

Sistemas fotovoltaicos flotantes

<https://doi.org/10.51378/ilia.vi1.8528>

M. Dávalos¹, A. Díaz¹, F. Guzmán¹, A. Mejía¹, I. Sánchez¹

¹Departamento de Ciencias Energéticas y Fluídicas, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, UCA, El Salvador

E-mail: rdgomez@uca.edu.sv

Resumen — El propósito de esta investigación es establecer un punto de partida para la realización de futuros proyectos de generación con sistemas fotovoltaicos flotantes. Esta tecnología ha sido utilizada en diferentes países alrededor del mundo y puede ser fundamental para una revolución en la matriz energética en El Salvador, dado que busca tanto impulsar proyectos de energía solar renovable que cumple con los objetivos sostenibles del país, como también liberar el espacio que hubiera sido utilizado por los equipos de un sistema fotovoltaico instalado en tierra. A lo largo del documento se estudia etapa por etapa, cómo es el funcionamiento de estas plantas, cuál ha sido su propósito de diseño, su funcionalidad, su potencial en el territorio salvadoreño combinado con centrales hidroeléctricas, se realizará un breve estudio de los componentes y un análisis de viabilidad en cuanto al desarrollo de un proyecto de gran magnitud, de igual forma se mencionan diferentes aplicaciones con otras tecnologías y cómo el sistema fotovoltaico flotante puede trabajar en conjunto con ellas.

Palabras Clave — sistema fotovoltaico flotante, sistema híbrido, estructura flotante, energía fotovoltaica

I. INTRODUCCIÓN

El escrito que se presenta a continuación documenta la información que se ha obtenido a lo largo de la investigación realizada con la finalidad de construir un documento que pueda ser utilizado como base para un futuro proyecto que busque abordar la tecnología de sistemas fotovoltaicos flotantes.

La matriz energética nacional es a la actualidad muy diversa, dentro de esa diversidad aún se puede identificar qué fuentes con alto potencial como lo son la solar (8.5 %) [1], aún no son explotadas en magnitudes considerables a comparación de por ejemplo la generación por fuentes hidroeléctricas (22.86 %) [1].

La generación fotovoltaica presenta una enorme oportunidad de desarrollo y a su vez presenta retos que deberán ser superados para poder considerar a la generación de este tipo una alternativa que pueda llegar a ser el principal fuerte de una matriz energética. Dos de las barreras más importantes y difíciles de superar son la necesidad de almacenaje de la energía producida y el espacio utilizado por las plantas solares que muchas veces pueden llegar a ser de varias hectáreas.

Existe una idea que presenta una alternativa a estas dos situaciones, los sistemas fotovoltaicos flotantes. Ambiciosos proyectos que conllevan a la construcción del conocido sistema fotovoltaico, pero en una estructura que se encuentra dentro de la superficie de cuerpos de agua como bien pueden

ser lagos o embalses artificiales creados por represas hidroeléctricas. Estos últimos son el principal objeto de estudio de esta investigación.

En El Salvador se cuentan con distintas presas hidroeléctricas que pueden ser consideradas para la realización de proyectos de este tipo, las 3 principales son: Cerrón Grande, 15 de septiembre y 5 de noviembre. Estas presas cuentan con una importante característica y es la amplitud de sus cuerpos de agua, la localización podría ser considerada estratégica dado que cumple varios requisitos que deben ser evaluados para la realización de estas plantas y que serán explicados y detallados dentro del cuerpo del documento.

Si bien es cierto que estas plantas pueden ser totalmente independientes y considerarse como plantas generadoras, existe la alternativa de crear un sistema dual junto con una represa hidroeléctrica, sistema que podría ser considerado coexistente pues la finalidad de realizar una unificación de estas dos tecnologías es maximizar la capacidad de generación y estabilizar la misma.

A lo largo del documento se explica a detalle tanto los componentes de las plantas fotovoltaicas como también su funcionamiento, además se realiza un estudio que permite tener un panorama más amplio y claro sobre el camino que se debe seguir para el levantamiento de un proyecto de este tipo en nuestro país, tomando como antecedentes plantas que se han diseñado y puesto en operación en distintos lugares del mundo, por lo que se sabe con certeza que es una tecnología con alto potencial de explotación y que puede ser aprovechada en nuestro país.

A. Contexto de la energía fotovoltaica en El Salvador

En El Salvador el mercado de la generación eléctrica se divide en 2 tipos: el mercado mayorista y el mercado minorista.

El mercado mayorista está compuesto por diferentes participantes que se clasifican en generadores, distribuidores, comercializadores y grandes usuarios de energía eléctrica. En la categoría de generadores entran las grandes centrales hidroeléctricas (5 de noviembre, 15 de septiembre, Guajoyo, Cerrón grande), algunos proyectos de gran escala de sistema fotovoltaicos (SFV) como el Proyecto La Trinidad, Capella Solar, etc.; Plantas de combustible fósil, Plantas geotérmicas, y algunas centrales de biomasa.

El mercado minorista de energía eléctrica está integrado por las plantas de generación conectadas directamente al

sistema de distribución, en el cual se comercializa la energía directamente a los usuarios finales. En este mercado existen transacciones entre generadores y distribuidores, así como también entre distribuidores y usuarios finales, así mismo comercializadores y usuarios finales, y transacciones entre distribuidores. [1]

En el mercado minorista podemos destacar la generación distribuida, la cual está compuesta por aquellas pequeñas fuentes de generación eléctrica, las cuales no superan los 20 MW de potencia nominal, y son en su mayoría tecnologías renovables. En este grupo se encuentran la mayoría de plantas fotovoltaicas del país, debido a que estas plantas normalmente no superan los 20 MW de capacidad instalada.

Pero también surgen proyectos que entran al mercado mayorista, estos proyectos normalmente se dividen en varias plantas fotovoltaicas que pertenecen a una misma institución y que no suelen exceder los 20 MW de forma individual, pero al estar en conjunto estas llegan a superar hasta los 100 MW de potencia nominal, por lo que se les considera como productores mayoristas. Dentro de estos proyectos se puede mencionar las plantas de Capella Solar y el proyecto Trinidad.

B. Potencial de la energía solar en El Salvador

El potencial energético solar proporciona un estimado de energía (kWh) que el sistema puede llegar a producir en función del punto máximo de rendimiento instalado (kWp). Este potencial podría considerarse como un factor determinante a la hora de seleccionar la ubicación ideal para un sistema fotovoltaico.

El Salvador es un país con un alto potencial para sistemas fotovoltaicos, se sitúa en el puesto 36 del mundo con un potencial promedio de 4.827 kWh/kWp por día. [2] De igual forma es un país con un alto promedio de irradiación global horizontal (GHI), el cual es el valor más importante para la evaluación de rendimiento en módulos fotovoltaicos fijos y planos, estos tipos de módulos son los que se usan en la mayor parte de los sistemas fotovoltaicos instalados en el territorio salvadoreño.

El Salvador está situado en el puesto 22, con una irradiación global horizontal promedio de 5.916kWh/m² por día.[2] Por lo cual El Salvador es un país con una deseable eficiencia y potencial energético para SFV, por lo cual la aplicación de estos sistemas en cuerpos de agua como el Lago Güija, el Lago de Suchitlán, Embalses situados en el Río Lempa, son más que consideraciones viables basado en el potencial energético y a la irradiación horizontal global del país.

C. Clasificación y consideraciones de los sistemas fotovoltaicos flotantes

La implementación de los SFVF (sistema fotovoltaico flotante) consiste en un conjunto de módulos solares montados en una estructura flotante que normalmente se encuentra anclada en el fondo de un cuerpo acuático. Dichos

sistemas surgen con el propósito de solucionar la problemática. La principal idea bajo la que nacen estos sistemas es solventar la problemática del extenso uso de suelos de la generación fotovoltaica, por lo que se planteó la instalación de un SFV sobre el agua, a través de dispositivos flotantes (o flotadores) que soportan los módulos fotovoltaicos, para permitir un mejor aprovechamiento de la superficie de la tierra. Este sistema fotovoltaico flotante (SFVF) tiene una configuración como la ilustrada en la fig. 1.

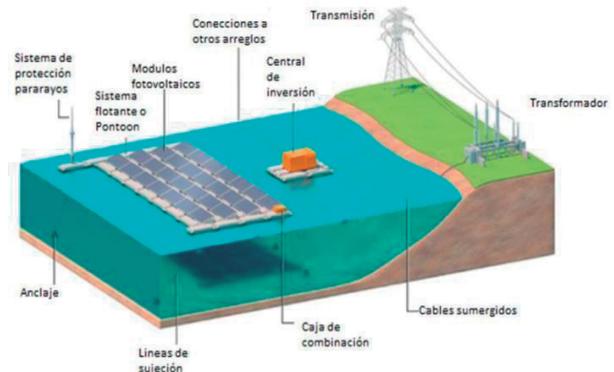


Fig. 1. Esquema de un SFVF y sus principales componentes [3]

Los componentes clave de los SFVF son los siguientes:

- Módulos fotovoltaicos adecuados para ambientes húmedos, para la producción de energía.
- La estructura flotante, encargada de sostener los módulos fotovoltaicos y de la cual existen diversos métodos, configuraciones y selección de materiales, para su fabricación y montaje.
- El cableado de conexión, que tiene que ser certificado y cumplir con los requerimientos que la energía fotovoltaica impone, pero además estar adecuados que estén diseñados para soportar las fuerzas mecánicas ejercidas por el movimiento del agua.
- El sistema de sujeción o anclaje de los dispositivos flotantes, los cuales se ilustran en la fig. 2.

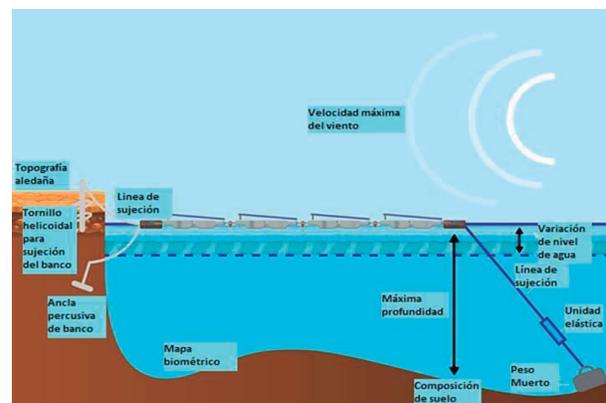


Fig. 2. Representación de los distintos tipos de anclaje y las variables que lo afectan [4]

También, los principales beneficios y retos que conllevan los SFVF se resumen en la tabla 1.

Tabla 1. Resumen de beneficios y retos de los SFVFT

Beneficios	Retos
Optimización de uso de suelos	Alto contenido de humedad para partes eléctricas.
Previene la evaporación del cuerpo de agua donde se sitúa	Condiciones perjudiciales para la integridad de la estructura como corrosión.
Evitan la proliferación de algas en el cuerpo de agua	Manejo de variables conocidas y desconocidas.
Aumento en la eficiencia de los módulos fotovoltaicos por disminución de temperatura	Altos costos de mantenimiento
Fomento de crear redes de consumo de energía solar en lugares remotos.	Comparativa en años iniciales a otras tecnologías
Competitividad de precios	Durabilidad de fuerzas mecánicas
Instalación y preparaciones reducidas mejoran costos iniciales.	Aceptación pública, inversionistas y entidades impulsoras

Se podría clasificar los SFVF según su aplicación y función energética de la siguiente manera:

- SFVF conectados a la red eléctrica: ya sea para generación distribuida, para plantas generadoras fotovoltaicas a gran escala o para autoconsumo residencial e industrial.
- SFVF aislados: para aplicaciones remotas ya sea a gran o pequeña escala en las que no se dispone de acceso a la red eléctrica. En este trabajo no se profundizará en este tipo de aplicaciones.
- SFVF híbridos: cuando existe un grado de interconexión entre un SFVF y otro tipo de generación energética.

Murphy [5] propone tres clasificaciones para configuraciones híbridas, cada una con diferentes costos y valores añadidos en su rendimiento:

1. Sistemas híbridos co-ubicados (mejoramiento en costos): dos tecnologías o más ubicadas en conjunto para ahorrar costos, pero con operaciones optimizadas de forma separada.
2. Sistemas virtualmente híbridos (mejoramiento en rendimiento): dos o más tecnologías situadas separadamente, con operaciones ligadas a un acuerdo bilateral y operación co-optimizada.
3. Sistema completamente híbrido (mejoramiento en rendimiento y costos): se logran mejoras en costos y rendimiento a través de un planeamiento y operación co-optimizados. Comúnmente, estas consisten en al menos una

tecnología emparejada que sea despachable junto con una o más tecnologías de energías renovables variables, la cual, cuando es emparejada, ofrece beneficios operacionales.

Si bien las combinaciones híbridas entre un SFVF y otros tipos de generación eléctrica pueden ser muchas, no todas ellas representan una mejora lo suficientemente considerable como para considerarlas viables o ventajosas frente a los SFVF operando por sí solos. La combinación de generación híbrida más destacable junto con un SFVF es la generación hidroeléctrica.

Básicamente esta configuración híbrida consiste en la instalación de un SFVF sobre el embalse o reservorio de agua de una central hidroeléctrica. En esta configuración tanto el SFVF como la casa de máquinas de la central, se interconectan en la subestación eléctrica para proveer de energía a la red de transmisión de forma conjunta (fig. 3).

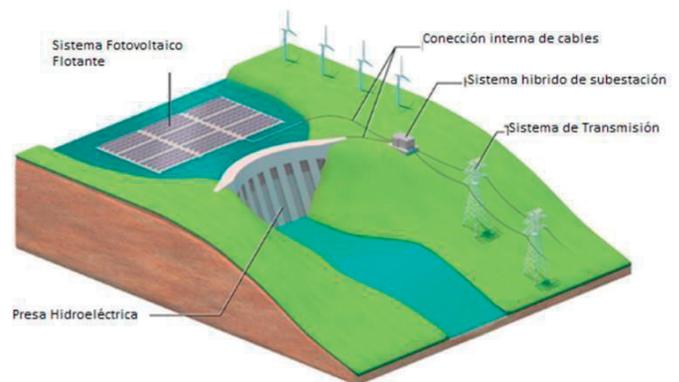


Fig. 3. Configuración de un sistema híbrido fotovoltaico flotante-hidroeléctrico [3]

En general, dentro de las ventajas que tienen los SFVF híbridos en conjunto con generación hidroeléctrica, podemos mencionar (además de las anteriormente mencionadas que corresponden a los SFVF individuales):

- Aprovechamiento de las redes de transmisión e instalaciones eléctricas existentes de la central hidroeléctrica, lo cual se traduce como un ahorro en la inversión del proyecto.
- Aprovechamiento de los estudios hídricos y geográficos realizados previos a la construcción de la central hidroeléctrica, así como también de las bases de datos sobre el comportamiento del reservorio de agua, lo cual representaría un ahorro en el diseño y por ende, en la inversión del proyecto.
- Mitigación de la variabilidad del suministro de energía de la tecnología fotovoltaica de forma estacional e instantánea, volviendo el sistema híbrido en su conjunto completamente despachable; siempre y cuando la central hidroeléctrica del sistema híbrido tenga la capacidad regulatoria de compensar las variaciones del SFVF.

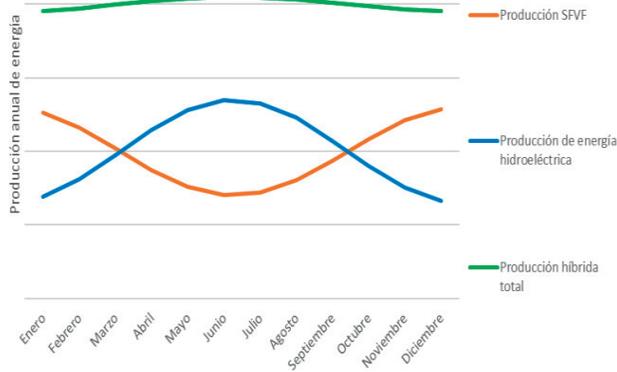


Fig. 4. Diagrama demostrativo del comportamiento sinérgico ideal de una central híbrida SFVF con una central hidroeléctrica durante un año

- Eficiencia en el uso de suelos, lo que significa un ahorro significativo en la inversión del proyecto y aumento de la densidad energética de la planta híbrida en conjunto.
- Mejoría en la conservación de recursos hídricos al evitar la evaporación del embalse y facilitar la oportunidad para la implementación de almacenamiento energético.

Analizando los principales embalses de El Salvador, se obtuvo un área adecuada para la instalación de un SFVF (tabla 2).

Tabla 2. Área seleccionada como óptima para la instalación de un SFVF en el embalse de cada central hidroeléctrica. Elaboración propia

Central	Guajoyo	Cerrón Grande	5de Noviembre	15 de Septiembre
Area	0.01 km ² (1 ha)	0.26 km ² (26 ha)	0.13 km ² (13 ha)	0.1 km ² (km ²)

Tomando en cuenta esta área y la irradiación incidente en esta ubicación se realizó una aproximación del potencial de generación que tendría un SFVF construido en dichos embalses. Los resultados se muestran a continuación en las figs. 5-8.

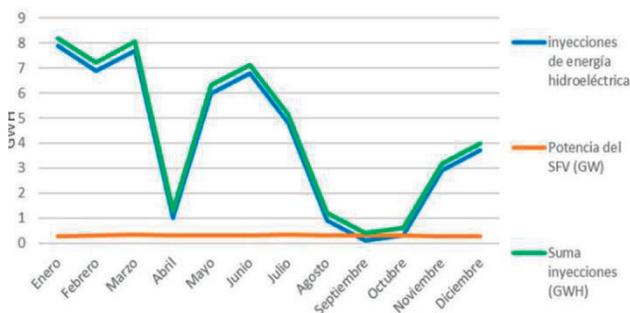


Fig. 5. Gráfico de producción e inyección mensual de la central de Guajoyo en 2021 y el comportamiento de la central híbrida si se instalara un SFVF [6]

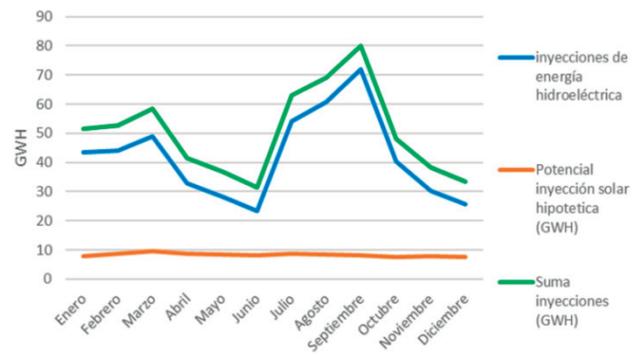


Fig. 6. Gráfico de producción e inyección mensual de la central de Cerrón Grande en 2021 y el comportamiento de la central híbrida si se instalara un SFVF [6]

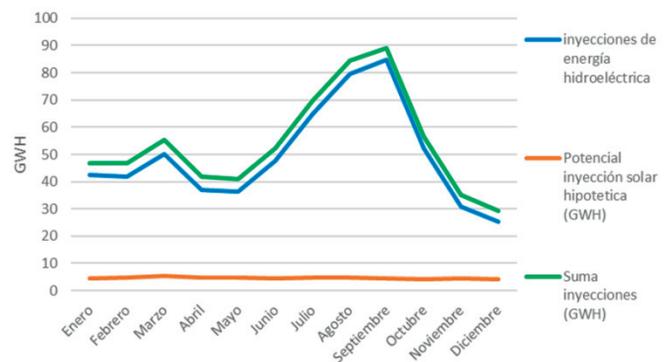


Fig. 7. Gráfico de producción e inyección mensual de la central de 5 de noviembre en 2021, y el comportamiento de la central híbrida si se instalara un SFVF [6]

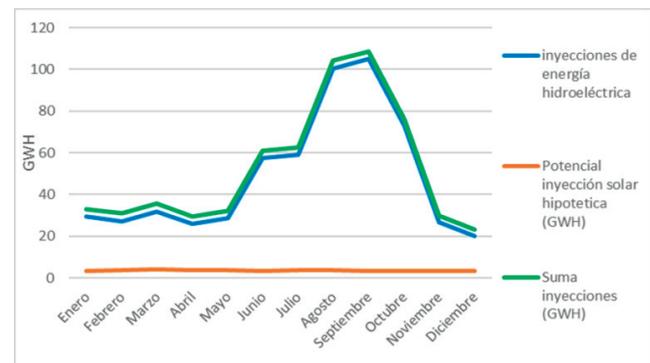


Fig. 8. Gráfico de producción e inyección mensual de la central de 15 de septiembre en 2021 y el comportamiento de la central híbrida si se instalara un SFVF [6]

Sin embargo, en estas aproximaciones anteriores se considera que toda el área seleccionada es un único módulo fotovoltaico, puesto que se toma el 100 % del área efectiva para los cálculos de transformación de la radiación en electricidad. Por lo que, para realizar una estimación más precisa del potencial energético de un sistema híbrido como el planteado, se utilizaron datos de la densidad de módulos (No. módulos/m²) de otros SFVF existentes.

Tomando esto en cuenta, se obtuvo 1.27 MW de capacidad instalada para el SFVF hipotético en Guajoyo, 32.9MW de capacidad instalada para el SFVF hipotético en Cerrón Grande, 16.45MW de capacidad instalada para el SFVF hipotético en 5 de Noviembre y 12.66 MW de capacidad instalada, otra consideración relevante que tomar en cuenta al evaluar la factibilidad de la hibridación de las centrales hidroeléctricas de El Salvador con la instalación de un SFVF es el uso que se le dará a la energía extra inyectada a la red. Si bien la hibridación planteada puede ser muy atractiva (por los criterios que ya se han demostrado) es importante verificar:

- i. Que se consideren las pérdidas en el cableado, inversor, transformadores, y demás pérdidas eléctricas que conlleve el sistema a diseñar.
- ii. Que la red de transmisión y/o distribución de electricidad a la que se conectará el SFVF esté correctamente dimensionada para soportar las inyecciones adicionales.
- iii. Que se identifique la demanda en la red a suplir con las inyecciones extra del sistema híbrido, a fin de determinar a la interconexión que hacer en la red.

II. TECNOLOGÍAS DISPONIBLES EN LA ACTUALIDAD PARA SFVF

La tecnología que se seleccione para los dispositivos flotantes de la planta es de vital importancia pues serán los encargados de sostener el peso de los paneles solares. Para seleccionar el más adecuado, primeramente, se deben tener claros las diferentes opciones que existen en la actualidad, se presentan de manera breve a continuación:

A. Raft

Su ensamble está basado en el posicionamiento del módulo de una manera escalonada en la cual la fila anterior no interfiera con el recibimiento de luz solar de la siguiente fila, priorizando el ángulo ideal para que los módulos logren el máximo aprovechamiento solar.



Fig. 9. SFVF colocados en modelo raft en plataforma metálica [7]

B. Ensamble prefabricado

En este tipo de ensamble se ve una composición de piezas modulares flotantes que han sido ideadas para funcionar de manera que todas sean simétricas, que puedan soportar su propio peso y el de una carga por medio de la flotabilidad y que sea posible interconectarlos con un método de perno moldeado o individual y rosca que facilita el montaje.



Fig. 10. Sistema de montura MRac Floating PV tipo G4S [8]

C. Estructura metálica

Método popularmente utilizado en estructuras flotantes para paneles solares suelen ser estructuras metálicas con propiedades altamente resistentes a la corrosión, normalmente con recubrimientos sobre todas las superficies, juntas, soldadura, etc. Estas estructuras son más versátiles porque suelen ser diseñadas a medida, su única desventaja se encuentra en 84 aspectos como la modularidad y lo poco adaptables que pueden ser con las condiciones ambientales y que tan compatibles son con otras tecnologías.

D. Dispositivos flotantes para módulos sumergibles y semisumergibles

Los módulos sumergible y semi-sumergible aún no son una opción convencional para la implementación de SFVF, debido a que esta tecnología aún se encuentra en sus etapas de investigación. Pero aun así se tienen proyectos y prototipos en los cuales se ha aplicado este tipo de metodologías. Este tipo de módulo no es tan visible desde la superficie, a diferencia de los demás tipos de SFVF, por lo que no provoca contaminación visual del paisaje.

E. Seguidores solares

Los seguidores solares son una tecnología que se desarrolló con el propósito de maximizar la absorción de la irradiación normal directa de los módulos solares, tanto de forma horaria como estacional, debido a la rotación constante de la tierra.

La implementación de estos SFVF con seguimiento solar representa mayores costos; sin embargo, World Bank Group [9] afirma que estos pueden aumentar la producción energética aproximadamente un 20-30 %. También se recomienda que los ángulos de inclinación de los módulos no excedan los 10-15° (el ángulo ideal para módulos fotovoltaicos en El Salvador está dentro de ese rango), para evitar movimientos bruscos causados por el viento.

F. Anclaje

Dado que los SFVF se instalan en cuerpos de agua, cualquier variación en los niveles de agua inducidas por el monzón, el viento, o el aumento/disminución de la cantidad de agua podría ser problemático para los sistemas. Para evitar esta situación los sistemas se anclan mediante sistemas de amarre, generalmente se sujeta con nylon de poliéster o cuerdas náuticas de nailon que se atan más a bolardos en la orilla y amarrados en cada esquina.

G. Enfriamiento

Una de las causas principales por las que puede disminuir la eficiencia y rendimiento de un módulo fotovoltaico es que este esté expuesto a altas temperaturas. Es inevitable las pérdidas caloríficas en la absorción de radiación por las células fotovoltaicas debido a sus características electroquímicas, lo que además de calentar las propias células, calienta también los demás componentes eléctricos del sistema, lo que se traduce como pérdidas en la transformación y conducción de energía.

Para solventar esta problemática, se han planteado diversas soluciones de refrigeración para los módulos fotovoltaicos:

- a. Utilizando aire forzado
- b. Velo de agua
- c. Aspersor de agua
- d. Circulación forzada de agua
- e. Sumersión en agua

III. CONSIDERACIONES ECONÓMICAS

Los SFVF aún no disponen de un alto nivel de madurez como es en el caso de los SFV en tierra, por lo cual existe un mayor costo de inversión y mayores dificultades en la planeación de proyectos de un SFVF.

Esto es debido a que el SFVF dispone de nuevos componentes como lo son; las estructuras flotantes o el sistema de amarre, que aún no disponen de mayores economías de escala y de estandarización. Pero se espera que a medida que el número de proyectos aumente, el mercado de estos componentes aumente y por ende reduciría los costos de inversión y las dificultades del proyecto.

Una de las dificultades en la planeación es la entrega y almacenamiento de plataformas flotantes. Estas normalmente son de polietileno de alta densidad, los cuales son bastantes voluminosos, por lo que ocupan un mayor uso de espacio, y podría generar un problema tanto en el costo como en el método de transporte.

Durante la operación y mantenimiento de igual forma hay ciertas dificultades que se pueden presentar, tanto el método para llevar al personal a la planta, si esta se sitúa muy lejos de la orilla, como los diferentes riesgos laborales a los que estarán presente el operario, que conllevan a un mayor costo de operación y mantenimiento al compararlo con su contraparte en tierra.

A. Indicadores económicos

1) **CAPEX:** El CAPEX o gasto capital es la inversión que el negocio necesita para disponer de los activos fijos necesarios para su actividad productiva [10]. Según datos recolectados por The World Bank Group, ESMAP y SERIS (2019) [9] el costo de inversión total promedio un SFVF con una capacidad de 50 MWp es de \$0.73/Wp, mientras que el de un SFV en tierra con una capacidad de 50 MWp es de \$0.62/Wp. Por lo cual el CAPEX para un SFVF suele ser \$0.10/Wp mayor que el de un SFV instalado en tierra.

2) **OPEX:** El OPEX o gastos operativos describe los costos asociados con la operación y mantenimiento de un SFVF. La comparativa de gastos entre SFVF y SFV en tierra, son bastantes variados, algunos afirman que estos pueden llegar a ser similares, debido a los altos costos de limpieza en SFV en tierra [11], pero otros consideran que al igual que el valor del CAPEX, el valor del OPEX para un SFVF viene siendo el doble (\$0.026/Wp/año), que el de un SFV en tierra (\$0.013/Wp/año), debido a ciertas dificultades que se pueden presentar en la operación y mantenimiento de los SFVF [12].

3) **WACC:** El WACC o coste promedio ponderado del capital es la tasa de descuento que se utiliza para descontar los flujos de caja futuros a la hora de valorar un proyecto de inversión [13]. En la mayoría de los casos, un WACC más bajo indica un negocio saludable que puede atraer inversores a un costo menor. Por el contrario, un WACC más alto generalmente coincide con negocios que se consideran más riesgosos y necesitan compensar a los inversores con rendimientos más altos. [14]

4) **LCOE:** El LCOE o coste nivelado de energía es un valor de coste total actual de construir y operar una instalación generadora de energía a lo largo de toda su vida útil. Esto nos ayuda a comparar el costo de diferentes generadoras de energía, de tal forma la que posea un valor de LCOE más bajo, será la que genera energía más barata. Tomando como base los datos recolectados por The World Bank Group, ESMAP, y SERIS [9], el LCOE para SFVF que se usa como base en países tropicales como el nuestro, es de \$7.11/kWp, mientras que el LCOE de un SFV en tierra es de \$6.85/kWp. El LCOE es mayor en SFVF, pero se espera que este valor disminuya a medida que se aumente la cantidad de proyectos y avance la tecnología.

IV. IMPACTO SOCIAL DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SFVF

Al evaluar un proyecto de SFVF es necesario tomar en consideración el impacto social que podría llegar a tener previo, durante y potencialmente al finalizar su ciclo de vida útil, bajo la puesta en marcha de un proyecto, su inicio y su fin representan la parte que más cambios sociales generan dentro del ciclo de vida de una planta. Por lo tanto, es de gran importancia tomar en consideración todos los posibles impactos siguiendo una serie de regulaciones y buenas

prácticas de carácter internacional incluyendo regulaciones de tipo doméstico, tomando en cuenta incluso los estándares de entidades financieras (cuando sea aplicable) para cumplir así con las expectativas y requerimientos de criterio mundial.

El impacto social de proyectos como tales como los de generación energética siempre dependen de un contexto local y nacional para poder dimensionar adecuadamente en qué medida este podría afectar positiva o negativamente a las comunidades, a factores de tipo económicos y otro tipo de áreas que deben ser tomadas en cuenta para una efectiva evaluación e inicio de proyecto.

Como punto clave de la implementación de todo proyecto es el aspecto económico que se extiende a otras ramificaciones, la economía de un proyecto y su sostenibilidad y rentabilidad establece la manera en la que aportará o contrarrestan dentro de un balance previamente establecido, para el caso de los SFVF suele representar un modelo de negocios lucrativo, sostenible y suele convertirse en fuente de crecimiento económico local o hasta nacional, además de ser fuente de empleabilidad y oportunidad de trabajo para terceros que ofertan sus servicios y mano de obra a la disposición de estos proyectos.

El incesante crecimiento del rubro de generación eléctrica a partir de módulos solares flotantes es un movimiento que enriquece la industria de la generación y crea industrias aledañas que le permiten mantenerse en óptimas condiciones siendo así este modelo de negocios una fuente constante de empleo local además de un aporte importante a la economía por su contribución para el porcentaje del PIB [15].

Asimismo, este crecimiento viene con responsabilidad social que se ve reflejado dentro de las políticas sociales que son indispensables para crear un impacto positivo en la comunidad, y un desaprovecho de estas oportunidades puede resultar en impactos de tipo negativo, estas políticas están directamente conectadas con el aporte directo de valor a la economía y a la empleabilidad relacionada con este tipo de proyectos.

Finalmente, estas políticas pueden llegar a mejorar las condiciones ambientales y están ideadas para mitigar cualquier tipo de repercusión posible para el ambiente y los habitantes aledaños que se puedan ver afectados. Es por esto que el impacto de un proyecto de cualquier magnitud debe ser analizado tan rigurosamente para asegurar que no exista o sea lo menor posible cualquier tipo de impacto que altere el orden de las cosas en una región e incluso a gran escala.

V. IMPACTO AMBIENTAL DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SFVF

Los SFV son sin duda alguna una de las mejores opciones en el tema de energías renovables. Aun así, es indiscutible que a lo largo de la realización de un proyecto se presentan riesgos que se deben tomar en cuenta.

A. Riesgos ambientales

La instalación de una SFVF conlleva de manera directa e innegable la alteración de un ecosistema acuático y esto depende de diversos factores que se enlistan a continuación:

- Calidad de los materiales utilizados
- Tamaño del cuerpo de agua donde se realiza el proyecto
- Salinidad del cuerpo de agua
- Biodiversidad de fauna y flora
- Porcentaje del cuerpo cubierto por los paneles
- Fuentes de alimentación de agua nueva
- Localización geográfica

Los proyectos de SFVF conllevan una gran responsabilidad ecológica, pues a pesar de ser una excelente alternativa para aprovechar terreno y brindar una solución energética, los impactos ambientales que pueden presentarse aumentan.

- 1) *Impacto en la calidad de agua:* el impacto en la calidad del agua donde se instalan los complejos fotovoltaicos puede ser medidos tomando en cuenta varios indicadores que se enlistan y explican a continuación:
- 2) *Interferencia en el flujo de agua:* existe la posibilidad que, al cubrir una amplia área del cuerpo de agua con un sistema fotovoltaico, este puede incidir directamente en la continuidad del cauce del cuerpo mismo provocando así un flujo incorrecto que conlleva el aumento de los sedimentos.
- 3) *Interferencia de irradiación solar:* Al cubrir grandes áreas de cuerpos acuáticos, se está reduciendo la cantidad de luz incidente a la fauna, que por consecuencia verá afectado su crecimiento y nutrición y eventualmente afectará también a la fauna acuática.
- 4) *Desechos:* la utilización de materiales de baja calidad o que reaccionen de manera negativa en contacto con el agua, puede provocar una irrigación de desechos nocivos para el equilibrio natural de los cuerpos de agua.
- 5) *Oxigenación:* el cambio de temperatura y la disminución de luz solar pueden provocar la disminución de la capacidad de oxigenación en el ciclo natural del cuerpo de agua.
- 6) *Flora y fauna:* el cambio en el equilibrio del ecosistema puede tener graves consecuencias en la simbiosis dentro de los cuerpos de agua y consecuentemente afectar a individuos que dependen de estos cuerpos.

B. Estudios ambientales para determinar el impacto ambiental de la instalación de un SFVF

Para poder mantener estándares de calidad que nos permitan asegurar que el impacto a los cuerpos de agua será el mínimo posible, se pueden disponer de ciertas regulaciones o estudios que se deben realizar de manera constante con la finalidad de asegurar que no se esté perjudicando el equilibrio natural de los cuerpos de agua.

Dichos estudios permiten llevar el adecuado control en parámetros que aseguran la calidad del agua y que en consecuencia disminuyen el impacto negativo que se pueda llegar a causar. Por enlistar algunos de estos parámetros se cuentan con los siguientes:

- Temperatura del agua a diferentes profundidades
- Flujo del cauce del cuerpo de agua (si es aplicable)
- Humedad relativa del ambiente
- Acidez del agua (PH)
- Oxigenación
- Cantidad de Sólidos (PPM)
- Cantidad de Químicos
- Concentración y crecimiento de algas
- Concentración de clorofila
- Estancamiento de sedimentos

VI. APLICACIONES COMERCIALES E INDUSTRIALES DE LOS SFVF

Las aplicaciones de estos modelos de generación energética son variadas, ya que por su versatilidad resultan atractivos para muchas ramificaciones de la industria, además de ser una gran propuesta de valor para proyectos existentes, que poseen un cuerpo de agua a disposición y siempre se encuentran en constante búsqueda de mejora, por lo cual su implementación puede reducir a largo plazo los costos de operación, y reducir emisiones en dicha industria, o actividad comercial. Algunos ejemplos de aplicaciones exitosas en la industria son:

A. Almacenamiento energético con bombeo de agua

Este tipo de aplicación se conoce como una generación fotovoltaica flotante híbrida, la cual actúa bajo el principio del almacenamiento energético en centrales hidroeléctricas (PHES por sus siglas en inglés), se define como la tecnología con la que se almacena energía en forma de energía potencial del agua que es bombeada desde un reservorio de bajo nivel hasta un reservorio a más alto nivel. En estos sistemas, la electricidad de bajo costo (la generada fuera de las horas pico de demanda) es usada para bombear y elevar el agua desde el reservorio inferior al superior. Durante momentos de gran demanda de electricidad, el agua almacenada se libera a través de turbinas hidráulicas (central hidroeléctrica) para producir electricidad [16].

Rehman, S. [16] afirma que esta tecnología de almacenamiento energético es considerada muy prometedora para aumentar la penetración de energías renovables en sistemas de potencia; sin embargo, esta tecnología requiere de un gran cuerpo de agua o bastante diferencia de altura entre reservorios para que sea factible, debido a su baja densidad energética; por lo que se puede decir que es ventajosa únicamente cuando se considera a gran escala. Sin embargo, una combinación híbrida de almacenamiento energético por

bombeo de agua, un SFVF y una planta hidroeléctrica pueden representar un incremento aún mayor en la producción energética.

B. SFVF para la producción de hidrógeno verde

Esta ramificación de la generación eléctrica propone una solución a la erradicación de las fuentes de energía fósil, disminuyendo así las emisiones de CO₂, comúnmente obtenido después de un proceso de electrólisis la cual necesita tener cierto grado de pureza dependiendo del sistema o tipo de electrolizador empleado. El consumo de agua para la producción de hidrógeno con una fuente de energía eléctrica de un SFV puede variar entre los 22 y 126 kg de agua por kg de hidrógeno producido, dependiendo de la radiación solar, y de las características del SFV [17]. Considerando estos dos factores fundamentales en la producción de hidrógeno verde (uso de agua y energía renovable variables) es que se puede considerar bastante factible su implementación junto con SFVF, el cual puede ser instalado en el reservorio del agua que se utilizará para el electrolizador.

C. SFVF en plantas de tratamiento de agua

La oportunidad presentada para el aprovechamiento de los SFVF dentro de las plantas de tratamiento de agua es un recurso que podría ser aprovechado considerando los existentes reservorios de agua donde podrían dar cabida a esta nueva tecnología. Es por esto que la CEO (Colorado Energy Office) en 2018 contacto con Ciel & Terre para colaborar en un reporte de estudio de oportunidades para implementación de tecnología fotovoltaica flotante en el estado de Colorado, dentro del cual se encontraron resultados tales que, bajo análisis digital asistido por imágenes satelitales, 27 % de los cuerpos de agua evaluados por eran únicamente candidatos a participar de la aplicación de un proyecto de este tipo. Dentro de ellos, sitios de trabajo catalogados como cuerpos de agua hechos por el hombre destinados para tratamiento de aguas, dentro de los cuales se podría instalar sistemas de operación similar a la de 2007 llamada “The Far Niente Winery” en California de las primeras en ser instaladas con una capacidad de 1,000 megawatts (MW) para 2018 y con esperanzas de incremento después de 2019 de hasta 2,400 MW donde estas serían capaces de generar hasta el 100 % de la energía anual utilizada en cada respectivo sitio de su instalación brindando una serie de beneficios a quienes opten por adoptar esta tecnología.

D. SFVF en agricultura

Para proyectos de aplicación en la agricultura, normalmente se parte de la existencia de un embalse de agua para riego o consumo, en este caso se ven beneficiados inicialmente gracias a la conservación del agua relativamente gracias a que los módulos solares previenen la evaporación del agua, además de ser fuente de energía de consumo interna.

Ahora bien, la calidad del agua de riego es algo de vital importancia en la agricultura; ya que esta influye en el desarrollo de la planta, en la estructura del suelo, y en el mismo sistema de riego. Los criterios de calidad de agua para el riego son muy diferentes respecto a los criterios de agua potable; además, los criterios de calidad pueden variar según el tipo de cultivo, dado que distintos cultivos tienen diferentes susceptibilidades a determinados minerales o propiedades del agua [18].

Es por esto que se ponen bajo riguroso análisis aspectos como la dureza del agua, salinidad del agua, PH, alcalinidad del agua y relación entre sodio calcio y magnesio. Por lo tanto, sí los SFVF podrían mejorar la calidad del agua de riego, estos ya tendrían un beneficio adicional por el cual un trabajo en conjunto sería una opción más viable y significativa.

E. SFVF en acuicultura

La FAO define la acuicultura como “El cultivo de organismos acuáticos, es decir, de peces, moluscos, crustáceos y plantas acuáticas. El cultivo supone alguna forma de intervención en el proceso de cría para aumentar la producción como, por ejemplo, el almacenamiento periódico, la alimentación, la protección frente a los depredadores, etc. considerando la naturaleza de la acuicultura podemos entender como este, puede ser un hogar nato para vincular sistemas fotovoltaicos flotantes en conjunto con la acuicultura, además del constante consumo energético que presentan, en búsqueda de mantener las mejores condiciones para las especies en desarrollo, esto podría ser efectuado consumiendo energía renovable haciéndolo más sostenible, además de poder ayudar con aspectos como mejoras en la temperatura, PH, salinidad, turbiedad y fotoperiodos [19].

Sin dejar de lado que pueden llegar a suplir la demanda energética total de la operación dependiendo del tamaño y la capacidad instalada

F. SFVF en minería

Este tipo de aplicación no trabaja en conjunto con la minería directamente, sino que se trata de aplicar los SFVF en un tajo de mina, el cual son los diferentes escalones sobre los cuales se están extrayendo los minerales.

Este tajo de mina normalmente se encuentra seco, gracias a las bombas que lo mantienen de tal manera, pero al concluir la operación minera, se detiene el proceso de bombeo y es ahí cuando el proceso de inundación empieza, y continúa durante varios años, hasta que la superficie del lago es aproximadamente igual a la elevación original del nivel freático [20].

Es en esta acumulación de agua, en la que se quiere aplicar un SFVF, de tal manera se reutiliza el área, que actualmente ha sido abandonada.

VII. CONCLUSIONES

- Está claro que los SFVF representan una variante de la generación fotovoltaica con mucho potencial para ser aplicada en El Salvador. Además de ser una energía completamente renovable que posee un mejor rendimiento a diferencia de su contraparte en tierra, y por ende una mayor producción de energía, también resuelve la problemática de la limitación de uso de suelos para SFV que se presenta en el país; puesto que el territorio salvadoreño, a pesar de contar con un gran potencial energético solar, tiene una limitada extensión territorial para aprovechar dichos recursos energéticos solares. Debido a esto, tanto la investigación, desarrollo e implementación de esta tecnología debería de ser más específicamente tomada en cuenta en los planes académicos de las universidades nacionales, en las políticas energéticas de El Salvador y también en los proyectos desarrollados por el sector privado.

- De las centrales hidroeléctricas de El Salvador analizadas en este documento, la que presenta un mejor potencial para volverse una central generadora híbrida junto con un SFVF, según los criterios analizados es la de Cerrón Grande. Esto debido a que es la central con el área superficial de reservorio más extensa, lo cual permitiría la instalación de un SFVF a gran escala, que es lo más factible. Además, también es central con mayor capacidad instalada que opera como central de base y punta, lo cual se adecuará bastante bien desde el punto de vista de sinergia energética de la central híbrida. Sin embargo, aún sería necesario analizar las necesidades y características de la red eléctrica en la zona para considerar la factibilidad de la adición de capacidad instalada en dicha central, además de realizar estudios más detallados de la naturaleza del embalse y de la inversión requerida.

- La mayor limitante de los SFVF en la actualidad es su costo, sobre todo para sistemas a media o pequeña escala. Esto debido a que aún no existe un mercado manufacturero lo suficientemente desarrollado que comercialice en todo el mundo los componentes de un SFVF a precios iguales o menores que con los SFV construidos en tierra, en especial para los dispositivos flotantes. Por lo tanto, en El Salvador esta tecnología solo sería viable desde un punto de vista económico si se implementa a gran escala, para así contrarrestar los altos costos de importación de los componentes flotantes. Sin embargo, al igual que como ocurrió con los SFV convencionales, se espera que en los próximos años se dé una expansión del mercado de componentes de los SFVF a nivel mundial conforme aumente la demanda, lo cual permitiría una disminución de costos de dichos componentes.

- Más específicamente, en la actualidad es más recomendable el uso de dispositivos flotantes del tipo modular o “pontoon”; esto ya que además de que son fabricados con materiales plásticos con precios de materia prima accesibles, como lo es el HDPE, el cual es menos contaminante que otros dispositivos flotantes elaborados con metales corrosivos que pueden afectar la química del cuerpo

de agua y pueden tener una vida útil menor. Así mismo, la fabricación de este tipo de dispositivos flotantes puede ser un nicho de mercado a desarrollar en la industria de plásticos de El Salvador para su producción en masa.

- A pesar de que por sí solos los SFVF mejoran su rendimiento al compararlo con su contraparte construida en tierra, si se consideran los costos actuales que conlleva un SFVF, resulta más económicamente factible el planteamiento de estos sistemas cuando se incluye un sistema de refrigeración por velo de agua o con un aspersor. Esto ya que, con solo adicionar un método de refrigeración activa para los módulos, el rendimiento de la planta aumenta considerablemente como para justificar la inversión extra de adicionar un sistema de bombeo para el enfriamiento.

REFERENCIAS

- [1] Mercado Eléctrico de El Salvador 2020. Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones (SIGET). <https://www.siget.gob.sv/gerencias/electricidad/informe-de-mercado-y-estadisticas-electricas/estadisticas-electricas/>
- [2] World Bank Group, ESMAP, Solargis, 2019, recuperado en: <https://globalsolaratlas.info/download/el-salvador>
- [3] Lee, N., Grunwald, U., Rosenlieb, E., Mirlletz, H., Aznar, A., Spencer, R., Cox, S., & National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States). (2020). Hybrid floating solar photovoltaics-hydropower systems: Benefits and global assessment of technical potential. *Renewable Energy*, 162, 1415-1427. https://login.research4life.org/tacsgr1doi_org/10.1016/j.renene.2020.08.080
- [4] Samialhelali (2021). Floating Solar Anchoring and Mooring, Recuperado en: <https://www.tyt.com.tr/post/floating-solar-anchoring-and-mooring>
- [5] Murphy, C. A., Schleifer, A., Eurek, K., & National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States). (2021). A taxonomy of systems that combine utility-scale renewable energy and energy storage technologies. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 139, 110711. https://login.research4life.org/tacsgr1doi_org/10.1016/j.rser.2021.110711
- [6] Power Data Access Viewer. (s.f.) NASA. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- [7] Tina, G. & Rosa-Clot, M. (2020). Floating PV Plants. *ACADEMIC PRESS* <https://doi.org/10.1016/C2018-0-01890-3>
- [8] Mibet Energy (2020). Floating PV System. Recuperado en: https://www.mibetsolar.com/floating-solar-mounting-system_p83.html
- [9] World Bank Group, ESMAP and SERIS. 2019. Where Sun Meets Water: Floating Solar Hand-book for Practitioners. Washington, DC: World Bank. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/418961572293438109/pdf/Where-Sun-Meets-Water-Floating-Solar-Handbook-for-Practitioners.pdf>
- [10] Software DelSol, 2020. ¿Qué es CAPEX? ¿Cómo aplicarlo?, <https://www.sdelsol.com/glosario/capex/>.
- [11] Barbuscia, Michele. (2017). Economic viability assessment of floating photovoltaic energy. https://www.researchgate.net/publication/322364592_Economic_viability_assessment_of_floating_photovoltaic_energy
- [12] Dunham, A. (2021) Exploring the Potential for Floating Photovoltaic Solar On Man-Made Reservoirs In The United States. https://jscholarship.library.jhu.edu/bitstream/handle/1774.2/64299/EPC_CapstoneFinalRep_SP_21_Dunham.pdf?sequ
- [13] Empresa Actual, 2019. ¿Qué es el WACC y para qué sirve? <https://www.empresaactual.com/el-wacc/>
- [14] Marshall Hargrave, 2022, "Weighted Average Cost of Capital (WACC) Explained with Formula and Example", <https://www.investopedia.com/terms/w/wacc.asp>.
- [15] Gaëtan Masson, I. K. (2022). Trends in Photovoltaic Applications 2021 (G. Masson, IEA PVPS.). *ENERDEAL*. https://iea-pvps.org/trends_reports/trends-in-pv-applications-2021/
- [16] Rehman, S., Al-Hadhrami, L. M., & Alam, M. M. (2015). Pumped hydro energy storage system: A technological review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 44, 586-598. https://login.research4life.org/tacsgr1doi_org/10.1016/j.rser.2014.12.040
- [17] International Renewable Energy Agency (2020). Green Hydrogen Cost Reduction, recuperado de: https://irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf
- [18] Sabspa (2020). Calidad del agua de riego, recuperado en: <https://www.sabspa.com/es/la-calidad-del-agua-para-riego/>
- [19] Pringle, A. M., Handler, R. M., & Pearce, J. M. (2017). aquavoltaics: Synergies for dual use of water area for solar photovoltaic electricity generation and aquaculture. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 80, 572-584. https://login.research4life.org/tacsgr1doi_org/10.1016/j.rser.2017.05.191
- [20] Environmental Protection, (2020). Pit lakes, recuperado en: https://ndep.nv.gov/uploads/land-mining-faq-docs/Pit_Lakes.pdf