



Casa abierta al tiempo

Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Azcapotzalco

División de Ciencias Básicas e Ingeniería

Licenciatura en Ingeniería Ambiental

Proyecto de Integración

**Generación de energía biofotovoltaica en un sistema modular
tipo jardinera**

Modalidad: Proyecto de investigación

Trimestre: 18-I

Presentan:

Diego Jair Aguilera Martínez
2122003321
diegomtz1392@gmail.com

Daniel Olguín Gómez
2122004024
dannplant1@gmail.com

Asesores:


Dra. Margarita González Brambila
mmgb@correo.azc.uam.mx

Dra. Blanca Estela Chávez Sandoval
becs@correo.azc.uam.mx

Abril 2018

DECLARATORIA

Yo, Margarita González Brambila, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.



Dra. Margarita González Brambila

Yo, Blanca Estela Chávez Sandoval, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.



Dra. Blanca Estela Chávez Sandoval

Yo, Diego Jair Aguilera Martínez, doy mi autorización a la Coordinación de Servicios de Información de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, para publicar el presente documento en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.



Diego Jair Aguilera Martínez

Yo, Daniel Olguín Gómez, doy mi autorización a la Coordinación de Servicios de Información de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, para publicar el presente documento en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.



Daniel Olguín Gómez

*“La naturaleza no es un lujo,
sino una necesidad del espíritu humano,
tan vital como el agua o el buen pan”*
Edward Abbey

DEDICATORIA

Dedico este logro a mi mamá Rosa M. Gómez y hermana Nallely Olguín, por darme ejemplos dignos de superación y entrega, porque en gran parte gracias a ustedes, hoy puedo ver alcanzada mi meta, ya que siempre estuvieron impulsándome en los momentos más difíciles de mi carrera, y porque el orgullo que sienten por mí, fue lo que me hizo ir hasta el final. Va por ustedes, por lo que valen, porque admiro su fortaleza y por lo que han hecho de mí.

A mis tíos, Eduardo y María del Socorro, a mis primos Elsa, Eduardo, Elizabeth y a mis amigos Jair, María del Ángel y Roberto. Gracias por haber fomentado en mí el deseo de superación y el anhelo de triunfo en la vida.

A la UAM-A, por brindarme los conocimientos, habilidades y herramientas para finalizar la carrera de Ingeniería Ambiental.

Mil palabras no bastarían para agradecerles su apoyo, su comprensión y sus consejos en los momentos difíciles.

A todos, espero no defraudarlos y contar siempre con su valioso apoyo, sincero e incondicional.

Daniel Olguín Gómez

A Dios.

Por haberme permitido terminar uno de mis objetivos y haberme dado tantas bendiciones en el transcurso de la carrera y en lo personal.

A mi madre María de Lourdes, mi abuelita María Reyna por creer en mi y por ser el pilar fundamental en toda mi vida, les agradezco por todo lo que me han enseñado para poder alcanzar todas mis metas.

Mi hermana, Yoatzi, primos Ximena, Yosune, Damián y Fabián por estar conmigo y apoyarme siempre.

Mis tías Mary, Martha y tío Rubén, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, valores y por la motivación constante.

A la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco, por haberme acogido en el transcurso de la carrera y darme todo lo necesario para culminar la carrera.

Este logro fue gracias a ustedes.

Diego Jair Aguilera Martínez

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos especialmente a nuestras asesoras Dra. Margarita González Brambila y Dra. Blanca Estela Chávez Sandoval por su apoyo, tiempo y conocimientos para realizar este proyecto.

Al Dr. Gordon Sánchez Manuel Domingo del Depto. de Energía y Dr. Israel Tovar, por brindaros el acceso y espacio en el edificio O para el desarrollo del proyecto.

Al Ing. Félix Antonio Naranjo Castañeda por su paciencia e incontable ayuda para la realización de este proyecto.

A la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco y a todos sus profesores, los cuales fueron una guía para poder finalizar nuestros estudios.

RESUMEN

En México existe una urgente necesidad de sustituir las energías provenientes de combustibles fósiles a energías que contribuyan a cuidar el ambiente, se sabe que actualmente en el país se trabaja con energías sustentables a gran escala como la energía solar, eólica, geotérmica, hidráulica y mareomotriz, ayudando a minimizar el impacto ambiental, sin embargo, existe aún la necesidad de crear e investigar más alternativas para reducir al mínimo el uso de combustibles fósiles para la obtención sustentable de energía. Como una alternativa novedosa en países desarrollados de Europa surge la idea de generar energía a través de plantas conocida como energía biofotovoltaica (BFV). En este proyecto se investigó la factibilidad de montar un sistema modular tipo jardinera para la generación de energía BFV con dos diferentes tipos de suelos y dos diferentes tipos de plantas (C3 y CAM).

Se montó un sistema con 20 módulos distribuidos en cuatro subsistemas conteniendo cinco módulos por subsistema, el primer subsistema conto con plantas tipo CAM y suelo (Tierra negra), en el segundo se utilizó plantas tipo C3 y suelo (tierra negra), en el tercero se usó plantas de tipo CAM y una mezcla de suelo con Peat moss y finalmente en el cuarto se ocupó plantas CAM y la mezcla de suelo con Peat moss. Para la generación de energía BFV se utilizaron electrodos capaces de realizar el intercambio de electrones a través del módulo, los electrodos fueron hechos con una placa de cobre y una de acero. El proceso duro 38 días, en los cuales se realizó la medición tres veces al día, de pH, humedad y voltaje en cada uno de los módulos y por subsistema. Los resultados obtenidos en todas las mediciones permiten concluir, que el proceso de generación de energía BFV con los tipos de plantas y suelos utilizados, es adecuado y viable, puesto que se logró obtener voltaje arriba de los 3 Volts en los subsistemas CAM, y voltaje de 1 Volts en los subsistemas C3. Además, se comprobó que, usando una mayor cantidad de módulos o superficie, se podría llegar a usar esta energía para alumbrado público.

ABSTRACT

In Mexico there is an urgent need to replace the energy from fossil fuels with energies that contribute to caring for the environment, it is known that currently in the country we work with large-scale sustainable energies such as solar, wind, geothermal, hydraulic and tidal energy, helping to minimize environmental impact, however, there is still a need to create and investigate more alternatives to minimize the use of fossil fuels for sustainable energy production. As a novel alternative in developed countries of Europe, the idea of generating energy through plants known as biofotovoltaic energy (BFV) arises. In this project the feasibility of assembling a modular system type gardening for the generation of BFV energy with two different types of soils and two different types of plants (C3 and CAM) was investigated.

A system was set up with 20 modules distributed in four subsystems containing five modules per subsystem, the first subsystem with CAM type plants and soil (black soil), in the second one C3 type plants and soil (black soil) were used, in the third one CAM plants and a mixture of soil with Peat moss were used and finally in the fourth CAM plants and the soil mixture with Peat moss were used. For the generation of BFV energy, electrodes capable of carrying out the exchange of electrons through the module were used, the electrodes were made with a copper plate and a steel plate. The process lasted 38 days, in which the measurement was made three times a day, pH, humidity and voltage in each of the modules and by subsystem. The results obtained in all the measurements allow us to conclude that the process of generating BFV energy with the types of plants and soils used is adequate and viable, since it was possible to obtain voltage above 3 Volts in the CAM subsystems, and voltage of 1 Volts in subsystems C3. In addition, it was found that, using a greater number of modules or surface, this energy could be used for public lighting.

CONTENIDO

DECLARATORIA.....	1
DEDICATORIA.....	3
AGRADECIMIENTOS	5
RESUMEN	6
CONTENIDO.....	8
ÍNDICE DE FIGURAS.....	11
ÍNDICE DE TABLAS	13
1.INTRODUCCIÓN	14
2.ANTECEDENTES	16
3.JUSTIFICACIÓN	17
4.OBJETIVOS	19
4.1 Objetivo general.....	19
4.2 Objetivos específicos	19
5. MARCO TEÓRICO.....	20
5.1 Energía limpia o verde	20
5.2 Energías limpias en México	20
5.3 Energía BVF	21
3.3.1 Fotosíntesis.....	21
5.3.2 Obtención de energía BVF a partir de la fotosíntesis.....	22
5.4 Plantas con metabolismo C3 y CAM.....	23
5.5 Suelo y tipos de suelo.....	24
5.5.1 Tierra negra.....	25

5.5.3 Peat moss	26
6. METODOLOGÍA.....	27
6.1 Montaje de del sistema modular tipo jardinera	28
6.2 Medición de la energía biofotovoltaica que se genera por tipo de planta y de suelo.	32
6.3 Medición de pH y humedad	32
7. RESULTADOS	34
7.1 Monitoreo del sistema.....	34
7.1.1 pH.....	34
7.1.1.1 pH por la mañana, por subsistema.....	34
7.1.1.2 pH por la tarde, por subsistema.....	35
7.1.1.3 pH por la noche, por subsistema.....	36
7.1.2 Humedad.....	37
7.1.2.1 Humedad por la mañana, por subsistema.....	37
7.1.2.2 Humedad por la tarde, por subsistema.....	37
7.1.2.3 Humedad por la noche, por subsistema.....	38
7.1.3 Voltaje.....	39
7.1.3.1 Comparación de la energía generada por tipo de planta y de suelo.....	40
8.ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	42
8.1 Medición de parámetros en las plantas C3 y CAM con Tierra negra	42
8.2 Medición de parámetros en Plantas C3 y CAM con Mezcla de Tierra negra y Peat moss.....	45
8.3 Voltaje generado durante el proyecto.....	49

10. CONCLUSIONES.....	50
11. RECOMENDACIONES	52
12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
13. Anexos	57
Anexo A. Permiso para el desarrollo del proyecto	57

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Proceso de fotosíntesis.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 2. Mezcla de tierra negra con Peat moss.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3. Diagrama metodológico del proyecto de integración.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 4. Ubicación sistema modular tipo jardinera.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 5. Construcción del Sistema modular.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 6. Módulos de policarbonato.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 7. Plantas C3 y CAM con tierra negra y con Peat moss.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 8. Sistema eléctrico.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 9. Led prendido y circuito eléctrico.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 10. Multímetro PCE-DM 22</i>	<i>32</i>
<i>Figura 11. Medidor active air.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 12. pH promedio por la mañana en los cuatro subsistemas.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 13. pH promedio por la tarde en los cuatro subsistemas.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 14. pH promedio por la noche en los cuatro subsistemas.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 15. Humedad promedio por la mañana por subsistema.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 16. Humedad promedio por la tarde por subsistema.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 17. Humedad promedio por la noche por subsistema.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 18. Promedios diarios por subsistema modular por la mañana.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 19. Promedios diarios por subsistema modular por la tarde.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 20. Promedios diarios por subsistema modular por la noche.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 21. Promedios diarios del Voltaje por subsistema.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 22. Parámetros de plantas CAM con tierra por la mañana.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 23. Parámetros de plantas C3 con tierra por la mañana.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 24. Parámetros de plantas CAM con tierra por la tarde.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 25. Parámetros de plantas C3 con tierra por la tarde.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 26. Parámetros de plantas CAM con tierra por la noche.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 27. Parámetros de plantas C3 con tierra por la noche.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 28. Parámetros de plantas CAM con Mezcla de tierra y Peat moss por la mañana.</i>	<i>45</i>

<i>Figura 29. Parámetros de plantas C3 con Mezcla de tierra y Peat moss por la mañana.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 30. Parámetros de plantas CAM con Mezcla de tierra y Peat moss por la tarde.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 31. Parametros de plantas C3 con Mezcla de tierra y Peat moss por la tarde.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 32. Parametros de plantas CAM con Mezcla de tierra y Peat moss por la noche.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 33. Parametros de plantas C3 con Mezcla de tierra y Peat moss por la noche.</i>	<i>48</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Tipos de plantas a emplear</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 2. Promedio diario de generación de energía por subsistema.</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 3. Voltaje generado durante el proyecto en el sistema.....</i>	<i>49</i>

1. Introducción

A causa del impacto ambiental derivado de las emisiones a la atmosfera a partir de la revolución industrial, en 1997 en Kioto, Japón se firmó un acuerdo internacional que se denominó “*Protocolo de Kioto*”. México apoya al Protocolo de Kioto y se convirtió en el primer país de América Latina en acreditar organismos verificadores de gases de efecto invernadero (GEI) (ONU, 1998).

Hay evidencia de estudios controlados de exposición a humanos (Brook et al., 2002), plantas (Grünhage y Jäger, 2003) y animales (Goheen et al., 2004) de la posibilidad de que los GEI causen efectos adversos a la salud. Los estudios epidemiológicos también han abordado los efectos a exposiciones de corto y largo plazo y proporcionan resultados importantes (Muñoz y Palomera, 2002).

En México, la visión de incluir al ambiente como uno de los elementos de competencia para contribuir al desarrollo socioeconómico, ha tomado relevancia en los últimos años (SENER, 2016), principalmente en las ciudades con mayor índice de emisión de GEI como en la Ciudad de México, Guadalajara, Monterrey, Salamanca, entre otras y concretamente, para cumplir con los compromisos adquiridos para la reducción de GEI, el objetivo del país es ampliar la utilización de fuentes de energía limpias y renovables, promoviendo la eficiencia energética y la responsabilidad ambiental (INECC, 2016a).

En relación con las emisiones de GEI que implica la generación de energía eléctrica a partir de recursos no renovables, como el carbón, el gasóleo o el gas natural (IEA, 2016), se requieren nuevas estrategias que ayuden a contrarrestar el impacto ambiental, así mismo, alcanzar un desarrollo sostenible mediante la generación basada en energías renovables como es la energía biofotovoltaica (BFV), esto con ayuda de muros verdes.

En principio, el proceso biofotovoltaico implica la captación de electrones y se requiere el uso de un centro de reacción fotosintética (el agua es donante primario de electrones) los electrones se generan por la oxidación del agua, mediante la luz (Masadeh et al., 2017).

Con el fin de contribuir en algunos aspectos ambientales a la sociedad; se diseñó un sistema modular tipo jardinera que generó energía BFV utilizando plantas que mantienen sus estomas abiertos durante el día, permitiendo la captación de dióxido de carbono (CO_2) necesario para la fotosíntesis. La fotosíntesis es la transformación de la energía radiante mediante la asimilación del carbono del CO_2 del aire. Según la forma de fijación del dióxido carbono se agrupan en: C3, las cuales fijan el CO_2 en compuestos de tres átomos de carbono, se encuentran en casi toda la ciudad, son aquellas con hojas, frutos o flores y las CAM que utilizan la vía del metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM) para reducir al mínimo la fotorrespiración, por la noche, abren sus estomas para que el CO_2 se difunda en las hojas, se destacan especies de climas áridos y otras de climas templados cálidos o tropicales (Hibberdy Quick, 2002).

2. ANTECEDENTES

Durante el período de 2012 a 2015, un equipo noruego-británico realizó un estudio sobre sistemas BFV (McCormick et al., 2015), en estos sistemas utilizaron organismos fotosintéticos, como plantas, microalgas y cianobacterias, por mencionar algunos, para cosechar energía de la luz solar y generar una corriente eléctrica (Shahparnia, 2015; Berla et al., 2013).

El proceso principal de este sistema es la generación de electrones, en el cual se requiere el uso de un centro de reacción fotosintética (el agua es donante primario de electrones) donde los electrones se generan por la oxidación del agua, mediante la luz. En estos estudios realizados reportan que han logrado hasta 86 mW/m² de energía BFV (McCormick et al., 2015).

En el año 2014, estudiantes del *Institute for Advanced Architecture of Catalonia* (IAAC), España, en conjunto con el bioquímico Paolo Bombelli, crearon una propuesta para un sistema de fachada que utiliza el poder de generación de electricidad natural de las plantas en módulos. La propuesta consiste en una serie de módulos hechos de arcilla que contienen musgo, el sistema aprovecha los nuevos avances científicos como la energía BFV, mencionan que el sistema es económico, auto-replicante, biodegradable y sustentable. En esta investigación se tomó un tipo de bacterias simbióticas que viven con el musgo. Cuando el musgo realiza la fotosíntesis, algunos de los compuestos orgánicos que produce son liberados a través de sus raíces. Se mostró que el prototipo generó 3 voltios a partir de un conjunto de 16 módulos, y una propuesta de aplicación que recomiendan para su sistema es para utilizarse para la iluminación light-emitting diode (LED) de un edificio (Stott, 2016).

La posibilidad de convertir la energía solar en energía eléctrica mediante sistemas de BFV se está optimizando, de momento se han obtenido hasta 2.9% de eficiencia, pero la idea es muy atractiva, por ello es crucial trabajar en la mejora de la generación de energía preferiblemente renovables y neutras en carbono (González et al., 2012).

3. JUSTIFICACIÓN

Las emisiones de bióxido de carbono (CO₂) en México, derivadas del uso y quema de combustibles fósiles, representaron en 2012 el 1.37% de las emisiones globales, colocando a México en el lugar 13 de los países con mayores volúmenes de emisiones de este gas derivados de dicha quema (INECC, 2016b).

México enfrenta en común acuerdo con lo mencionado en la COP 21 llevada a cabo en Paris en el 2015 que las emisiones de GEI representa una amenaza apremiante y con efectos potencialmente irreversibles para las sociedades humanas y el planeta y, por lo tanto, exige la cooperación más amplia posible de todos los países y su participación en una respuesta internacional efectiva y apropiada, con miras a acelerar la reducción de las emisiones mundiales de GEI (COP 21, 2015).

Las emisiones directas de GEI en el país ascendieron a 665 megatoneladas de CO₂ equivalente, de las cuales la mayor contribución se debe al sector transporte (26%), seguido por el de generación de energía eléctrica (19%) y el de las industrias (17%), de acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 2013 (INECC,2016b).

Desde el año 2009, en México la tendencia del diseño y uso de muros verdes se ha utilizado para disminuir los efectos de los contaminantes en la salud de la población (INECC, 2016b).

Se sabe que los muros verdes producen oxígeno, captan dióxido de carbono y otros GEI (Turégano et al., 2009), regulan las temperaturas, incluso procesan metales pesados, captan polvos (Verbruggen et. al., 2009) y enriquecen visualmente la ciudad.

La adaptación de los sistemas BFV en jardines, azoteas verdes, parques entre otros, es una tecnología poco probada en el país, siendo un elemento con mayor potencial de aplicación a la naturación (enverdecimiento urbano), debido a que son estructuras verticales que pueden ser colocadas casi en cualquier lugar de las edificaciones y por el modelo de desarrollo urbano, son cada vez más viables en las ciudades (Yeang, 2001).

El propósito de esta investigación es generar energía BFV, a través de un sistema modular tipo jardinera, ayudando así a México a cumplir con los compromisos de mitigación y adaptación ante el cambio climático (SEMARNAT, 2013).

Por lo que, es necesario comenzar con las investigaciones que proporcionen evidencia de que en el país se pueden usar los muros verdes como una nueva tecnología para generar energía limpia y mitigando los efectos de GEI, respetando los derechos humanos y el medio ambiente.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Cuantificar la energía biofotovoltaica generada en un sistema modular tipo jardinera con dos tipos de plantas y dos tipos de suelos.

4.2 Objetivos específicos

- Montaje del sistema modular tipo jardinera.
- Medir la energía biofotovoltaica que se genera por tipo de planta y suelo.
- Determinar el promedio diario de la generación de energía por los dos tipos de plantas (C3 y CAM) y suelos en un periodo de 38 días.
- Comparar la energía generada por los dos tipos de plantas (C3 y CAM) y suelos.

5. MARCO TEÓRICO

El hombre ha tenido la necesidad de buscar nuevas tecnologías para el sostenimiento de la vida, anteriormente se ha ocupado la mayor parte de energía que proviene de los combustibles fósiles, por ejemplo; en el transporte, para cocinar, para generar electricidad, entre otros. Tienen un porcentaje alto de contaminación al ambiente, como al suelo, aire y al agua. Por ello se ha investigado y analizado otras fuentes de energía, en la actualidad se ha buscado principalmente en los recursos naturales, entre ellas son las energías verdes o energías renovables.

Las energías verdes o energías renovable son aquellas que se obtiene de fuentes naturales, Por lo cual, el manejo de estas energías va en aumento ya que se catalogan energías limpias, en la actualidad se ha convertido en un tema importante, puesto que los combustibles fósiles son desfavorables para el ambiente.

5.1 Energía limpia o verde

Esta energía se refiere toda aquella que se obtiene a partir de recursos naturales inagotable del entorno ambiental, como es la luz solar y el aire, es decir, la generación de la energía limpia no causa ningún desecho o residuo contaminante que afecte al ambiente. Ejemplos de estos son la energía eólica, energía hidráulica e hidroeléctrica, energía solar y la energía geotérmica. Por mencionar algunas ya que cada vez se investigan nuevas energías que pueden cuidar el ambiente, dicho de otra forma, ayuda a disminuir el calentamiento global (SotySolar, 2017).

5.2 Energías limpias en México

México se ha destacado por ser una de las naciones que tiene metas altas en el área de obtención de energías limpias. Para el año 2015 se aprobó una ley (Ley de Transición Energética) donde se acordó que para el año 2024 el 35% de energía se debía genera a través de fuentes limpias y para el año 2050 debería ser el 60%. México ha invertido en nueve diferentes proyectos de energía

eólica en los últimos años con el fin de colaborar en la preservación del medio ambiente (Becerra, 2014).

5.3 Energía BFV

La energía biofotovoltaica es generada a través del proceso de la fotosíntesis de ciertos organismos vivos, en las investigaciones recientes se utilizan comúnmente musgos y algas (Olmedo, 2013).

Así que en la Universidad de Cambridge, Científicos y diseñadores trabajan en un método de captura electrones de modo de poder producir electricidad, por lo tanto, construyen prototipos de paneles biofotovoltaicos para uso domiciliario (por ejemplo, para los techos de casas y edificios), mástiles solares (postes o pilares) recubiertos por algas, que, gracias a su rápida y alta reproducción, capturarían la luz solar constantemente, para transformarla en electricidad. Está tecnología actualmente se desarrolla, pero su avance es cada vez más rápido, se sabe que entre 5 y 10 años, serían ilimitadas y obtener una clase de energía alternativa, a la de los combustibles fósiles (Olmedo, 2013).

3.3.1 Fotosíntesis

Los organismos fotosintéticos poseen dos fotosistemas (Figura 1), cada uno formado por una antena colectora de luz y un centro de reacción fotoquímico que incluye una molécula de clorofila. Ambos fotosistemas se diferencian por el pico de absorción de la clorofila: el Fotosistema I lo presenta a 700 nm; el Fotosistema II, a 680 nm.

En un flujo no cíclico de electrones, los dos fotosistemas trabajan en forma simultánea y continua. Así se produce un flujo permanente de electrones desde el agua al Fotosistema II, de éste al Fotosistema I y de este último al NADP+.

Durante el transporte de electrones, los protones presentes en el estroma son enviados al espacio intertilacoide, creando un gradiente cuya energía se utiliza para sintetizar ATP. La síntesis de ATP a partir de energía lumínica se conoce como fotofosforilación.

Cuando los dos fotosistemas trabajan en forma independiente, se forma un flujo cíclico de electrones. En este caso no se forma NADPH, pero se sintetiza ATP. Es

una ruta alternativa que permite regular la cantidad de NADPH y ATP formados en presencia de luz y, probablemente, aumenta la eficiencia en la formación de ATP cuando coexiste con el flujo no cíclico de electrones (Curtis, 2008).

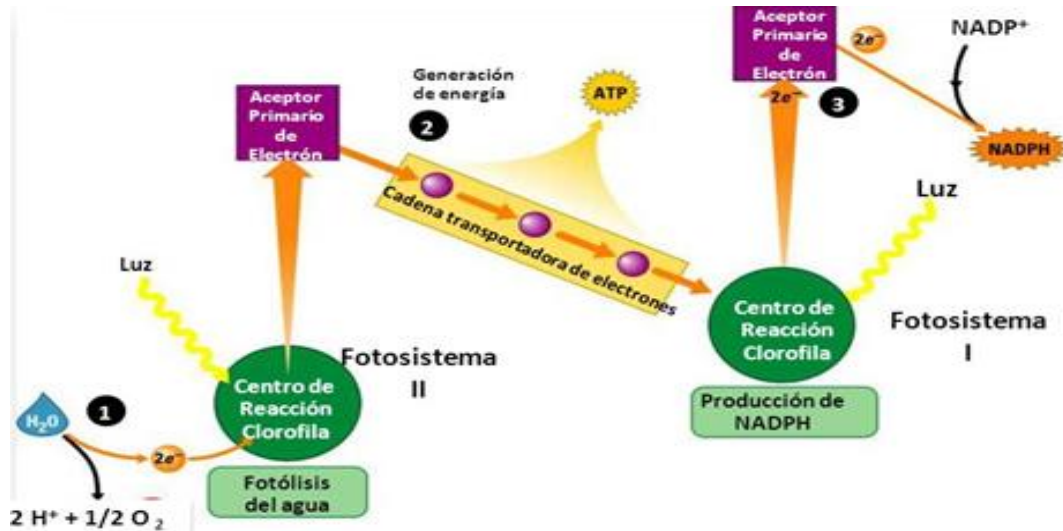


Figura 1. Proceso de fotosíntesis
(Cpech preuniversitario de Chile, 2017)

5.3.2 Obtención de energía BFV a partir de la fotosíntesis

Como se mencionó anteriormente, la fotosíntesis es un proceso químico que todas las plantas siguen para transformar un sustrato inorgánico en materia orgánica rica en energía, gracias a la energía de la luz (energía lumínica).

La energía lumínica atrapada en la molécula reactiva de la clorofila a del Fotosistema II lanza los electrones a un nivel de energía superior. Estos electrones son reemplazados en la molécula de clorofila por electrones que provienen indirectamente de moléculas de agua que se escinden liberando además protones (H^+) y oxígeno.

Los electrones pasan desde el aceptor de electrones primario, a lo largo de una cadena de transporte de electrones, a un nivel de energía inferior, el centro de reacción del Fotosistema tipo I. A medida que pasan a lo largo de esta cadena de transporte de electrones, se forma un gradiente de protones a partir del cual se sintetiza ATP.

La energía lumínica absorbida por el Fotosistema I lanza los electrones a otro aceptor primario. Desde este aceptor, los electrones son transferidos mediante otros transportadores al NADP^+ y se forma NADPH. Los electrones eliminados del Fotosistema tipo I son reemplazados por los del Fotosistema tipo II. El ATP y el NADPH representan la ganancia neta de las reacciones que capturan energía (Curtis, 2008).

Con el sistema de electrodos instalados en las macetas, electrones sobrantes del proceso de fotosíntesis son jalados hacia el electrodo positivo y negativo generando una pequeña cantidad de energía que es llevada a una pila mediante unos conductores de cobre (cable de cobre), donde posteriormente son usados al conectar la pila aun dispositivo electrónico o contactados a un led que funcionan con un voltaje de aproximadamente tres voltios.

5.4 Plantas con metabolismo C3 y CAM

Las principales características importantes para la elección de los tipos de plantas en este proyecto fueron su diferencia en el metabolismo, gasto energético y la absorción de CO_2 . Con el fin de hacer una comparación en la eficiencia de la producción de energía, su durabilidad y la posibilidad de su adaptación al clima y condiciones cambiantes del Nor-Poniente de la Ciudad de México.

Las diferencias metabólicas y de gasto energético entre plantas C3 y CAM son debidas a una respuesta ambiental. Cada uno de estos tipos se desarrolla en climas diferentes, y cada uno representa una adaptación a ese clima. Esto hace que el mayor gasto energético para la fijación de CO_2 que existe en plantas CAM tenga sentido.

Las plantas C3 para fijar una molécula de O_2 gastan tres moléculas de ATP y dos moléculas de NADPH, mientras que las plantas CAM gastan para lo mismo 5 o 6.5 moléculas de ATP respectivamente y dos de poder reductor. La conversión diurna de ácido málico para formar almidón requiere ATP y justifica la diferencia en el consumo energético.

Las CAM son plantas adaptadas a vivir en ambientes cálidos y áridos. En estos ambientes la apertura de estomas para dejar circular el aire y así poder fijar el CO_2

les supondría pérdidas de agua, de ahí que las CAM utilicen mecanismos de acumulación de CO₂ que les permitan evitar esas pérdidas de agua.

Pero no sólo presenta esa ventaja la acumulación de CO₂ en la planta para después ser utilizado en el ciclo de Calvin. La enzima Rubisco a altas temperaturas pierde afinidad por el CO₂ con lo que el mayor gasto energético que se utiliza para acumularlo dentro de la planta queda compensado, ya que en el caso de una planta C3 tuviese humedad suficiente para realizar la fijación sin desecarse pasaría mucho tiempo en fase oxigenativa, lo cual representa un gasto energético extra y además no estaría fijando CO₂ con lo que el rendimiento sería inferior.

Por tanto, el mayor gasto energético de plantas CAM queda compensado en los ambientes en los que viven, ya que en esos ambientes un metabolismo tipo C3 sería menos rentable y en algunos casos inviable debido a la desecación.

Si por el contrario atendemos a la producción de biomasa entre estos tres tipos de plantas nos encontramos con una serie de diferencias.

Las plantas C3 producen menos biomasa bruta, ya que estas alternan fase oxigenativa con fase carboxilativa. Por el contrario, las plantas CAM prácticamente no presentan fase oxigenativa debido a que acumulan CO₂ con lo que estas plantas producen más biomasa ya que aprovechan todo el CO₂ en formación de fotosintatos.

Pero en cuanto a biomasa neta son las plantas C3 las que más producen y esto es debido a que gastan menos energía (pese a alternar fase oxigenativa con fase carboxilativa) que las plantas CAM, las cuales hacen un mayor gasto de ATP y poder reductor para acumular CO₂ (Campbell y Reece, 2005).

5.5 Suelo y tipos de suelo

El suelo es la capa más superficial de la corteza, es dinámica (constante cambio) y de escaso grosor en la que se asienta la vida, la riqueza de organización de un suelo es muy grande, con variedad de organismos que viven en él y actúa de interface de la atmosfera, hidrosfera, geosfera y biosfera, ya que contiene elementos de todas ellas (Sánchez et al., 2012).

Cuando abundan partículas de tamaño arena, se dice que el suelo tiene textura arenosa, si son los limos, textura limosa y si son las arcillas, textura arcillosa.

Un suelo con mezcla de los tres componentes se llama textura franca (tierra negra) y es lo más beneficioso, pues un suelo que posea fracciones gruesas y finas en proporciones adecuadas es un suelo equilibrado, siendo ligero, aireado y permeable.

Un suelo con textura predominante en cualquiera de las fracciones siempre será deficiente por alguna causa, por ejemplo, el suelo arenoso no tiene capacidad e retener agua y el suelo arcilloso no tiene aireación y se encharca con facilidad al ser impermeable (Sánchez et al., 2012).

5.5.1 Tierra negra

Es aquella que tiene un color negro oscuro, que resulta de la descomposición de materia orgánica, ya sea producida por restos de hojas secas que caen de los árboles o proveniente de restos de animales, de los cual el suelo absorbe como nutrientes y la podemos encontrar desde zonas boscosas o hasta en nuestro propio jardín (Sarmiento, 2012).

Cuando hablamos sobre las propiedades que tiene la tierra negra, podemos mencionar que contiene materia orgánica que se ha descompuesto en partículas muy pequeñas, que mejoran su textura dándole la capacidad de retener suficiente agua y que además proporciona una buena circulación entre las raíces de la planta, que es fundamental para el crecimiento de estas.

A medida que la materia vegetal es descompuesta por los microbios en partes utilizables, la tierra negra se vuelve abundante en nutrientes y es que algunas bacterias son capaces de absorber el nitrógeno de aire y lo depositan en el suelo, quedado disponibles para las plantas que se encuentren en él (Sarmiento, 2012).

5.5.3 Peat moss

También conocido como turba de musgo *Sphagnum*, es un material orgánico de color pardo claro a oscuro, bajo en sales solubles, con pH de neutro a ácido dependiendo su mezcla, tiene mayor capacidad de retención de humedad, y un punto importante es que no ocurren cambios biológicos o químicos, al medio de cultivo. Es fácil de mezclar con otros sustratos, se obtiene buen drenaje y aireación para el cultivo (Alvarado et al., 2002).

En el mercado se encuentran varios tipos de Peat moss como son; Turbas negras: se caracteriza por ser más mineralizados teniendo un menor contenido de materia orgánica. Peat moss fino: óptimo para germinación y también puede enraizar adecuadamente. Permite tener la humedad, temperatura y porosidad adecuada para la producción de varios cultivos. Peat moss grueso: Porosidad mayor esto permite las mejores condiciones para su desarrollo. Para poder tener más provecho de este sustrato se puede mezclar con otros como: perlita, vermiculita o tezontle. También es muy utilizado en mezcla con tierra como se hizo en este proyecto (tierra negra), en la figura 2 se muestra la mezcla Peat moss con tierra que se usó en dos subsistemas (CAM y C3) (Hydro environment, 2018).



Figura 2. Mezcla de tierra negra con Peat moss.

6. METODOLOGÍA

Se llevó a cabo el montaje del sistema modular tipo jardinera tomando en cuenta la norma: **NADF-013-RNAT-2007**, Que establece las especificaciones técnicas para la instalación de sistemas de naturación en la Ciudad de México y donde se menciona que “los sistemas de naturación tienen como objetivo principal incrementar la cantidad de áreas verdes que proporcionen beneficios ambientales, aportar al embellecimiento paisajístico de las edificaciones y compensar el área verde perdida por la construcción de edificaciones” (SEDEMA, 2008).

En la figura 3, se muestra un diagrama de las principales actividades realizadas.



Figura 3. Diagrama metodológico del proyecto de integración.

6.1 Montaje de del sistema modular tipo jardinera

Para el montaje del sistema se seleccionó un espacio en la azotea del edificio O, se anexa el permiso para utilizar el lugar (Anexo A), fue seleccionado debido a sus características, tales como, el tiempo de exposición a la radiación solar, exposición al aire ambiente, buen drenaje en la azota para evitar la acumulación de agua y el amplio espacio para las pruebas (Figura 4).



Figura 4. Ubicación sistema modular tipo jardinera

El sistema constó de tres subsistemas importantes, el primero es la estructura donde se instaló el sistema modular, el segundo consta del sistema eléctrico de cada uno de los módulos para la generación de energía BFV y finalmente el sistema de riego. En conjunto el sistema comprendió las siguientes dimensiones: altura $1.20\text{ m} \pm 15\text{ cm}$ y de largo $2.50\text{ m} \pm 10\text{ cm}$.

El sistema modular constó a su vez de cuatro subsistemas formados por cinco módulos, se estiman medidas de 20 cm de largo, 7 cm de ancho y 15 cm de alto por módulo. En conjunto los cuatro subsistemas modulares tuvieron una altura de $55\text{ cm} \pm 15\text{ cm}$ y de largo $2.50\text{ m} \pm 10\text{ cm}$ (Figura 5).



Figura 5. Construcción del Sistema modular.

Los módulos fueron fabricados de policarbonato, se eligió este material ya que provee un ambiente amigable para las plantas. Las propiedades de aislamiento eléctrico del policarbonato permitieron captar la mayor cantidad de electrones que se generan por la fotosíntesis dentro de los módulos, su alta resistencia a la intemperie y la protección contra rayos ultravioleta permite un cuidado adecuado para las raíces de las plantas (Figura 6).



Figura 6. Módulos de policarbonato.

En diez módulos se usó tierra negra, el resto de los módulos tuvo tierra negra mezclada con un sustrato universal; el cual contiene Peat moss, piedra caliza, vermiculita, entre otros aditivos. Por ser un sustrato de turba natural con un nivel de pH equilibrado y con una mejora en la absorción de agua, tiene la capacidad de brindar las condiciones adecuadas para el crecimiento óptimo de las plantas.

En diez de los módulos se colocaron plantas de tipo C3, cinco módulos con tierra negra y cinco con la mezcla de tierra y sustrato; se realizó lo mismo para las plantas de tipo CAM (Tabla1), las cuales fueron seleccionadas por su capacidad fotosintética, utilizan el ciclo de Calvin para formar azúcares a partir de la fijación

de CO₂. Estas vías de fijación del CO₂ permiten que las plantas se adapten a climas de moderados a extremos (Hibberd y Quick, 2002) como es el caso de la Ciudad de México a lo largo de todo el año (Figura 7).



Figura 7. Plantas C3 y CAM con tierra negra y con Peat moss.

Tabla 1. Tipos de plantas a emplear

Plantas C3	Plantas CAM
<i>Selaginella apoda</i> (esponja)	<i>Crassula portulacea monstruosa</i> (oreja de shrek)
<i>Bellis perennis</i> (Margarita)	<i>Erythrina crista-galli</i> L. (Tucán o Flor de coral)

El sistema eléctrico fue hecho con cable de cobre número 18 conectado a electrodos puesto en el interior de las macetas, el electrodo fue hecho de una placa de cobre (positivo) y una placa de hierro (negativo). Los materiales de los electrodos fueron escogidos debido a la facilidad que tienen para la circulación de electrones de un punto a otro (conducción). La función de los electrodos dentro de las macetas es hacer accesible la energía proveniente del proceso que ocurre dentro de las macetas donde se convierte la energía química proveniente de la fotosíntesis y se transforma en energía eléctrica, formando un dispositivo que se conoce como pila o batería eléctrica. Se usó una conexión en cada módulo debido a que una sola maceta no genera suficiente energía. Sin embargo, con una conexión en serie se suman los voltajes obtenidos de cada maceta (Figura 8),

permitiendo obtener mayor energía para encender los leds (Figura 9) o acumulando energía en baterías recargables (pilas).

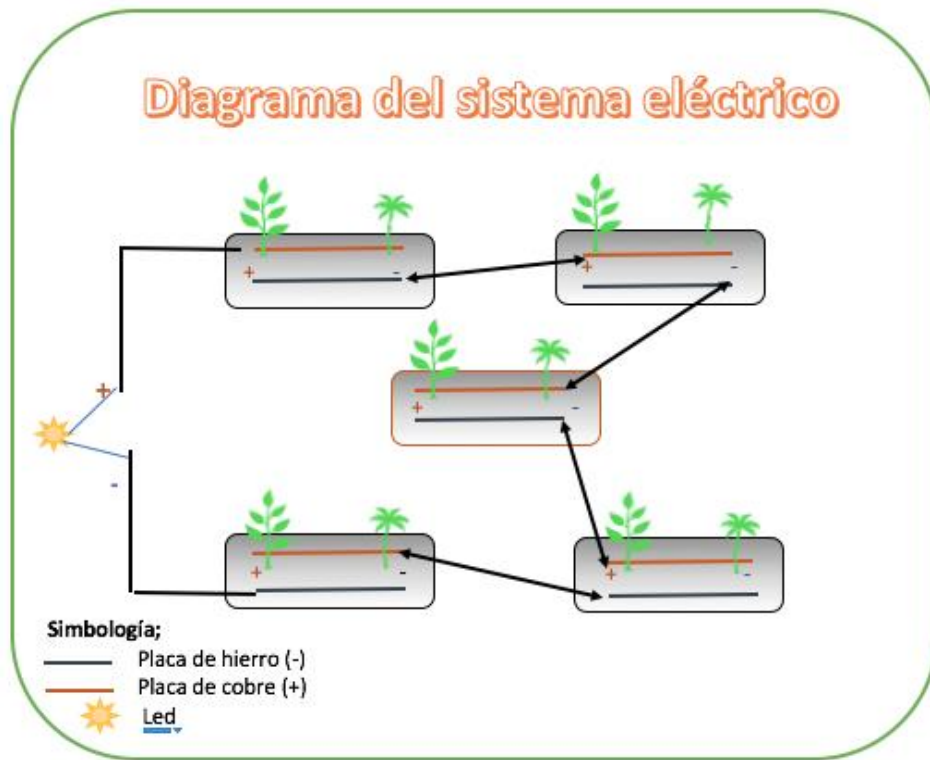


Figura 8. Sistema eléctrico.

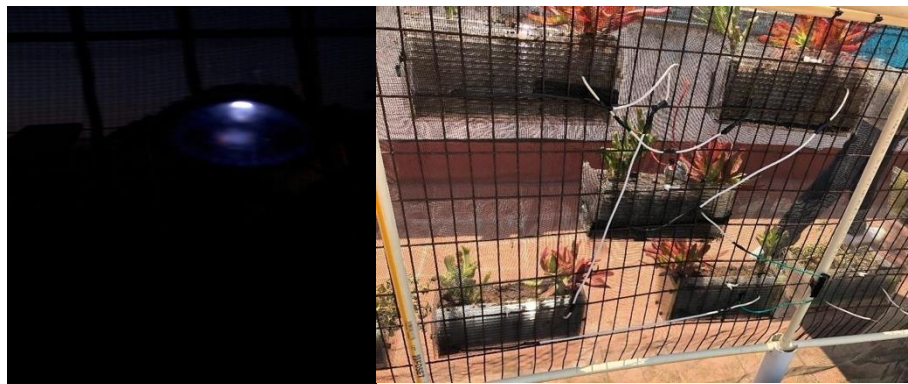


Figura 9. Led prendido y circuito eléctrico.

6.2 Medición de la energía BFV que se genera por tipo de planta y tipo de suelo.

La energía generada fue medida con ayuda de un multímetro PCE-DM 22 (Figura 10).



Figura 10. Multímetro PCE-DM 22

6.3 Medición de pH y humedad

El pH es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución, utilizamos un medidor Active Air como se observa en la figura 11, para una mayor rapidez y exactitud se realizaron pruebas de pH, Con un rango de pH: 0 (ácido) al 10 (básico). Así mismo el contenido de humedad es la cantidad de agua que el sustrato contiene en el momento de ser extraído. Una forma de conocer el contenido de humedad es pesar la muestra cuando se acaba de extraer y después de haberla mantenido durante un periodo de tiempo. Se utilizó también un medidor Active Air para determinar la humedad: 0 (seco) al 10 (húmedo) (H, 2014).



Figura 11. Medidor Active Air.

Las mediciones de humedad, pH y voltaje se realizaron 3 veces al día (mañana, tarde y noche), durante 38 días. Las mediciones se hicieron en cada subsistema modular, con el fin de determinar el tipo de planta que genera mayor cantidad de energía y conocer si el sustrato utilizado mejora la producción de energía, para ello se realizó una base de datos.

7. RESULTADOS

A lo largo del proyecto se monitorearon tres parámetros en el sistema modular tipo jardinera, con el fin de llevar un control en la generación de energía. Los parámetros que se monitorearon fueron el pH, humedad y voltaje; las mediciones se realizaron tres veces al día (mañana, tarde y noche), durante 38 días hábiles de los meses de febrero y marzo de la UAM Azcapotzalco.

A continuación, se presentan los resultados promedio del monitoreo del sistema modular tipo jardinera por subsistema modular durante los 38 días, es importante mencionar que debido a las condiciones climatológicas extremas que se tuvieron durante el proyecto, las plantas de metabolismo C3 se secaron a los 25 días, por lo que se tomaron en cuenta los datos monitoreados durante 22 días de este tipo de planta.

7.1 Monitoreo del sistema

7.1.1 pH

A continuación, se muestran las gráficas resultantes, donde se observa el comportamiento que mantuvo el pH en las mediciones que se realizaron durante el proyecto.

7.1.1.1 pH por la mañana, por subsistema.

La figura 12 muestra el pH promedio que se obtuvo en los 4 subsistemas por la mañana. Se aprecia que tres de los cuatro subsistemas se mantuvieron con un pH entre 7 y 8, siendo el CAM con tierra el que tuvo un pH promedio ligeramente mayor a 8 en algunas mediciones, esto pudo deberse al metabolismo de la planta en combinación con la materia orgánica que se encontraba en la tierra negra.

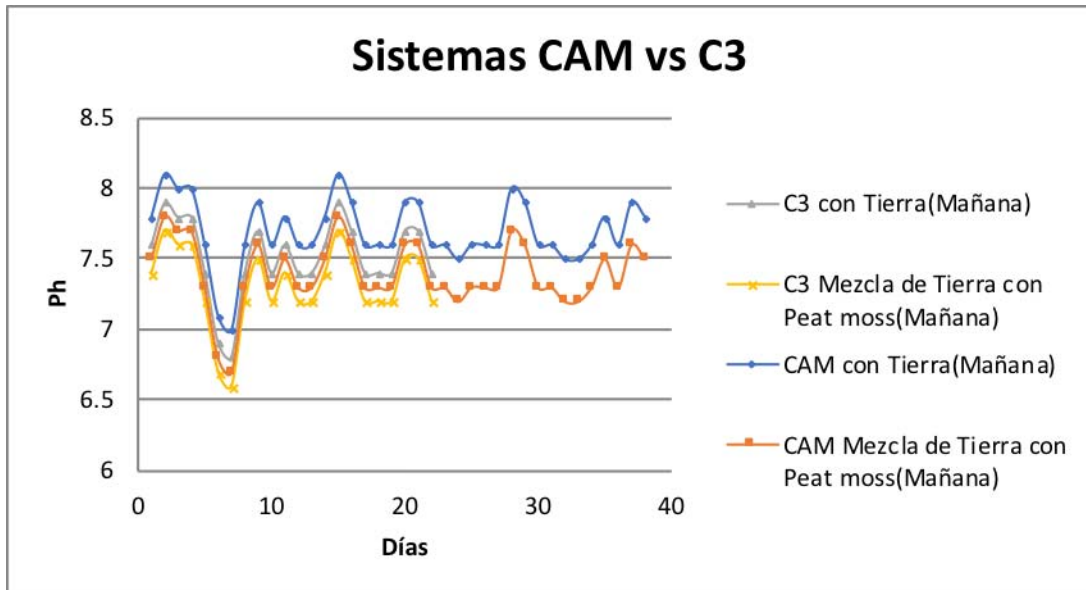


Figura 12. pH promedio por la mañana en los cuatro subsistemas.

7.1.1.2 pH por la tarde, por subsistema.

La figura 13 muestra el pH promedio que se obtuvo en los 4 subsistemas en la tarde. Se aprecia que las plantas C3 con tierra, plantas C3 con mezcla de tierra y Peat moss, plantas CAM con tierra y las plantas CAM con mezcla de tierra y Peat moss se mantuvieron entre 7 y 7.8 aproximadamente.

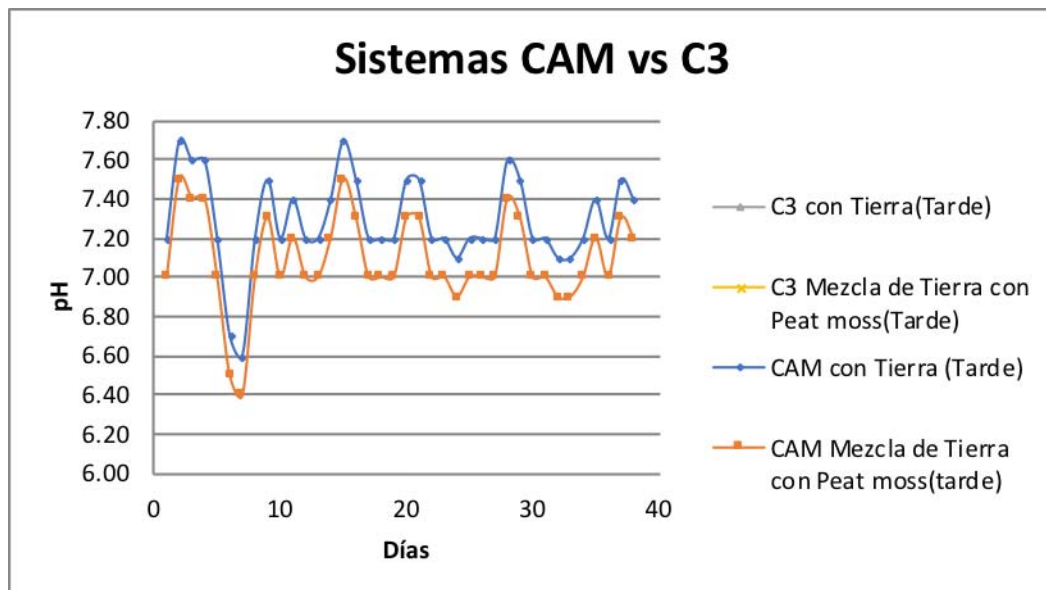


Figura 13. pH promedio por la tarde en los cuatro subsistemas.

7.1.1.3 pH por la noche, por subsistema.

La figura 14 muestra el pH promedio que se obtuvo en los 4 subsistemas en la noche. Se aprecia que las plantas C3 con tierra, plantas C3 con mezcla de tierra y Peat moss, plantas CAM con tierra y las plantas CAM con mezcla de tierra y Peat moss se mantuvo con un pH promedio entre 7 y 8.

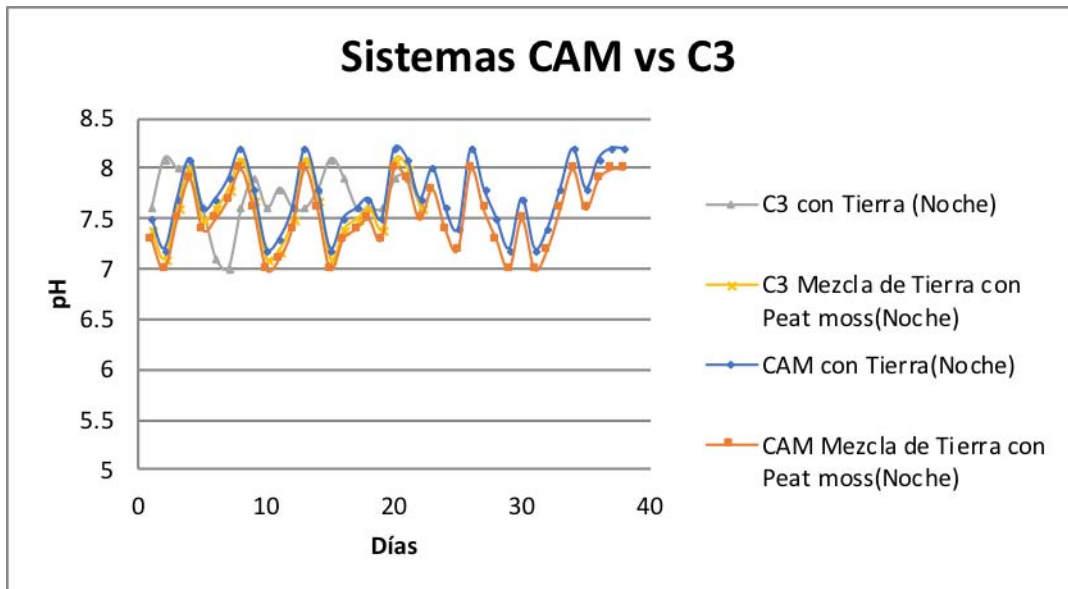


Figura 14. pH promedio por la noche en los cuatro subsistemas.

7.1.2 Humedad

A continuación, se muestran las gráficas donde se observa el comportamiento que mantuvo la humedad durante la duración del proyecto en los subsistemas.

7.1.2.1 Humedad por la mañana, por subsistema

La figura 15 muestra la humedad promedio que se obtuvo en los 4 subsistemas en la mañana. Se aprecia que las plantas C3 con tierra y plantas C3 con mezcla de tierra y Peat moss la humedad se mantuvo en un rango entre 7 y 10, las plantas CAM con tierra negra entre 6 y 8 y las plantas CAM con mezcla de tierra y Peat moss se mantuvo entre 8 y 10, la variación de la humedad es debida al metabolismo de las plantas y la tierra no retiene mucha humedad.

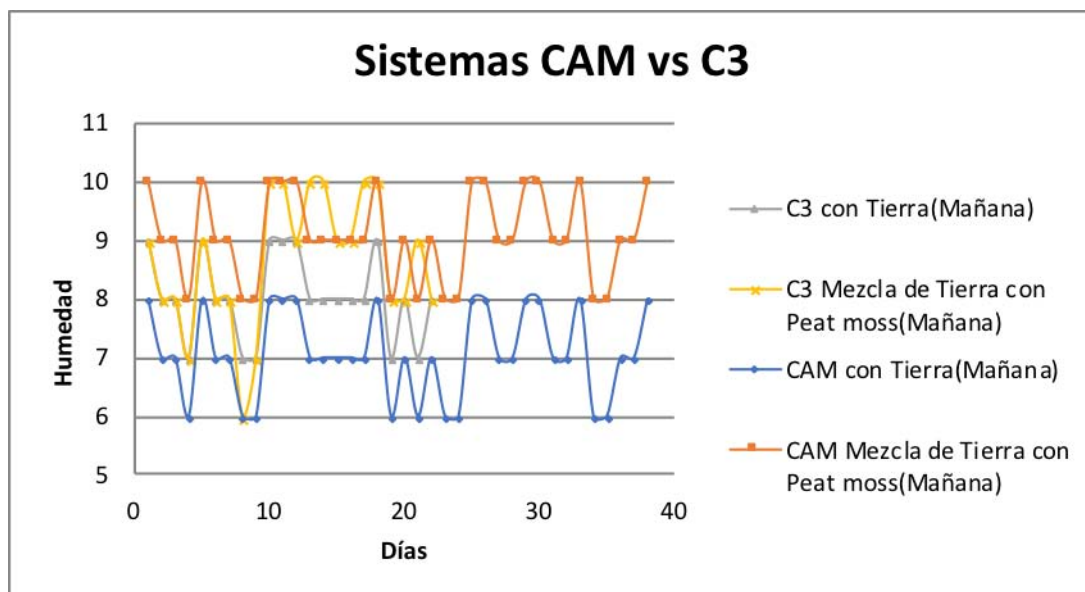


Figura15. Humedad promedio por la mañana por subsistema.

7.1.2.2 Humedad en la tarde, por subsistema.

La figura 16 muestra la humedad promedio que se obtuvo en los 4 subsistemas en la tarde. Se aprecia que las plantas C3 con tierra y plantas CAM con tierra entre mantuvieron una humedad en un rango entre 3 y 8, las plantas C3 con mezcla de tierra y Peat moss y las plantas CAM con mezcla de tierra y Peat moss se mantuvo entre 4 y 9.

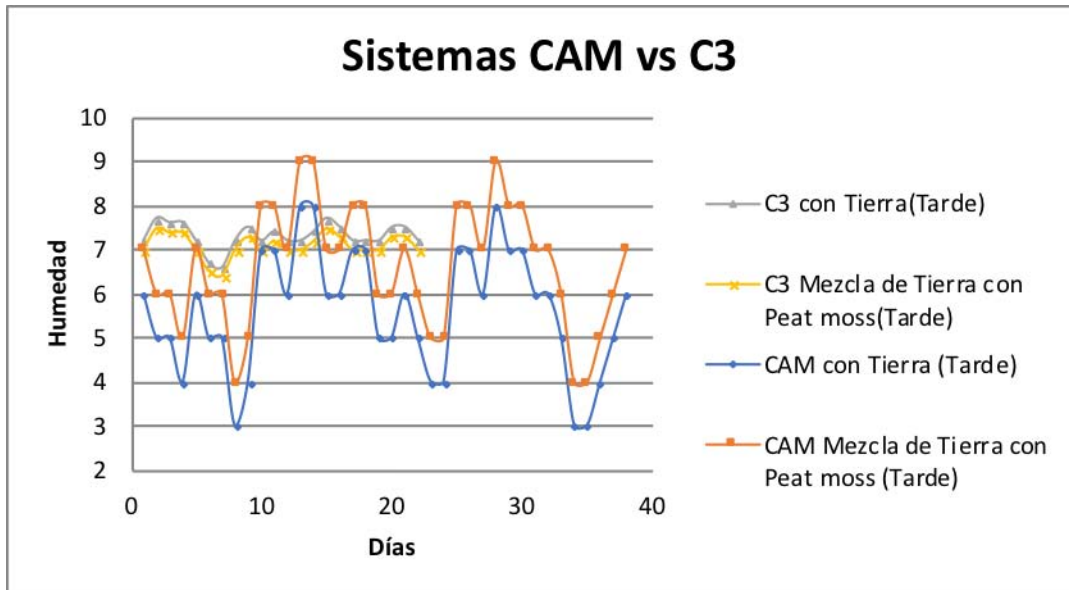


Figura 16. Humedad promedio por la tarde por subsistema.

7.1.2.3 Humedad en la noche, por subsistema.

La figura 17 muestra la humedad promedio que se obtuvo en los 4 subsistemas por la noche. Se aprecia que las plantas C3 con tierra se mantuvieron entre 7 y 8, plantas C3 con mezcla de tierra y Peat moss entre 8 y 9, plantas CAM con tierra entre 3 y 8 y las plantas CAM con mezcla de tierra y Peat moss se mantuvo entre 7 y 10.

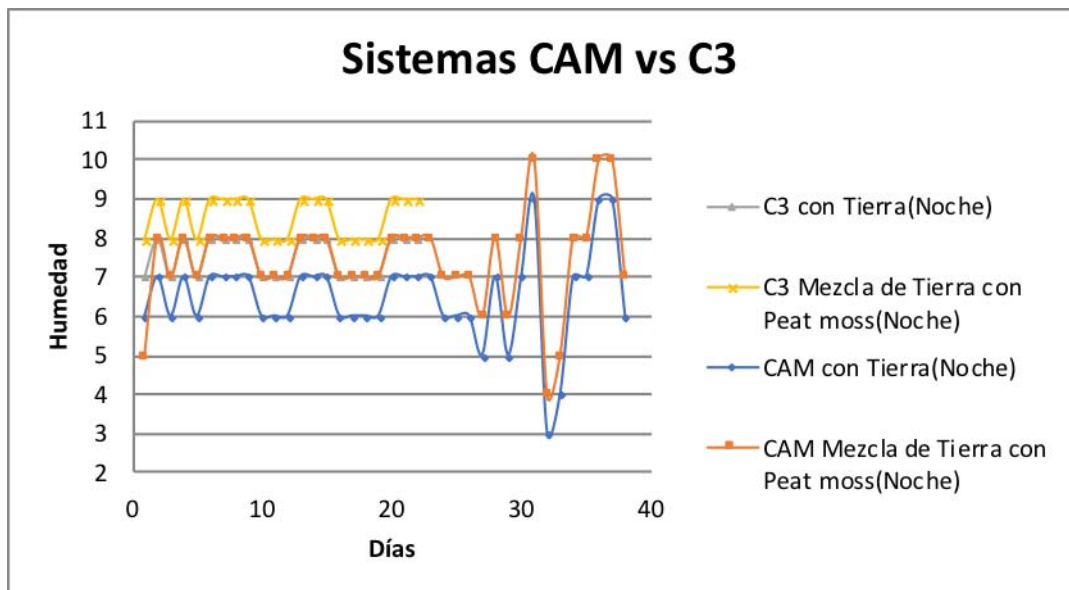


Figura 17. Humedad promedio por la noche por subsistema.

7.1.3 Voltaje

Con los datos obtenidos de las mediciones se realizó un promedio diario, esto para conocer qué cantidad de energía aproximadamente se almacena cada día en los acumuladores (Tabla 2). La energía que se obtuvo se usó para encender focos led's o acumulando energía en baterías recargables (pilas) para usarla posteriormente en dispositivos electrónicos.

Tabla 2. Promedio diario de generación de energía por subsistema.

Mediciones	CAM con tierra negra (V)	C3 con tierra negra (V)	CAM con mezcla de tierra y Peat moss (V)	C3 con mezcla de tierra y Peat moss (V)
1	3.42	2.03	3.98	2.60
2	3.53	2.15	4.10	2.72
3	3.50	2.12	4.07	2.68
4	3.47	2.08	4.03	2.65
5	3.33	1.95	3.90	2.52
6	3.52	2.13	4.08	2.70
7	3.55	2.17	4.12	2.73
8	3.53	2.15	4.10	2.72
9	3.48	2.10	4.05	2.67
10	3.37	1.98	3.93	2.55
11	3.35	1.97	3.92	2.53
12	3.25	1.87	3.82	2.43
13	3.23	1.85	3.80	2.42
14	3.18	1.80	3.75	2.37
15	3.33	1.95	3.90	2.52
16	3.35	1.97	3.92	2.53
17	3.30	1.92	3.87	2.48
18	3.35	1.97	3.92	2.53
19	3.50	2.12	4.07	2.68
20	3.43	2.05	4.00	2.62
21	3.38	2.00	3.95	2.57
22	3.38	2.00	3.95	2.57
23	3.48	0.00	4.05	0.00
24	3.57	0.00	4.13	0.00
25	3.33	0.00	3.90	0.00
26	3.27	0.00	3.83	0.00
27	3.42	0.00	3.98	0.00
28	3.27	0.00	3.83	0.00
29	3.38	0.00	3.95	0.00
30	3.15	0.00	3.72	0.00
31	3.27	0.00	3.83	0.00
32	3.53	0.00	4.10	0.00
33	3.50	0.00	4.07	0.00
34	3.57	0.00	4.13	0.00
35	3.57	0.00	4.13	0.00
36	3.50	0.00	4.07	0.00
37	3.25	0.00	3.82	0.00
38	3.22	0.00	3.79	0.00

7.1.3.1 Comparación de la energía generada por tipo de planta y de suelo.

En las siguientes graficas se muestran los promedios diarios de las mediciones realizadas durante la mañana (Figura 18), tarde (Figura 19) y noche (Figura 20), por subsistema modular.

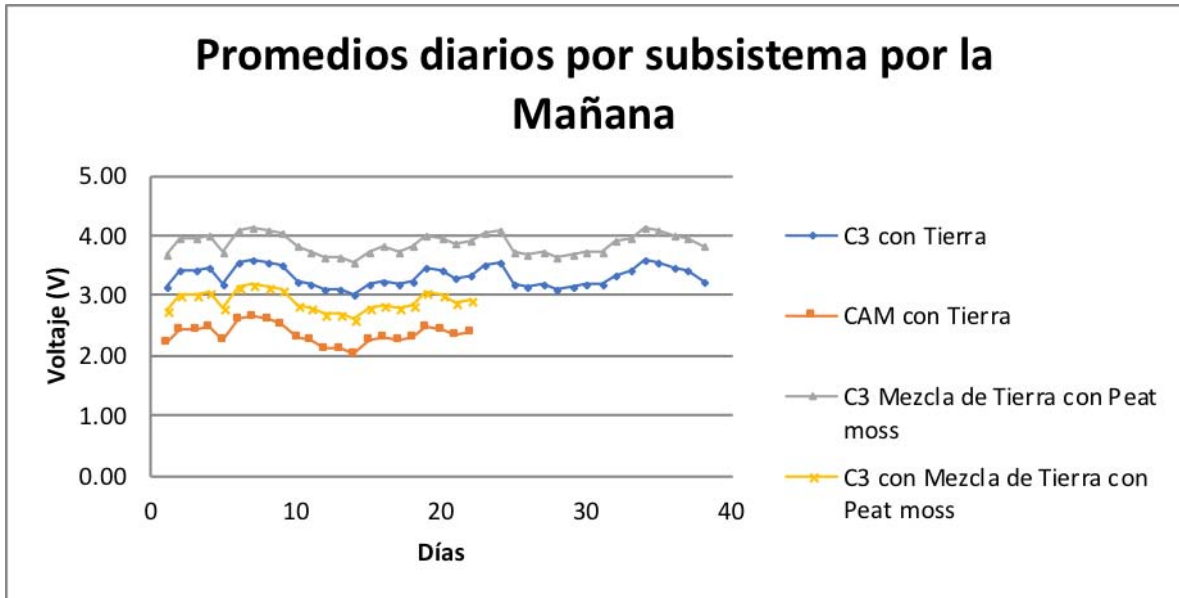


Figura 18. Promedios diarios por subsistema modular por la mañana

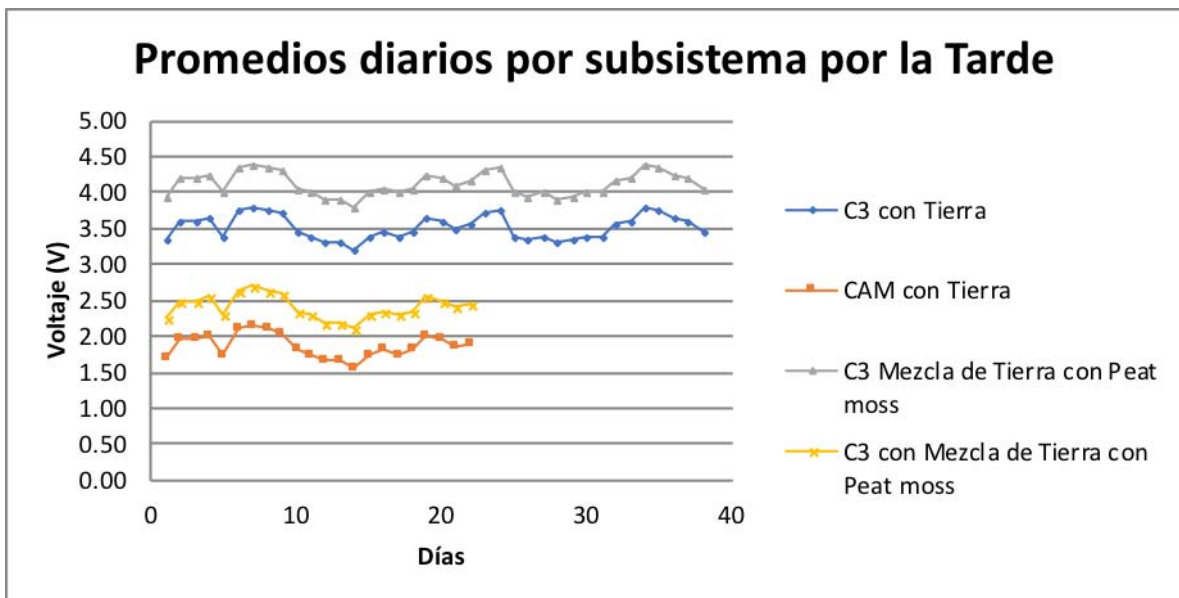


Figura19. Promedios diarios por subsistema modular por la tarde.

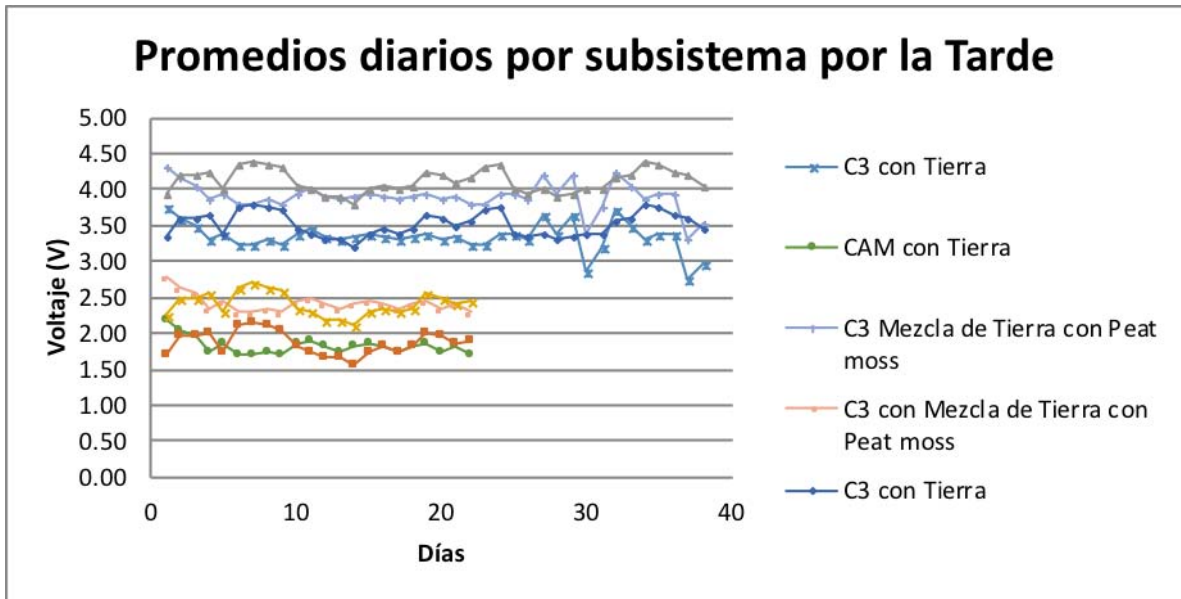


Figura 20. Promedios diarios por subsistema modular por la noche.

A continuación, se presentan la gráfica (figura 21) con los promedios diarios del voltaje obtenido de cada subsistema durante los 38 días.

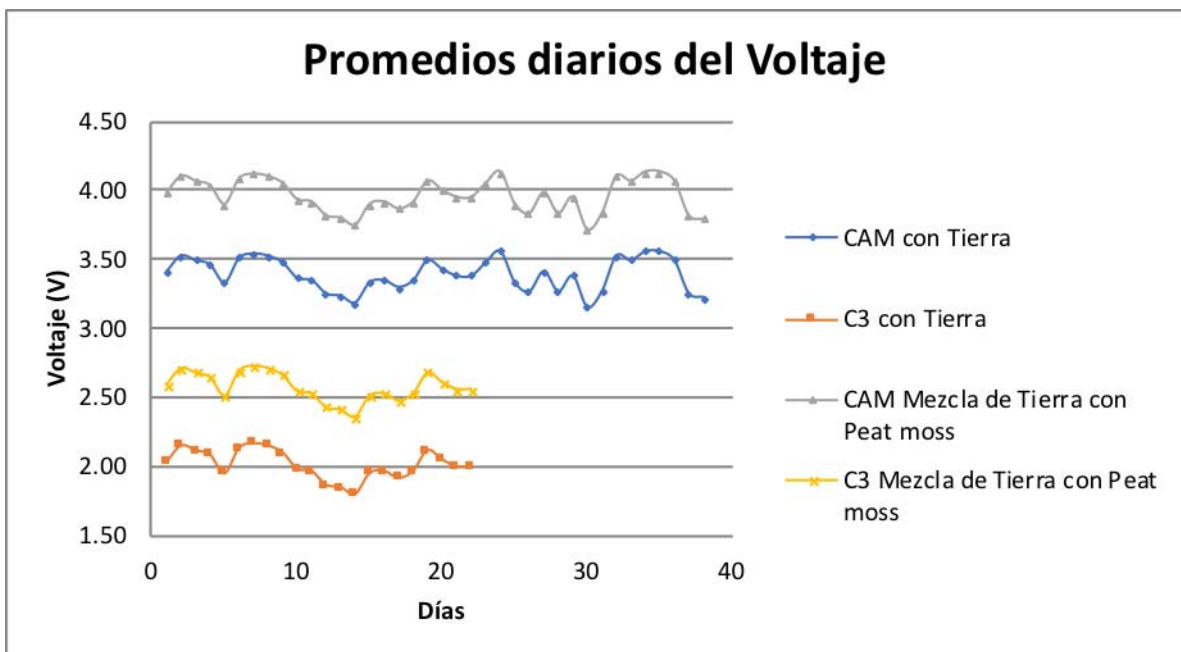


Figura 21. Promedios diarios del Voltaje por subsistema

8. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para el análisis y discusión de resultados se presentan graficas con los tres parámetros medidos por la mañana, tarde y noche de los diferentes subsistemas, con el fin de poder hacer una comparación completa sobre la generación de energía BFV.

8.1 Medición de parámetros en las plantas C3 y CAM con Tierra negra

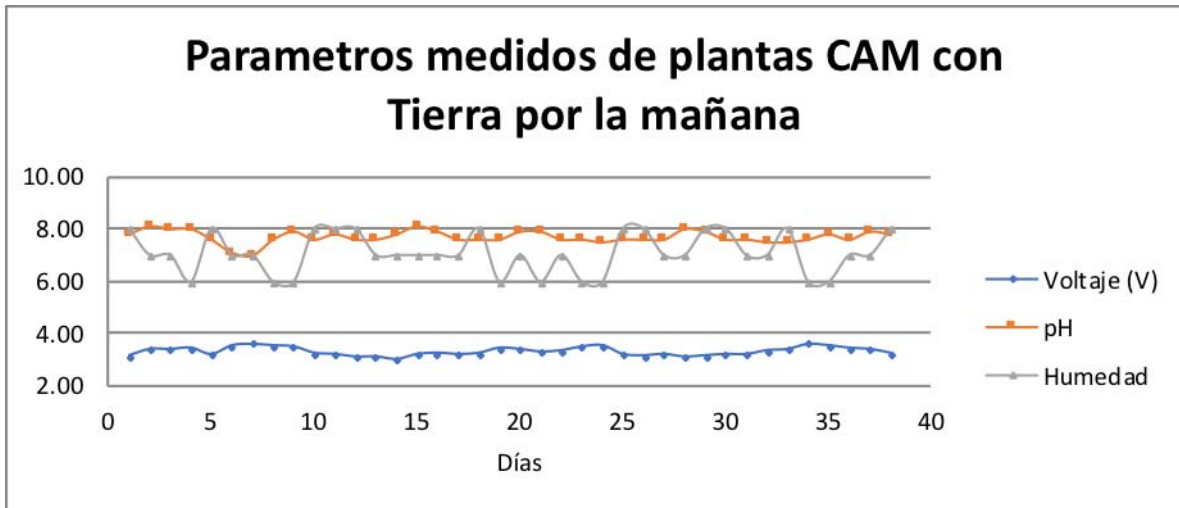


Figura 22. Parámetros de plantas CAM con tierra por la mañana

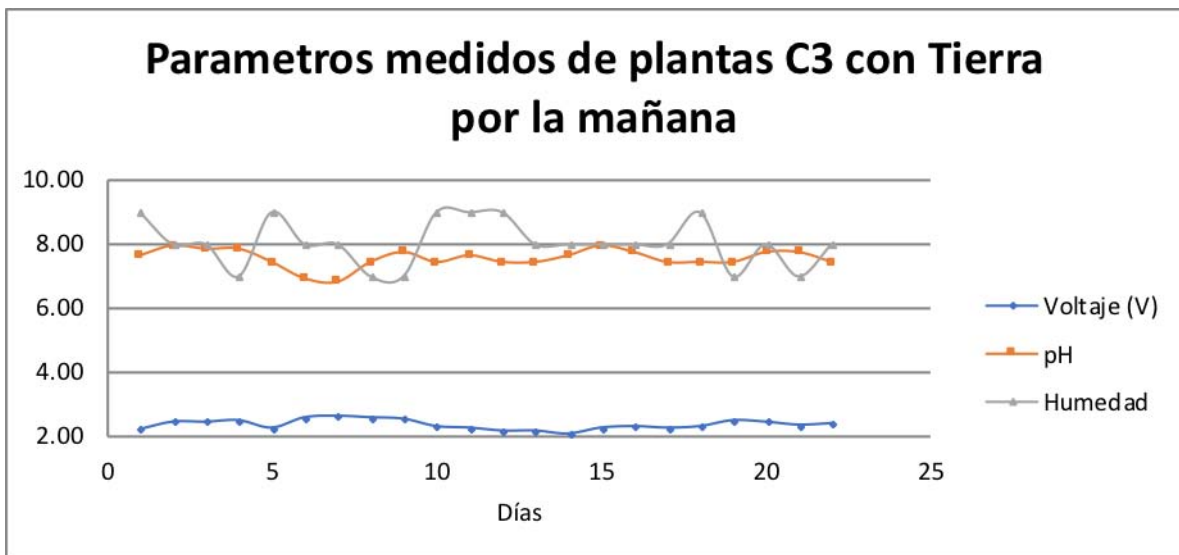


Figura 23. Parámetros de plantas C3 con tierra por la mañana.

En las gráficas anteriores (figura 22 y 23) se aprecia que las plantas con metabolismo CAM generan un voltaje superior a 3 volt's a diferencia de las plantas con metabolismo C3 donde el voltaje generado es inferior a 3 volt's. El pH en ambos se mantuvo entre 7 y 8, y la humedad en el caso de las plantas C3 se encontró en un rango superior entre 7 y 9 a las plantas CAM que tuvieron humedad de entre 6 y 8.

En este caso las plantas que generaron mayor energía fueron las CAM con una humedad inferior a las C3 y con un pH ligeramente alcalino.

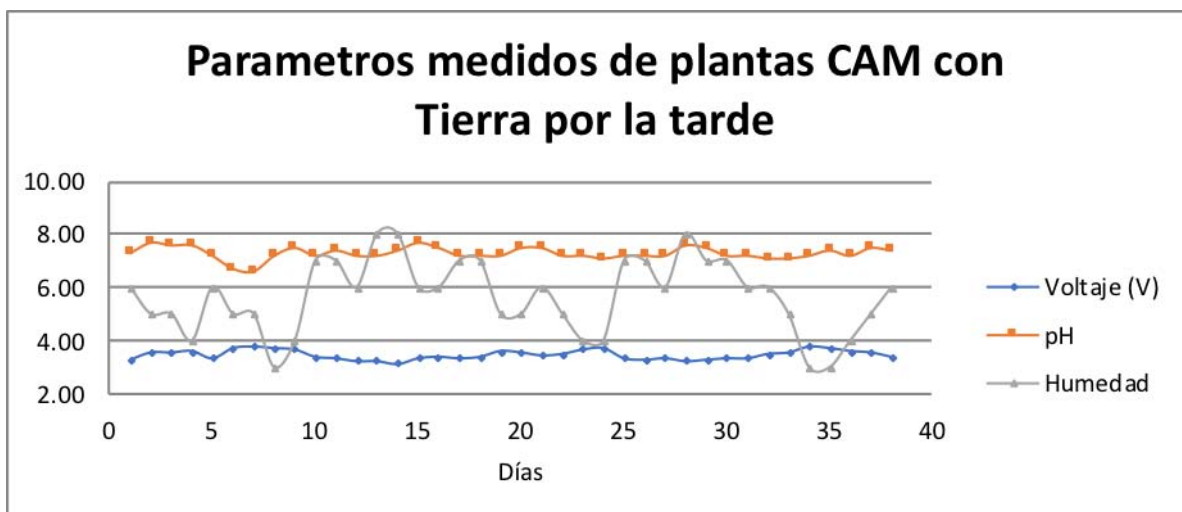


Figura 24. Parámetros de plantas CAM con tierra por la tarde.

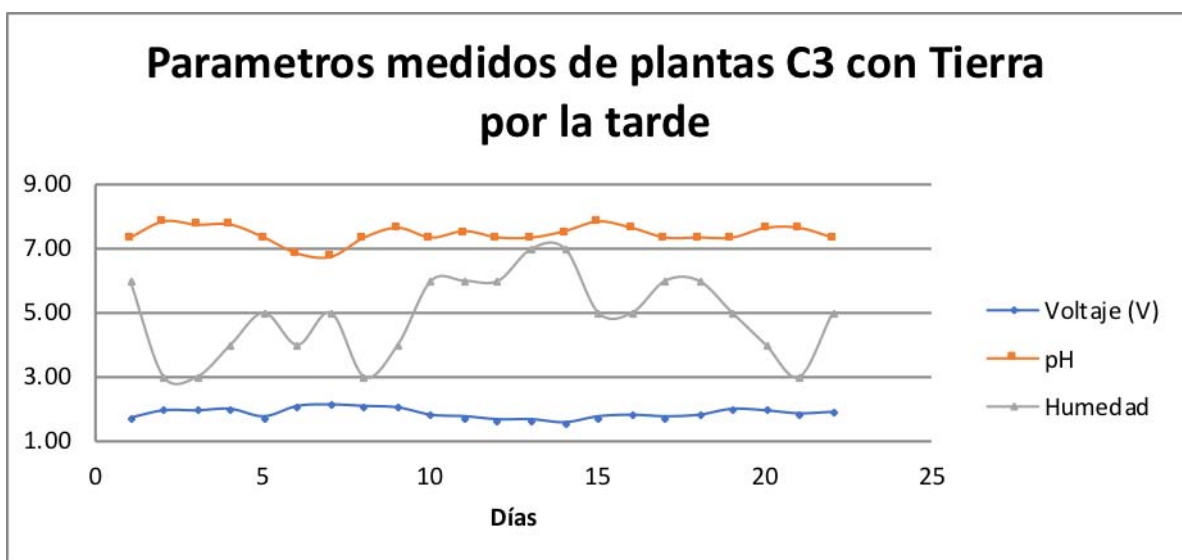


Figura 25. Parámetros de plantas C3 con tierra por la tarde.

En las gráficas anteriores (figura 24 y 25) se aprecia que las plantas con metabolismo CAM generan un voltaje de 3 a 3.8 volts aproximadamente, a diferencia de las plantas con metabolismo C3 donde el voltaje generado es de 1.9 a 2.1 volts. El pH en ambos se mantuvo ligeramente alcalino entre 7 y 8, las variaciones en la humedad fueron cambiantes, posiblemente por las condiciones climatológicas por la tarde, en el caso de las plantas C3 se encontró en un rango entre 3 y 7 a las plantas CAM que tuvieron humedad de entre 3y 8.

En este caso las plantas que generaron mayor energía fueron las CAM con una humedad mayor a las C3 y con un pH ligeramente alcalino.

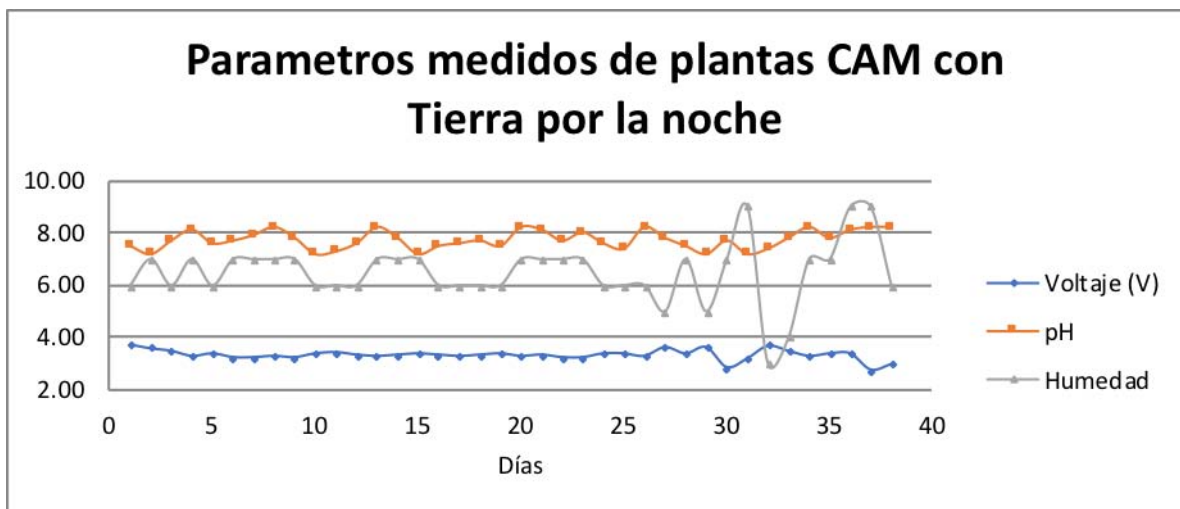


Figura 26. *Parámetros de plantas CAM con tierra por la noche.*

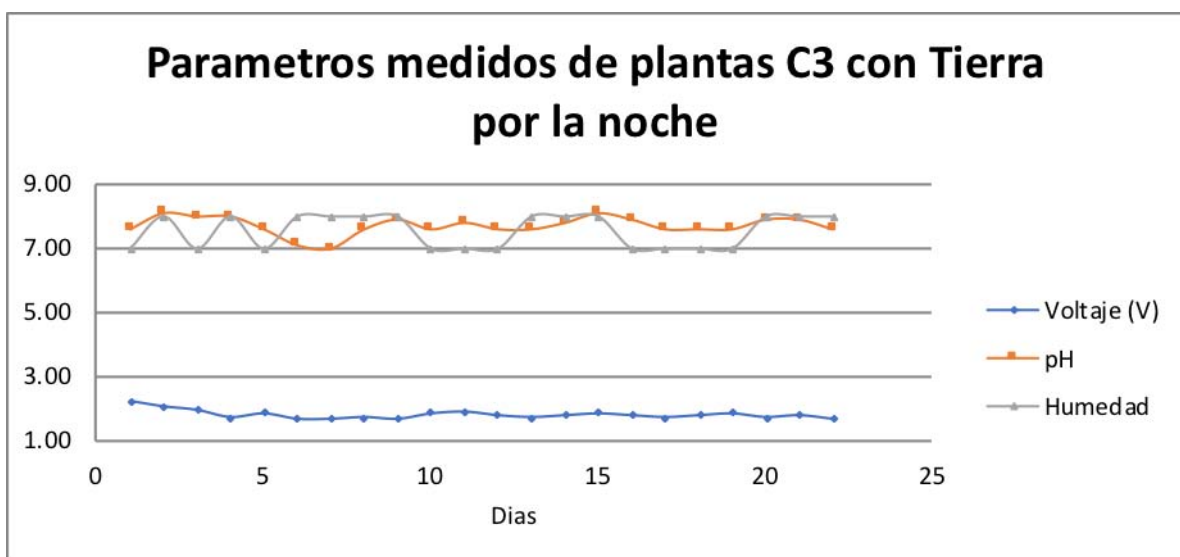


Figura 27. *Parámetros de plantas C3 con tierra por la noche.*

En las gráficas anteriores (figura 26 y 27) se muestra que el voltaje no vario mucho con respecto al medido por la tarde, casi se encuentra en los mismos rangos, lo mismo ocurrió con las mediciones del pH, el parámetro que variante fue el de la humedad ya que en las plantas C3 se aprecia una humedad entre 7 y 8, y en las CAM una variación de entre 6 y 7.

En este caso las plantas que generaron mayor energía fueron las CAM con una humedad menor a las C3 y con un pH ligeramente alcalino.

Al analizar todas las gráficas anteriores se observa que en todos los casos las plantas de metabolismo CAM generaron mayor energía, mantuvieron un pH ligeramente alcalino de entre 7 y 8 y una humedad con rangos de entre 6 y 8, a diferencia de las C3 donde fueron inferiores en la generación de energía.

8.2 Medición de parámetros en Plantas C3 y CAM con Mezcla de Tierra negra y Peat moss.

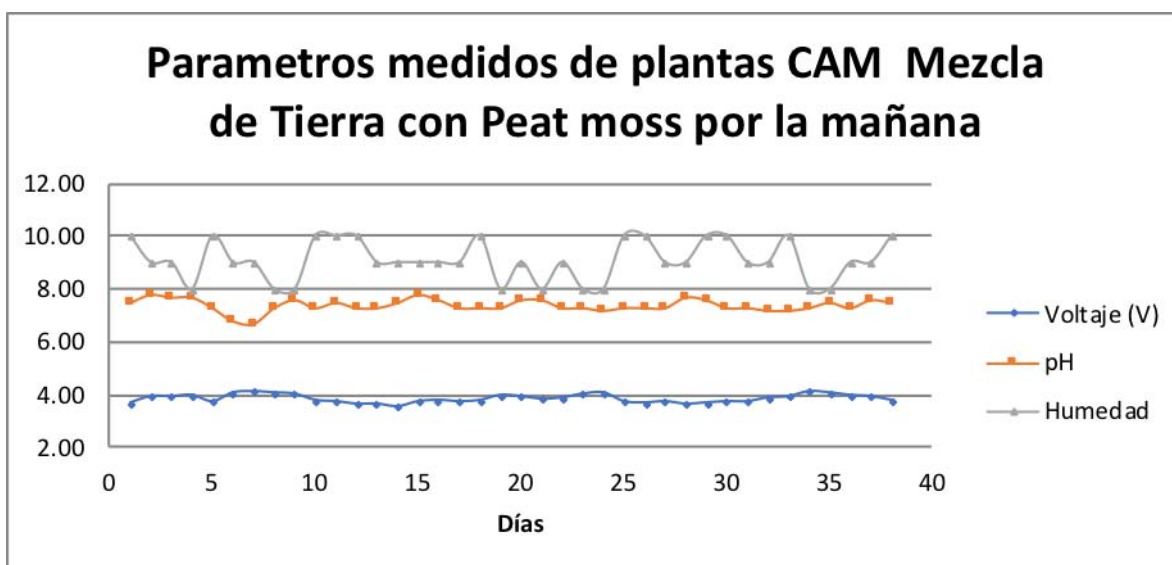


Figura28. Parámetros de plantas CAM con Mezcla de tierra y Peat moss por la mañana.

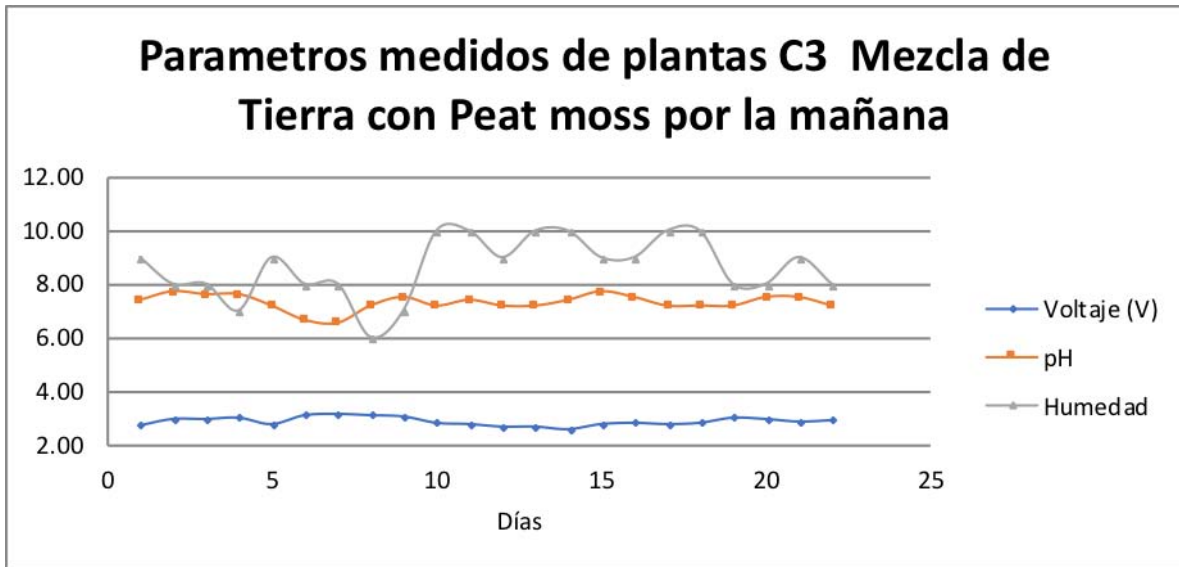


Figura 29. Parámetros de plantas C3 con Mezcla de tierra y Peat moss por la mañana.

En las gráficas anteriores (figura 28 y 29) se observa que las plantas con metabolismo CAM generan un voltaje superior a 3.5 volt's a diferencia de las plantas con metabolismo C3, donde el voltaje generado es inferior a 3.5 volts. El pH en ambos se mantuvo entre 6 y 7, la humedad en el caso de las plantas C3 se encontró en un rango superior a 6, y las plantas CAM tuvieron una humedad superior a 8.

En este caso las plantas que generaron mayor energía fueron las CAM con una humedad superior a las C3 y con un pH alcalino.

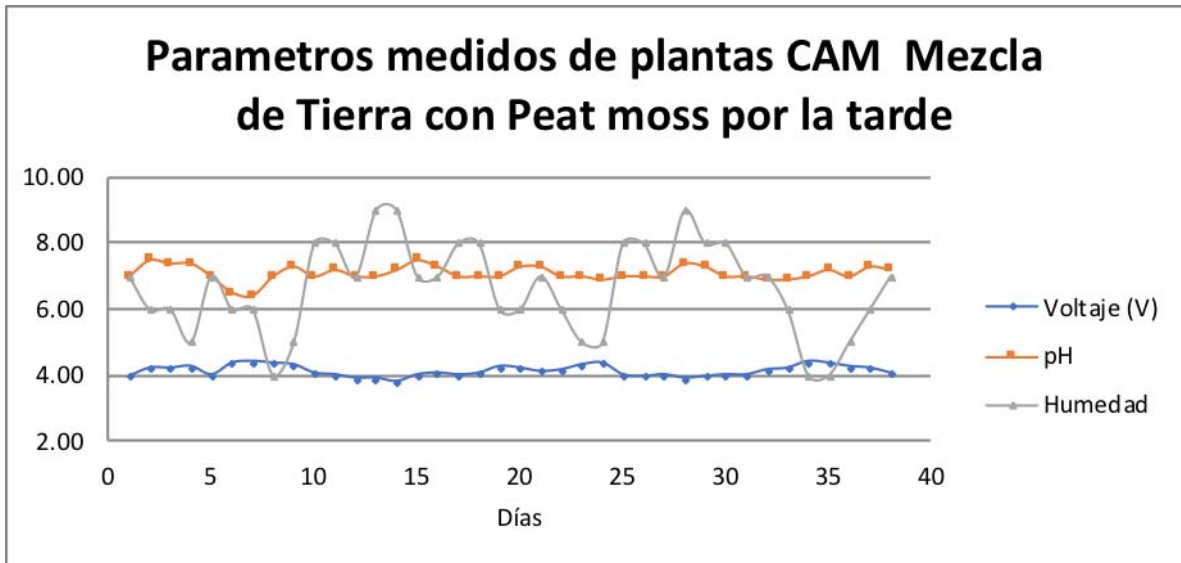


Figura 30. Parámetros de plantas CAM con Mezcla de tierra y Peat moss por la tarde.

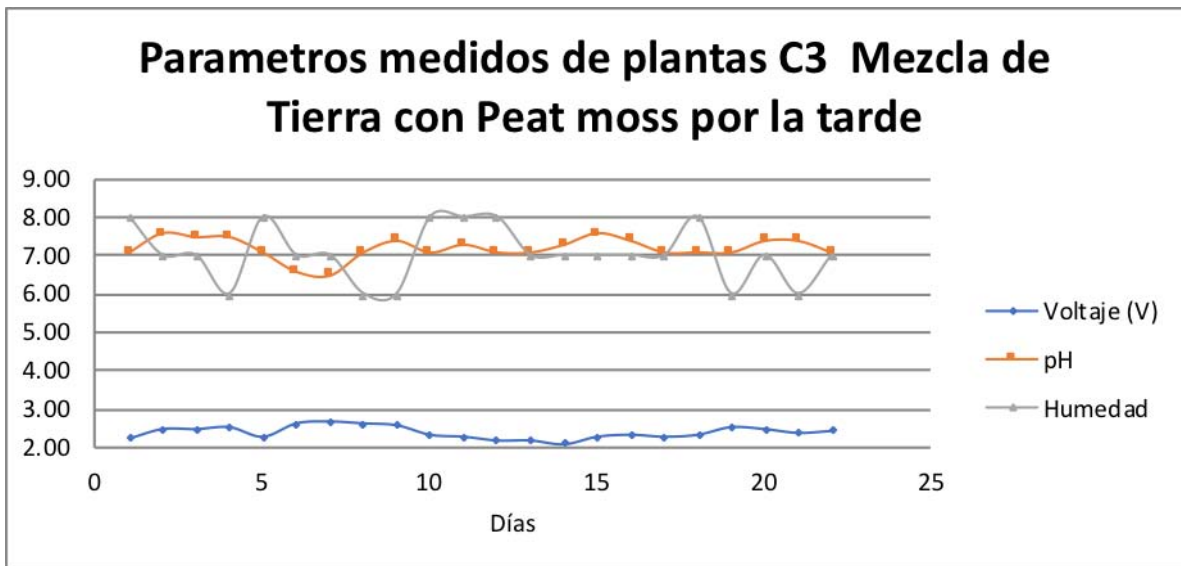


Figura 31. Parámetros de plantas C3 con Mezcla de tierra y Peat moss por la tarde.

En las gráficas (figura 30 y 31) se observa que las plantas con metabolismo CAM generan un voltaje superior a 3.5 volts llegando a los 4 Volts, en cambio en las plantas con metabolismo C3, el voltaje generado es inferior a tres volts. El pH en ambos casos se mantuvo en un rango de 6 a 8, la humedad en el caso de las plantas C3 se encontró en un rango superior a 6, y las plantas CAM presentaron una humedad superior a 4.

Con lo anterior podemos decir que las plantas que generaron mayor energía por la tarde fueron las plantas con metabolismo CAM con un pH variante entre ácido y alcalino.

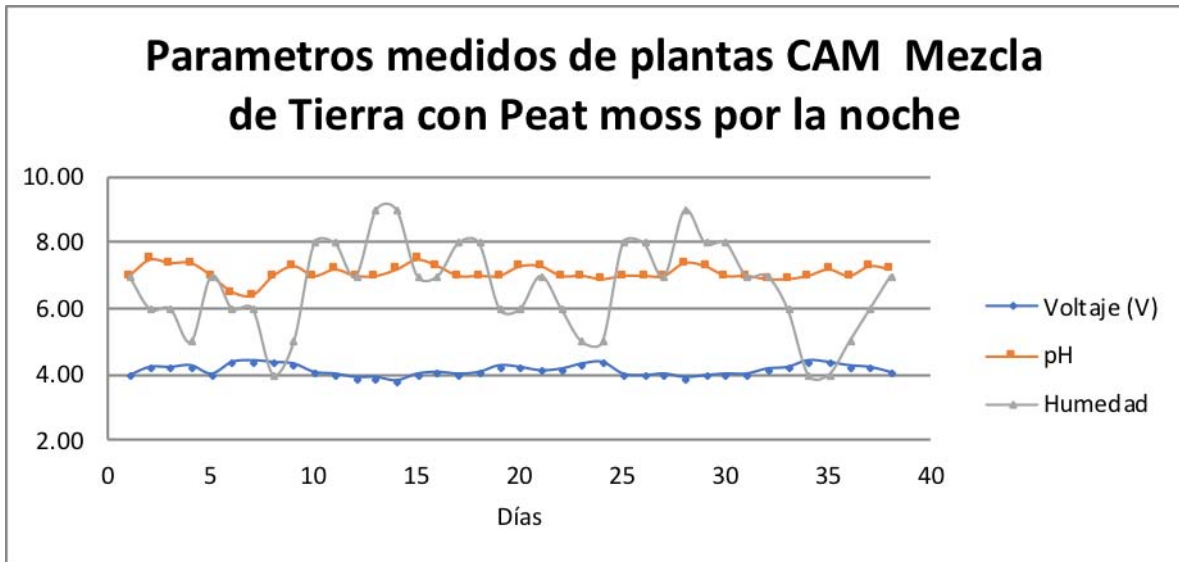


Figura 32. *Parámetros de plantas CAM con Mezcla de tierra y Peat moss por la noche.*

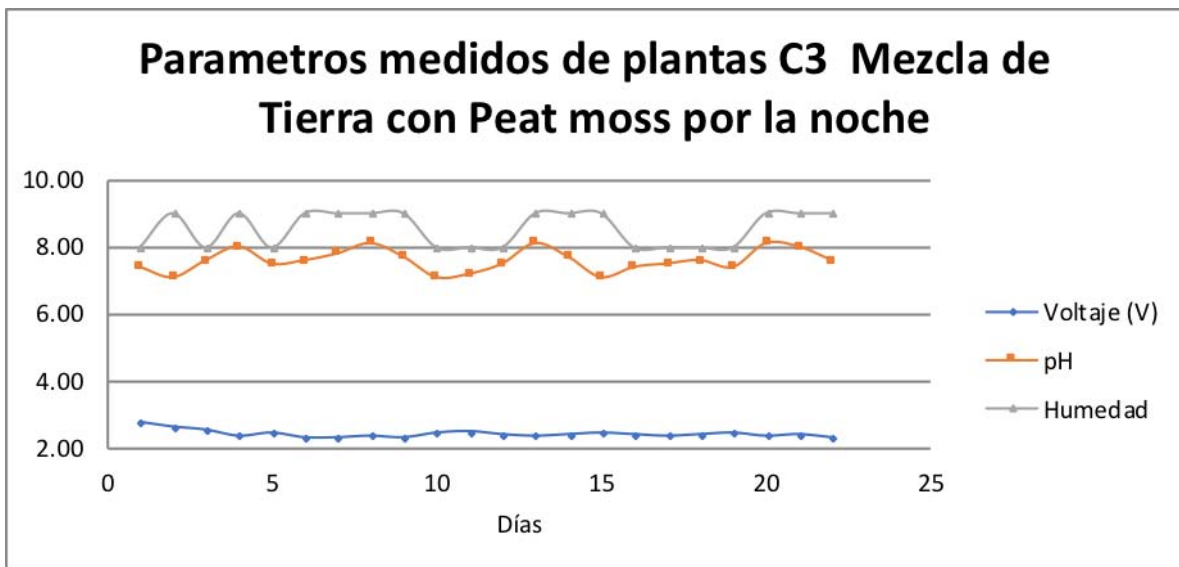


Figura 33. *Parámetros de plantas C3 con Mezcla de tierra y Peat moss por la noche.*

Se percibe en las gráficas (figura 32 y 33) que las plantas con metabolismo CAM generan mayor energía con un voltaje superior a 3.8 volts llegando a los 4.4 Volts, en las plantas con metabolismo C3, el voltaje es inferior a 3 volts, el pH en plantas con metabolismo C3 se mantuvo en un intervalo de 7 a 8, mientras tanto en las plantas con metabolismo CAM se mantuvo en un intervalo de 6 a 8, la humedad

en las plantas C3 se encontró en un rango superior a 8, y las plantas CAM tuvieron humedad superior a 4, es decir, las plantas CAM son las que generan mayor energía, comparando con las plantas de metabolismo C3.

8.3. Voltaje generado durante el proyecto

De acuerdo con los resultados mostrados anteriormente, durante el proyecto se llegó a generar una cantidad de energía de aproximadamente 380 volts, en la siguiente tabla se muestra el total de energía generada por cada subsistema, así como, el total de energía generado por el sistema.

Tabla 3. Voltaje generado durante el proyecto en el sistema.

CAM con Tierra	C3 con Tierra	CAM Mezcla de Tierra con Peat moss	C3 Mezcla de Tierra con Peat moss	Total
129.02 v	44.32 v	150.56 v	56.78 v	380.68 v

Es importante mencionar que se mantuvo una intensidad de corriente de 0.1 A, y conforme lo establecido en la ley de potencia $W = (V)(A)$, la energía útil de haberse almacenado es de alrededor de 38 W, la cual podría usarse en algún dispositivo electrónico.

10. CONCLUSIONES

Conforme a los resultados obtenidos de la generación de energía biofotovoltaica en un sistema modular tipo jardinera, con dos tipos de suelo (tierra negra y mezcla de tierra negra con Peat moss) y dos tipos de metabolismo de plantas (CAM y C3), se concluye que:

La generación de energía BFV se produce gracias al proceso de fotosíntesis de las plantas. La cantidad de energía depende mucho del suelo y del metabolismo de las plantas, así como, las condiciones climatológicas, los parámetros tanto el pH y Humedad.

En los diferentes subsistemas se generó energía BFV, es notorio que la humedad es un parámetro importante para la generación de energía, es decir, hubo casos donde entre más humedad más energía, algunas ocasiones con una humedad arriba de 7 junto con un pH por debajo de 7 aumentaban la eficacia en la generación de energía.

La generación de energía BFV en todos los subsistemas fue de un voltaje mayor a 1.4 volts, fue visible que el uso de Peat moss ayudo al aumento de generación de energía, el ejemplo más notorio se visualiza en los subsistemas de plantas C3 con tierra negra y con mezcla de tierra con Peat moss pues, en el subsistema de plantas con metabolismo C3 y tierra negra, se obtuvo el menor voltaje de aproximadamente 1.5 volts, en el subsistema con el mismo tipo de planta pero con mezcla de tierra negra con Peat moss el menor voltaje obtenido fue de 2.1 volts. Claramente se muestra un aumento en la generación de energía por el uso de este sustrato. En estos subsistemas se suspendieron las mediciones ya que no resistieron los cambios drásticos climatológicos ocurridos durante el proyecto.

En los subsistemas con plantas de metabolismo CAM se presentó una mayor generación de energía BFV, siendo el subsistema de plantas CAM que tenían mezcla de tierra negra con Peat moss, la que genero voltajes de hasta 4.3 volts por la tarde.

La energía total generada en este proyecto fue de alrededor de 38 W, de haberse almacenado en una pila para su posterior uso, se podría haber ocupado para la

carga de baterías para celulares o para lámparas de baja potencia como son las de focos led.

Por lo que finalmente podemos concluir que la nueva tecnología de energía BFV usando plantas con metabolismo CAM, es una buena opción para la generación energía limpia, sin embargo, se necesita desarrollar aún más esta tecnología puesto que, consideramos que las aplicaciones son limitadas, debido que para la generación de cantidades mayores de energía BFV aún se requiere de espacios extensos y un mayor número de plantas.

11. RECOMENDACIONES

- Es importante elegir plantas con metabolismo CAM, debido a su gran durabilidad para climas muy extremos como se presentan al Nor-Poniente de la Ciudad de México.
- En el caso del sustrato, es conveniente elegir el sustrato que ayude al crecimiento, aireación y drenaje de las plantas, como el Peat moss.
- En la colocación, tomar en cuenta el lugar donde se va a encontrar el sistema para considerar la resistencia de los materiales a ocupar.
- Para la generación de energía depende mucho de las condiciones climatológicas, es decir, la energía es variable.
- Sobre el sistema eléctrico, es importante elegir adecuadamente los electrodos para tener un buen flujo de electrones. Usar materiales de cobre y hierro son convenientes, aunque existen muchos más.
- Es necesario continuar con investigaciones sobre los sistemas BFV, ya que existen muchas limitaciones en la aplicación de esta tecnología.

12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarado, M., Solano, J. (2002). Producción de sustratos para viveros, Costa Rica.
- Becerra, M. (2014). Fuentes de energía limpia en México. Forbes México. Obtenido de: <https://www.forbes.com.mx/fuentes-de-energia-limpia-en-mexico/>
- Berla, B.M., Saha, R., Immethun, C.M., Marañas, C.D., Moon, T.S. y Pakrasi, H.B. (2013). *Microbial*, 4, 246.
- Brook, R.D., Brook, J.R., Urch, B., Vincent, R., Rjagopalan, S. y Silverman, F. (2002). Inhalation of Fine Particulate Air Pollution and Ozone Causes Acute Arterial Vasoconstriction in Healthy Adults. 105:1534-1536.
- Conferencia de las Partes 21^{er} período de sesiones París (COP 21).(2015). Obtenido de: <http://www.cop21paris.org/>
- Campbell,N., Reece,J.(2005). *Biology*. Pearson.
- Curtis, H., Schnek, A., Massarini, A. (2008). *Biología*. Perú: Médica Panamericana.
- Goheen, S.C., Gaither, K., Anantamula, S.M., Mong, G.M., Sasser, L.B. y Lessor, D. (2004). Corona Discharge Influences Ozone Concentrations Near Rats,*Bioelectromagnetics* 25:107-113.
- González, A., Cañizare, P, Rodríguez, M., Fernández, F. J. y Lobato, J. (2012). Microbial fuel cell with an algae-assisted cathode: A preliminary assessment. *Journal of Power Sources*, 242, 638-645.
- Grünhage, L., y Jäger, H.J. (2003). From critical levels to critical loads for ozone: a discussion of a new experimental and modelling approach for establishing flux–response relationships for agricultural crops and native plant species, *Environmental Pollution* 125: 99-110.
- H, C. (2014). Medidor ActiveAir. Obtenido de <http://www.culturah.com/medidor-de-ph-y-humedad-para-tierra-sustrato.html#.VK9ulyuG9ps>
- Hibberd, J.M. y Quick, W.P., (2002). Characteristics of C4 photosynthesis in ítems and petioles of C3 flowering plants. *Cience Nature*, 415: 451-454.
- Hydro environment (2018). ¿Qué es el Peat Moss?, Estado de México. Obtenido de: http://hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=355
- IAAC. (2014). Moss Voltaic. Institute for Advanced Architecture of Catalonia. Obtenido de: <https://iaac.net/research-projects/self-sufficiency/moss-voltaics/>

IEA. (2016). CO₂ emissions from fuel combustion. International Energy Agency. Obtenido

de:https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CO2EmissionsfromFuelCombustion_Highlights_2016.pdf

INECC. (2016a). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Obtenido de:<https://www.gob.mx/inecc/documentos/informe-de-la-situacion-del-medio-ambiente-en-mexico-compendio-de-estadisticas-ambientales-indicadores-clave-de-desempeno-ambiental-y-de-crecimiento-verde-edicion-2015>

INECC. (2016b). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Disponible en:<https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>

Masadeh, A. ,Kuruvinashetti, K., Shahparnia, M., Pillay, P. yPackirisamy, M. (2017). Electrochemical Modeling and Equivalent Circuit Representation of a Microphotosynthetic Power Cell. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 64:2, 1561-1571.

McCormick, A.J., Bombelli, P., Bradley, R., Thorne, R., Wenzel, T., Howe, C.J. (2015). Biophotovoltaics: oxygenic photosynthetic organisms in the world of bioelectrochemical systems. *Energy and Environmental Science* 8:1092-1109.

Muñoz, R. y Palomera, J. (2002). Análisis del estado de la calidad del aire por ozono en la zona metropolitana del Valle de México ante dos límites de protección a la salud (Proyecto de modificación a la norma NOM-020-SSA-1993). IV Simposio de Contaminación Atmosférica. García-Colín & Varela Ham (Eds.) UAM-Colegio Nacional, México.

Olmedo, F. (2013). Energía biofotovoltaica, nueva fuente de energía renovable producida a partir de musgos y algas. Biodisol. Obtenido de: <http://www.biodisol.com/biocombustibles/energia-biofotovoltaica-nueva-fuente-de-energia-renovable-producida-a-partir-de-musgos-y-algas/>

ONU. (1998). Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Organización de las Naciones Unidas. Obtenido de: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>

Sánchez de P, M., Prager, Ma., Naranjo, R., Sanclemente, O. (2012). El suelo, su metabolismo, ciclaje de nutrientes y prácticas agroecológicas. *Agroecología*, 7, 34.

Sarmiento, L. (2017). Propiedades y usos de la tierra negra. 09/04/18, de Jardineriaon. Obtenido de: <https://www.jardineriaon.com/propiedades-usos-la-tierra-negra.html>

SEDEMA (2008). Norma ambiental para el distrito federal NADF-013-RNAT-2007, que establece las especificaciones técnicas para la instalación de sistemas de naturación de la Ciudad de México. Secretaría de Medio Ambiente de la CDMX. Publicada en la Gaceta Oficial del Distrito Federal el 24 de diciembre de 2008.

SEMARNAT. (2013). Estrategia Nacional de Cambio Climático Visión 10-20-40. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.

SENER. (2016). Prospectiva de Energías Renovables 2016-2020. Secretaría de Energía. Obtenido de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/177622/Prospectiva_de_Energias_Renovables_2016-2030.pdf

Shahparnia, M. (2015). Micro photosynthetic power cell for power generation from photosynthesis of algae., de Technology.

Sotysolar (2017). ¿Qué es la energía verde? Obtenido de: <https://sotysolar.es/blog/que-es-la-energia-verde>

Stott, R. (2016), Sistema modular de muros verdes genera electricidad a partir del musgo, ArchDaily, México.

Turégano, R., Velasco, J.A., Martínez, M.C. y Gracia, A. (2009). Arquitectura bioclimática y urbanismo sostenible (volumen I). Zaragoza, España: Prensas Universitarias de Zaragoza.

Verbruggen, N., Hermans, C. y Schat, H. (2009). Molecular mechanisms of metal hyperaccumulation in plants. *New Phytologist*.

Yeang, K. (2001). El rascacielos ecológico. Gustavo Gili, Barcelona.

13. Anexos

Anexo A. Permiso para el desarrollo del proyecto

Ciudad de México a 15 de enero de 2018

**COMITÉ DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA AMBIENTAL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD AZCAPOTZALCO**

PRESENTE

Por este medio les informo que les otorgo autorización a los alumnos Aguilera Martínez D. Jair y Olguín Gómez Daniel de la división de CBI de la carrera Ingeniería Ambiental para ocupar un espacio de la azotea del edificio O, con el fin de desarrollar el Proyecto de Integración **"Generación de energía biofotovoltaica en un sistema modular de muro verde"**

Se planea que el Proyecto de Integración concluyan a finales del trimestre 18-I.

Sin más por el momento aprovecho la ocasión para enviarles un cordial saludo.

ATENTAMENTE

M.C. Manuel Domingo Gordon Sánchez
Profesor-Investigador
Depto. de Energía



Firma