>2</sub> durante 25 años.



*Ilustración 3, Granja solar en el departamento de Bolívar. Instalada por Celsia*

*(<https://www.celsia.com/es/Granjas-Solares/>)*

Otro claro ejemplo de la implementación de granjas solares con el uso de celdas se encuentra ubicado en Santa Rosa de Lima, en el departamento de Bolívar (Ilustración 3), en el norte de Colombia que empezó a entregarle energía fotovoltaica al Sistema Interconectado Nacional (SIN) de Colombia. Fue inaugurada 26 de noviembre de 2018 y cuenta con 32.000 paneles solares ubicados en un área de 12 hectáreas los cuales fueron instalados en 7 meses logrando una producción energética de 8.06 MW evitando la emisión de más de 170.000 toneladas de CO<sub>2</sub> durante 30 años.

Un nuevo referente nacional de la implementación de celdas solares que fue inaugurado el pasado 9 de diciembre del 2020 en el Tolima (Ilustración 4) y fue realizado por la empresa privada Celsia junto en conjunto con Cubico Sustainable Investments.



*Ilustración 4, granja solar en Tolima. Instalada por Celsia*

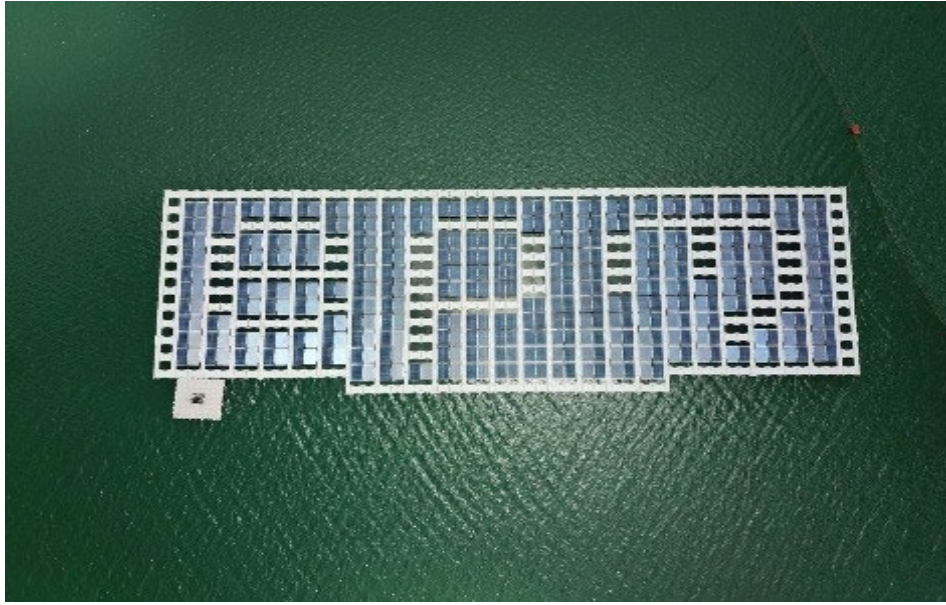
*(sala\_de\_prensa/celsia-inaugura-en-el-espinal-la-primera-granja-solar-del-tolima-que-genera-99-megavattios-de-energia-limpia/)*

En el proyecto fueron usados 37.876 paneles instalados en 17 meses logrando una producción energética de 54,43 MW y ocupando un área de 17 hectáreas, haciendo evidente, no solo la viabilidad de este tipo de tecnologías en el contexto local y actual, sino también las grandes áreas necesarias para su implementación, así como el gran impacto ambiental del mismo ya que se dejarán de emitir 194.775 toneladas de CO<sub>2</sub> en 25 años.

Desde el punto de vista local la empresa EPM comienza a evaluar con una prueba piloto la instalación de paneles solares en el embalse El Peñol, en el Oriente Antioqueño el 18 de abril del 2018 con la instalación de 368 paneles solares flotantes en un área total de 1.430 metros cuadrados que pueden suministrar 100KW o 145 MWh lo equivalente al consumo de 15 casas anualmente (Ilustración 5). Es importante resaltar como las empresas buscan, no solo la instalación de paneles solares en áreas terrestres, sino también en áreas donde se encuentran embalses, esto con el fin del aprovechamiento de lugares motivado por sus grandes extensiones que procuran la disposición de dicha tecnología.

Un ejemplo más cercano al contexto colombiano es la ceiba solar, instalada en la universidad EAFIT que cuenta con capacidad instalada de 1500 vatios, entrega un voltaje de corriente directa de 36 voltios y cuenta con un peso de 700 kilogramos que permite cargar dispositivos, vehículos eléctricos y alimenta la iluminación de sus alrededores (Colorado Chávez, 2017) esta ceiba solar tiene un área de captación aproximada de 10 m<sup>2</sup>, que tiene una función adicional de dar sombra debido a la ubicación en la parte superior del soporte, como se observa en la Ilustración 6.





*Ilustración 5, Parque solar piloto EPM el Peñol Antioquia .*

<https://www.epm.com.co/site/home/sala-de-prensa/noticias-y-novedades/epm-innova-con-el-primero-piloto-de-parque-solar-flotante>

El dispositivo, concebido y construido en la universidad EAFIT muestra como la tecnología de captación energética se ve obligada a interactuar con el entorno de una manera amable y teniendo en cuenta, no solo la función, sino también la forma.



*Ilustración 6, Ceiba solar universidad EAFIT.*

Tomado de: <http://www.eafit.edu.co/medios/eleafitense/109/paginas/a-la-ceiba-solar-de-eafit.aspx>

La construcción de esta ceiba solar evidencia a pequeña escala la necesidad, desde el punto de vista geométrico del estudio, no tanto de las típicas celdas planas comerciales en un

montaje de área plana, sino también de su disposición en el espacio, es decir, en este montaje fue necesario tener un soporte que genera altura, que en este caso es el eje z, para no ocupar el área del montaje de los 6 paneles que en su conjunto generan un área aproximada de 10 m<sup>2</sup> donde se genera el área efectiva de captación, también es un buen ejemplo para demostrar como este manejo de la altura para la disposición de los paneles solares genera sombra, para este caso es una ventaja como espacio de reunión evitando la luz del sol a las personas que permanecen bajo esta solución.

Para nuestro caso, donde el sistema llamado fotobiorreactor necesita luz solar directa para los procesos fisicoquímicos que comprometen la captura del CO<sub>2</sub> y para su funcionamiento mecánico a partir de las celdas solares que también requieren de luz solar para los fenómenos que ocurren dentro de ellas.

En este orden de ideas, se hace evidente que otro de los principales retos de la energía solar, comprende la colocación de paneles solares planos en áreas específicas con tecnologías puntuales de celdas solares y que tiene una relación directa con el espacio, es decir, la obtención de energía esperada es directamente proporcional al área necesaria para lograr proveerla. Así, a mayor necesidad de captación energética sería también mayor la captura de CO<sub>2</sub>, mayores deberán ser las áreas tanto del espacio físico para la instalación de los biorreactores, como también deberá ser mayor la superficie de los paneles solares, sin distinción del tipo de tecnología utilizada en los paneles empleados.

Otro factor que debería ser tenido en cuenta y que necesariamente debe ser revisado, tiene que ver con el crecimiento de las ciudades, la población y su relación con el espacio habitable. En otras palabras, si bien es cierto que en las últimas décadas se ha observado un aumento en la densidad poblacional, también es cierto que este crecimiento ha implicado un proceso de lento agotamiento del espacio posible y necesario para la expansión física de las ciudades, las cuales atraviesan por momentos donde la contaminación generada por la quema de combustibles fósiles han desmejorado considerablemente la calidad del aire lo cual tiene como principal consecuencia la necesidad de buscar soluciones habitacionales teniendo como base una forma de crecimiento que *busque reestructurar el espacio urbano, con la finalidad de explotar los espacios pequeños, y obtener la maximización del aprovechamiento de los recursos disponibles* (Icasas, 2019).

El cambio climático sin precedentes, influenciado por el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) ocasionadas por las acciones antropogénicas, y los largos tiempos de residencia de estos en la atmósfera, han ocasionado una problemática ambiental a nivel mundial. Se estima que la acumulación de CO<sub>2</sub> en la atmósfera (principal componente de los GEI) ha incrementado de 280 ppm, en los tiempos preindustriales, a 400 ppm en la actualidad, con pronóstico de alcanzar 430–1000 ppm para el año 2100 (Jones 2017). Debido a las características peligrosas que presentan estos gases y a las enfermedades causadas a la población expuesta, existe una conciencia cada vez mayor para reducir la contaminación del aire y evitar la tendencia creciente del calentamiento global (Qie et al. 2019). Esto genera

grandes desafíos para la sostenibilidad mundial. Por lo que, los líderes mundiales, han firmado el acuerdo de París (2015), que se centra en reducir el uso de los combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero (Kim et al. 2019). Por ejemplo, para 2020, la Unión Europea tiene como objetivo, satisfacer el 10% de la demanda total de energía para el transporte, utilizando energías renovables, basadas en el uso de biocombustibles que no generan cambios directos o indirectos en el uso del suelo, en regiones con gran biodiversidad, y que además generen mitigación de al menos un 35% de gases de efecto invernadero en comparación con los combustibles fósiles (Correa et al. 2019).

Colombia contribuye al 0.46 % de las emisiones globales. Aunque esta cifra es baja, se calcula que si no se toman medidas, las emisiones podrían aumentar cerca de 50% en 2030, por ello Colombia, se comprometió ante la comunidad internacional a tomar 10 medidas concretas de adaptación, que van desde la delimitación y protección de los 36 complejos de páramos, hasta lograr que el 100% del territorio nacional cuente con planes de adaptación al cambio climático y adicionalmente reducir 20% de sus emisiones con base en un escenario proyectado a 2030 e, inclusive, a disminuir el 30% si cuenta con cooperación internacional (García Arbeláez et al. 2016). Esta problemática, impulsa al desarrollo de iniciativas que permitan la utilización de fuentes energéticas alternativas e insumos renovables (Liu *et al.* 2019).

De los diversos enfoques para capturar GEI, principalmente el CO<sub>2</sub>, la biofijación por microalgas brinda una alternativa que permite reducir significativamente las emisiones de carbono generadas especialmente aquellas focalizadas (chimeneas) que contribuyen al deterioro ambiental (Raud *et al.* 2019). Las microalgas juegan un papel importante en el equilibrio de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, su fotosíntesis es responsable del 40% de la cantidad de carbono anualmente fijado en el planeta (Jacob-Lopes, Scoparo, and Franco 2008). Estos microorganismos autótrofos, presentan un alto potencial para ser un importante sumidero de CO<sub>2</sub> de emisiones antropogénicas, debido a que pueden fijar gases de combustión de la atmósfera y presentan capacidad de acumulación de carbono inorgánico en el citoplasma, razón por la cual logran una alta eficiencia de absorción de CO<sub>2</sub> (Pires et al. 2012).

El cultivo controlado de microalgas es considerado como una de las tecnologías más prometedoras, ya que presentan tolerancias a gases como el SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub> presentes en gases de chimenea (Young et al. 2019) y pueden convertir eficientemente el CO<sub>2</sub> en oxígeno, cantidades masivas de biomasa y productos biológicos a través de la fotosíntesis.

La biomasa genera en el proceso de captura de CO<sub>2</sub>, denominada biomasa microalgas, puede ser utilizada en diferentes sectores como el de alimentos humanos, algunas microalgas presentan características nutricionales relevantes para los humanos; el de alimentación animal, especialmente microalgas con alto contenido de proteína; el sector agrícola, donde se identifican microalgas que pueden aportar macro y micronutrientes, así como compuestos promotores de crecimiento; y el sector energético, en el cual la biomasa se convierte en insumo para la producción de combustibles de carácter renovable (Hossain et al. 2018), (Miranda et al. 2019), (Rodas-Zuluaga et al. 2021), (Castro et al. 2021), (Khemiri et al. 2020), (Savage et al. 2020).

En la ciudad de Medellín según el sistema de alerta temprana SIATA (Proyecto liderado por la alcaldía de Medellín y área Metropolitana del Valle de Aburra con la participación y apoyo de EPM e ISAGEN), el alto crecimiento demográfico y los actos de consumo que esto genera, impactan directamente la calidad del aire entre otros, debido a los casi 4 millones de habitantes que tiene el Área Metropolitana que están ubicados en 1.157 kilómetros cuadrados. Es decir que aproximadamente el 58% de los habitantes del departamento de Antioquia están ubicados en 1.157 kilómetros cuadrados evidenciando consumos de todo tipo viéndose reflejado en gran medida en el aspecto ambiental, es decir, la contaminación.

La contaminación del aire producida por el exceso de consumo y/o producción de insumos crea un entorno donde los índices de contaminación por CO<sub>2</sub> producido en la ciudad de Medellín llegan a afectar la calidad de vida, pues es de vital importancia el aire que se respira. Por este motivo la búsqueda de nuevas tecnologías para disminuir la cantidad de CO<sub>2</sub> en el ambiente se convierte en un campo de estudio, que impacta directamente a la sociedad.

Según datos suministrados por el Grupo de Investigaciones Ambientales de la Universidad Pontificia Bolivariana (*contrato de ciencia y tecnología n° 1179 de 2018*), en la ciudad de Medellín se producen gases de efecto invernadero. Medellín es el principal emisor de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O con un aporte promedio del 38%, para estos mismos gases se identifica como CO<sub>2</sub> equivalente con un total de 6,119,640 de toneladas en el año 2018. Estos datos relacionados con espacios reducidos muestran la urgente implementación de tecnologías que logren mitigar la contaminación del aire. Obliga a desarrollar dispositivos que ocupen áreas restringidas para la captura de estos elementos contaminantes (CO<sub>2</sub>). Al mismo tiempo que hagan uso de energías alternativas para su funcionamiento. Cerrando así círculos de sostenibilidad.

Para resumir, se plantea que tanto el desarrollo de estudios para la utilización de los espacios necesarios para la captación de energía y la estética utilizada, tienen una implicación intrínseca y estrechamente relacionada con las posibilidades reales de la utilización y captación de energía solar aplicada a fotobiorreactores que tengan como fin la limpieza del aire por medio de la captación de CO<sub>2</sub> en las ciudades. Es decir, se trata de explorar soluciones que logren un espacio de utilización aplicable, efectivo y que comprenda que las necesidades energéticas están condicionadas por factores poblacionales, espaciales, económicos y estéticos, así como la utilización de materiales que optimicen los costos de construcción para los sistemas de soporte y mantenimiento de los paneles. En síntesis, la utilización de la energía solar depende en gran medida de la capacidad de dar respuestas a las necesidades en los diferentes contextos sociales existentes y de los requerimientos técnicos planteados anteriormente.

Partiendo de la necesidad de reducir la contaminación de CO<sub>2</sub> en las ciudades, contando con espacios reducidos y costosos para la implementación de tecnologías que permitan la atenuación de factores de contaminación del aire, el uso de fotobiorreactores funcionando con energía solar permiten cerrar el círculo de sostenibilidad. Es necesario plantearse la siguiente



pregunta y que la respuesta de esta sea el objetivo de esta investigación o propuesta: ¿es posible generar una propuesta de diseño teniendo en cuenta la disposición espacial las celdas solares en un plano tridimensional usando como herramienta la secuencia de Fibonacci para ser implementado en el sistema energético de un fotobiorreactor?

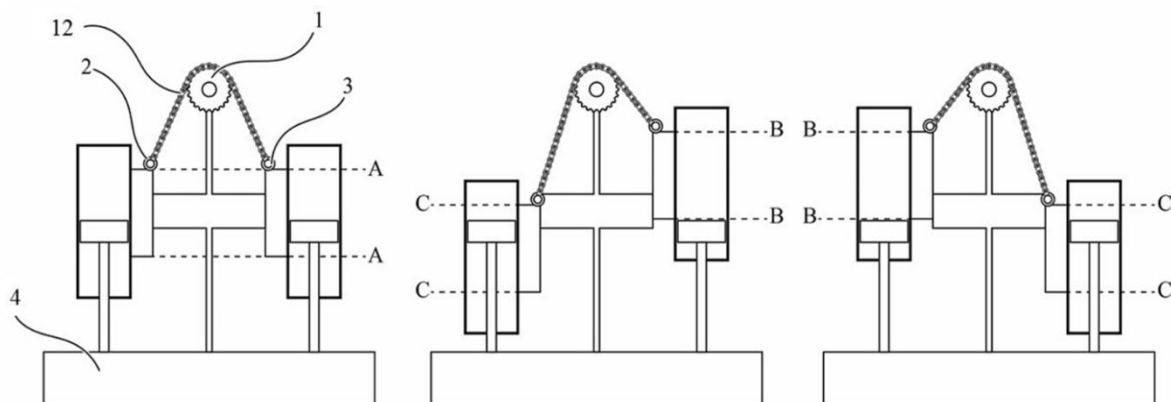
Es poca la información acerca del estudio de la implementación de la secuencia Fibonacci como herramienta teórica con el uso de algoritmos que arrojen simulaciones para observar comportamientos de ubicación espacial en tres dimensiones de celdas solares, por lo general se ha buscado en artículos como relacionar la secuencia Fibonacci desde la forma de las celdas solares mas no su ubicación espacial en tres dimensiones para una disposición detallada abordada desde el diseño, por otro lado existen un sin números de artículos relacionados con la tecnología de construcción de celdas solares abordado desde los campos de la física y la química, de igual manera con lo referente a los fotobiorreactores y el uso de microalgas para la captura de CO<sub>2</sub>, todos estos temas serán usados como referencia ya que se pretende generar códigos donde esté incluida la secuencia Fibonacci como herramienta de diseño. Así dar un norte para la distribución espacial de las celdas que generen un sistema que pueda ser usado en el suministro energético de un fotobiorreactor para la captura de CO<sub>2</sub> con especificaciones puntuales. Evitando la competencia de la absorción de la radiación solar entre el fotobiorreactor y los paneles.

Los antecedentes se mencionarán como la explicación de la secuencia Fibonacci y su acercamiento al diseño, así como la explicación a nivel general de las celdas solares y el funcionamiento del fotobiorreactor al que se pretende integrar este desarrollo.

Para dar respuesta a este planteamiento o problemática se hace necesario comenzar por explicar cómo es el funcionamiento básico del fotobiorreactor que fue diseñado para la captura de CO<sub>2</sub> haciendo uso de microalgas y su capacidad para capturarlo (ver anexo 1). El esquema de funcionamiento del biorreactor se observa en la Ilustración 7. Este equipo genera presión positiva usando el peso de un par de contenedores transparentes cargados con agua en disposición de contrapeso, es decir, están comunicados el uno con el otro por medio de un elemento que permite un movimiento vertical de sube y baja (alrededor del punto 1), este movimiento junto con sus masas es aprovechado para generar presiones positivas y de esta manera crear un desplazamiento de aire al generar burbujeo con la suficiente presión como para romper la columna de agua, algo similar a un compresor de pecera. Estas presiones, cuando los contenedores son escalados tanto en diámetro como en altura se ven incrementadas las presiones para el desplazamiento del aire, viéndose reflejado en el consumo energético del sistema de bombeo (ver anexo 1).

En la ilustración se observa en tres etapas el movimiento del fotobiorreactor relacionado con los elementos en sus tres etapas para el bombeo de aire: camisa como soportes (2,3). Punto donde se encuentra el motor (1). Elemento que relaciona las dos partes del sistema (12) que están relacionados mecánicamente al movimiento de los contenedores con relación a la posición. El punto de equilibrio entre las dos masas señalados en la figura como elementos de sujeción tipo argollas. Generan presión positiva (posición A), el embolo al bajar la camisa (2) sube produciendo el flujo de aire (posición C). A su vez la camisa (3) por estar relacionado

mecánicamente por los elementos 1 y 12 sube, atrapando aire para luego generar presión positiva (posición C) hacia los contenedores con fluido. Repitiendo este ciclo una y otra vez Estas tres etapas de recorrido es un sube y baja permanente que están produciendo presión positiva para el sistema de bombeo de aire al fotobiorreactor; no solo para la captura de CO<sub>2</sub>, sino también para que las microalgas se encuentren siempre en suspensión.



*Ilustración 7, Esquema funcionamiento mecánico del fotobiorreactor.*

*tomado de: documento oficial de patente. Universidad EAFIT y autor anexo 1*

En este orden de ideas, el desplazamiento del aire en el medio líquido está directamente relacionado con el método de bombeo para romper la columna de agua, mientras más altura tenga el contenedor de este medio líquido mayor será la exigencia del sistema de bombeo, esto se ve reflejado en consumos energéticos de dichos sistemas, en este caso consumos en voltajes bajos así como intensidades no representativas comparados con sistemas tradicionales de métodos de bombeo donde los voltajes así como las corrientes de consumo son elevadas, esto es importante resaltarlo porque el consumo natural del equipo por su concepción permite ser nutrido energéticamente por celdas fotovoltaicas, que tendría dos ventajas, la primera capturar CO<sub>2</sub> para la limpieza del aire y la segunda, al ser nutrido con energía solar se cerraría el círculo de sostenibilidad. Al mismo tiempo, y no menos importante son los fenómenos que ocurren dentro de los contenedores para que la captura de CO<sub>2</sub> ocurra pues es de vital importancia, no solo desplazar el aire dentro de la columna de agua, sino también ser expuestos a la luz solar, es decir, para que el equipo cumpla su función debe ser expuesto a la luz natural para su funcionamiento mecánico, así como para los fenómenos bioquímicos que ocurren dentro de él, con el fin de limpiar el aire capturando el CO<sub>2</sub> con la ayuda de las microalgas.

Es de gran importancia señalar que la experiencia de campo que da origen a estos planteamientos comienza con un ejercicio realizado con un dispositivo que fue creado en la universidad EAFIT. En principio como una forma efectiva para la captación de CO<sub>2</sub> haciendo uso de microalgas y celdas solares para que sea autosostenible. Teniendo en cuenta los espacios reducidos en los centros de las ciudades tanto para la captura de CO<sub>2</sub> como la energía eléctrica generada para el funcionamiento electromecánico que necesita el fotobiorreactor.

Para ello, se partió de la evidencia presentada y reconocida como patente otorgada sobre la gran capacidad que tienen las microalgas para la limpieza del aire. Ésta propuesta, por si misma, representaba en principio un dispositivo no solo por el uso de las algas, el cual es otro campo de estudio, sino un sistema que permita la función de captura de CO<sub>2</sub> para limpieza del aire con un principio de funcionamiento que permita, por su bajo consumo energético ser nutrido con energía solar (ver Ilustración 8).

Así las cosas, se trata específicamente de un dispositivo que usa la gravedad para bombear diferentes tipos de fluidos. El mecanismo consta de dos contrapesos (fotobiorreactores) conectados entre sí por una polea, dos bombas de pistón asociadas a cada uno de los contrapesos y un actuador rotacional conectado a la fuente de potencia (panel solar).

El actuador rotacional levanta el primer contrapeso con la primera bomba de pistón, y al segundo contrapeso con la segunda bomba de pistón a la posición opuesta. Posterior a este movimiento, el actuador rotacional invierte su dirección de giro, y por consiguiente los desplazamientos inducidos son análogos a los indicados anteriormente (Ilustración 7). A causa de los cambios de posición de extensión e ingreso de los vástagos en los actuadores, se genera un efecto de succión y por consiguiente de bombeo.

La construcción del primer prototipo se logró haciendo uso de la tecnología fotovoltaica de paneles solares para la comprobación de su principio de funcionamiento. Se planteó de esta forma, especialmente debido a la facilidad en la obtención de un panel solar, unas baterías y un gestor de carga (ver Ilustración 8). Sin embargo, una vez terminado el prototipo, se hicieron evidentes algunos problemas geométricos con respecto a la absorción de la luz solar tanto por las celdas como por el biorreactor, desde el punto de vista de su función y su practicidad.

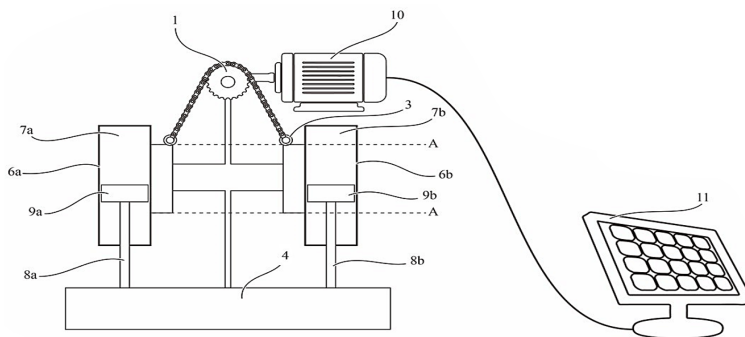


Ilustración 8, Esquema de dispositivo nutrido por energía solar.

Desde el punto de vista de la función, la dificultad tenía que ver con la ineficiencia natural de los paneles solares. Es decir, para lograr el funcionamiento del dispositivo dependiendo únicamente de este tipo de energía, se hacía necesaria la utilización de una superficie que contara con un formato de tamaño considerable que para el prototipo construido con un motor reductor de corriente continua con características de consumo de 12 voltios 150 miliamperios serían necesarios dos paneles comerciales policristalinos de 12 voltios 20W que sumados tendrían un área aproximada de 3.400 cm<sup>2</sup> o un panel de 12 voltios 50W que ocuparían un área aproximada de 3.550 cm<sup>2</sup>. Ya que los paneles deberían estar en un plano (x, y), a pesar de que el prototipo se había planteado como un dispositivo de altura y no de extensión ya que el fotobiorreactor requiere luz solar directa para su funcionamiento, así como para los procesos fisicoquímicos de las microalgas que logran la captura de CO<sub>2</sub> con el fin de limpiar el aire, usando las áreas reducidas dentro de las ciudades. Comprendiendo que la función de captura de energía para el funcionamiento mecánico del fotobiorreactor no puede afectar los procesos fisicoquímicos que ocurren dentro de él, es indispensable que la captura energética (celdas) no genere sombras al fotobiorreactor (algas), donde se usan 5 g de microalgas en 4 litros de agua donde la absorción de CO<sub>2</sub> depende de la cepa de microalga que se use y es motivo de investigaciones en el marco de la biotecnología, además el sistema es escalable, para alcanzar la absorción de CO<sub>2</sub> deseada en un punto específico de la ciudad.

En las Ilustraciones 9, 10 y 11 se observa el prototipo de fotobiorreactor que será usado como referente para la propuesta de diseño que trata el documento, se observan los dos contenedores transparentes donde se ocupan para contener el medio líquido con las microalgas. Es importante resaltar como la disposición del panel solar que nutre energéticamente al equipo se encuentra en el frente del mismo con una inclinación de 45 grados con respecto al soporte del mismo, cumpliendo con las especificaciones de energéticas del equipo pero creando sombra en la zona inferior de los contenedores lo cual perjudica la eficiencia de captura de CO<sub>2</sub>, por otro lado esos 45 grados de inclinación no permite el aprovechamiento de captura de luz directa en el transcurso del día, debido a que la posición de fuente de luz solar cambia a medida que el día avanza.

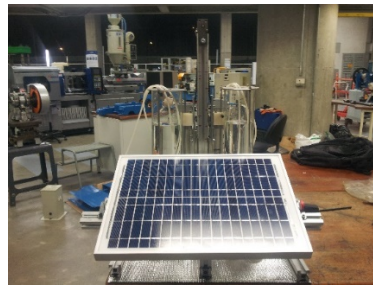
Tanto en la vista frontal (Ilustración 10) como en la vista lateral (Ilustración 11) se evidencia como el panel genera interferencia de la luz por parte de la celda solar a los contenedores.

Fue justamente la posibilidad de la utilización de la altura, lo que llegó a convertirse en una especie de puerta de entrada a la búsqueda teórica de una posible solución. Así, en un primer momento, se comenzó por investigar posibles soluciones a partir de nuevas disposiciones de los paneles ya existentes, con el ánimo de conseguir una nueva configuración y nuevas geometrías de las células fotovoltaicas, que lograrán nutrir no solo el dispositivo en cuestión, sino cualquier dispositivo que necesite energía para su funcionamiento esto con el fin de lograr mayor captación de energía solar utilizando menores áreas dentro de las ciudades.

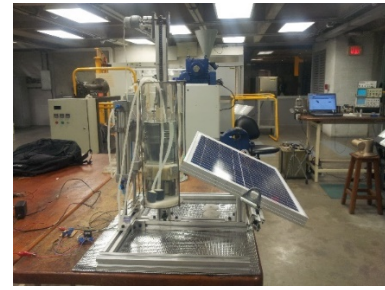
El conocimiento de estas técnicas para la producción de energía solar sería de gran ayuda para la implementación en la propuesta de diseño si se llegara a necesitar geometrías y áreas variables.



*Ilustración 9, Fotobiorreactor en vista isométrica.*



*Ilustración 10, Fotobiorreactor en vista frontal*



*Ilustración 11, Fotobiorreactor en vista lateral.*

En resumen, una búsqueda de soluciones adaptables a las necesidades específicas que inevitablemente implican que todo puede variar. Donde lo único constante, es el principio fundamental que determina que no se trata de buscar la luz, sino evitar la sombra entre el dispositivo fotobiorreactor (microalgas) y las celdas solares que le suministran energía para el funcionamiento.

En este orden de ideas, y teniendo en cuenta que estas nuevas propuestas hacen evidente que las celdas solares actuales no son otra cosa que la sumatoria de pequeñas celdas unidas para generar un panel, cuya tarea radica en el cumplimiento de unas especificaciones técnicas puntuales, se dio inicio a una serie ejercicios de experimentación con el fin de proponer y ubicar celdas fotovoltaicas comerciales, partiendo de la aplicación del modelo matemático simple propuesto por la secuencia Fibonacci.

Sin embargo, estos intentos demostraron no ser suficientes. Exclusivamente debido a que la geometría empleada para la construcción de los paneles de silicio utilizados está concebida bajo el parámetro de iluminación directa, bajo el parámetro básico de la obtención de la luz. En términos generales, esta dificultad tuvo como principal consecuencia la pérdida de eficiencia tanto en la captación de la luz solar, como en el proceso de captación de CO<sub>2</sub> por parte de las algas que a su vez necesitan la luz solar. Esto se traduce en una ineficiencia generalizada en el funcionamiento de los componentes principales del equipo.

Por este motivo los paneles solares en un plano unidireccional cumplían la función de nutrir energéticamente al fotobiorreactor para su funcionamiento mecánico al ubicarlas de manera separada del equipo en un plano inferior a los contenedores, dando pie al uso de áreas de captación energética que podrían ser usadas como áreas de limpieza del aire por parte de otros fotobiorreactores, ya que al realizar el ejercicio de ubicación de dichos paneles en la parte superior del mismo como técnica de integración, los discos (paneles) generaban sombra a los contenedores del equipo donde se encuentran ubicado el medio líquido con las microalgas las cuales necesitan luz directa para producir el fenómeno de captura de CO<sub>2</sub>.

Llegados a este punto, se concluyó que era necesario replantear los acercamientos a posibles soluciones. Para ello, se acudió nuevamente como referente a la secuencia Fibonacci. Con la diferencia de que ya no se pretendía abordar el tema a partir de factores de eficiencia de los paneles solares, ni se trataba de buscar soluciones altamente sofisticadas para la creación de

nuevos sistemas de producción, ni de métodos mecatrónicos con tecnologías de seguimiento de luz solar, como los que actualmente se investigan. Sino que se pretendía abordar el tema de maximizar la captación y el aprovechamiento de luz solar desde un punto de vista geométrico, diseñado para trabajar en espacios reducidos y con ambientes ruidosos y contaminados como los centros de grandes ciudades.

## 7 OBJETIVOS

### 7.1 General

Caracterizar el comportamiento de un arreglo fijo de paneles solares gobernados en forma y distribución por la secuencia de Fibonacci, bajo condiciones solares ecuatoriales para ser considerados como fuentes de captación de energía para el sistema basculante de un fotobiorreactor sin afectar negativamente la captación de CO<sub>2</sub> por parte de las microalgas.

### 7.2 Específicos

- Construir el estado del arte y la técnica de paneles solares usados para la transformación y aprovechamiento de la energía solar en energía eléctrica, que permita el especificar las formas y tamaños de los paneles necesarios para alimentar el sistema basculante de un fotobiorreactor predefinido.
- Desarrollar un algoritmo basado en la secuencia Fibonacci que describa trayectorias en el espacio y que defina tamaños de las formas de paneles para especificar y dimensionar un prototipo experimental.
- Crear un prototipo, automático y con paneles de tamaño y ubicación espacial bioinspirados en la secuencia de Fibonacci, que permita medir experimentalmente la exposición a la luz solar que recibiría un fotobiorreactor alimentado por paneles de tamaños y distribuciones de acuerdo con secuencia Fibonacci, con tres grados de libertad: azimut solar ( $\alpha$ ), ángulo de elevación solar ( $\beta$ ), nivel del contenedor de algas ( $z$ ) y Angulo trayectoria de sensores( $\theta$ ).
- Ejecutar protocolos de pruebas de laboratorio usando el dispositivo experimental descrito en el objetivo específico anterior, variando el azimut solar ( $\alpha$ ), el ángulo de elevación solar ( $\beta$ ), nivel del contenedor de algas ( $z$ ) y Angulo trayectoria de sensores( $\theta$ ). Simulando condiciones solares ecuatoriales.
- Analizar los resultados obtenidos mediante herramientas estadísticas para concluir y establecer las recomendaciones al implementar paneles solares con formas y disposiciones bioinspirados en la secuencia Fibonacci.

## 8 METODOLOGÍA

Para aclarar la metodología es importante resaltar que no era una opción la ubicación de paneles solares de manera caprichosa en un área de tres dimensiones debido a los requerimientos de funcionamiento del biorreactor, esto obligaría a explorar soluciones geométricas que permitieran desarrollar el método de diseño dentro de un marco que permitiera observar trayectorias, distancias, áreas, geometrías, no como una simulación, sino abordado como herramienta para la creación de un objeto que en un futuro puede transformarse en prototipo para ser evaluado. Debido a las exigencias técnicas fue evidente el estudio para una solución de un problema geométrico, en este momento la secuencia Fibonacci juega un papel importante en el desarrollo de la idea, pues esta secuencia, de alguna manera ha intentado describir fenómenos naturales, de forma tridimensional y acotado por proporciones numéricas que permitirán creación de códigos, para luego ser convertidos en líneas y mostrar de esta manera su comportamiento, para tener así un punto de partida para una propuesta que refiere a un proceso de diseño.

### 8.1 La secuencia de Fibonacci

La secuencia o sucesión de Fibonacci fue propuesta en el siglo XIII por el matemático Leonardo de Pisa y explica, en términos generales, que el producto de cada elemento es la suma de los dos anteriores. para nuestro caso comenzando con “0” y “1” (pero no es necesario dicho orden). Esto crea una sucesión que nos permite, dependiendo de cómo es abordada, dar herramientas de diseño para obtener algunas pistas para proceder y adaptar de manera geoméricamente diferente la disposición de elementos captadores de energía intentando emular el crecimiento de las plantas.

De esta manera, se llega a lo que se conoce como filotaxis, entendida como “la distribución u organización de las hojas en un tallo y los mecanismos que la gobiernan” (Adam, 2003). Este término se utiliza para describir el orden de las hojas, las ramas, los pétalos, y se cree que existe una relación directa entre la disposición de los elementos propios de una planta y su relación con la captación efectiva de la luz solar. “Aunque la orientación de la hoja puede variar independientemente del patrón de desarrollo en sus inicios, desde el nacimiento de la hoja, la geometría de la superposición entre las hojas y, por lo tanto, las sombras proyectadas por y sobre entre ellas, se ven influenciadas en patrones de filotaxis” (Niklas, 1998).

Así, “la filotaxis de Fibonacci se deriva como una necesidad matemática de la combinación de un ápice en expansión y un mecanismo de separación adecuado para colocar nuevas hojas. Los principios matemáticos involucrados son claros cuando se supone que solo dos hojas (los contactos) colocan una nueva hoja. Sin embargo, no es una condición previa para la filotaxis de Fibonacci, ya que un modelo de computadora muestra que este patrón se genera incluso cuando muchas hojas contribuyen a la inhibición en un punto dado. De hecho, el patrón de Fibonacci parece ser un fenómeno matemático estable y robusto, un hallazgo que explica de alguna manera su ocurrencia generalizada en todo el reino vegetal” (Mitchison, 1977).



De esta manera, la secuencia o sucesión de Fibonacci representó para el caso, una guía que brindó herramientas de diseño para obtener algunas pistas sobre cómo proceder y disponer de manera geoméricamente las celdas solares.

## 8.2 Generación de las geometrías

Usando el lenguaje de programación libre, Python, se propone crear un código que logre dar una idea visual de la secuencia Fibonacci en dos dimensiones para producir una línea en forma de trayectoria, esto con el fin de introducir gradualmente una forma que permita una aproximación para comenzar a construir un marco de diseño y así continuar con una posible solución geométrica que permita maximizar la captación de energía solar directa para la función mecánica sin comprometer las funciones fisicoquímicas que generan la sombra en el biorreactor. Es decir, que la captación para la función mecánica del equipo no puede entrar en conflicto con la captación para la función bioquímicos que ocurre en el biorreactor.

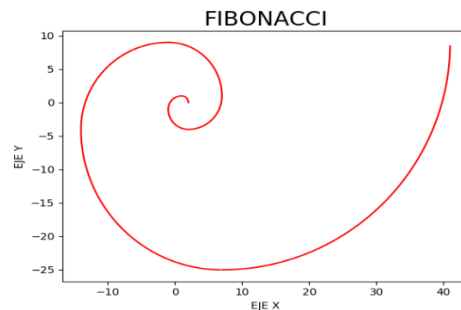


Ilustración 12, Secuencia Fibonacci en dos dimensiones. (Anexo 10.2.1).

La Ilustración 12 muestra el comienzo del código generando la trayectoria Fibonacci en un plano bidireccional, esto con el fin de verificar visualmente su comportamiento basado en el código escrito (anexo 2.1), para luego ser usada en el ejercicio exploratorio.

El código escrito comienza a tomar forma ubicando la trayectoria Fibonacci creada con anterioridad en dos dimensiones, pero esta vez dispuesta en un plano tridimensional, esta ubicación espacial del comportamiento de la trayectoria comienza a generar la necesidad de es “estirar” matemáticamente, usando la misma secuencia numérica para observar cómo sería su comportamiento en el espacio “X,Y,Z”.

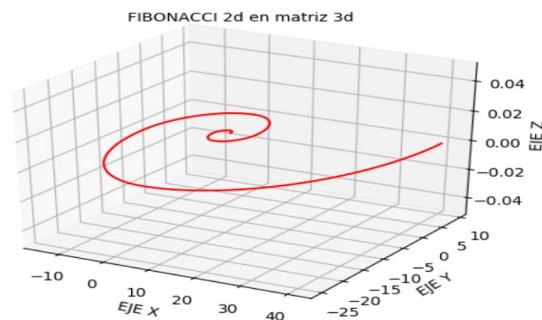
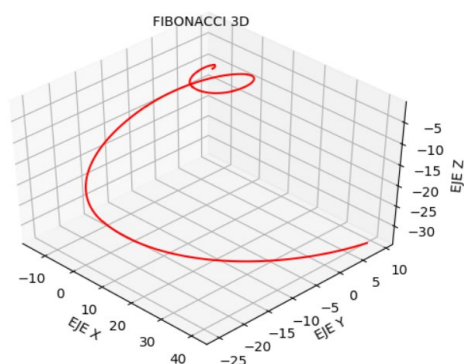


Ilustración 13, trayectoria Fibonacci ubicada en un plano tridimensional. (Anexo10.2.2).

De ahí que, para relacionar la secuencia de Fibonacci en el desarrollo del prototipo, se consideró pertinente, en primera instancia, hacer uso del dibujo como herramienta no solo de diseño sino como parte de un ejercicio de pensamiento e instrumento básico para la comprensión de la aplicación de la secuencia. De esta forma, cuando se logró recrear la proporción aurea y especialmente cuando se logró comprender que la espiral está formada en un plano con valores en x, y (ver Ilustración 13). Se concluyó que era necesario intentar desarrollarla en un eje z, incluyendo los valores en proporción para lograr observar la altura. Lo que condujo a determinar que el eje de altura representaría el plano que se buscaba efectivamente estudiar



*Ilustración 14, Trayectoria Fibonacci aplicando la misma proporción en eje z y ubicada en un espacio tridimensional.*

*(Anexo 10.2.3).*

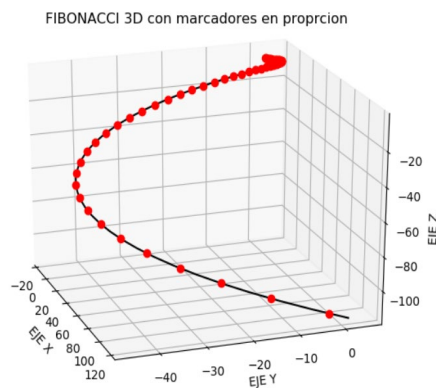
En la Ilustración 14 se observa cómo en el código se implementa la función Fibonacci en su misma proporción, pero ya trabajando en el eje z, observando una trayectoria de vórtice que muestra una posible solución geométrica comprometiendo una matriz x, y, z. Es visible el comportamiento de la trayectoria, dando una idea de la ubicación en el espacio, obligando a pensar en posiciones espaciales de las celdas solares sobre esa línea de trayectoria en el espacio brindando información visual acerca de una posible solución geométrica, ya en tres dimensiones.

Así, se había logrado reproducir una espiral que guardaba las proporciones Fibonacci en tres dimensiones y que se asemeja a la estructura de un árbol muy básico, parecido a un pino, geoméricamente comparable a un cono en 3d. Estos ensayos, permitieron comprender que una solución posible para la eliminación de la sombra que se pueden producir en el fotobio-reactor causada por los paneles solares durante el proceso de captación de luz solar tiene directamente que ver con la propuesta para un diseño que permita la ubicación de las celdas solares en un espacio tridimensional.

Hasta este punto, si bien se contaba con una estructura en tres dimensiones, que cumplía con los parámetros de la serie Fibonacci, fue entonces necesario comenzar a indagar por la ubicación en el espacio de las celdas solares. Para ello se intentó experimentar con marcadores calculados a su vez a partir de la secuencia, que permitieran entrever la ubicación tentativa de los mismos y en proporción según la secuencia

La Ilustración 15 muestra, en el proceso de creación del código, la manera como se lograron insertar numéricamente en la misma secuencia Fibonacci, marcadores que pretenden dar una ubicación de las celdas solares, estos marcadores serían los puntos en el espacio donde irían ubicados las celdas solares sin tener en cuenta el área de captación de estas, solamente su posición en el espacio. Se evidencia la menor separación entre ellas ubicadas en la trayectoria de vórtice a medida que ascienden, esto muestra posibilidades de diseño para una posible distribución basada en una matemática establecida teniendo el eje z como referencia sin dejar de lado los planos x, y.

Basado en Ilustración 16 se puede comenzar a evaluar la posibilidad de una estructura, no sobre la línea de trayectoria en el espacio, sino, sobre un eje vertical estructura del cual salgan componentes en voladizo que tienen longitudes variables y que, a su vez, a medida que ascienden progresivamente también varíe su ángulo, así como su altura, es decir, la trayectoria se formaría basada en una estructura física.



*Ilustración 15, trayectoria Fibonacci posicionando marcadores con la misma proporción ubicada en un espacio tridimensional. (Anexo 10.2.4).*

En la Ilustración 16 se muestra la trayectoria Fibonacci como complemento de la Ilustración 16, la trayectoria en proporción con los marcadores color verde que dan una idea de la ubicación de las celdas en la vista superior evidenciando que el centro de la estructura en esta vista no sería el centro del eje z en la vista lateral, cambiaría la posición del soporte físico obligando a incluir en el diseño estructural conceptos de balance y rigidez para el sistema. así las cosas, la Ilustración 17 con sus marcadores muestra que las áreas de los paneles serían de vital importancia para la propuesta, ya que el panel inferior, es decir, el que comienza la secuencia debería ser el de mayor área, y a medida que en el eje z ascienden las celdas, el área de captación efectiva de cada una de ellas debería reducirse conservando una proporción que sería coherente con todas las proporciones anteriores tomando una gran relevancia en el diseño conceptos de alturas, longitudes, ángulos y áreas. Todas en su misma proporción.

Al aplicar este pensamiento que refiere a conceptos de balance y rigidez y relacionándolo con área y pesos es posible comenzar a hablar de una estructura que guarde todas sus proporciones y que a su vez sea integral en su conjunto de diseño, no solo desde su función, sino también desde la rigidez, balance, y eficiencia energética para un fotobiorreactor.

Por otro lado, esta geometría generada espacialmente podría ser aplicada a sistemas que funcionen con energías alternativas, como fotobiorreactores que tengan disposiciones verticales, así como aprovechar áreas de captación energética reducidas como ocurre en este caso específicamente de una ciudad.

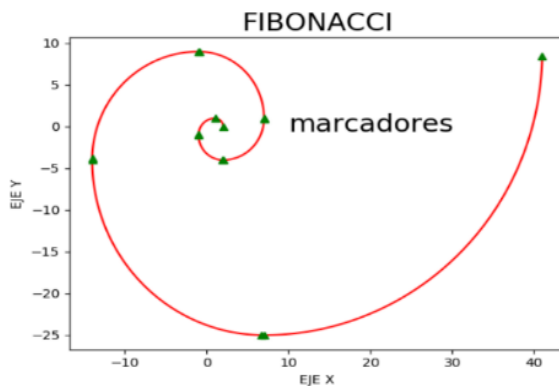


Ilustración 16, Trayectoria Fibonacci en vista superior con marcadores (Anexo10.2.5).

### 8.3 Disposición de paneles

Cómo se evidencia en la Ilustración 15, la propuesta de exploración sobre la posibilidad de la disposición de paneles en el eje z, nace del proceso de diseño de un modelo de fotobiorreactor de microalgas, con el cual se busca no solo optimizar la obtención de luz solar, sino que a su vez se busca lograr un diseño amigable con el entorno en términos de diseño y espacio reducido.

Como punto de partida se propone que uno de los principales retos de la forma por medio de la cual se continúa obteniendo energía solar, debe ser revisada bajo parámetros de diferentes dimensiones. En otras palabras, por un lado, es preciso un análisis juicioso de cuestiones como la superficie necesaria para el proceso de captación y su pertinencia con respecto a las condiciones habitacionales y económicas de los consumidores en la actualidad en las ciudades.

Es así como estos tres elementos (optimización en la captación, diseño “amigable” con el espacio y la estética de los entornos), posibilitaron la recreación una estructura en tres dimensiones que cumpliera y que se basara en la serie de Fibonacci, y que a su vez utilizara los principios de los fractales con la finalidad fundamental de no perseguir la luz sino de evitar la sombra a partir de los cambios en la distribución y en las formas geométricas. Es decir, el modelo propuesto busca dar una respuesta efectiva a las necesidades energéticas dentro de un amplio marco de variables que se presentan en realidad del consumo eléctrico.

En la Ilustración 17 se muestra un diagrama de bloques que pretende exponer la metodología para la situación del problema planteado.

Tomando como base la bibliografía consultada, el primer paso se centró en el desarrollo de un algoritmo basado en la secuencia de Fibonacci para calcular tamaños y trazar trayectorias

en el espacio tridimensional euclidiano para especificar formas y ubicaciones de los paneles solares requeridos para alimentar un fotobiorreactor. El algoritmo fue escrito Python para comprender a partir de gráficos digitales las propiedades de las formas que se pueden generar a partir de las secuencias Fibonacci y así poder especificar una para la construcción de un prototipo experimental; las formas iniciales fueron inspiradas en las espirales subyacentes de la geometría de algunas plantas.

Posteriormente, el mismo algoritmo fue acondicionado para definir las rutas y formas de los componentes principales del prototipo creado para las caracterizaciones experimentales.

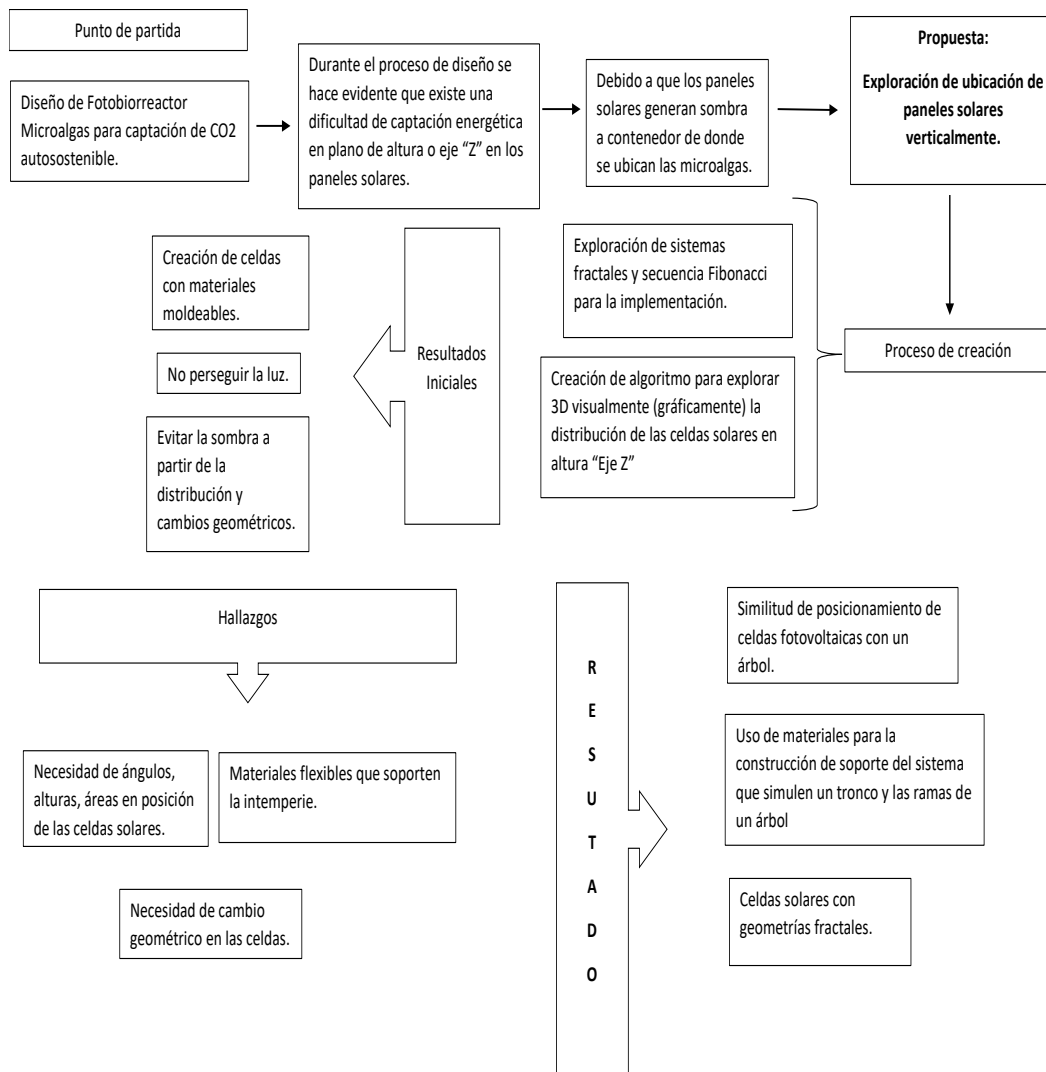
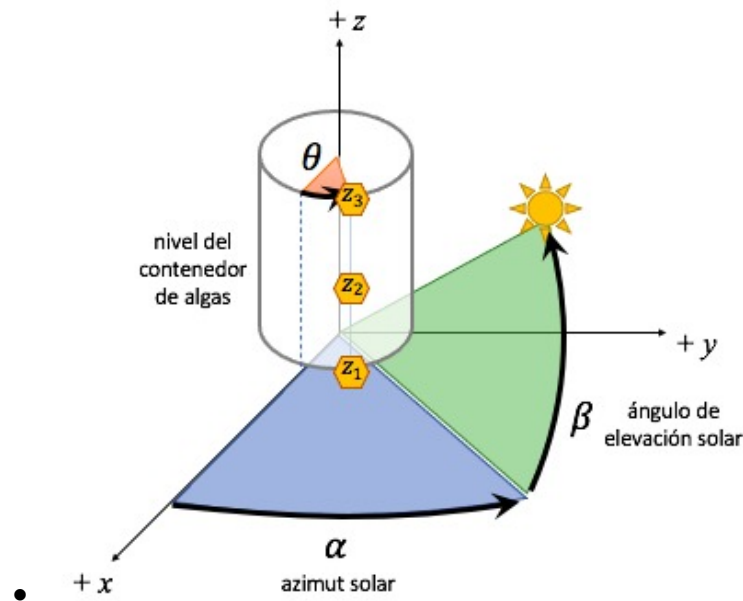


Ilustración 17, diagrama de trabajo

## 8.4 El prototipo

Luego, se construyó el prototipo para la caracterización experimental del arreglo fijo de paneles. El prototipo incluyó tres grados de libertad, según se expone en la Ilustración 18 y como se describe a continuación:

- El azimut solar ( $\alpha$ ): Define la orientación geográfica con la que se podrían instalar los paneles en el fotobiorreactor.
- Ángulo de elevación solar ( $\beta$ ): Define la posición del sol.
- Elevación ( $z$ ): Define niveles sobre el fotobiorreactor.
- Angulo trayectoria de sensores( $\theta$ ).



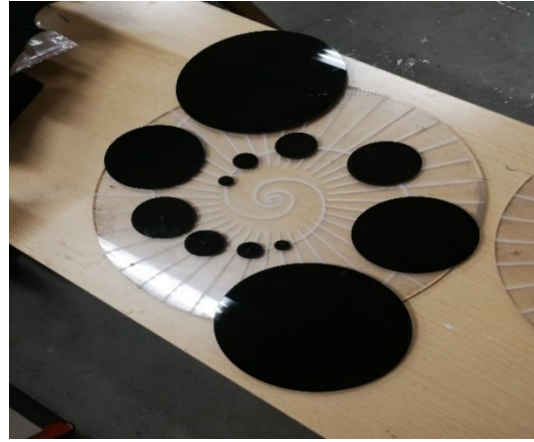
• Ilustración 18, Sistema y ángulos de referencia.

### 8.4.1 La estructura

Se diseña y construye un sistema estructural que permite la disposición espacial de celdas solares en un plano tridimensional respetando las proporciones que brinda la secuencia Fibonacci, para ello sería posible usar como punto de anclaje del mismo la parte superior de la estructura del fotobiorreactor que cuenta por su diseño rigidez, este punto de anclaje estructural permitiría la integración del sistema de captación de la luz solar sin cambios en el diseño original, permitiendo crear un soporte en trayectoria donde estarían dispuestas las celdas solares, todo esto en el marco de las proporciones que nos brinda la matemática dada por la secuencia Fibonacci. Estas celdas tienen como fin ser ubicadas en un soporte cortado con láser y grabado para tener como guía en el montaje de dichos elementos, esto mostraría el comportamiento de la luz y la sombra con respecto al contenedor (Ilustraciones 19 y 20).



*Ilustración 19, Acrílico cortado por laser*



*Ilustración 20, Posición de Celdas sobre el acrílico en 2D*

Dentro de los retos de diseño se encuentran principalmente el compromiso estructural que está vinculado con el elemento que portaría la trayectoria, esto hace pensar en materiales sintéticos con matrices poliméricas que permiten ser, dependiendo de las diferentes zonas de la trayectoria, comportarse de manera flexible otorgando cualidades donde se vean comprometidas situaciones ambientales como el viento, el golpe de la lluvia, etc. a su vez que permitan ser más rígidas, por ejemplo, en las zonas de soporte de las celdas solares, para tener un montaje apropiado de las mismas.

La propuesta de diseño debe ser evaluada en la construcción de un prototipo futuro, motivo por el cual permite cambios rápidos en cuestiones de posición, no solo de las celdas solares de su ubicación espacial, sino también la posición de los sensores de intensidad de luz para ser evaluado, se proponen puntos de captación de luz para la ubicación de los sensores en distintas partes del sistema, específicamente donde se encuentran ubicados los contenedores, esto comprobara si la cantidad de luz que llega a dichos contenedores cumple con los requerimientos del sistema para no comprometer los procesos bioquímicos y pueda cumplir con la captura de CO<sub>2</sub>, a su vez que se evaluarían las celdas solares de manera individual, esto con el fin de encontrar valores de voltaje y corrientes y encontrar la configuración eléctrica en serie y/o en paralelo que cumplan con el consumo energético del fotobiorreactor, diseñado para trabajar en espacios reducidos.

Los elementos de soporte del sistema serían delgados con propiedades mecánicas de acuerdo con el peso que soportarían las celdas, es posible proponer varillas comerciales de fibra de vidrio o carbono, esto con el propósito de disminuir desde su diámetro la sombra que pudiera ser generada a los contenedores, dichos elementos partirían del soporte principal del fotobiorreactor desde la parte superior del mismo lo cual generaría en la vista superior del conjunto ángulos y distancias variables. A su vez, y ya en la vista lateral del diseño se encontrarían elementos también con propósitos estructurales y de soporte de las celdas, su comportamiento sería de altura variable de acuerdo con la proporción, estos elementos deberían tener las mismas propiedades que los mencionados con anterioridad.



Los sistemas de acople entre los elementos horizontales y verticales; a su vez, entre los verticales y las celdas solares deberían ser mecanizados en un material liviano que al mismo tiempo pueda soportar las condiciones climatológicas que permitan soportar la corrosión y suministren los requerimientos de rigidez y estabilidad del sistema.

Es importante resaltar que el diseño de las celdas que irían en el sistema debe ser de áreas variables, esto es un requerimiento de diseño que tiene gran relevancia, puesto que en una situación ideal y en cualquier momento del día, las celdas no deberían de crear sombra entre las mismas, dicho esto se propondría una geometría circular ya que las tangencias que se producen en la vista superior convendrían para este escenario.

Para el proceso de construcción y evaluación de la idea se escaló a 1/2, tanto el fotobiorreactor como el sistema de las celdas solares (Ilustración 21). Donde los contenedores fueran captadores de luz, es decir, que estuvieran dotados de sensores como fotorresistencias las cuales se caracterizarían con una fuente de luz simulando condiciones reales, esto con el fin de lograr acotar valores máximos y mínimos de condiciones favorables o desfavorables del sistema para luego, con dichos valores proceder al análisis que refiere a la cantidad de sombra producida por el dispositivo diseñado. Por otro lado, para evaluar la cantidad energética producida por las celdas solares que proporcionarían energía a las funciones mecánicas del fotobiorreactor, se colocaron físicamente dentro del marco de esta propuesta de diseño para poder caracterizar energéticamente todo el conjunto ya integrado.



*Ilustración 21, Vista frontal del equipo*

Con respecto a lo mencionado anteriormente y con los datos suministrados por el estudio, se creó un prototipo. Con el fin evaluar la cantidad de luz que llega a los contenedores donde se encuentran las microalgas, para demostrar que el elemento de captura de energía solar creado en esta experiencia no interfiere para los procesos de captura de CO<sub>2</sub> al generar sombra en



el fotobiorreactor. Debido a la geometría circular que exige este diseño de captura, no se evaluaron experimentalmente la cantidad energética suministrada por cada celda o la totalidad del conjunto. Se hizo un estudio de áreas con relación al consumo del prototipo ya creado en unidades de voltios, amperios y vatios, partiendo del área utilizada con anterioridad en un panel comercial policristalino. Estas celdas se simularon en acrílico de color negro con el fin de evaluar su comportamiento de la luz de acuerdo con su disposición con respecto a los contenedores del fotobiorreactor.

El soporte que ocupa las celdas solares en proporción está construido en acrílico transparente cortado por láser con un diámetro de 50mm. En él fue grabada la trayectoria Fibonacci en proporción, a su vez fueron grabados marcadores cada 10 grados con el fin de ubicar en un plano 2D los soportes de las celdas. También con el fin de establecer un cuadrante como referencia para el conjunto con respecto a la fuente de luz.

#### 8.4.2 Instrumentación y control

El prototipo fue instrumentado con fotoceldas para medir la intensidad de luz en los diferentes niveles  $z_i$  del fotobiorreactor y control con motores de paso para garantizar un ajuste fino de las rotaciones de los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$ . Este atributo permite liberar la supervisión de un operador y por tanto se optó por un protocolo de prueba que explora las posibles configuraciones y combinaciones de las variables independientes ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\theta$ ,  $z$ ), de manera sistemática; además, el experimento se repitió varias veces controlando la interferencia lumínica de fuentes externas para determinar la incertidumbre asociada.

Fueron usados tres sensores (ilustración 22), fotorresistencias RDL (*light dependent resistor*) de 20 mm de diámetro, se escogieron por su fácil acceso y bajo costo sin comprometer su precisión entregando un dato analógico lineal de 0 a 5 voltios dentro de rangos de temperatura bastante amplios. Este tipo de sensor es comúnmente usado en experimentos donde al variar la fuente de intensidad de cambia su resistencia. Otra ventaja que presentan este tipo de sensores es su bajo nivel de ruido y alta sensibilidad debido a su construcción simple y robusta, por otro lado, no requieren un sistema complejo de acondicionamiento de señal para la adquisición de los valores. Esto los convierte en elementos ideales para capturar y convertir a valores la cantidad de luz o la cantidad de sombra generada.

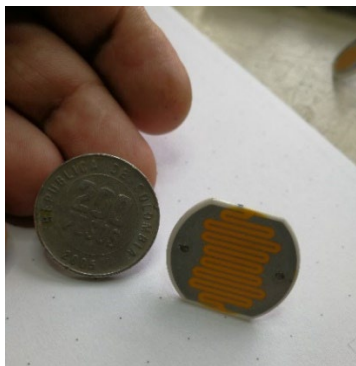


Ilustración 22, Fotorresistencias RDL

Para el sistema de adquisición de estas tres señales analógicas se usó un multímetro Fluke 117 con un rango de precisión de 0.001V. Los valores analógicos que entregan los sensores que están en un rango de 0 a 5 voltios de corriente directa, se seleccionan para la entrega del valor de tensión usando un selector de voltaje tipo perilla circular de tres posiciones, esto con el fin de no usar un solo multímetro para la toma de datos para los tres sensores. Así mismo tener la opción de verificar el dato entregado por el sensor requerido, simplemente con rotar la perilla.

Para la evaluación del comportamiento del conjunto sobre la sombra generada a los contenedores, se disponen tres sensores RDL dispuestos, en altura máxima, media y mínima para cubrir la longitud del contenedor de manera vertical (ilustración 23).

Este conjunto de sensores está acoplados a un soporte unido a un motor de paso nema 17(12V-1) que permite posicionar los sensores en diferentes grados de la circunferencia con respecto al conjunto de captación, así como la fuente de luz.



*Ilustración 23, Conjunto de tres sensores*

El prototipo para la evaluación de la idea cuenta con tres motores de paso que proporcionan una precisión de 0.18 grados, configurando sus controladores a función micropaso. Los mismos son controlados por lenguaje de maquina o CNC (control numérico computarizado), esta técnica de control de movimiento es ampliamente usada en la industria para controlar procesos de alta precisión, máquinas herramientas y un sinnúmero de aplicaciones que exijan versatilidad, respuesta y precisión.

Para la interfaz CNC se usó una tarjeta Smooth Stepper V1.2 con comunicación USB, esta tarjeta puede controlar 6 ejes (cada eje se considera un motor), a su vez responde a los comandos creados en códigos G desde el software Mach 3, usado ampliamente en el marco de control de movimiento.

Es así como el prototipo para evaluar el comportamiento de la luz sobre los contenedores con respecto a la disposición de las celdas solares ubicadas en un plano de tres dimensiones cuenta con tres ejes de control de movimiento (A, B, C) todos en función rotacional para el posicionamiento en grados. Donde el actuador que gobierna la ubicación la fuente de luz (A) pretende emular la posición del sol en distintos momentos del día. El actuador (B) pretende posicionar el conjunto de manera rotacional posicionando en grados con respecto al eje A. Por otro lado, el actuador rotativo (C) tiene como fin ubicar en grados el conjunto de sensores describiendo una circunferencia para emular la cantidad de luz recibida por los contenedores.

El soporte de los sensores y el motor, junto con las celdas y el soporte de estas están acoplados a un motor de paso nema 23(12v-3A). Este motor posiciona el conjunto de manera individual proporcionando la ubicación en grados ya sea con respecto a los sensores, así como a la fuente de luz.

#### 8.4.3 La fuente de luz

La fuente de luz es un led de 3.2 voltios, 1W, acoplado a un sistema de lentes que permite variar el *spot* de luz producido a una altura específica (Ilustración 24). Esto con el fin de establecer un área de generación de luz para el conjunto de celdas solares y los sensores.



Ilustración 24, Vista del equipo con fuente de luz

La fuente de luz se encuentra se instalada en un soporte, que en la vista lateral del prototipo se muestra en “L” invertida. Acoplada a un motor nema 23(12V-4A) con reducción planetaria 10:1, es decir; por cada diez revoluciones del motor produce una a la salida del reductor, eso con el fin de incrementar su torque sin comprometer la precisión. Debido a que el brazo del soporte y la fuente de luz en su longitud mayor exige un alto torque.

## 8.5 Optimización de la orientación del sistema

Con la estadística descriptiva como herramienta se caracterizan los datos tabulados para cada una de las configuraciones del experimento. De esos datos, se identifica la configuración de mejor captación y a partir de ese punto se traza *la trayectoria de mejor desempeño*. Para esa trayectoria se calcula el coeficiente de energía captada por las fotoceldas integrando la irradiancia a lo largo de la trayectoria, durante el equivalente a un día de exposición y normalizándola por la magnitud de la máxima irradiancia muestreada. Cualquier otra trayectoria debe producir un coeficiente de energía menor que la unidad. Se adopta este coeficiente relativo puesto que se usó una fuente de luz artificial con una longitud de onda de 450-500 nm, voltaje de operación 3.2V, consumo 1W y un flujo luminoso de 10 a 25 Lm. Estos valores medidos serán relativos a la fuente (100%). Los instrumentos de medición de la radiación se caracterizaron por comparación, correlacionado el valor de voltaje producido contra un valor de referencia y bajo condiciones controladas.

La energía captada por cada una de las posibles configuraciones, durante el equivalente de un día de exposición, se comparó en valores relativos contra la energía captada por la mejor trayectoria durante el mismo periodo. Tales comparaciones fueron el insumo para emitir el pliego de recomendaciones resultado de este trabajo.

Para encontrar la mejor orientación del conjunto de celdas ( $\alpha$ ) se procede de la siguiente manera:

1. Crear las superficies de intensidad luminosa sobre el tanque del biorreactor. Para esto se interpolan las mediciones de iluminancia (lx) en función del nivel del tanque ( $z_i$ ) y el ángulo  $\theta$ . Esta representación equivale a desarrollar la superficie del biorreactor y crear una trayectoria de 360° de barrido correspondientes a  $\theta=0^\circ$ ,  $\theta=90^\circ$ ,  $\theta=270^\circ$  respectivamente. Sobre ella proyectar un mapa de iluminancia. Para reconstruir las superficies (mapas de colores) se utilizan curvas *spline* de tercer orden de acuerdo con el muestreo de los ángulos y elevaciones.
2. Evaluar los comportamientos de cada configuración de las celdas ( $\alpha$ ) para cada momento del día ( $\beta$ ). Para estimar la intensidad de manera comparativa se propuso el coeficiente adimensional de Intensidad Luminosa Normalizada (ILN) que corresponde a la integral de la luminancia  $L_v$  lumínico sobre la superficie del reactor expuesta a la luz solar A, sobre la mayor intensidad luminosa percibida por el sistema:

$$I_v = \int_A L_v dA$$

donde:

$$A = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{z_1}^{z_2} dz d\theta$$

y

$$ILN = \frac{I_{v_i}}{\max_i(I_{v_i})}$$

Aquella configuración que obtenga el mayor  $ILN$  será la que recibe la mayor intensidad luminosa durante los diferentes momentos de un día típico.

3. Evaluar, a diferentes momentos del día, el desempeño de cada configuración. Se utiliza el coeficiente adimensional  $ILN$ , y para cada momento del día se generan las gráficas de desempeño. Tal representación permitirá determinar cuál o cuáles configuraciones manifiestan el mejor desempeño sin importar la orientación del conjunto.
4. Por último, se propone el coeficiente adimensional de exposición ( $H_vN$ , respetando simbología estándar), que se obtiene al integrar el  $ILN$  en función del tiempo,  $\beta$  (horas de exposición al día); el coeficiente se normaliza en función de la máxima exposición. De este modo, la configuración de celdas  $\alpha$  con la mejor tasa de exposición, tendrá un  $H_vN=1$ . Lo anterior se representa, acompañado de los valores de incertidumbre para cada configuración:

$$H_vN = \frac{1}{\max_i(H_vN_i)} \int_{t_1}^{t_2} ILN dt$$

Un gráfico de  $H_vN$  vs  $\alpha$  permitirá, por un lado, agrupar las diferentes configuraciones en función de sus comportamientos similares, y por otro, determinar la mejor configuración para la orientación de las celdas.

## 9 RESULTADOS

### 9.1 Muestras de Intensidad Luminosa en función de $\alpha$ , $\beta$ , $\theta$ , $z$ .

La Tabla 1 ordena los valores promedio de la intensidad Luminosa medida para diferentes valores de los ángulos  $\alpha$ ,  $\beta$ , y a las diferentes elevaciones  $z_i$ . Dado que la magnitud de esta medida es irrelevante, los valores obtenidos se presentan en voltios, tal cual los reporta el instrumento de medición.

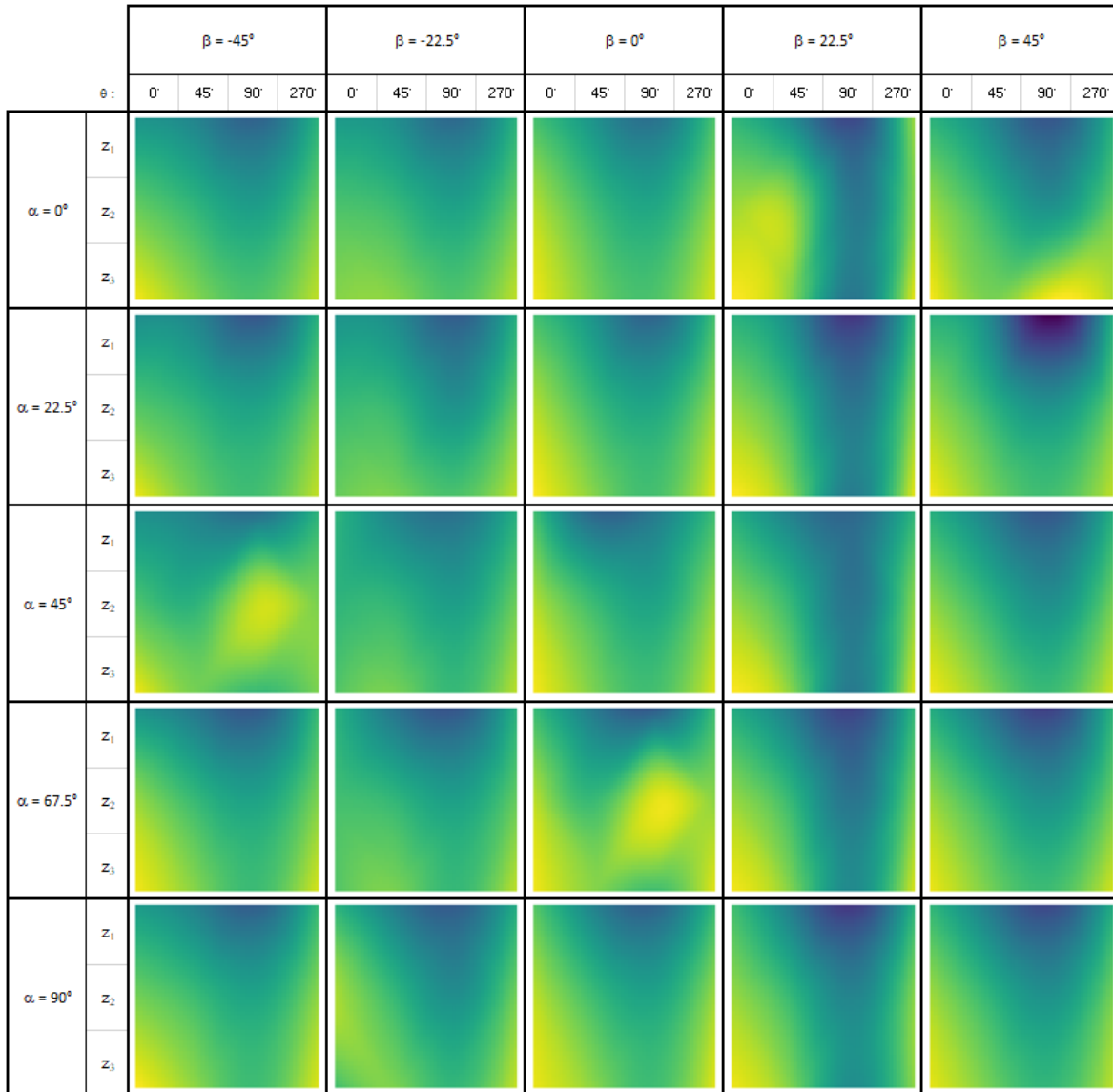
Tabla 1- Muestras de Intensidad Luminosa para diferentes combinaciones de los parámetros  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\theta$ ,  $z$ .

$\theta$	$\beta = -45^\circ$				$\beta = -22.5^\circ$				$\beta = 0^\circ$				$\beta = 22.5^\circ$				$\beta = 45^\circ$				
	$0^\circ$	$45^\circ$	$90^\circ$	$270^\circ$	$0^\circ$	$45^\circ$	$90^\circ$	$270^\circ$	$0^\circ$	$45^\circ$	$90^\circ$	$270^\circ$	$0^\circ$	$45^\circ$	$90^\circ$	$270^\circ$	$0^\circ$	$45^\circ$	$90^\circ$	$270^\circ$	
$\alpha = 0^\circ$	z1	3.628	3.436	3.086	3.953	3.695	3.548	3.156	3.956	4.138	3.607	3.246	4.166	4.022	3.516	2.807	4.507	3.972	3.481	2.956	3.922
	z2	4.314	4.009	3.752	4.355	4.183	4.065	3.79	4.335	4.657	4.11	3.859	4.529	4.567	4.507	3.323	4.445	4.554	4.029	3.624	4.313
	z3	4.899	4.441	4.199	4.682	4.451	4.454	4.201	4.681	4.891	4.375	4.189	4.789	4.953	4.423	3.289	4.819	4.915	4.391	4.923	4.649
$\alpha = 22.5^\circ$	z1	3.552	3.439	2.952	3.956	3.618	3.514	3.019	3.915	4.124	3.605	3.101	4.115	3.95	3.492	2.642	4.007	3.948	3.455	2.198	3.886
	z2	4.213	3.982	3.791	4.367	4.053	4.015	3.602	4.312	4.638	4.078	3.835	4.513	4.502	4.015	3.284	4.428	4.512	3.985	3.606	4.302
	z3	4.858	4.335	4.123	4.689	4.306	4.389	4.177	4.684	4.934	4.441	4.138	4.816	4.944	4.408	3.359	4.811	4.905	4.385	4.122	4.666
$\alpha = 45^\circ$	z1	3.582	3.417	3.212	3.975	3.983	3.437	3.236	3.923	4.107	3.117	3.335	4.085	3.924	3.392	3.128	3.991	3.941	3.382	2.969	3.914
	z2	4.183	3.985	4.73	4.408	3.997	3.999	3.735	4.328	4.640	4.068	3.805	4.503	4.504	3.999	3.266	4.451	4.505	3.967	3.578	4.349
	z3	4.881	4.370	4.066	4.407	4.212	4.375	4.053	4.658	4.908	4.400	4.136	4.782	4.941	4.421	3.337	4.78	4.894	4.411	4.082	4.734
$\alpha = 67.5^\circ$	z1	3.596	3.283	2.987	4.062	3.941	3.259	2.955	3.943	4.063	3.328	3.027	4.085	3.883	3.324	2.762	3.995	3.899	3.216	2.758	3.966
	z2	4.524	4.038	3.791	4.412	4.133	4.008	3.753	4.299	4.663	4.064	4.833	4.487	4.524	4.003	3.268	4.396	4.536	3.973	3.597	4.328
	z3	4.893	4.431	4.091	4.767	4.218	4.390	4.041	4.672	4.892	4.452	4.132	4.808	4.904	4.383	3.517	4.761	4.869	4.365	4.107	4.752
$\alpha = 90^\circ$	z1	3.714	3.401	3.051	4.04	3.975	3.357	3.017	3.887	4.225	3.423	3.079	4.038	4.119	3.327	2.667	3.948	4.022	3.31	2.824	3.886
	z2	4.372	4.075	3.815	4.483	4.598	4.027	3.571	4.365	4.675	4.084	3.807	4.529	4.536	4.013	3.449	4.436	4.559	3.983	3.605	4.37
	z3	4.942	4.465	4.102	4.799	4.155	4.401	4.029	4.698	4.861	4.461	4.103	4.804	4.883	4.379	3.547	4.468	4.845	4.345	4.028	4.666

### 9.2 Superficies de intensidad luminosa

La Tabla 2 presenta la representación en mapa de colores de las superficies de iluminancia. Cada imagen equivale a desarrollar la superficie del biorreactor y sobre ella proyectar un mapa de iluminancia. Cuanto más amarillo es el color de cada coordenada de la imagen, tanto mayor será la iluminancia en la coordenada correspondiente sobre la superficie del biorreactor. Entre más azul, menor es la iluminancia en la coordenada respectiva.

Tabla 2- Superficies de Intensidad Luminosa.



### 9.3 Comportamiento de cada configuración de las celdas ( $\alpha$ ) para diferentes momentos del día ( $\beta$ )

En la Ilustración 25 se observa que todas las configuraciones reciben mayor intensidad mayor intensidad hacia el mediodía ( $\beta=0^\circ$ ) lo que es de esperarse y que de alguna manera corrobora la validez del experimento. La configuración que mayor intensidad recibe a esa hora es la #4 ( $\alpha=67.5^\circ$ ). Sin embargo, se observa que en horas de la mañana ( $\beta=-45^\circ$ ), es más efectiva la configuración #5 ( $\alpha=90^\circ$ ). La primera configuración de las celdas ( $\alpha=90^\circ$ ) recibe más intensidad en una franja de la mañana y durante la tarde.

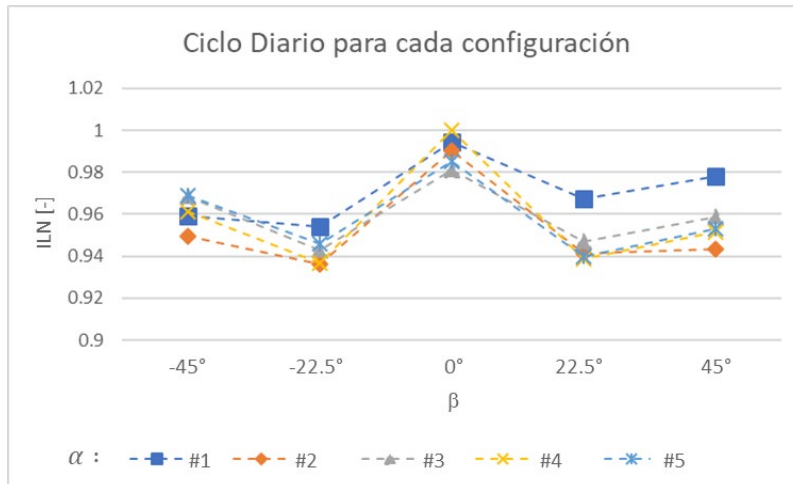


Ilustración 25- Coeficiente adimensional de Intensidad Luminosa Normalizada (ILN) para cada configuración de las celdas ( $\alpha$ ) en función del momento del día ( $\beta$ ).

#### 9.4 Comportamiento de cada configuración durante un día típico

Se puede concluir del resultado de la Ilustración 26 que, de manera general, la configuración de celdas evaluada muestra un mejor desempeño en horas de la mañana y al medio día, sin importar la orientación del conjunto.

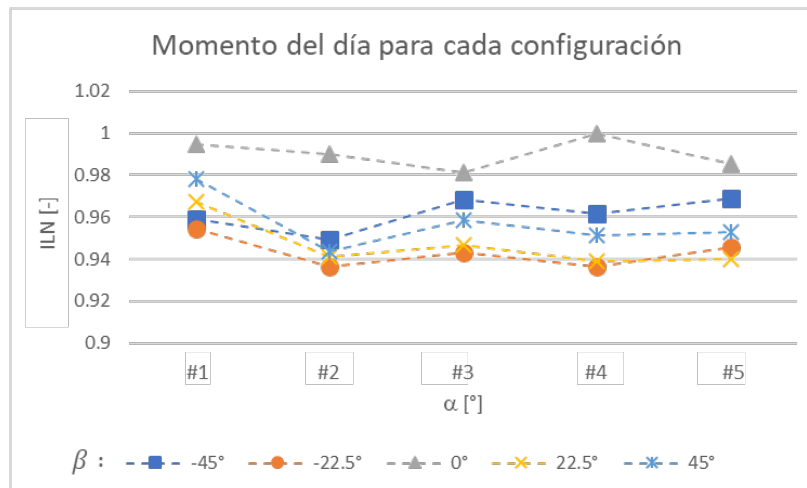
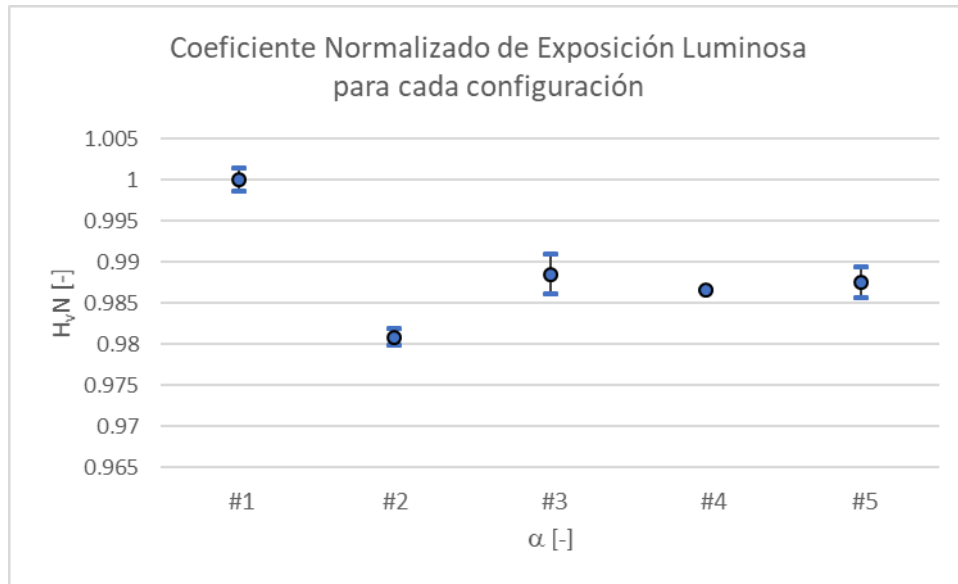


Ilustración 26, Tabla para cada momento del día

#### 9.5 Coeficiente adimensional de exposición

El coeficiente adimensional de exposición,  $H_vN$ , obtenido para cada configuración (orientación  $\alpha$ ) se representa en la Ilustración 27, acompañado de los valores de incertidumbre para cada caso. La incertidumbre típica fue del 0.02.





*Ilustración 27, Exposición luminosa para cada configuración*

De la ilustración 27 se pueden agrupar 3 comportamientos para las distintas posiciones del conjunto de celdas. El de la primera configuración los valores referentes a la exposición luminosa, el de la segunda y las tres últimas que muestran un comportamiento similar, es decir. Se concluye entonces que la mejor configuración para la orientación de las celdas es la primera ( $\alpha=0^\circ$ ). La diferencia relativa entre la primera configuración y el promedio de las configuraciones #3, #4 y #5 correspondientes a  $\alpha=22.5^\circ$ ,  $\alpha=45^\circ$ ,  $\alpha=67.5^\circ$  y  $\alpha=90^\circ$  respectivamente es un 43% mayor que la distancia entre ese mismo promedio y la segunda configuración. Entonces, se puede afirmar que la primera configuración ( $\alpha=0^\circ$ ) es la que mostró el mejor rendimiento mientras que la segunda configuración ( $\alpha=22.5^\circ$ ) obtuvo el menor.

## 10 CONCLUSIONES

Se logró la eficiencia en la captación de la luz para el fotobiorreactor y las celdas solares que ayudan al funcionamiento, pasando por la necesidad de evaluar la posibilidad de usarlos en los espacios reducidos que se tienen en las ciudades y las necesidades de purificar el aire en zonas industriales o de alto tráfico vehicular.

La secuencia Fibonacci permite la distribución espacial de paneles solares en una matriz de tres dimensiones para ser aplicada a un fotobiorreactor con el fin de proporcionar energía eléctrica para su función mecánica sin afectar las funciones de captura de CO<sub>2</sub> para lo que fue diseñado.

El proceso de creación de un código utilizando la secuencia Fibonacci arroja disposiciones espaciales como: distancias, alturas, ángulos, geometrías y áreas variables para la ubicación de las celdas, independientemente de la tecnología de construcción de las celdas solares, porque ya primaría la distribución espacial de las celdas en los tres ejes dimensionales más que los materiales o eficiencia de dichas celdas.

El uso de fotobiorreactores verticales para la captura de CO<sub>2</sub> nutridos por energía solar haciendo uso de la disposición de celdas solares para la captura energética constituyen una interesante solución para mitigar la contaminación en espacios reducidos y focalizados en áreas urbanas.

La disposición de celdas solares ubicadas en una proporción matemáticamente definida en un espacio tridimensional es una solución para el suministro energético de fotobiorreactores verticales con funcionamiento basculante. Esto cumple con los requerimientos energéticos del sistema sin comprometer la captura de CO<sub>2</sub>. Además, no genera sombra en los contenedores y al mismo tiempo reduce áreas para su montaje y cerrando el círculo de sostenibilidad.

Se diseñó y construyó un prototipo funcional que permitió la simulación y evaluación de diferentes configuraciones a partir de la combinación de tres parámetros: el azimut solar ( $\alpha$ ), que define la orientación geográfica con la que se podrían instalar los paneles en el fotobiorreactor; el ángulo de elevación solar ( $\beta$ ): Define la posición del sol y por tanto el momento de un ciclo diario; la elevación ( $z$ ) que define los diferentes niveles sobre el fotobiorreactor y el ángulo( $\theta$ ) que equivale a desarrollar la superficie del biorreactor.

A partir de los resultados se concluye que todas las configuraciones reciben mayor intensidad hacia el mediodía ( $\beta=0^\circ$ ) lo que es de esperarse y que de alguna manera corrobora la validez del experimento. La configuración que mayor intensidad recibe a esa hora es la #4 ( $\alpha=67.5^\circ$ ). Sin embargo, se observa que en horas de la mañana ( $\beta=-45^\circ$ ), es más efectiva la configuración #5 ( $\alpha=90^\circ$ ). La primera configuración de las celdas ( $\alpha=90^\circ$ ) recibe más intensidad en

una franja de la mañana y durante la tarde. Además, la configuración de celdas evaluada muestra un mejor desempeño en horas de la mañana y al medio día, sin importar la orientación del conjunto. Finalmente, se concluye entonces que la mejor configuración para la orientación de las celdas es la primera ( $\alpha=0^\circ$ ), mientras que la segunda configuración obtuvo la menor calificación y por tanto, desempeño.

## 11 BIBLIOGRAFÍA

Adam, j. (2003). the fibonacci sequence and the golden ratio. en j. adam, *mathematics in nature. modelling patterns in the natural world* (págs. 213-230). princeton university press.

Adler group. (21 de octubre de 2016). *Adler group*. obtenido de adler group: <http://www.adlergroup.in/2016/10/21/solar-energy/this-indian-scientist-grows-solar-panels-on-trees/>

Barragan escandon, e. a., Zalamea leon, e. f., Terrados Cepeda, j., & Parra Gonzalez, a. (2019). las energias renovables a escala urbana. aspectos determinantes y seleccion tecnologica. *bitacora urbano territorial*, 39-48.

Bravo Hidalgo, d., Jimenez Borges, r., & Valdivia Nodal, y. (2018). applications of solar energy: history, sociology and last trends in investigation. *revista produccion+limpia*, 21-28.

Colorado Chavez, p. a. (27 de 02 de 2017). *eafit.edu.co*. obtenido de a la "ceiba" solar de eafit: <http://www.eafit.edu.co/medios/eleafitense/109/paginas/a-la-ceiba-solar-de-eafit.aspx>

Correa Florez, c. a., Marulanda Garcia, g. a., & Panesso Hernandez, a. f. (2016). impacto de la penetracion de la energia solar fotovoltaica en sistemas de distribucion: estudio bajo supuestos del contexto colombiano. *revista tecnura*, 85-95.

Gaviria Galocha, M. J., & Perez Alvarez, G. A. (2018). estudio comparativo del efecto de las propiedades opticas del revestimiento exterior de fachada sobre la demanda energetica de un edificio. *dyna*, 216-220.

Guarachi Flores, J., & Garcia Alvarado, R. j. J. (2016). integracion arquitectonica de la fachada fotovoltaica. potencial solar y percepcion de usuario en la vivienda colectiva. *arquitectura y urbanismo*, 33-48.

Huerta Mascotte, E., Mata Chavez, r. i., Estudillo-Ayala, j. m., Sierra Hernandez, j. m., Guryev, i., & Lizarraga Morales, r. a. (2016). estudio de las características de una celda fotovoltaica para el uso eficiente de la energia solar. *acta universitaria*, 30-34.

Icasas. (2019). *Icasas.mx*. obtenido de icasas.mx: <https://www.icasas.mx/noticias/que-son-las-ciudades-verticales/>

Mitchison, g. (1977). la filotaxis y la serie de fibonacci. *science*, 270-275.

Niklas, k. (1998). the role of phyllotactic pattern as a "developmental constraint" on the interception of light by leaf surfaces. *evolution*, 1-16.

Noguera Salas, O., Villareal Padilla, j. e., & Pinto Garcia, r. a. (2018). la eficiencia de los nuevos materiales fotosensibles usados en la fabricacion de paneles solares. *iteckne*, 7-16.

riecks andersen, t., friss dam, h., & carlé, j. e. (junio de 2014). *research gate web site*. obtenido de research gate web site: <https://www.researchgate.net/publication/263236353>

roca, j. (9 de 10 de 2018). *el periodico de la energia*. obtenido de las 20 mayores plantas fotovoltaicas del mundo: china, india y eeuu arrasan: <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-fotovoltaicas-del-mundo/>

rodriguez murcia, h. (2008). desarrollo de la energia solar en colombia y sus perspectivas. *revista de ingenieria de la universidad de los andes*, 83-89.

salbidegoitia garcia, i. (2008). energia solar. *dyna*, 561-566.

takigawa, f., aranhna neto, e., fernandes, r., de campos, d., & cardoso, m. (2019). analysis of the financial viability of a photovoltaic system to a consumer unit in south brazil. *ingeniare. revista chilena de ingenieria*, 131-141.

toranzo machado, n., lusson cervantes, a., leysdian oro carralero, l., bonzon henriquez, j., & escalona acosta, o. (2015). seguidor solar, optimizando el aprovechamiento de la energia. *ingenieria energetica*, 190-199.

vallejo mejia, d. (2019). *colombia patente n° 7154*.

## 12 Anexos.

### 12.1 Anexo 1 Patente.

#### **MECANISMO BASCULANTE DE BOMBEO**

##### **CAMPO DE LA INVENCION**

La presente invención está relacionada con bombas. Más específicamente la presente invención está relacionada con dispositivos de bombeo que usa la gravedad para bombear diferentes tipos de fluidos.

##### **DESCRIPCION DEL ESTADO DE LA TECNICA**

Una bomba es una máquina que transforma la energía (generalmente energía mecánica) con la que es accionada en energía del fluido que mueve. El fluido puede ser líquido o una mezcla de líquidos y sólidos como puede ser el hormigón antes de fraguar o la pasta de papel. Al incrementar la energía del fluido, se aumenta su presión, su velocidad o su altura. En general, una bomba se utiliza para incrementar la presión de un líquido añadiendo energía al sistema hidráulico, para mover el fluido de una zona de menor presión a otra de mayor presión.

Dicho lo anterior, el estado de la técnica divulga patentes como las mencionadas en los documentos US 7,935,523 B2 Y WO 1,990,013,744.

El documento WO 1,990,013,744 divulga aparato para bombear fluidos desde un pozo. El aparato incluye una viga tiene dos extremos longitudinales opuestos, en un extremo se conecta a un vástago de bombeo mediante un cable, dicho vástago se encuentra dispuesto dentro de un pozo. Por otra parte, en el extremo opuesto de la viga se conecta a un contrapeso, también mediante un cable. El aparato también incluye un pilar con un pivote sobre el cual se ubica una viga. A su vez, la viga puede desplazarse axialmente sobre el pivote. El vástago de bombeo tiene un levantamiento asistido mecánicamente y un descenso accionado por gravedad. Adicionalmente, el aparato incluye un mecanismo que desplaza axialmente la viga, que puede conformarse de dos cilindros hidráulicos, cada cilindro se dispone diagonalmente entre el pivote y un extremo de la viga.

Dicho lo anterior, se puede notar que dicha bomba no permite un bombeo continuo de fluidos, ni tampoco permite bombear diferentes tipos de fluidos al mismo tiempo. Además, la posición de la bomba durante su operación es estacionaria, es decir, debe de permanecer quieta en un punto para su correcto funcionamiento.

El documento US 7,935,523 B2 divulga un aparato para la inmersión temporal de células de cultivo que comprende un primer contenedor y un segundo contenedor conectados mediante una tubería, un mecanismo que mueve cíclicamente y de manera diagonal-ascendente el primer contenedor y el segundo contenedor. En una primera etapa, el mecanismo mueve el primer contenedor desde una posición más alta que el segundo contenedor hasta una posición más baja que el segundo contenedor. En una segunda etapa, el mecanismo mueve el segundo contenedor desde una posición más alta que el primer contenedor hasta una posición más baja que el primer contenedor, posteriormente, se repite la primera etapa. El mecanismo incluye un motor de corriente directa conectado a un cable dispuesto operacionalmente en un marco con dos viguetas que conforman una cercha con forma de V invertida.

El cable se conecta a dos soportes, cada soporte se desplaza sobre una de las dos viguetas. Además, encima cada soporte se ubica uno de los dos contenedores. El motor de corriente directa está controlado por un módulo de control que cambia el sentido de rotación del motor de manera cíclica. El documento US 7,935,523 B2 también divulga que el mecanismo también puede ser hidráulico, neumático, eléctrico, mecánico o combinaciones de los anteriores. Sin embargo, a pesar de que dicha máquina usa la gravedad para su funcionamiento por medio de dos cuerpos que se mueven cíclicamente, el documento US 7,935,523 B2 no divulga medios para bombear fluidos por medio de la acción cíclica del primer o del segundo cuerpo.

Por lo tanto, el estado de la técnica divulga bombas que usan la gravedad para su funcionamiento, pero todas dichas bombas que usan la gravedad, siempre deben de estar estacionarias para poder funcionar, además, de que solo pueden bombear un fluido a la vez y no permiten un bombeo continuo de fluido. Asimismo, el consumo energético de los medios para mover cíclicamente los cuerpos es muy alto.

## **BREVE DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION**

Un mecanismo basculante de bombeo que comprende: un primer contrapeso (1) y un segundo contrapeso (2) localizado al lado del primer contrapeso (1), un elemento de transmisión (1) que tiene dos extremos longitudinales, cada extremo longitudinal se conecta a un contrapeso (1, 2), un actuador (10) conectado al elemento de transmisión y una primera bomba (5a) que incluye un primer elemento de compresión acoplado a uno de los contrapesos (1,2).

## **BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS**

La FIG. 1 ilustra dos bombas de pistón conectadas a dos cuerpos diferentes, y estos, a su vez, conectados a un mecanismo.

La FIG. 2 ilustra dos bombas de pistón conectadas a dos cuerpos diferentes, y estos, a su vez, conectados a un mecanismo, en donde

La FIG. 3 ilustra dos bombas de pistón conectadas a dos cuerpos diferentes, y estos, a su vez, conectados a un mecanismo y el mecanismo conectado a un motor.

La FIG. 4 ilustra dos bombas de pistón conectadas a dos cuerpos diferentes, y estos, a su vez, conectados a un mecanismo, el mecanismo conectado a un motor y el motor conectado a un panel.

## **DESCRIPCIÓN DETALLADA**

La presente invención corresponde a un mecanismo basculante de bombeo que comprende: un primer contrapeso (2) y un segundo contrapeso (3) localizado al lado del primer contrapeso (2), un elemento de transmisión (1) que tiene dos extremos longitudinales, cada extremo longitudinal se conecta al primer contrapeso (2) y al segundo contrapeso, un actuador (10) conectado al elemento de transmisión (1) y una bomba (5) que incluye un primer elemento de compresión conectado a uno de los contrapesos (2, 3).

El elemento de transmisión (1) es un mecanismo el cual soporta el primer contrapeso (2) y el segundo contrapeso (3), y además permite que primer contrapeso (2) y el segundo contrapeso (3) se desplacen simultáneamente. El elemento de transmisión (1) puede seleccionarse del grupo compuesto por: cables, cadenas de transmisión, correas o bandas de transmisión, poleas, poleas dentadas, engranajes, piñones, piñón-cadena, mecanismo de piñón y tornillo sin fin, mecanismo de cremallera, ruedas de fricción, discos de fricción, chavetas y ejes nervados, juntas cardán y juntas homocinéticas, árbol de levas, otros elementos equivalentes conocidos por una persona versada en la materia técnica o combinación de los anteriores.

Los contrapesos se pueden conectar a los extremos longitudinales del elemento de transmisión (1) mediante elementos de fijación. El elemento de fijación puede seleccionarse del grupo conformado por: tornillos, pernos, tuercas, remaches, espárragos, pasadores, cuñas, abrazaderas, pernos, pin-cuñas, soldadura, amarres, elementos equivalentes conocidos por una persona versada la materia técnica o combinación de los anteriores. Los contrapesos también pueden ser tanques.

Uno de los efectos técnicos de que el primer contrapeso (2) o el segundo contrapeso (3) sean tanques, es variar el peso que estos tienen según el requerimiento. Otros de los efectos técnicos que tiene de que los contrapesos sean tanques, es permitir bombear al interior del ellos.



El elemento de transmisión (1) se puede mover en una primera posición o a una segunda posición. El actuador (10) es un elemento que se encuentra conectado al elemento de transmisión (1) y permite que el elemento de transmisión (1) se mueva. El elemento de transmisión (1) puede tener un punto de pivote o un punto de apoyo en donde se conecta el actuador (10). Uno de los efectos técnicos de que el actuador (10) permita que el elemento de transmisión (1) se mueva, es permitir que el primer contrapeso (2) y el segundo contrapeso (3) se muevan. Otro de los efectos técnicos de que el actuador (10) permita el movimiento del elemento de transmisión (1), es aumentar o disminuir la velocidad, el tiempo, la fuerza, el torque o combinación de los anteriores, con las que se mueve el elemento de transmisión (1).

El actuador (10) puede seleccionarse del grupo compuesto por: palancas de accionamiento mecánico o de accionamiento manual, motores eléctricos, motores de corriente alterna, motores sincrónicos trifásicos, motores asíncronos sincronizados, motores con un rotor de imán permanente, motores monofásicos, motores bifásicos, motores con arranque auxiliar bobinado, motores con arranque auxiliar bobinado y con condensador), motores de corriente continua, motores de excitación en serie, motores de excitación en paralelo, motores de excitación compuesta, otros motores equivalentes conocidos por una persona versada la materia técnica o combinación de los anteriores.

Uno de los efectos técnicos de que el actuador (10) sea un motor, es que actuador (10) tenga un movimiento rotacional con acción invertible, lo que permite también cambiar el sentido de movimiento del elemento de transmisión (1) y a su vez, el movimiento del primer contrapeso (2) y el segundo contrapeso (3).

El actuador (10) puede ser alimentado por una fuente de energía, la cual permite regular y suministrar al actuador de la energía necesaria para su funcionamiento. La fuente (11) puede ser una fuente eléctrica que se selecciona entre: celdas fotovoltaicas, celdas monocristalinas, celdas policristalinas, fuentes AC, fuentes DC, motores de combustión interna, generadores eólicos, otras fuentes equivalentes conocidas por una persona versada la materia técnica o combinación de las anteriores.

La presente invención también puede tener un reductor de velocidad puede estar conectado al actuador (10). Algunos de los efectos técnicos del reductor de velocidad son: disminuir la velocidad con la que gira el actuador (10), lo que permite que el elemento de transmisión (1) aumente la velocidad con la que se mueve, aumentar o disminuir la fuerza con la que gira el actuador (10), lo que aumenta la fuerza con la que se mueve el elemento de transmisión (1) y cuya fuerza es transmitida al primer contrapeso (2) y al segundo contrapeso (3) y otros equivalentes conocidos por una persona versada la materia técnica o combinación de las anteriores.

El reductor de velocidad puede seleccionarse por el grupo conformado por: reductores de velocidad de sin fin corona, reductores de velocidad de engranajes, reductores cicloidales, reductores de velocidad planetarios, reductores de engranajes internos, reductores de engranajes externos, otros reductores equivalentes conocidas por una persona versada la materia técnica o combinación de las anteriores.

Cuando el elemento de transmisión (1) se mueve en un primer sentido, mueve el primer contrapeso (2) a la primera posición. Para el entendimiento de la presente invención, se entenderá por primera posición cuando el primer contrapeso (2) se encuentra posicionado verticalmente por encima del segundo contrapeso (3), segunda posición es cuando el segundo contrapeso (3) encuentra posicionado verticalmente por encima del primer contrapeso (2) y la posición neutra es cuando el primer contrapeso (2) y el segundo contrapeso (3) se encuentran en un estado de equilibrio respecto a una posición vertical.

Asimismo, para el entendimiento de la presente invención, se entenderá por eje A, a un eje horizontal imaginario trazado sobre un punto a igual altura en el primer contrapeso (2) y el segundo contrapeso (3). Es decir, cuando el eje A, toca dos puntos iguales en el primer contrapeso (2) y el segundo contrapeso (3), quiere decir que los contrapesos están en posición neutra. Por eje B, se entenderá a un eje horizontal imaginario trazado sobre la altura máxima vertical a la que puede llegar el primer contrapeso (2) o el segundo contrapeso (3). Y por eje C, se entenderá a un eje horizontal imaginario trazado sobre la altura mínima vertical a la que puede llegar el primer contrapeso (2) o el segundo contrapeso (3).

Uno de los efectos técnicos de que el primer contrapeso (2) y el segundo contrapeso (3) se desplacen en posición vertical, es permitir que, la acción de la gravedad ayude a que el primer contrapeso (2) o el segundo contrapeso (3) descienda, lo que permite que el actuador (10) reduzca la energía utilizada. Otro de los efectos técnicos de que el primer contrapeso (2) y el segundo contrapeso (3) se desplacen en posición vertical, es aumentar la fuerza de bombeo de la bomba (5).

Inicialmente el primer contrapeso (2) y el segundo contrapeso (3) se encuentran en una posición la cual puede ser, una posición neutra, una primera posición o una segunda posición. Cuando el actuador (10) es activado, este mueve el elemento de transmisión (1) y a su vez, el elemento de transmisión empieza a mover al primer contrapeso (2) y al segundo contrapeso (3), alternándolos entre la posición neutra, la primera posición o la segunda posición y permite el bombeo de la bomba (5). La primera posición también puede ser llamada posición 1, la segunda posición también puede ser llamada posición 2 y la posición neutra también puede ser llamada la posición neutra.

La bomba (5) se conecta a uno de los contrapesos (2, 3). Cuando el primer contrapeso (2) se mueve mediante la acción del elemento de transmisión (1), el elemento de transmisión (1) genera una fuerza sobre el elemento de compresión de la bomba (5), lo que permite la bomba bombee.

Para el entendimiento de la presente invención se entenderá por elemento de compresión de la bomba (5), a todo aquel elemento que permite que una bomba bombee en conjunto con un segundo elemento, por ejemplo, un cilindro y un émbolo, en donde el cilindro estando en un estado estacionario y un émbolo en movimiento al interior del cilindro, ayuda al bombeo de fluidos al interior de la cámara del cilindro, o viceversa. El elemento de compresión puede seleccionarse del grupo compuesto por: cilindro, émbolos, los lóbulos de una bomba, los engranajes de una bomba de engranajes, otros elementos equivalentes conocidos por una persona versada en la materia o combinación de los anteriores.

El elemento de compresión se puede conectar a los contrapesos (2, 3) mediante elementos de fijación. El elemento de fijación puede seleccionarse del grupo conformado por: tornillos, pernos, tuercas, remaches, espárragos, pasadores, cuñas, abrazaderas, pernos, pin-cuñas, soldadura, amarres, elementos equivalentes conocidos por una persona versada la materia técnica o combinación de los anteriores.

La presente invención puede tener al menos dos bombas, una primera bomba (5a) y una segunda bomba (5b), cada una asociada a un contrapeso. La primera bomba (5a) y la segunda bomba (5b) pueden seleccionarse del grupo conformado por: bombas de engranes, bombas de aspa, bombas de tornillo, bombas de cavidad progresiva, bombas de lóbulo o bomba de levas, bombas peristálticas, bombas reciprocantes, bombas centrifugas, bomba dúplex, bomba de diafragma, bomba de doble diafragma, Bombas dilaceradoras, otras bombas equivalentes conocidos por una persona versada en la materia o combinación de los anteriores.

La invención también puede comprender una estructura (4). Uno de los efectos técnicos de incluir una estructura (4) es soportar al elemento al elemento de transmisión (1), al primer contrapeso (2) o al segundo contrapeso (3), a las bombas asociadas a los contrapesos o al actuador. Dicha estructura también puede soportar al segundo elemento, que, en combinación con el elemento de compresión de la bomba, permite que este se mantenga fijo, lo que permite que la bomba pueda bombear. Un ejemplo, es donde el segundo elemento es un vástago con un émbolo, conectado fijo a la estructura (4) y el elemento de compresión es un cilindro conectado a unos de los contrapesos (2, 3), lo que permite que, cuando alguno de los dos contrapesos (2, 3) se desplacen, el elemento que se mueva sea el cilindro y el vástago se mantenga en posición estacionaria.

El material de la estructura puede seleccionarse del grupo conformado por: Aluminio, acero al carbono, fundiciones de hierro, hierro galvanizado, aceros al cromo, aceros al cromo-níquel, aceros al cromo-níquel-titanio, aleación de níquel-cromo-molibdeno-tungsteno, aleaciones ferrosas al cromo-molibdeno, acero inoxidable 301, acero inoxidable 302, acero inoxidable 304, acero inoxidable 316, acero inoxidable 405, acero inoxidable 410, acero inoxidable 430, acero inoxidable 442, acero aleado con manganeso, cobre, madera, un material plástico seleccionado entre policloruro de vinilo (PVC, por sus siglas en inglés); de policloruro de vinilo clorado (CPVC, por sus siglas en inglés); polietileno teréftalato (PET, por sus siglas en inglés), poliamidas (PA) (v.g. PA12, PA6, PA66); policlorotrifluoretileno (PCTFE, por sus siglas en inglés); polifluoruro de vinilideno (PVDF, por sus siglas en inglés); politetrafluoruro de etileno (PTFE, por sus siglas en inglés); etileno-clorotrifluoroetileno (ECTFE, por sus siglas en inglés); plásticos (resinas poliéster, vinilester, epóxicas, vinílicas) reforzados con fibras (v.g. de vidrio, aramida, poliéster), otras bombas equivalentes conocidos por una persona versada en la materia o combinación de los anteriores.

Uno de los efectos técnicos que la estructura (4) sea de alguno de los materiales antes mencionados. es evitar que la estructura sufra deformaciones plásticas debido a los esfuerzos generados por acción del movimiento del primer contrapeso (2) y del segundo contrapeso (3).

Haciendo referencia a la FIG. 1 la invención está conformada por: una estructura (4) un elemento de transmisión (1) compuesto por un piñón y una cadena (12) conectada al piñón. La cadena (12) tiene dos extremos longitudinales. Un primer contrapeso (2) conectado en un extremo de la cadena (12) y un segundo contrapeso (3) conectado en el otro extremo de la cadena (12).

La FIG. 1 también presenta dos bombas (5) de pistón, una primera bomba (5a) y una segunda bomba (5b). La primera bomba (5a) comprende un primer cilindro (6a) conectado al primer contrapeso (2), un primer émbolo (9a) localizado al interior del primer cilindro (6a) y un primer vástago (8a) con un primer extremo y un segundo extremo. El primer extremo del primer vástago (8a) está conectado al primer émbolo (9a) y el segundo extremo del primer vástago (8a) está conectado a la estructura (4).

La segunda bomba (5b) comprende un segundo cilindro (6b) conectado al segundo contrapeso (3), un segundo émbolo (9b) localizado al interior del segundo cilindro (6b) y un segundo vástago (8b) con un primer extremo y un segundo extremo. El primer extremo del segundo vástago (8b) está conectado al segundo émbolo (9b) y el segundo extremo del segundo vástago (8b) está conectado a la estructura (4).

En la invención representada en la FIG. 1, cada uno de los contrapesos, el primer contrapeso (2) y el segundo contrapeso (3) tienen las mismas características físicas, de peso, masa y densidad.

Uno de los efectos técnicos de que el primer contrapeso (2) y el segundo contrapeso (3) comprenden las mismas características físicas, es permitir que, cuando el elemento de transmisión (1) reciba una carga para permitir el movimiento, y posteriormente desplazar el primer contrapeso (2) o el segundo contrapeso (3), la gravedad ayude con el desplazamiento del primer contrapeso (2) o del segundo contrapeso (3). Y, disminuir el consumo energético cuando el actuador (10), va a cambiar de dirección para cambiar el desplazamiento del primer contrapeso (2) o del segundo contrapeso (3).

Haciendo referencia a la FIG. 2 se presenta el mecanismo de bombeo basculante presentado en la FIG: 1 con la diferencia de que dicha FIG. 2 muestra tres posiciones de la presente invención, una posición 1, una posición 2 y una posición neutral. Además, ilustra el eje A trazado horizontalmente entre los extremos superiores del primer contrapeso (2) y del segundo contrapeso (3). Dicha figura también muestra un eje B, trazado sobre la altura máxima vertical en donde se encuentra el primer contrapeso (2) o el segundo contrapeso (3) y un eje C, trazado sobre la altura mínima vertical en donde se encuentra el primer contrapeso (2) o el segundo contrapeso (3).

La posición 1 corresponde a un estado de la presente invención en donde el segundo contrapeso (3) se encuentra en una posición vertical inferior respecto al primer contrapeso (2), es decir, el segundo contrapeso (3) se encuentra por debajo del eje A y del eje B, mientras que el primer contrapeso (2) se encuentra alineado con el eje B. La posición 2 corresponde a un estado de la presente invención en donde el primer contrapeso (2) se encuentra en una posición vertical inferior respecto al segundo contrapeso (3), es decir, el primer contrapeso (2) se encuentra por debajo del eje A y del eje B, mientras que el segundo contrapeso (3) se encuentra alineado con el eje B.

La FIG. 2 también ilustra una posición neutral en donde el primer contrapeso (2) y el segundo contrapeso (3) se encuentran en la misma posición vertical respecto al eje A, es decir, sus centros de masa están en un estado de equilibrio.

Cuando la máquina basculante de bombeo se encuentra en la posición 2, el primer contrapeso (2) y por consiguiente, el primer cilindro (6a) conectado al primer contrapeso (2), bajan su posición vertical respecto al primer vástago (8a), permite que el émbolo contenido al interior del Primer cilindro (6a) comprima el fluido al interior de la cámara del cilindro, lo que eventualmente permite que este fluido contenido al interior de la cámara del cilindro salga a una presión diferente a la presión atmosférica.

Haciendo referencia a la FIG. 3 se presenta la modalidad de la invención presentada en la FIG. 1, con la diferencia técnica de que esta comprende un actuador (10) conectado al elemento de transmisión (1). Dicho Actuador (10) es un motor eléctrico cuya rotación es invertible. Uno de los efectos técnicos que tiene, de que la rotación del actuador (10) sea invertible, es permitir, que el primer contrapeso (2) y el segundo contrapeso (3) alternen de posición vertical mediante el cambio de la rotación del actuador (10).

Haciendo referencia a la FIG. 4 se presenta la modalidad de la invención presentada en la FIG. 3, con la diferencia técnica de que esta comprende una fuente (11) conectada al actuador (10). En dicha FIG. 4, la fuente (11) es un panel solar.

Se debe entender que la presente invención no se halla limitada a las modalidades descritas e ilustradas, pues como será evidente para una persona versada en el arte, existen variaciones y modificaciones posibles que no se apartan del espíritu de la invención, el cual solo se encuentra definido por las siguientes reivindicaciones.

### **Ejemplo**

En una modalidad de la invención, se presenta un mecanismo basculante de bombeo que comprende:

una estructura (4) en aluminio, un elemento de transmisión (1) compuesto por un piñón y una cadena (12) con dos extremos longitudinales conectada al piñón. Un primer contrapeso (2) conectado en un extremo de la cadena (12) y un segundo contrapeso (3) conectado en el otro extremo de la cadena (12). En dicha modalidad, el primer contrapeso (2) y el segundo contrapeso (3) son tanques, cada uno lleno de agua. Cada tanque tiene un peso de 2kg cada uno y una altura de 25cm.

La modalidad también presenta dos bombas (5) de pistón, una primera bomba (5a) y una segunda bomba (5b). La primera bomba (5a) comprende un primer cilindro (6a) conectado al primer contrapeso (2), un primer émbolo (9a) localizado al interior del primer cilindro (6a) y un primer vástago (8a) con un primer extremo y un segundo extremo. El primer extremo del primer vástago (8a) está conectado al primer émbolo (9a) y el segundo extremo del primer vástago (8a) está conectado a la estructura (4).

El elemento de transmisión (1) está conectado a un motor de corriente directa y dicho motor, está conectado a un reductor simple por piñones. El motor de corriente directa es alimentado por un panel solar policristalino de 50cm de largo por 50cm de ancho. El panel solar está conectado a un gestor de carga y a unas baterías de ion de litio, lo cual permite que, cuando no haya energía solar para alimentar el panel, la invención funcione por la noche sin interrupciones.

En esta modalidad, las bombas bombean aire en la parte inferior del tanque, lo que permite romper la presión de la columna de agua al interior del primer contrapeso (2) y del segundo contrapeso (3) y oxigenar el agua al interior de este.

Se debe de tener en cuenta que, el consumo total de energía de dicha modalidad fue 12V y de 100mA, y que, la utilización de sistemas convencionales para romper la presión del agua al interior de tanques, puede llegar a ser de hasta 110v a 2A.

## REIVINDICACIONES

- 1). Un mecanismo basculante de bombeo que comprende:
  - un primer contrapeso (1) y un segundo contrapeso (2) localizado al lado del primer contrapeso (1);
  - un elemento de transmisión (1) que tiene dos extremos longitudinales, cada extremo longitudinal se conecta a un contrapeso (1, 2);
  - un actuador (10) conectado al elemento de transmisión; y
  - una primera bomba (5a) que incluye un primer elemento de compresión acoplado a uno de los contrapesos (1,2).
- 2). El mecanismo de la reivindicación 1 caracterizado porque incluye una segunda bomba (5b) que incluye un segundo elemento de compresión acoplado a uno de los contrapesos (1,2).
- 3). El mecanismo de la reivindicación 1 caracterizado porque los contrapesos tienen igual peso.
- 4). El mecanismo de la reivindicación 1 caracterizado porque incluye una estructura (4).
- 5). El mecanismo de la reivindicación 1 caracterizado porque el primer contrapeso y el segundo contrapeso son tanques.
- 6). El mecanismo de la reivindicación 1 caracterizado porque el actuador (10) es de acción invertible.
- 7). El mecanismo de la reivindicación 4 caracterizado porque el actuador (10) es un motor.
- 8). El mecanismo de la reivindicación 5 caracterizado porque actuador (10), está conectado a una fuente de energía.

9). El mecanismo de la reivindicación 8 caracterizado porque la fuente de energía es un panel solar.

## RESUMEN

Un mecanismo basculante de bombeo que comprende: un primer contrapeso (1) y un segundo contrapeso (2) localizado al lado del primer contrapeso (1), un elemento de transmisión (1) que tiene dos extremos longitudinales, cada extremo longitudinal se conecta a un contrapeso (1, 2), un actuador (10) conectado al elemento de transmisión y una primera bomba (5a) que incluye un primer elemento de compresión acoplado a uno de los contrapesos (1,2).

Inicialmente el primer contrapeso (2) y el segundo contrapeso (3) se encuentran en una posición la cual puede ser, una posición neutral, una primera posición o una segunda posición. Cuando el actuador (10) es activado, este mueve el elemento de transmisión (1) y a su vez, el elemento de transmisión empieza a mover al primer contrapeso (2) y al segundo contrapeso (3), alternándolos entre la posición neutral, la primera posición o la segunda posición y permite el bombeo de la bomba (5).

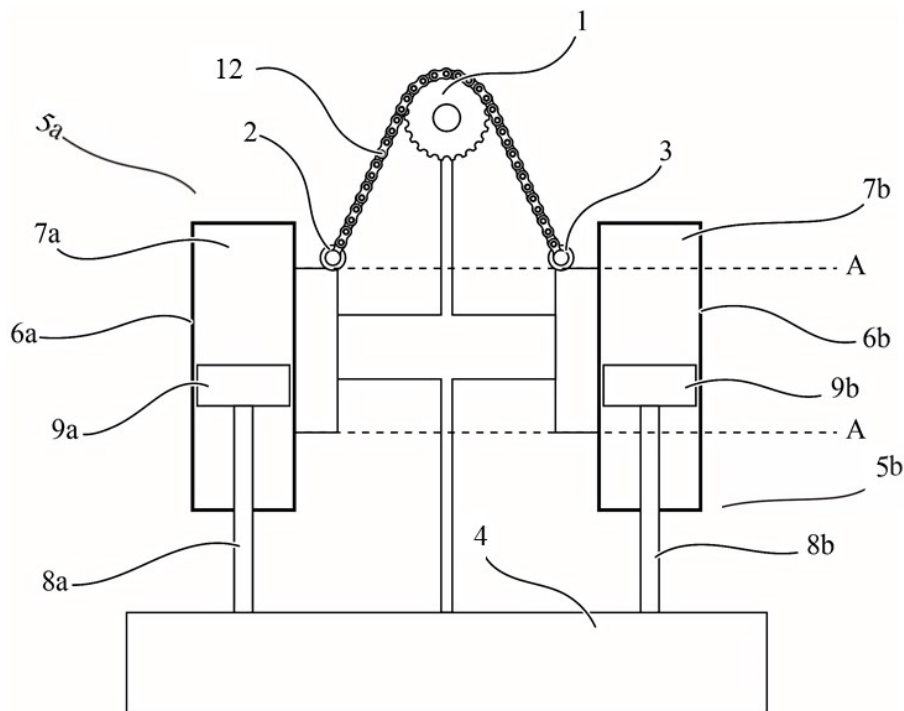
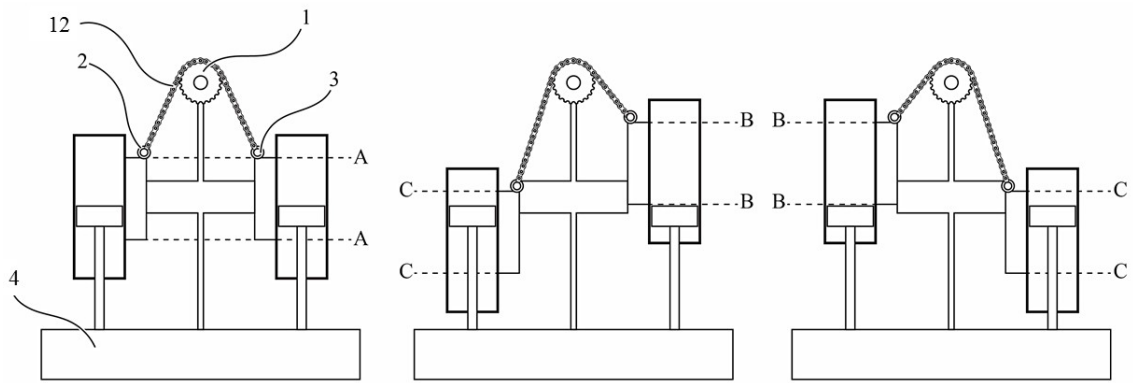
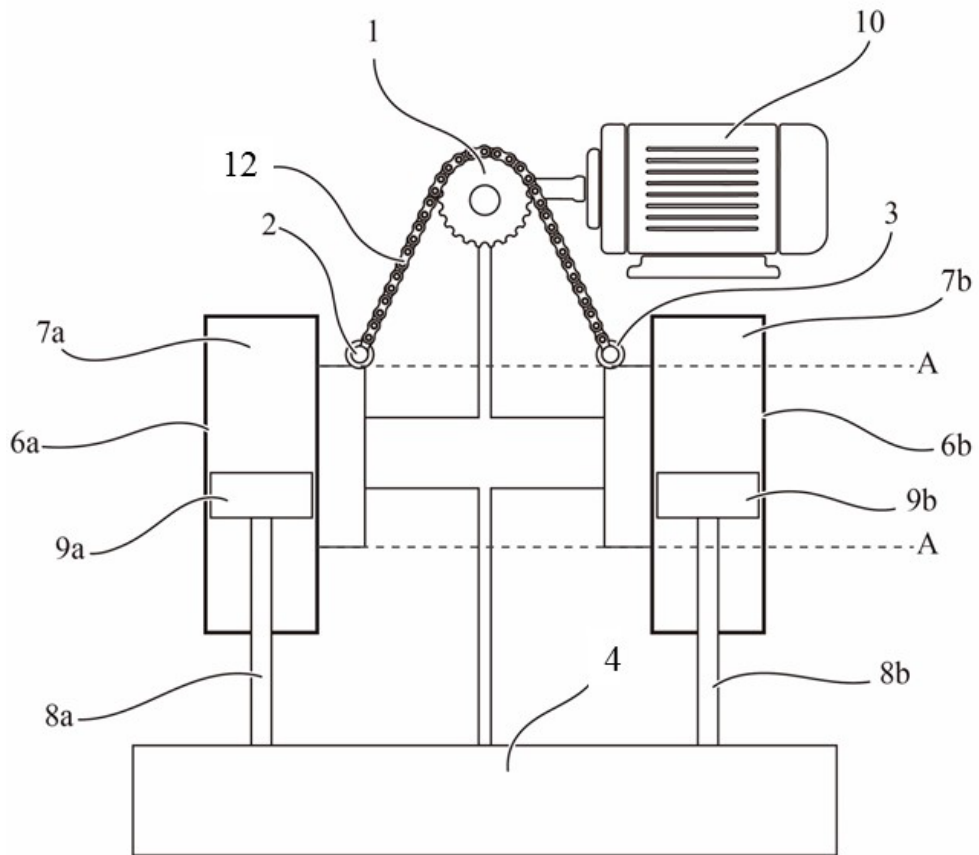


FIG. 1

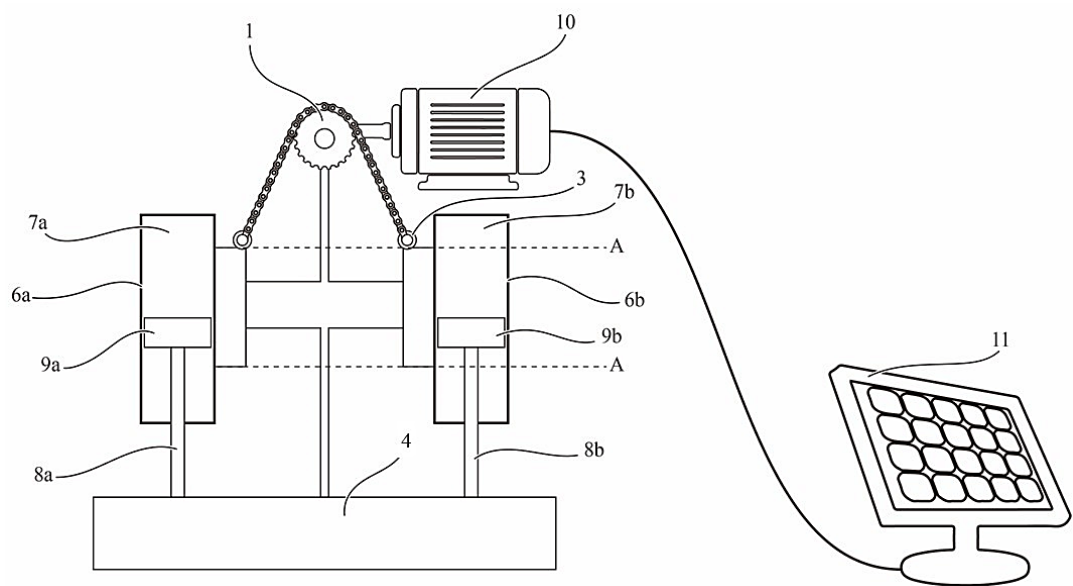




**FIG. 2**



**FIG. 3**



**FIG. 4**

## 12.2 Anexo 2. Programas en Python

### 12.2.1 Anexo 2.1. Programas en Python del algoritmo para construir la espiral de Fibonacci 2d sin marcadores.

Created on thu jul 19 15:03:31 2018

@author: David Vallejo Mejia

# algoritmo para construir la espiral de Fibonacci 2d sin marcadores:

# cargar librerías requeridas:

```
import numpy as np
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
def pol2cart(rho, phi):
```

```
    x = rho * np.cos(phi)
```

```
    y = rho * np.sin(phi)
```

```
    return(x, y)
```

```
def qcirc(x,y,r,q):
```

```
    # plot de cuadratura con centro (x,y) y radio r
```

```
    th = np.arange(q*np.pi/2,(q+1)*np.pi/2,np.pi/2/100)
```

```
    r = np.full(th.size,r)
```

```
    x,y = pol2cart(r, th)
```

```
    x = np.add(x,x)
```

```
    y = np.add(y,y)
```

```
    return x,y
```

# inicializar variables:

```
n = 30          # cantidad de números Fibonacci a generar
```

```
x = np.full(n,1) # coordenadas x de los centros de cada cuarto de círculo
```

```
y = np.zeros(n)  # coordenadas y de los centros de cada cuarto de círculo
```

```
f = np.full(n,1) # números de Fibonacci generados
```

```
xy = 1          # control de coordenada a actualizar xy = 1 v 0
```

```
s = -1          # control de signo s = 1 v -1
```

```
q = 0           # cuarto de círculo a dibujar; q=0: primer cuadrante.
```

```
fig = plt. Figure()
```

```
for i in range(1,n-1):
```

```
    if xy == 1:
```

```
        x[i] = x[i-1] + s*(f[i]-f[i-1])
```

```
        x[i+1] = x[i-1] + s*(f[i]-f[i-1])
```

```
        xy = 0
```

```
    else:
```

```
        y[i] = y[i-1] + s*(f[i]-f[i-1])
```

```
        y[i+1] = y[i-1] + s*(f[i]-f[i-1])
```

```

    xy = 1
    s *= -1
    xs,ys = qcirc(x[i],y[i],f[i],q)
    plt.plot(xs,ys, 'r')
    f[i+1] = f[i] + f[i-1]
    q += 1
    if q > 3:
        q=0
plt.show()

```

12.2.2 Anexo 2.2: Programas en Python del algoritmo para construir la espiral de Fibonacci en plano 2d ubicada en un espacio 3d.

Created on thu jul 19 15:03:31 2018

@author: David Vallejo Mejia

# algoritmo para construir la espiral de Fibonacci en plano 3d

# cargar librerías requeridas:

```
import numpy as np
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
def david_fibo(n):
```

```
    """funcion recursiva
```

```
    de secuencia"""
```

```
    if n <= 1:
```

```
        return n
```

```
    else:
```

```
        return(david_fibo(n-1) + david_fibo(n-2))
```

```
def pol2cart(rho, phi):
```

```
    x = rho * np.cos(phi)
```

```
    y = rho * np.sin(phi)
```

```
    return(x, y)
```

```
def qcirc(x,y,r,q):
```

```
    # plot de cuadratura con centro (x,y) y radio r
```

```
    th = np.arange(q*np.pi/2,(q+1)*np.pi/2,np.pi/2/100)
```

```
    r = np.full(th.size,r)
```

```
    x,y = pol2cart(r, th)
```

```
x = np.add(x,x)
```

```
    y = np.add(y,y)
```

```
    return x,y
```

```
# inicializar variables:
```

```
n = 10 # cantidad de números Fibonacci a generar
```

```
x = np.full(n,1) # coordenadas x de los centros de cada cuarto de círculo
```

```

y = np.zeros(n) # coordenadas y de los centros de cada cuarto de círculo
f = np.full(n,1) # números de Fibonacci generados
xy = 1 # control de coordenada a actualizar xy = 1 v 0
s = -1 # control de signo s = 1 v -1
q = 0 # cuarto de círculo a dibujar; q=0: primer cuadrante.
fig = plt.figure()
ax = fig.gca(projection='3d')
for i in range(1,n-1):
    if xy == 1:
        x[i] = x[i-1] + s*(f[i]-f[i-1])
        x[i+1] = x[i-1] + s*(f[i]-f[i-1])
        xy = 0
    else:
        y[i] = y[i-1] + s*(f[i]-f[i-1])
        y[i+1] = y[i-1] + s*(f[i]-f[i-1])
        xy = 1
        s *= -1
    xs,ys = qcirc(x[i],y[i],f[i],q)
    plt.plot(xs,ys, 'r') #generar en espacio 3d sin eje z
    f[i+1] = f[i] + f[i-1]
    q += 1
    if q > 3:
        q=0
ax. Legend()
plt.show()

```

12.2.3 Anexo 2.3: Programas en Python del algoritmo para construir la espiral de Fibonacci 3d sin marcadores.

Created on thu jul 19 16:38:27 2018

@author: David Vallejo Mejia

# algoritmo para construir la espiral de Fibonacci 3d sin marcadores:

# cargar librerías requeridas:

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
def david_fibo(n):
    """funcion recursiva
    de secuencia"""
    if n <= 1:
        return n
    else:

```

```

    return(david_fibo(n-1) + david_fibo(n-2))
def pol2cart(rho, phi):
    x = rho * np.cos(phi)
    y = rho * np.sin(phi)
    return(x, y)
def qcirc(x,y,r,q):
    cuadratura del circulo con centro (x,y) y radio r
    th = np.arange(q*np.pi/2,(q+1)*np.pi/2,np.pi/2/100)
    r = np.full(th.size,r)
    x,y = pol2cart(r, th)
    x = np.add(x,x)
    y = np.add(y,y)
    return x,y
# inicializar variables:
n = 10          # cantidad de números Fibonacci a generar
x = np.full(n,1) # coordenadas x de los centros de cada cuarto de círculo
y = np.zeros(n) # coordenadas y de los centros de cada cuarto de círculo
f = np.full(n,1) # números de Fibonacci generados
xy = 1         # control de coordenada a actualizar xy = 1 v 0
s = -1        # control de signo s = 1 v -1
q = 0         # cuarto de círculo a dibujar; q=0: primer cuadrante.
fig = plt.figure()
ax = fig.gca(projection='3d')
for i in range(1,n-1):
    if xy == 1:
        x[i] = x[i-1] + s*(f[i]-f[i-1])
        x[i+1] = x[i-1] + s*(f[i]-f[i-1])
        xy = 0
    else:
        y[i] = y[i-1] + s*(f[i]-f[i-1])
        y[i+1] = y[i-1] + s*(f[i]-f[i-1])
        xy = 1
        s *= -1
    xs,ys = qcirc(x[i],y[i],f[i],q)
    #plt.plot(xs,ys)
    f[i+1] = f[i] + f[i-1]
    q += 1
    if q > 3:
        q=0
    z1 = david_fibo(i)
    z2 = david_fibo(i + 1)

```

```

zs = -np.linspace(z1, z2, len(xs))
ax.plot(xs, ys, zs, 'r')
# ax.plot([xs[0], xs[-1]], [ys[0], ys[-1]], [zs[0], zs[-1]], 'g^')
#np.random.rand(20), '-o', ms=20, lw=2, alpha=0.7, mfc='orange'
#ax.plot([20],[20],[-20], 'go') # punto arbitrario en el espacio
ax.legend()
plt.show()

```

#### 12.2.4 Anexo 2.4: Programas en Python de para construir espira 3d con marcadores.

Created on fri aug 3 14:37:11 2018

@author: David Vallejo Mejia

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.mplot3d import axes3d
def pol2cart(rho, phi):
    x = rho * np.cos(phi)
    y = rho * np.sin(phi)
    return(x, y)
phi = (1 + np.sqrt(5))/2 #en grados cada punto
m = 360
q = 6.3
theta = np.linspace(0, q, 100)
r = (phi**(np.pi/2))**theta
x, y = pol2cart(r, theta)
theta2 = np.arange(0, m*np.pi/180, q*np.pi/180) #done 0 es inicio , p son los grados totales
# cada punto ,*np.pi/180 es conver-
sión a grados
r2 = (phi**(np.pi/2))**theta2
x2, y2 = pol2cart(r2, theta2)
plt.figure()
plt.plot(x, y, 'k-')
plt.plot(x2, y2, 'ro')
plt.show()
fig = plt.figure()
ax = fig.gca(projection='3d')
ax.plot(x, y, -r, 'k-')
ax.plot(x2, y2, -r2, 'ro')
plt.show()

```



## 12.2.5 Anexo 2.5: Programas en Python del algoritmo para construir la espiral de Fibonacci 2d con marcadores.

Created on thu jul 19 15:03:31 2018

2 dimensiones con marcadores verdes

@author: David Vallejo Mejia

# algoritmo para construir la espiral de Fibonacci 2d con marcadores:

# cargar librerías requeridas:

```
import numpy as np
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
def pol2cart(rho, phi):
```

```
    x = rho * np.cos(phi)
```

```
    y = rho * np.sin(phi)
```

```
    return(x, y)
```

```
def qcirc(x,y,r,q):
```

```
    # plot de cuadratura con centro (x,y) y radio r
```

```
    th = np.arange(q*np.pi/2,(q+1)*np.pi/2,np.pi/2/100)
```

```
    r = np.full(th.size,r)
```

```
    x,y = pol2cart(r, th)
```

```
    x = np.add(x,x)
```

```
    y = np.add(y,y)
```

```
    return x,y
```

```
    # inicializar variables:
```

```
n = 30          # cantidad de números Fibonacci a generar
```

```
x = np.full(n,1) # coordenadas x de los centros de cada cuarto de círculo
```

```
y = np.zeros(n)  # coordenadas y de los centros de cada cuarto de círculo
```

```
f = np.full(n,1) # números de Fibonacci generados
```

```
xy = 1          # control de coordenada a actualizar xy = 1 v 0
```

```
s = -1          # control de signo s = 1 v -1
```

```
q = 0           # cuarto de círculo a dibujar; q=0: primer cuadrante.
```

```
fig = plt.figure()
```

```
for i in range(1,n-1):
```

```
    if xy == 1:
```

```
        x[i] = x[i-1] + s*(f[i]-f[i-1])
```

```
        x[i+1] = x[i-1] + s*(f[i]-f[i-1])
```

```
        xy = 0
```

```
    else:
```

```
        y[i] = y[i-1] + s*(f[i]-f[i-1])
```

```
        y[i+1] = y[i-1] + s*(f[i]-f[i-1])
```

```
        xy = 1
```

```
        s *= -1
```

```
xs,ys = qcirc(x[i],y[i],f[i],q)
plt.plot(xs,ys, 'r') #plot secuencia fibo
plt.plot([xs[0], xs[-1]], [ys[0], ys[-1]],'g^') #plot marcadores
f[i+1] = f[i] + f[i-1]
q += 1
if q > 3:
    q=0
plt.show()
```