

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA**

**ANÁLISIS DINÁMICO DE UN SISTEMA DE AMARRE PARA UN  
FPV EN EL EMBALSE DE MAZAR**

**COMPONENTE B: ZONA 3 – COTA SUPERIOR**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**ERICK PATRICIO MOLINA ESPINEL**

erick.molina@epn.edu.ec

**DIRECTOR: ING. WILSON IVÁN GUACHAMÍN ACERO, PhD**

wilson.guachamin@epn.edu.ec

**DMQ, agosto 2023**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, ERICK PATRICIO MOLINA ESPINEL declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

**ERICK PATRICIO MOLINA ESPINEL**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por ERICK PATRICIO MOLINA ESPINEL, bajo mi supervisión.

**ING. WILSON IVÁN GUACHAMÍN ACERO, PhD**  
**DIRECTOR**

Certificamos que revisamos el presente trabajo de integración curricular.

**NOMBRE\_REVISOR1**  
**REVISOR1 DEL TRABAJO DE**  
**INTEGRACIÓN CURRICULAR**

**NOMBRE\_REVISOR2**  
**REVISOR2 DEL TRABAJO DE**  
**INTEGRACIÓN CURRICULAR**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

ERICK PATRICIO MOLINA ESPINEL

## **DEDICATORIA**

El documento que se presenta a continuación está dedicado en primer lugar a mis padres Patricio y Nelly quienes, al ser un pilar fundamental en mi vida, dieron todo su sacrificio con la finalidad de que no me falte nada a lo largo de mi camino académico, a quienes siempre estaré agradecido, a Laura y Teresa Licto, quienes fueron dos madres más para mí a lo largo del camino gracias por cuidar de mi familia, a mis hermanos Kimberly y Ernesto por darme más razones para salir adelante.

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres Patricio y Liliana, por el enorme sacrificio que hicieron al enviarme a estudiar fuera de mi ciudad natal, por haber depositado confianza en mí y en que se haría posible este gran sueño de convertirme en profesional.

A mi ángel que se encuentra en el cielo Teresa Licto, quien fue y siempre será uno de los pilares más importantes de mi vida, gracias por haber sido una madre más para mí, aquellos consejos viven en mi memoria.

A mi abuelita Laura Licto, de igual forma por cuidarme toda la vida, dejo por sentado que siempre estaré pendiente de ella.

A mis hermanos Ernesto por haberme brindado su apoyo en los momentos que fueron muy difíciles en mi vida y en la carrera, a mi herma Kimberly por ser un motivo más para superarme.

A los profesores que me ayudaron durante la carrera compartiendo su conocimiento para forjar así un buen profesional, un agradecimiento especial a Marco Guamán, y Wilson Guachamin, por darme la motivación para completar mi carrera, por hacerme ver lo importante que es ser un buen profesional.

## INDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES .....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
INDICE DE CONTENIDO.....	V
INDICE DE FIGURAS .....	VII
INDICE DE TABLAS .....	VIII
RESUMEN .....	IX
ABSTRACT.....	X
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO .....	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos .....	2
1.3 Alcance .....	2
1.4 Marco teórico .....	2
1.4.1. Plantas Solares Fotovoltaicas Flotantes. ....	2
1.4.2. Sistemas de amarre.....	5
<i>Tipos de sistemas de amarre</i> .....	6
1.4.3. Desafíos en la instalación de un FPV.....	8
1.4.4. Cargas que soporta un FPV .....	9
1.4.3.1. Flotabilidad .....	9
1.4.3.2. Cargas producidas por el viento .....	10
1.4.3.3. Cargas producidas por la corriente.....	11
1.4.3.4. Oleaje .....	12
2 METODOLOGÍA.....	14
2.1 Caracterización del embalse y topografía .....	15
2.2 Diseño preliminar de un FPV. ....	18
2.3 Análisis de alternativas para un sistema de amarre. ....	22
2.4 Caracterización de cargas sobre un FPV .....	28
2.5 Modelo Numérico.....	31
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	35
3.1 Resultados.....	35

3.2	Conclusiones .....	44
3.3	Recomendaciones .....	44
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46
5	ANEXOS .....	49
	ANEXO 1. ESTIMACIÓN MASAS DE PESOS MUERTOS.....	49
	ANEXO 2. VELOCIDAD DEL VIENTO.....	52
	ANEXO 3. VELOCIDAD DE LA CORRIENTE.....	55

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> FPV en el embalse de Mazar a) Cota superior b) Cota inferior.....	1
<b>Figura 1. 2</b> Granja Solar .....	3
<b>Figura 1. 3</b> Sistemas de Amarre.....	5
<b>Figura 1. 4.</b> Accidente Planta Solar Yamakura a causa del tifón Faxai, Japón 2019. ....	9
<b>Figura 1. 5.</b> Flotabilidad de un FPV.....	10
<b>Figura 1. 6.</b> Cargas producidas por el viento sobre una estructura FPV. ....	11
<b>Figura 1. 7.</b> Cargas del viento y de la corriente sobre un FPV.....	12
<b>Figura 2. 1</b> Metodología.....	15
<b>Figura 2. 2.</b> Determinación del ancho de embalse .....	16
<b>Figura 2. 3</b> Variación De Cota 2010-2018.....	17
<b>Figura 2. 4.</b> Caracterización del embalse de Mazar para la Zona3.....	18
<b>Figura 2. 5</b> Modulo FPV.....	19
<b>Figura 2. 6.</b> Dimensionamiento geométrico un FPV considerando el ancho del embalse, a) cota inferior y b) cota superior .....	20
<b>Figura 2. 7.</b> Distribución de un FPV sobre el embalse de Mazar .....	21
<b>Figura 2. 8.</b> Sistema Catenaria Cota Superior .....	22
<b>Figura 2. 9</b> Sistema Catenaria Cota Inferior .....	23
<b>Figura 2. 10</b> Sistema de Amarre Catenaria; a) Cota superior; b) Cota Inferior.....	24
<b>Figura 2. 11</b> Sistema de Amarre líneas tensas con pesos muertos cota superior.....	24
<b>Figura 2. 12</b> Sistema de amarre líneas tensas con pesos muertos cota inferior; a) líneas tensas; b) líneas pierden tensión .....	25
<b>Figura 2. 13</b> Sistema de amarre líneas tensas con pesos muertos anclaje a la orilla; a) Cota inferior; b) Cota Superior .....	26
<b>Figura 2. 14</b> Sistema de amarre tensado con pesos muertos y poleas cota superior.....	27
<b>Figura 2. 15</b> Sistema de amarre tensado con pesos muertos y poleas cota inferior.....	27
<b>Figura 2. 16.</b> Determinación del ángulo crítico para selección de sistema de amarre. ....	28
<b>Figura 2. 17</b> Cargas que actúan sobre un FPV. ....	29
<b>Figura 2. 18</b> Dirección del viento sobre un FPV. ....	30
<b>Figura 2. 19</b> Modelo FPV con sistema de amarre cota superior, a) vista frontal, b) vista superior.....	32
<b>Figura 2. 20</b> Modelo Numérico ANSYS AQWA vista Isométrica, A) FPV, B) Líneas de amarre, D) Anclajes en la orilla, E) Polea, F) Peso Muerto.....	33
<b>Figura 2. 21</b> Modelo Numérico Vista Lateral, Ángulo respecto del embalse .....	33
<b>Figura A 1</b> Pesos muertos sobre un FPV .....	49
<b>Figura A 2.</b> DCL ESTIMACION DE MASAS M1, M4 .....	49
<b>Figura A 3</b> DCL estimación de masas M2, M3. ....	51
<b>Figura A 4</b> Grafica velocidad del viento 2010-2011.....	54
<b>Figura A 5</b> Variación del caudal del embalse de Mazar 2010-2018.....	55
<b>Figura A 6</b> Área transversal embalse Mazar; a) cota superior, b) cota inferior .....	56
<b>Figura 3. 1.</b> Desplazamiento FPV en el eje X en función del tiempo .....	35

<b>Figura 3. 2.</b> Desplazamiento FPV en X para casos propuestos.....	36
<b>Figura 3. 3</b> Desplazamiento FPV en Y, para casos propuestos.....	37
<b>Figura 3. 4</b> Rotación FPV, sobre el eje Z para casos propuestos.....	38
<b>Figura 3. 5.</b> Desplazamiento en X, FPV varios escenarios .....	40
<b>Figura 3. 6</b> Desplazamiento FPV, eje X casos A4-A6, velocidad de corriente 0.5 m/s ....	41
<b>Figura 3. 7</b> Desplazamiento FPV, eje Y casos A4-A6, velocidad de corriente 0.5 m/s ....	41
<b>Figura 3. 8</b> Desplazamiento en X, varias velocidades de corriente para escenario A1....	43

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1. 1</b> Partes de un FPV.....	4
<b>Tabla 1. 2</b> Sistemas de amarre.....	7
<b>Tabla 2. 1</b> Estimación de la masa para el modelo FPV .....	21
<b>Tabla 2. 2</b> Parámetros para 3 direcciones del viento.....	31
<b>Tabla 2. 3.</b> Escenarios de simulación propuestos para la simulación.....	34
<b>Tabla 3. 1.</b> Escenarios variando el ángulo para cada espectro .....	38
<b>Tabla 3. 2.</b> Respuesta dinámica de varios escenarios variando el ángulo del espectro de olas.....	39
<b>Tabla 3. 3.</b> Respuesta dinamica de varios escenarios variando la velocidad de la corriente .....	42
<b>Tabla A 1</b> Velocidad promedio máxima 2010-2018 .....	53
<b>Tabla A 2.</b> Datos obtenidos para velocidad de la corriente .....	56

## RESUMEN

Ante la propuesta presentada por la Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC EP) de instalar una plana planta solar fotovoltaica flotante (FPV) en el embalse de Mazar, se realiza un estudio del arte para revisar posibles soluciones de sistemas de amarre que se adapten a las condiciones que presenta la topografía del embalse en cuanto al ancho disponible para la instalación, variación de grandes niveles de agua, cargas producidas por el viento, oleaje y corriente, entre otras.

Para instalar un FPV en Mazar se evalúan varias zonas, escogiendo la zona más crítica posterior se realiza una evaluación de alternativas, y se define una geometría para realizar una preselección de sistema de amarre mismo que consta de una línea a la cual se incluye una polea móvil misma que sujeta un peso muerto, adicional se plantea un modelo conceptual.

En base a los datos meteorológicos del embalse, al igual que estimaciones realizadas se determinan parámetros como velocidad del viento, corriente y se caracteriza un espectro de olas. Posteriormente se define un modelo numérico al igual que algunos posibles escenarios, aplicando las condiciones de cada escenario y con la ayuda del programa computacional ANSYS AQWA, se realiza la simulación dinámica del modelo propuesto y se concluye que el sistema propuesto cumple con los parámetros necesarios de operación y funcionamiento en el embalse de Mazar.

**PALABRAS CLAVE:** Sistema de amarre, FPV, viento, oleaje, corriente, análisis dinámico, modelo numérico.

## **ABSTRACT**

In view of the requirement from the Electric Corporation of Ecuador (CELEC EP) to install a Floating Photovoltaic System (FPV) in the Mazar reservoir, this study reviews the state of the art for mooring system solutions that can be adapted to conditions presented by the reservoir's topography, such as available width for installation, water level variations, loads generated by wind, waves, and currents, among others.

The areas where the FPV can be installed are assessed, selecting the most critical zone for further selection of alternatives. A geometry of the FPV is defined to the mooring system, which consists of a line with a movable pulley that holds a dead weight.

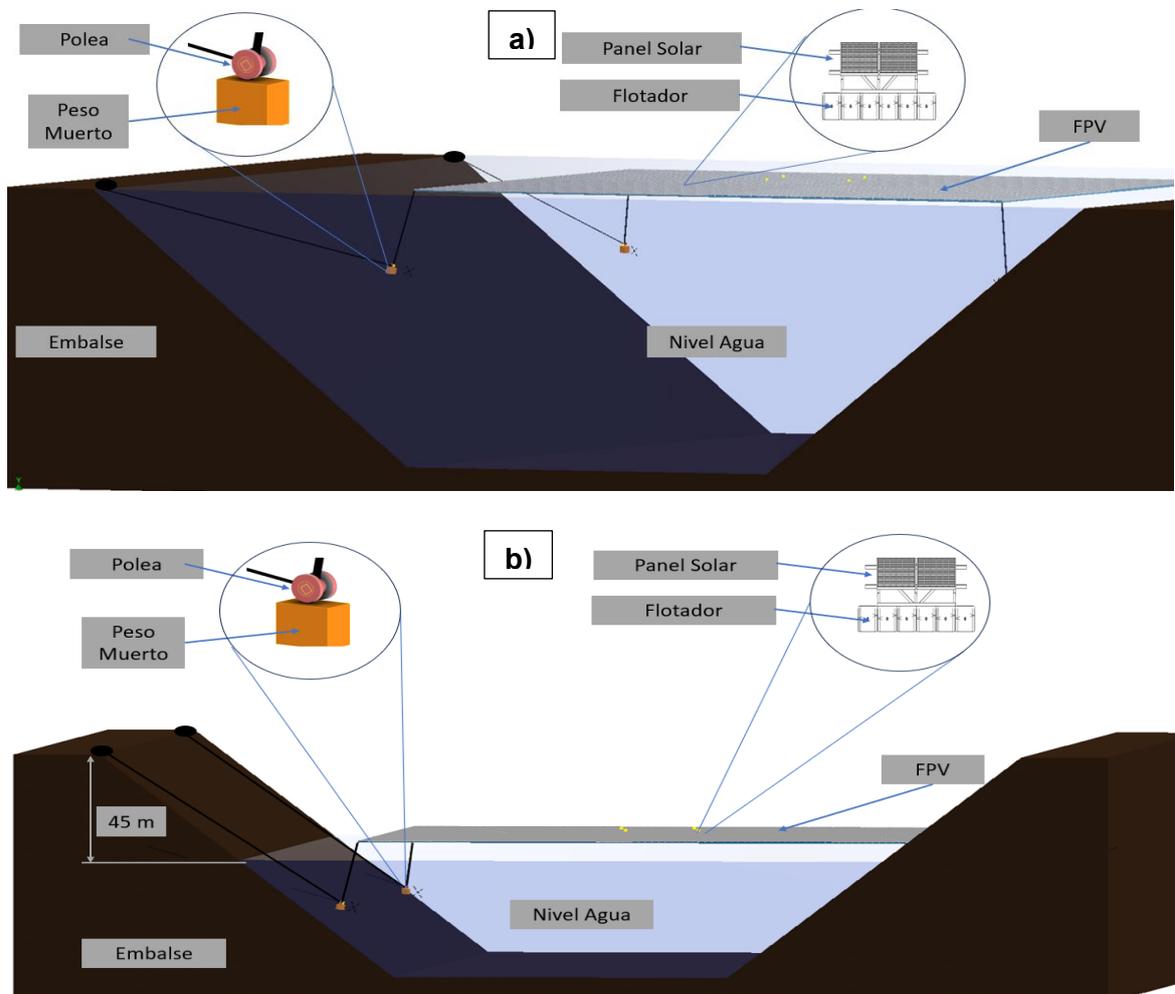
Based on the meteorological data, parameters such as wind speed, current, and wave spectrum are determined. Subsequently, a numerical model is defined, along with several potential scenarios. By applying the conditions of each scenario and using the computational code ANSYS AQWA, a dynamic analysis of the proposed model is performed, concluding that the proposed system meets the necessary parameters for its operation.

**KEYWORDS:** Mooring system, Floating Photovoltaic System (FPV), wind, waves, current, dynamic analysis, numerical model.

# 1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Considerando el análisis de prefactibilidad realizado por CELEC EP, el embalse de Mazar ofrece varias zonas en las cuales puede ser instalado un FPV. El presente proyecto escoge la Zona 3 considerada la más crítica, para evaluar la respuesta dinámica de un sistema de amarre que se adapte a las condiciones ambientales, topográficas y de variación de nivel de agua.

Se caracteriza geométricamente un FPV, considerando las limitaciones del embalse, tomando en cuenta que conforme se da la variación de nivel de agua se reduce el espacio para su instalación. Ver Figura 1, a) y b). Una vez realizada la evaluación se escoge un sistema de amarre mismo que parte de un sistema tradicional de líneas de amarre tensas al que se incluye una polea y un peso muerto en su composición.



**Figura 1.** FPV en el embalse de Mazar a) Cota superior b) Cota inferior

Posteriormente, se evalúan las condiciones ambientales a las que va a estar sometido el módulo FPV, en este punto se evalúan las cargas a las que va a estar sometida la

estructura, siendo estas principalmente cargas generadas por el viento, oleaje y corriente, en varios estudios se consideran cargas por congelamiento mismas que en el caso no se consideraran ya que no se han registrado puntos de congelación dentro de la zona de estudio.

Finalmente, las simulaciones permiten evaluar desplazamientos tanto en dirección como en rotación, a fin de analizar si es óptimo el sistema de amarre seleccionado.

## **1.1 Objetivo general**

Analizar la respuesta dinámica de un módulo del sistema fotovoltaico flotante (FPV), considerando la cota superior en la zona 3 del embalse de Mazar.

## **1.2 Objetivos específicos**

1. Recabar información sobre sistemas fotovoltaicos flotantes ya instalados, sistemas de amarre y condiciones a evaluar con el fin de plantear un modelo simple para realizar el análisis de su respuesta dinámica.
2. Detallar las condiciones del embalse para determinar las cargas que afectaran directamente al modelo.
3. Seleccionar un sistema de amarre para un módulo de un FPV, que se adapte a la variación de cota del embalse.
4. Realizar un modelo numérico del módulo de un FPV considerando todas las cargas, sistemas de amarre, y anclaje.
5. Analizar la respuesta dinámica del FPV.

## **1.3 Alcance**

El alcance del presente proyecto está limitado a seleccionar y desarrollar un sistema de amarre que se adapte a las necesidades de uno de los módulos de un FPV, en la zona 3 cota superior del embalse de Mazar realizando el análisis de las características geométricas, topográficas, cargas ambientales que lo afecten, para finalizar con el análisis dinámico del FPV.

## **1.4 Marco teórico**

### **1.4.1. Plantas Solares Fotovoltaicas Flotantes.**

Aprovechar la energía solar ha permitido desarrollar plantas fotovoltaicas (PV), sin embargo, al instalar granjas solares estas ocupan terrenos que pueden ser aprovechados como áreas productivas o habitables.

Una de las desventajas principales es el uso del territorio, ya que al ser montadas en tierra estas requieren que se realice una preparación de un territorio extenso mismo que puede incurrir en la deforestación, además de la pérdida de la flora y fauna que se encuentren en la región en la que se quiera implementar.[4]



**Figura 1. 1** Granja Solar

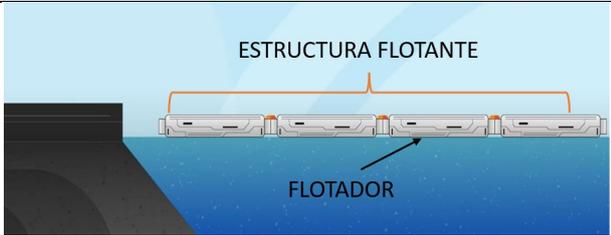
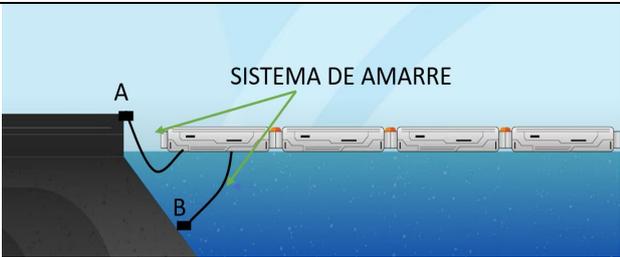
Fuente:[5]

Las plantas fotovoltaicas flotantes por otro lado ofrecen una innovación sobre las plantas fotovoltaicas tradicionales, en el caso de estas plantas al no estar sobre territorio aprovechable, cubrir con estas estructuras una superficie de agua contribuye en el control de la temperatura y evaporación de la zona cubierta.

La energía que se genera también se puede usar para el tratamiento del agua, controlando además el crecimiento desproporcionado de flora marina perjudicial, como ventaja adicional al estar en contacto con la superficie acuática esta ayuda a refrigerar los paneles solares aumentando su eficiencia. [3]

Los FPV, están formados básicamente de los mismos módulos usados en instalaciones realizadas comúnmente en tierra, con la diferencia que estos se encuentran anclados a flotadores los cuales están unidos entre sí a través de hileras, y a su vez están anclados al fondo marino , o a otras estructuras para impedir su movimiento, en la Tabla 1.1 se detallan de forma esquemática las principales partes de un FPV.[6]

**Tabla 1. 1** Partes de un FPV

<b>PLANTAS SOLARES FOTOVOLTAICAS FLOTANTES</b>			
<b>PARTE</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>ESQUEMA</b>	<b>FUENTE</b>
Estructura Flotante	Compuesto por una estructura y un flotador, la misma que mantiene al sistema suspendido sobre el agua		[7]
Sistema de amarre	Ancla al FPV, a la orilla (A), o al lecho marino (B), ajustándose a las fluctuaciones producidas por el oleaje, estabilizando al FPV.		[7]
Sistema Fotovoltaico	Paneles solares recolectan la energía solar que se convierte en eléctrica.		[7]

Sistema de cableado	Cableado subacuático que transporta la energía a la subestación eléctrica para su tratamiento y distribución.	 <p>SUBESTACIÓN ELÉCTRICA</p> <p>CABLEADO</p>	[7]
---------------------	---	---	-----

Los FPV idealmente deben ser instalados en lugares con aguas tranquilas, sin variaciones de nivel además estos deben estar situados cerca de las orillas.

#### 1.4.2. Sistemas de amarre

Los sistemas de amarre se encuentran conformados por una o más líneas las cuales se conectan a la una estructura flotante anclándolas al lecho marino, a tierra o a otra estructura marina con la finalidad de restringir su movimiento, evitando la colisión con otros elementos o a su vez evitando que queden a la deriva, estas líneas pueden a su vez estar constituidas por cadenas, cables, fibras sintéticas, etc.[8]

En la figura 1.2, se puede visualizar que en un sistema que consta de varias líneas de amarre, estas ayudan a que la estructura se encuentre fija en un lugar restringiendo todos sus movimientos, mientras que en el sistema de amarre que consta únicamente de una línea el barco puede moverse en varias direcciones, y restringe que este sea arrastrado por los efectos de la marea y se quede a la deriva.[9]

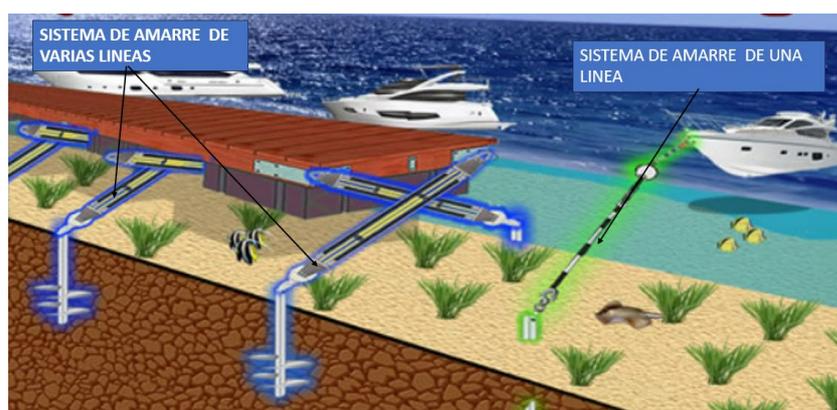


Figura 1. 2 Sistemas de Amarre

Fuente:[9]

### ***Tipos de sistemas de amarre***

Los sistemas de amarre son esenciales en el mantenimiento de las estructuras marinas, desarrolladas en casos de exploración o ejecución de proyectos de extracción de petróleo, gas, etc., además de cumplir la función de mantener la integridad y operatividad, equilibran las cargas ambientales produciendo una fuerza de restauración, adicional a ello también equilibra las cargas de operatividad necesarias durante el desarrollo del proyecto o exploración.[10];[11].

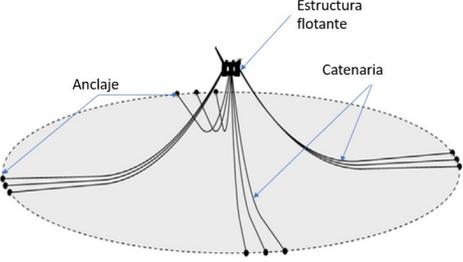
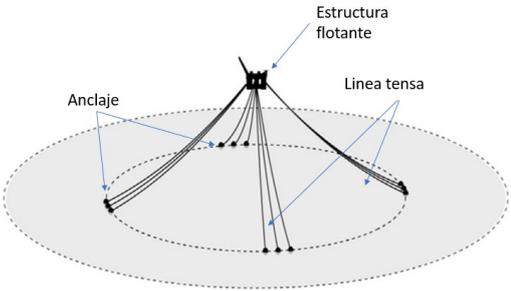
Los sistemas de amarre pueden ser temporales o permanentes. Son temporales aquellos que son usados en aplicaciones de poca duración de tiempo, estos pueden ser usados en barcos en alta mar, tubería, barcos grúa, etc., no es necesario su mantenimiento o a su vez este es mínimo.

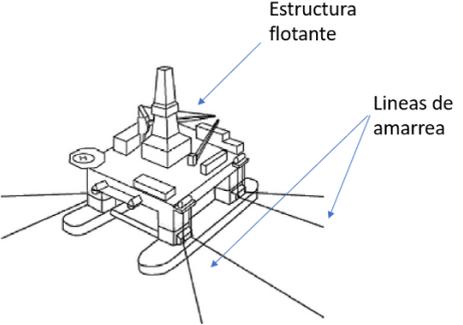
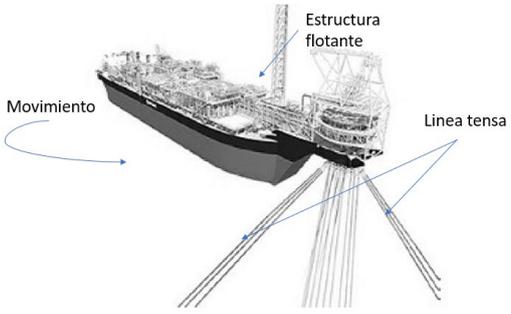
Los sistemas de amarre permanentes son usados para una gran variedad de estructuras flotantes a largo plazo, en cuyos diseños se evalúan adicionalmente tiempos de mantenimiento ya sean estos en años o en décadas. Para el caso de un FPV, se considerarán sistemas de amarre permanentes, debido a la vida útil promedio de los paneles de 25 años.[12]

En la Tabla 1.2 se pueden visualizar los sistemas de amarre más usados en estructuras marinas flotantes.

**Tabla 1. 2** Sistemas de amarre

Fuente:[13]

Sistema de amarre	Características	Diagrama
Catenaria	<p>La Catenaria se forma por efecto del propio peso de la línea de amarre, contrarrestando el desplazamiento estático y el movimiento dinámico del flotador.</p> <p>Sistema más usado a niveles bajos y medios de agua.</p>	
Líneas Tensas	<p>Sistema que se adapta mejor a espacios reducidos de anclaje, a consideración del sistema de catenaria se usa menor material.</p>	

<p>Extendido</p>	<p>Las líneas de amarre se encuentran colocadas alrededor de la estructura flotante, restringiendo la posición y el rumbo de la misma.</p>	
<p>En un punto</p>	<p>Las líneas de amarre se concentran a un punto de la estructura flotante, en este caso solo se restringe posición en un punto generando un centro de rotación, en este caso la estructura se adapta al movimiento propio del entorno ambiental.</p>	

### 1.4.3. Desafíos en la instalación de un FPV.

Las plantas solares fotovoltaicas flotantes empezaron a instalarse en el mundo a inicios del año 2007, y a pesar de que año tras año en la última década se han implementado varios proyectos alrededor del mundo, aun los estudios que se realizan no se encuentran en una etapa de madurez o a su vez estos son escasos y no permiten desarrollar una metodología estándar [14]

Para el diseño de plantas solares fotovoltaicas flotantes se consideran eventos que ya han ocurrido en base a datos históricos y también condiciones que pueden significar críticas a futuro. Sin embargo, no se pueden predecir eventos como en el caso de un embalse en el cual la variación de nivel de agua sea de mayor a 50 m, en donde toda la integridad de un proyecto que cuesta varios cientos de millones de dólares se vea afectado. [15];[16]

La integridad de un FPV se recarga sobre el sistema de amarre que es escogido ante las condiciones ambientales y todas las cargas asociadas, si el sistema de amarre falla el sistema completo colapsa.

Un ejemplo de colapso que se puede citar es el ocurrido en Japón, en el año 2019, en la planta de Yamakura cuando los vientos producidos por el tifón Faxai, ocasionaron que las líneas de amarre se suelten desencadenando choques entre los módulos del FPV, provocando incluso un incendio, como se puede observar en la Figura 1.3.



**Figura 1. 3.** Accidente Planta Solar Yamakura a causa del tifón Faxai, Japón 2019.

Fuente: [17]

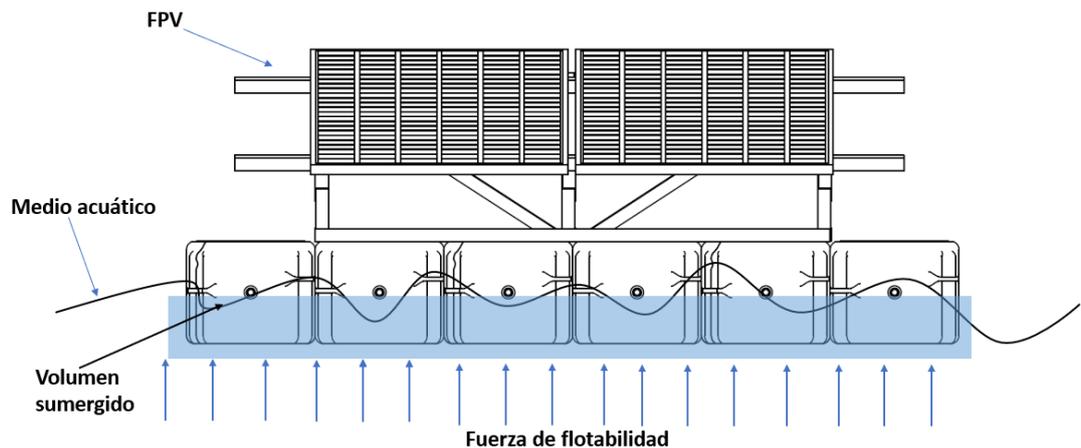
#### **1.4.4. Cargas que soporta un FPV**

Dentro del análisis de un sistema de amarre se debe considerar que los cables o líneas que componen el mismo tienen que encontrar el equilibrio ante las cargas que se producen sobre el FPV.

Un FPV principalmente soporta cargas por acciones del viento, las olas del embalse, la corriente, adicional en ciertos estudios también se analizan las cargas que se generan por acción del hielo, sin embargo, dentro del análisis que se realiza no son consideradas por el clima que se presenta en Ecuador.

##### **1.4.4.1. Flotabilidad**

Tanto la flotabilidad como la estabilidad debe ser garantizada en una estructura flotante, considerando adicionalmente las condiciones medioambientales (cargas de viento, oleaje, corriente), por lo que la estructura debe garantizar que la fuerza de flotación permita únicamente que un porcentaje de la estructura se encuentre sumergida, ver Figura 1.4.



**Figura 1. 4.** Flotabilidad de un FPV

**Fuente:** Propia.

De acuerdo con la ecuación (1.1). Las variables que se ven comprometidas dentro del análisis y cálculo de la fuerza de flotabilidad ( $F_f$ ) está representada por el producto entre la gravedad ( $g$ ), la densidad del fluido ( $p$ ) y el volumen sumergido ( $V_s$ ), que hace referencia al porcentaje del volumen desplazado por parte de la estructura que permanece hundida.

$$F_f = p * g * V_s \quad (1.1)$$

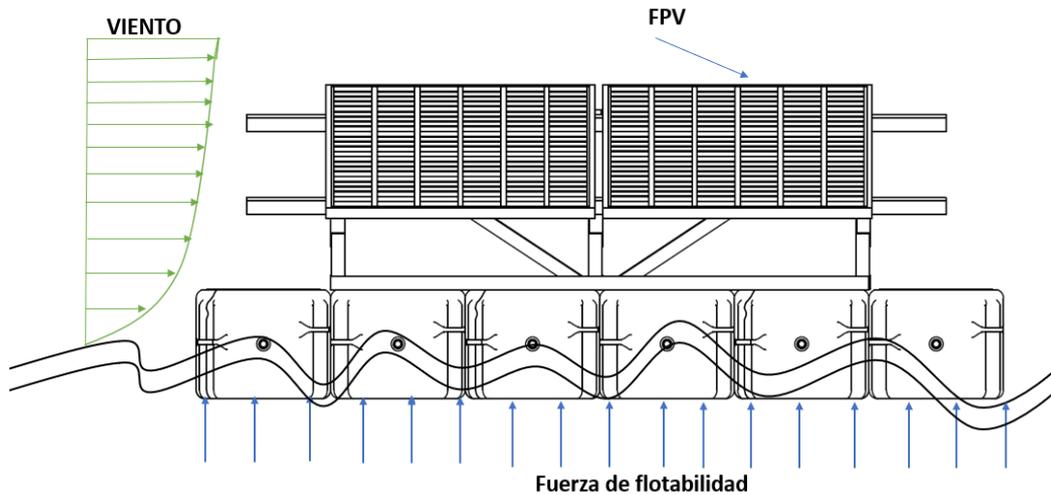
#### 1.4.4.2. Cargas producidas por el viento

El viento genera cargas de arrastre sobre un FPV, misma que depende principalmente de la velocidad del viento al igual que el tamaño y la forma del FPV.

La velocidad del viento varía con el tiempo, y con la altura sobre la superficie del mar comúnmente usando un valor de 10 m sobre la superficie, su dirección se representa desde donde sopla, por ejemplo, si un viento del sur sopla desde el sur hacia el norte.

En la Figura 1.5, se observa como el viento crea una fuerza normal a la estructura generando una fuerza de arrastre, la misma que puede ser estimada a través de la ecuación 1.2, en donde se la Fuerza de arrastre ( $F_a$ ) está es igual a la mitad del producto de la densidad del fluido en este caso aire ( $p_a$ ) por el coeficiente de arrastre el cual depende de la forma ( $C_d$ ) por el área normal a la acción del viento ( $A_n$ ) y por el cuadrado de la velocidad del viento.[18]

$$F_a = \frac{1}{2} * C_d * p_a * A_n * v^2 \quad (1.2)$$



**Figura 1. 5.** Cargas producidas por el viento sobre una estructura FPV.

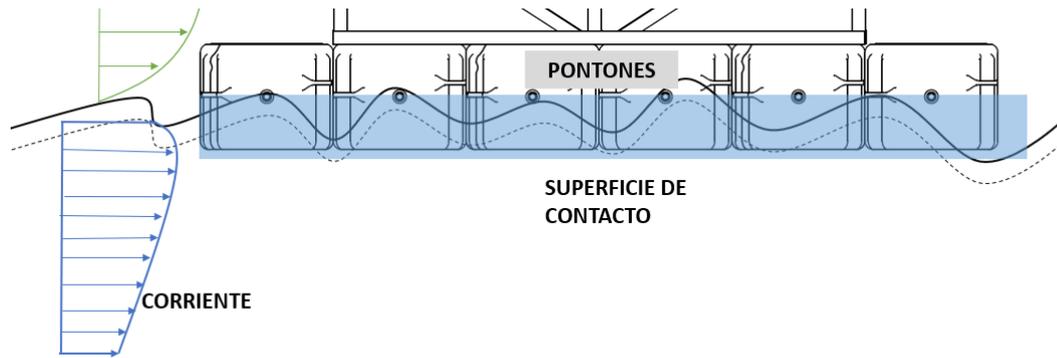
**Fuente: Propia**

La ecuación 1.3, es usada para determinar la velocidad del viento ( $U$ ) que está dada por el producto entre la velocidad en la superficie ( $U_0$ ), por la razón entre la altura de estudio ( $z$ ) sobre la altura en la superficie ( $z_0$ ) elevada al exponente ( $b$ ) que representa el perfil del viento, para estructuras offshore se usa un valor ( $b$ ) de 0.125.

$$U = U_0 * \left( \frac{z}{z_0} \right)^b \quad (1.3)$$

#### 1.4.4.3. Cargas producidas por la corriente.

En la figura 1.6, se observa que la corriente al igual que el viento se puede caracterizar por la velocidad y la dirección, esta carga afecta directamente la superficie de contacto que tiene una estructura con el medio acuático, al igual que el sistema de amarre que la compone.[19];[13]



**Figura 1. 6.** Cargas del viento y de la corriente sobre un FPV.

**Fuente:** Propia

Al igual que en la carga de viento, la fuerza de arrastre que genera la corriente puede ser calculada en base a la ecuación 1.2, obteniendo la ecuación 1.4, que básicamente dice que la Fuerza de arrastre generada por la velocidad de la corriente ( $F_c$ ) es igual a la mitad del producto de la densidad del fluido en este caso el agua ( $p_w$ ), por un coeficiente de forma ( $C_d$ ), por el área normal a la dirección de la corriente ( $A_n$ ) y por la velocidad de la corriente al cuadrado ( $v_c^2$ ). [20]

$$F_c = \frac{1}{2} * C_d * p_w * A_n * v_c^2 \quad (1.4)$$

#### 1.4.4.4. Oleaje

Las olas son generadas en embalses por tres motivos principales, por acción del viento, cambios en el nivel del agua, y por interacciones entre las corrientes y la topografía propia del embalse, es importante considerar que los embalses tienen características diferentes a zonas donde las masas de agua son abiertas. [21]; [22]

El viento que sopla sobre la superficie del embalse puede generar oleaje al transmitir energía a las capas superiores del agua generando las ondulaciones. [9]; [23]

Los cambios en el nivel de agua, ya sea por marea, condiciones naturales como fuertes lluvias, o por la operación de compuertas o válvulas, generan perturbaciones sobre el agua, también puede verse afectada la corriente al interactuar con la topografía del embalse generando oleajes.

### **Espectro de olas de Jonswap**

El espectro de olas de Jonswap se ha usado para caracterizar condiciones de oleaje en varios escenarios de cuerpos de agua ya sean estos en embalses o en mar abierto. Este espectro se basa en el modelo de energía de las olas que proporciona la información necesaria sobre la amplitud y la frecuencia de las olas de un determinado lugar.[24]

En investigaciones desarrolladas durante la década de 1970, se determinó la formulación espectral para situaciones de búsqueda limitada, misma que se expresa en las ecuaciones 1.5 y 1.6. [25]

En la ecuación 1.5, se considera la frecuencia angular ( $\omega$ ), la altura significativa de la ola ( $H_s$ ), el factor pico ( $\gamma$ ) considerado típicamente un valor 3.3, el periodo pico ( $T_p$ ), en el caso de la ecuación 1.6, se considera además la frecuencia angular pico ( $\omega_p = \frac{2\pi}{T_p}$ ), y una función escalón ( $\sigma$ ) donde ( $\sigma = 0,07$ ; **si**  $\omega < \omega_p$ ,  $\sigma = 0,09$ ; **si**  $\omega > \omega_p$ ).

$$S_{\zeta}(\omega) = \frac{320 \cdot H_s^2}{T_p^4} \cdot \omega^{-5} \cdot e^{\left(\frac{-1950}{T_p^4} \cdot \omega^{-4}\right) \cdot \gamma^A} \quad (1.5)$$

$$A = e^{-\left(\frac{\frac{\omega}{\omega_p} - 1}{\sigma \cdot \sqrt{2}}\right)^2} \quad (1.6)$$

La altura significativa de la ola ( $H_s$ ) se puede calcular en función del espectro de energía de Jonswap, definido como  $4 * \sqrt{M_0}$ , donde  $M_0$  representa el momento espectral de primer orden, mismo que se calcula con la integral del área bajo la curva del espectro de energía de Jonswap.[26]; [27];

Para definir  $H_s$  y  $T_p$ , se realizaron mediciones en el lago Ontario, Canada, por parte de Donelan, creando el modelo de Donelan basado en el espectro de Jonswap, definiendo las ecuaciones 1.7 y 1.8, donde  $U$  es la velocidad del viento, y  $F$  es el Fech (longitud de alcance) y  $g$  la gravedad.

$$H_s = 0.00366g^{-0.62}U^{1.24}F^{0.38} \quad (1.7)$$

$$T_p(1.85g^{0.77}U^{-0.54}) = F^{0.23} \quad (1.8)$$

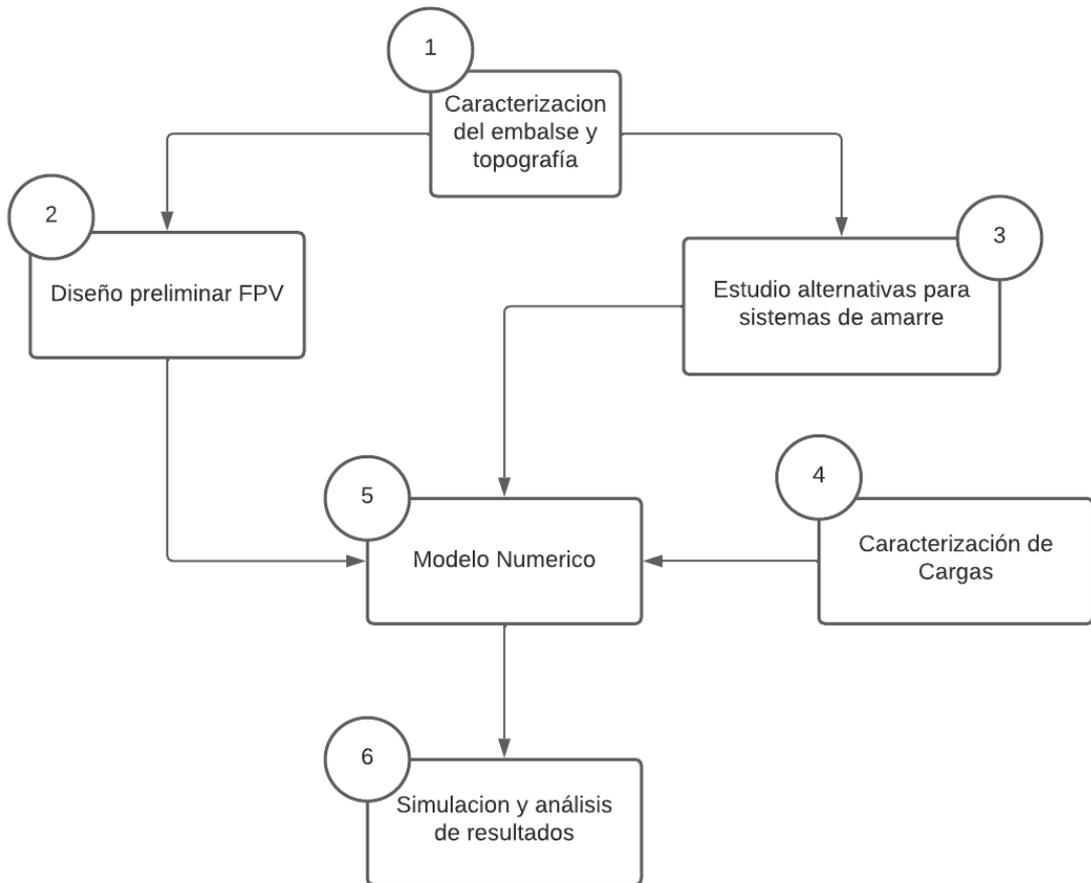
## **2 METODOLOGÍA**

En la Figura 2.1, se presenta la metodología, que tiene como punto de partida la caracterización del embalse y la topografía de este a partir de los datos proporcionados CELEC EP, en este punto se revisan datos para definir variaciones de cota, la geometría transversal del embalse y el efecto que tendrán sobre un FPV.

En el punto 2, se realiza un modelo 3D simplificado considerando los obstáculos del punto 1, para definir las partes principales de un FPV, así como sus dimensiones geométricas, y también establecer un peso estimado de la estructura. En el punto 3 se realiza el estudio de sistemas de amarre tradicionales, así como alternativas que puedan adaptarse a las necesidades del punto 1 y 2.

Pasando al punto 4, se evalúan todas las cargas dinámicas que actúan sobre la planta solar (cargas por viento, corriente, oleaje), estudiando velocidades, direcciones, y espectros de ser el caso. En el punto 5 se desarrolla la simplificación del problema a través de un modelo sencillo en un programa de simulación al que se aplican todas las caracterizaciones tanto de cargas dinámicas, estáticas, y arreglo de líneas de amarre.

Finalmente, en el punto 6, se establecen escenarios en los que se evalúan desplazamientos tanto lineales como angulares máximos, a fin de verificar si el sistema de amarre seleccionado cumple con las condiciones establecidas en los escenarios propuestos.



**Figura 2. 1** Metodología.

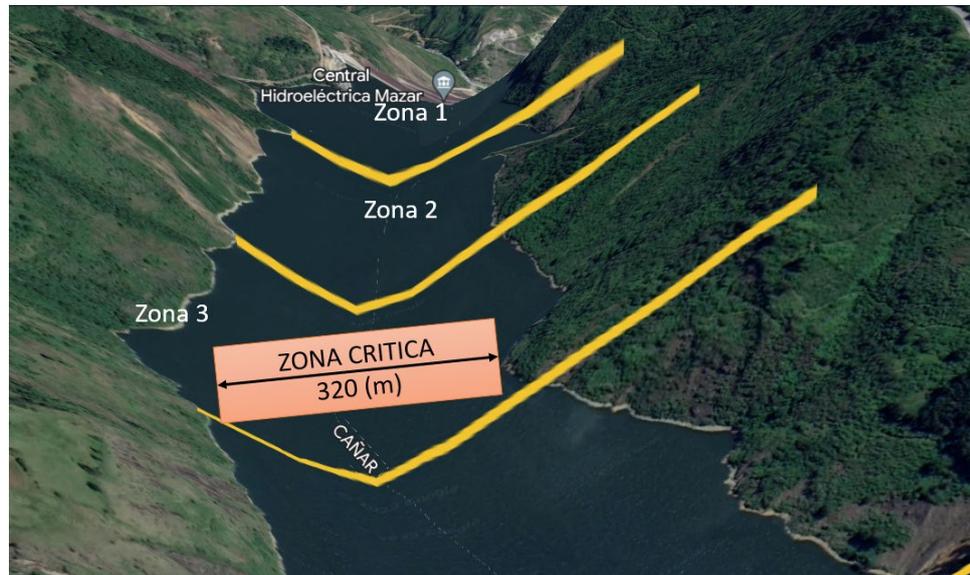
**Fuente:** Propia

## 2.1 Caracterización del embalse y topografía

En este punto se realiza un análisis de los datos que se encuentran en el informe de prefactibilidad proporcionado por CELEC EP, en donde de acuerdo con las evaluaciones realizadas una de las mejores zonas para realizar la instalación del FPV, es la Zona 3, por tal motivo se selecciona esta para realizar el análisis.

Empezando con los datos topográficos de la zona se establece las medidas del ancho del embalse al que se debe adaptar el FPV, como se puede ver en la Figura 2.3, el ancho que se determina en la zona 3 a través del uso del software Google Earth es de 320 m.

Al tener una topografía irregular se considera un punto crítico dentro de la zona 3 para la selección de un sistema de amarre apropiado que se adapte a zonas más anchas en el embalse sin inconvenientes.



**Figura 2. 2.** Determinación del ancho de embalse

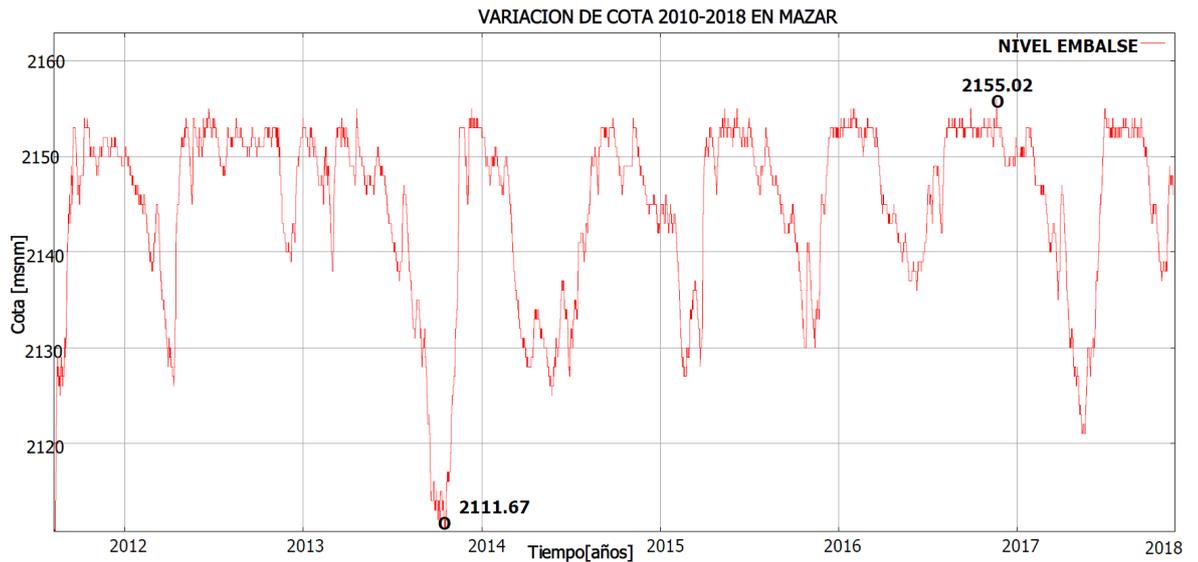
**Fuente:** Propia

### ***Variación de cota***

Una vez establecido el ancho crítico de la zona 3 del embalse, el siguiente paso es el análisis de los datos proporcionados de caudal y variación de la cota del embalse, para el mismo se revisan los datos históricos de los registros desde el año 2010 hasta el año 2018.

En la figura 2.3, se observa en la gráfica los valores de cota a través desde el año 2010 hasta el año 2018, para obtener dicho grafico se eliminaron los datos duplicados, para fines de estudio es importante únicamente verificar la cota ya que se desea determinar los puntos críticos del embalse a través de los años.

Se han determinado datos atípicos que no deben ser incluidos en la gráfica ya que no se encuentran entre la tendencia de esta, se tiene una cota de 0(msnm) y una de 1007 (msnm), las cuales no van a ser consideradas dentro del análisis.



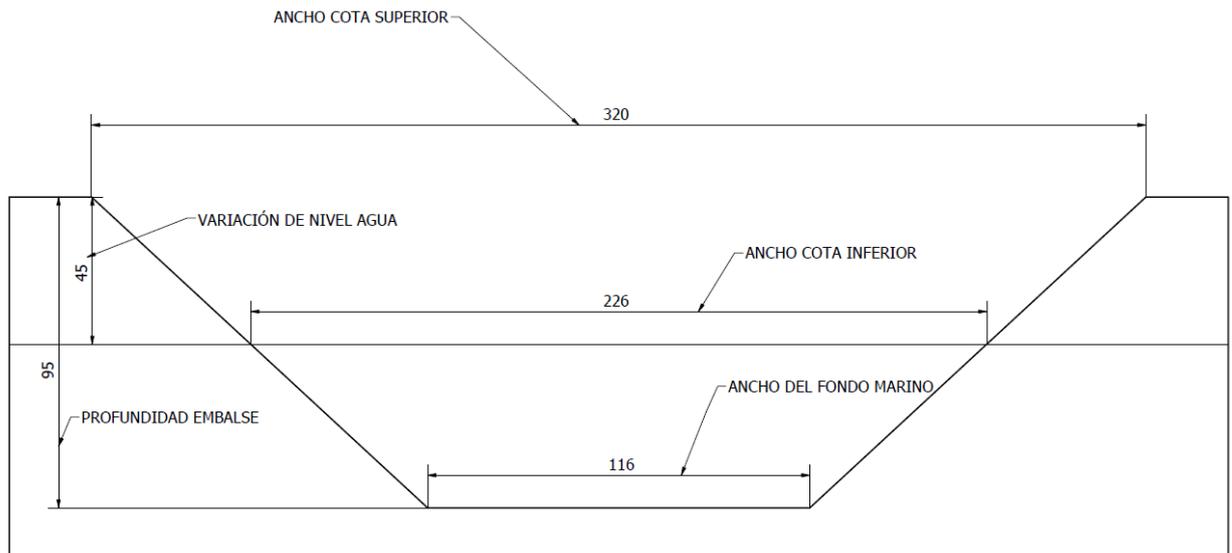
**Figura 2. 3** Variación De Cota 2010-2018

**Fuente:** Propia

Se determina que los puntos de interés se encuentran entre los puntos máximo 2155.02 (msnm) y mínimo 2111,67 (msnm), obteniendo una variación de cota máxima de 43,25 (m), misma que para fines del análisis se considerara como 45 (m).

En la figura 2.4, se muestra un corte transversal del embalse de acuerdo con los datos y sus variaciones tanto de cota como de ancho, mismos a los que debe adaptarse el modelo de FPV al igual que su sistema de amarre.

Se puede destacar de este análisis que la variación del ancho al variar los 45 m de cota es considerablemente grande teniendo una variación de 94 m, dejando en la cota inferior un espacio de 226 m usable para colocar un FPV con su sistema de amarre.



**Figura 2. 4.** Caracterización del embalse de Mazar para la Zona3

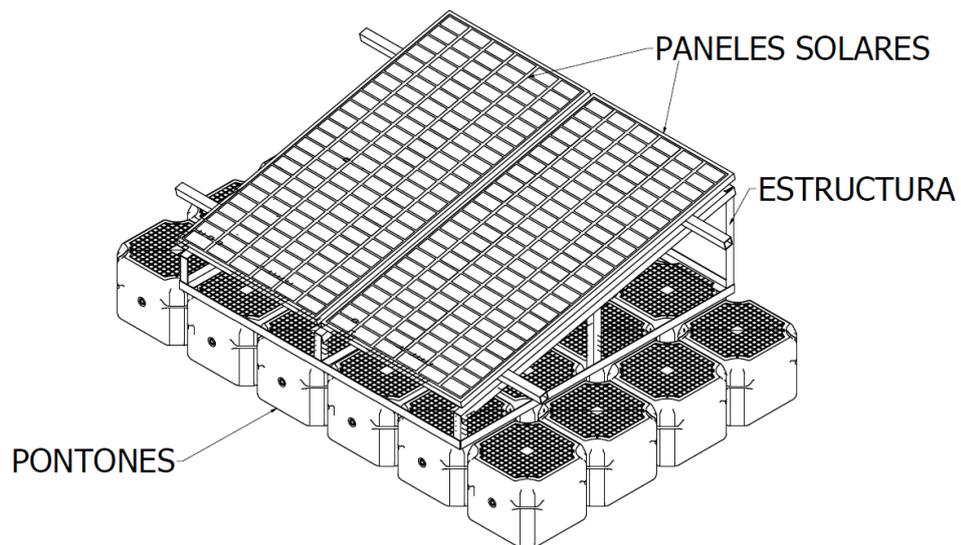
Fuente: Propia

## 2.2 Diseño preliminar de un FPV.

Dentro de este punto se consideran dos puntos importantes la modelación de las partes principales y simplificadas de un FPV, al igual que el ancho al cual debe adaptarse mismo que fue estudiado en el punto anterior.

### **Modelo FPV.**

Cada uno de los módulos de un FPV, se encuentran formados de un panel solar una estructura por lo general realizada de acero galvanizado a la que se coloca el panel solar cuyo conjunto se coloca sobre los pontones, ver Figura 2.5.



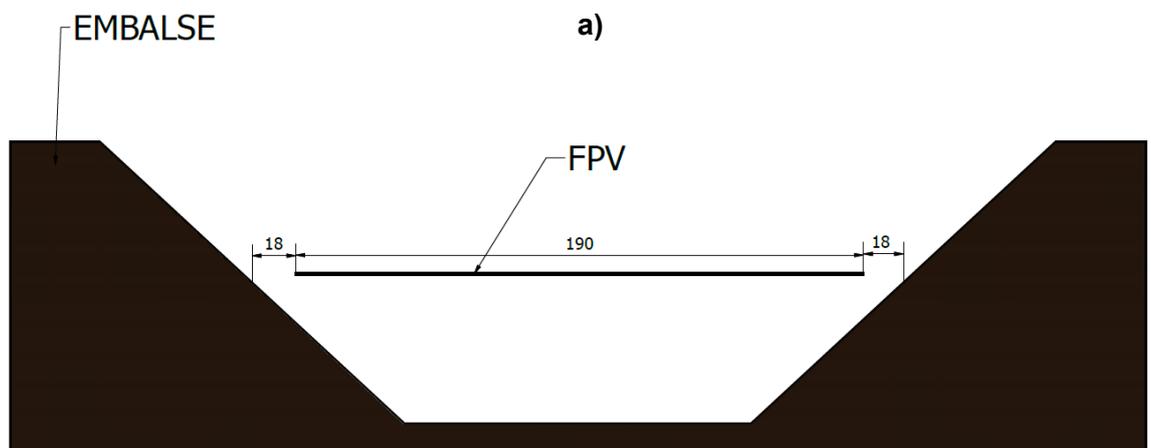
**Figura 2. 5** Modulo FPV

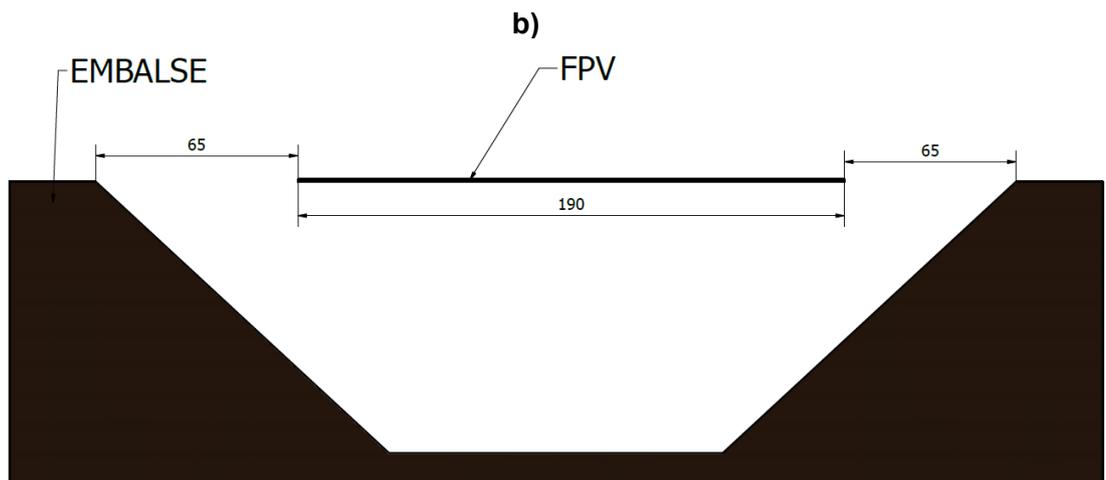
**Fuente:** Propia

A partir de la unión de módulos se forma la estructura completa de un FPV, considerando principalmente el ancho del embalse tanto en la cota alta como en la cota baja se determina un ancho aproximado para la estructura de 190 m.

Considerando la cota mínima en la Figura 2.6 a), muestra el caso crítico donde la estructura tendría menor margen de movimiento hacia la orilla, considerando 8 m de movimiento existe un margen de 10 m para evitar choque con las orillas.

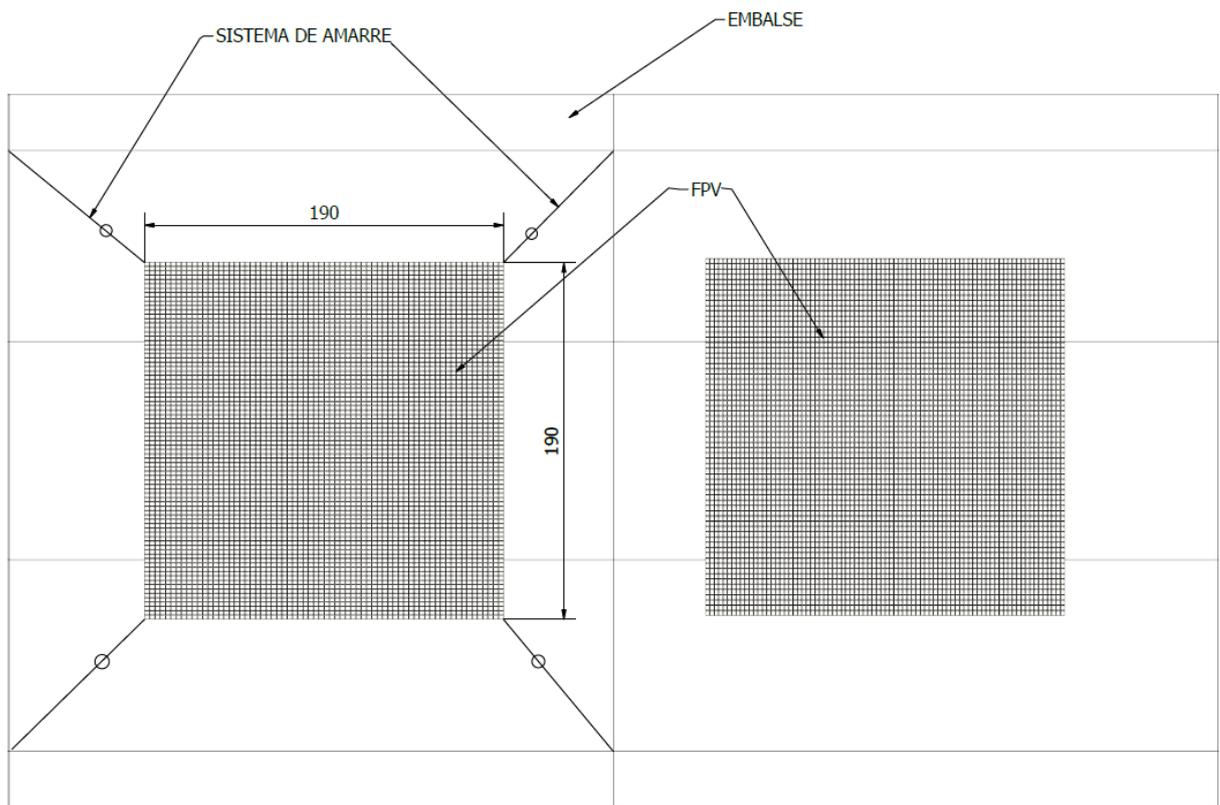
En la Figura 2.6, b) se puede observar que en el caso de la cota superior el movimiento hacia la orilla del embalse en cualquiera de las direcciones se puede realizar hasta en 55 m, dejando como margen 10 m para evitar colisión.





**Figura 2. 6.** Dimensionamiento geométrico un FPV considerando el ancho del embalse, a) cota inferior y b) cota superior

En cuanto a la longitud del largo del FPV, se escoge una medida similar ya que no influye sobremanera en las características críticas. En la figura 2.7, se puede observar cómo se distribuyen dos FPV, considerando que sus dimensiones se adaptan a la topografía del embalse y no existiría colisión entre si o con su sistema de amare.



**Figura 2. 7.** Distribución de un FPV sobre el embalse de Mazar

**Fuente:** Propia

Una vez determinada la geometría del modelo de un FPV, se realiza una estimación de la masa de la estructura, para lo cual adicionalmente se consideran elementos como el inversor, cables, accesorios y conexiones.

En la tabla 2.1, se muestran los elementos considerados para el cálculo, así como la masa estimada, consiguiendo una masa de 224,26 Ton, misma que para el desarrollo del trabajo se tomara como 225 Ton.

**Tabla 2. 1** Estimación de la masa para el modelo FPV

**Fuente:** Propia

COMPONENTE FPV	Cantidad	Masa (Kg)	MASA (Ton)
Módulos solares	7440	24.9	185.26
Inversor	1	3400	3.4
Cables y accesorios	-	-	36
		<b>TOTAL</b>	<b>224.26</b>

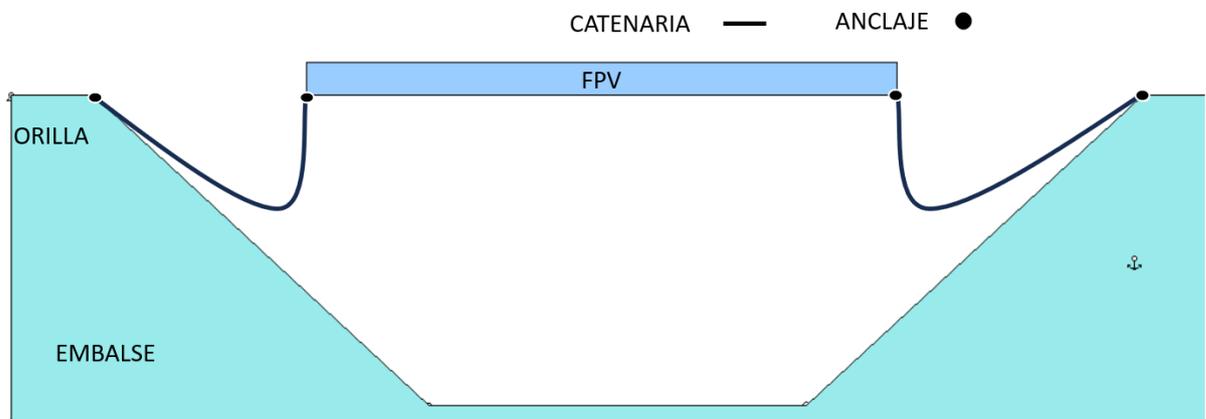
## 2.3 Análisis de alternativas para un sistema de amarre.

Una vez determinadas las características principales del FPV, y realizadas las simplificaciones necesarias al modelo se selecciona un sistema de amarre, en este punto se estudian sistemas de amarre convencionales y también propuestas con mecanismos simples que pueden ser usados para abaratar los costos, así como la facilidad en la instalación de estos en la zona de estudio.

### **Sistema de amarre con Catenarias**

El primer sistema de anclaje que se propone es uno basado en catenarias, como se puede observar en la Figura 2.8. se elaboró un esquema a escala evaluando el sistema de catenarias, una de las facilidades que ofrece este sistema es su simplicidad ya que únicamente se anclan las cuerdas a la orilla y al FPV.

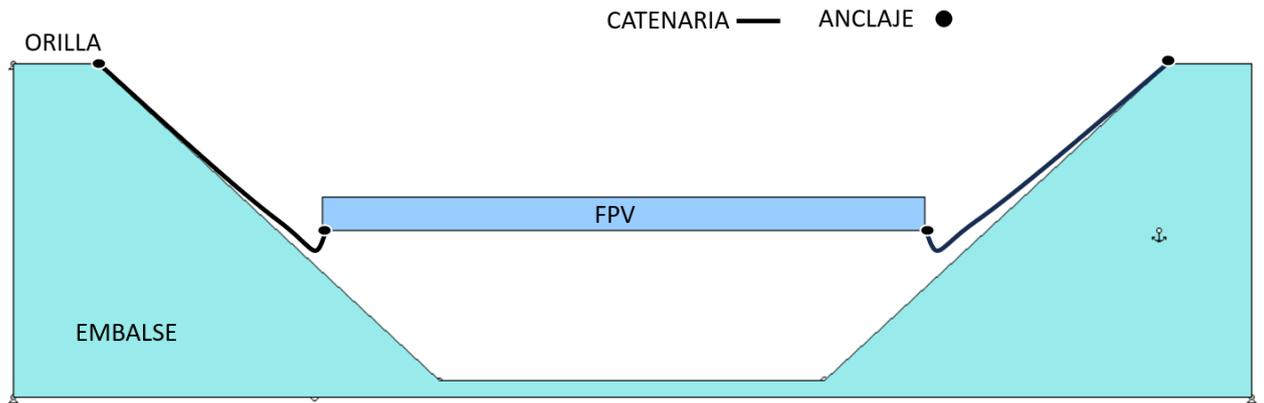
Se puede apreciar que en la cota superior a nivel de la orilla el sistema se mantiene estable, y la catenaria conserva su forma.



**Figura 2. 8.** Sistema Catenaria Cota Superior

Fuente: Propia

De acuerdo con el esquema presentado en la Figura 2,9, al variar la cota la catenaria pierde sus propiedades de forma, adquiriendo la tendencia de una cuerda tensa, adicional se puede observar que las líneas de amarre tienden a chocar con el embalse, lo que puede ocasionar atascamientos de las líneas de amarre debido a la topografía del embalse.

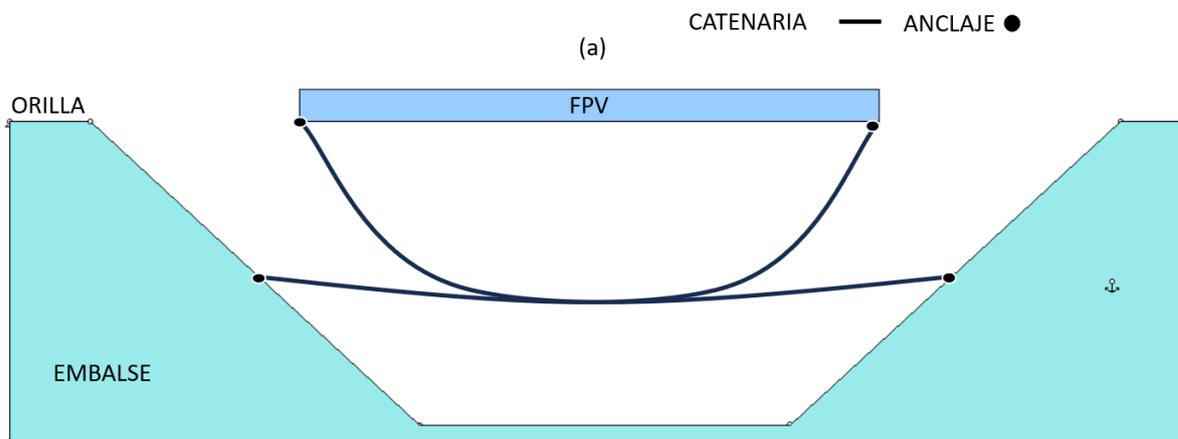


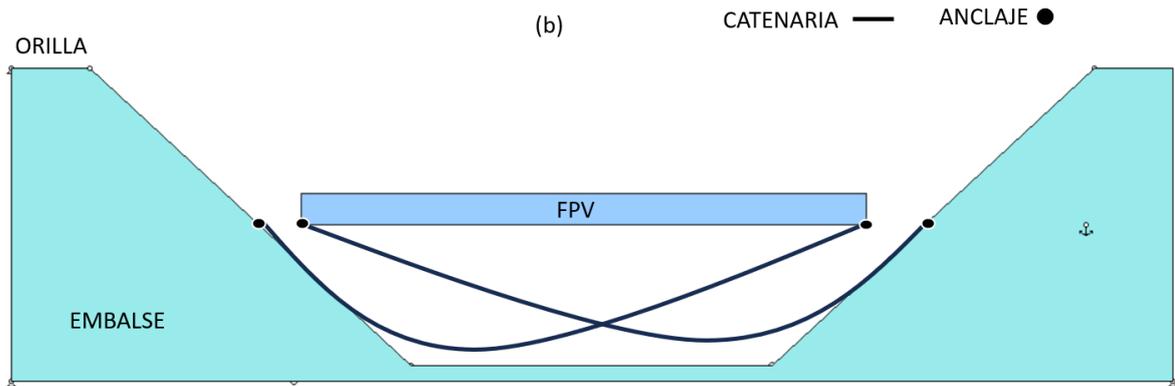
**Figura 2.9** Sistema Catenaria Cota Inferior

**Fuente:** Propia

Se realizó un segundo análisis del sistema de catenarias, esta vez colocando los anclajes en la zona media del embalse y tomando como punto de anclaje en el FPV los puntos más alejados del FPV a los anclajes del embalse.

Como se pueden revisar en la Figura 2.10, el sistema funciona bien en la cota superior, sin embargo, al evaluar el descenso a la cota inferior pasa algo similar a lo sucedido en modelo de las Figuras 2.8 y 2.9, ya que al disminuir la cota del embalse las líneas de amarre interactúan con peligro de atrapamiento, y al no conocer a plenitud el perfil topográfico, además de la pérdida de sus propiedades, no mantendría estable al FPV.





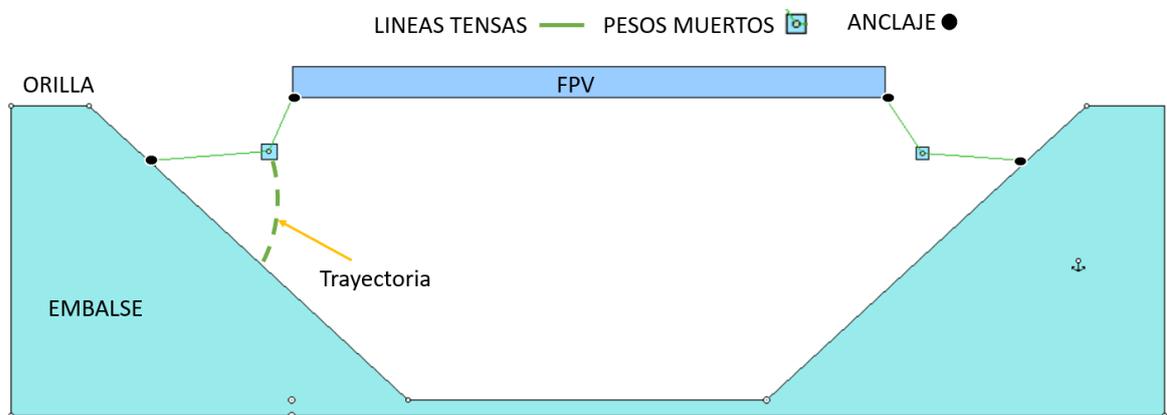
**Figura 2. 10** Sistema de Amarre Catenaria; a) Cota superior; b) Cota Inferior

**Fuente:** Propia

**Sistema de amarre con líneas tensas y pesos muertos**

Para el siguiente sistema de amarre propuesto se toma en cuenta a un sistema basado en líneas tensas, mismas que obtienen esta característica al colocar estratégicamente pesos muertos en las mismas a fin de mantener el sistema estable.

En la figura 2.11, se observa el efecto del peso muerto sobre las líneas de amarre, al ser colocado en un punto fijo este realizaría idealmente un movimiento curvilíneo similar al de un compás, los anclajes al embalse se colocaron en un punto medio entre las cotas de análisis, para que pueda cumplir la variación de cota.



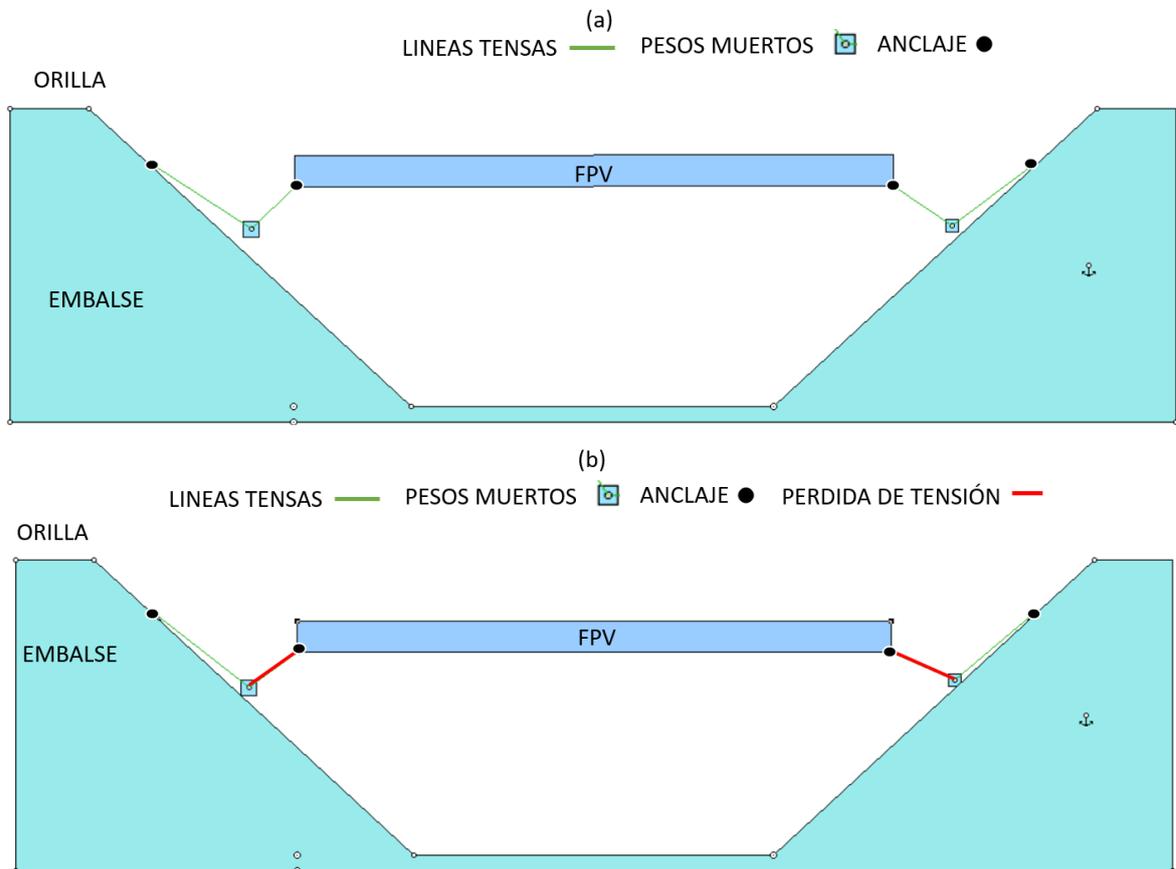
**Figura 2. 11** Sistema de Amarre líneas tensas con pesos muertos cota superior

**Fuente:** Propia

Al observar la Figura 2.12, (a) se evidencia efectivamente que al realizar este movimiento curvilíneo no afectaría las líneas manteniéndolas tensas durante la variación de la cota, sin embargo, no cumplirían con los 45 m de variación que se propuso.

Si bien, se pueden colocar los puntos de anclaje más al fondo del embalse incurriría en que la longitud de las líneas se reduciría en proporción a la reducción del embalse este efecto evitaría que el FPV pueda retornar a la cota más alta.

En la Figura 2.12(b), se comprueba que, al intentar cumplir con la variación completa de la cota, los pesos muertos se asientan sobre la topografía del embalse y al disminuir más el nivel de agua llega un punto donde las líneas pierden la tensión liberando los movimientos que puede realizar el FPV.

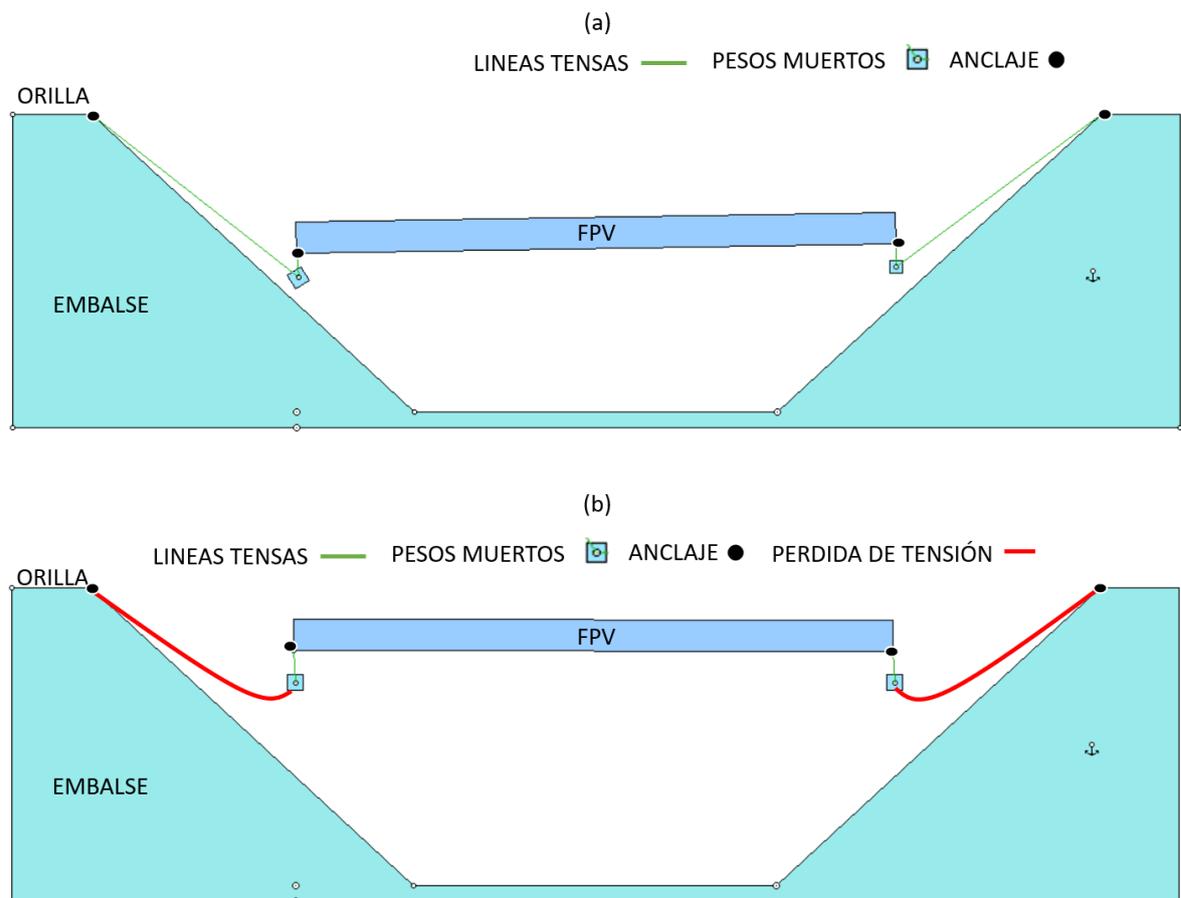


**Figura 2. 12** Sistema de amarre líneas tensas con pesos muertos cota inferior; a) líneas tensas; b) líneas pierden tensión

**Fuente:** Propia

Otro de los inconvenientes encontrados en este modelo es la instalación al considerar el anclaje y mantenimientos que se deben realizar pueden generar costes altos. Pensando en esta problemática también se desarrolló un modelo en el cual los anclajes se encuentran en las orillas del embalse.

Analizando la Figura 2,13, se observa en a) que el sistema funciona en el escenario de cota inferior ya que se mantienen tensas las cuerdas y el peso muerto cumple con su propósito, sin embargo, al subir el nivel del agua como el peso muerto se mantiene fijo en un punto únicamente fija al FPV, las líneas empiezan a perder tensión mientras el nivel sube como se puede observar en b), entonces el sistema falla, por pérdida de tensión en las líneas de amarre.



**Figura 2. 13** Sistema de amarre líneas tensas con pesos muertos anclaje a la orilla; a) Cota inferior; b) Cota Superior

Fuente: Propia

***Sistema de amarre con líneas tensas con poleas móviles que sujetan un peso muerto.***

El modelo expuesto anteriormente funciono relativamente bien y se decidió incluir una mejora que soluciona la pérdida de la tensión de la línea de amarre, dicha mejora propone

un peso muerto que se desliza conforme el nivel de agua aumenta o disminuye manteniendo las líneas tensas, la solución más factible es aquella en la que se incluye una polea móvil la cual tiene el trabajo de deslizarse por las líneas de amarre manteniéndolas tensionadas en todo momento logrando que el sistema entre en equilibrio y no realice movimientos que afecten al módulo del FPV o al sistema como tal.

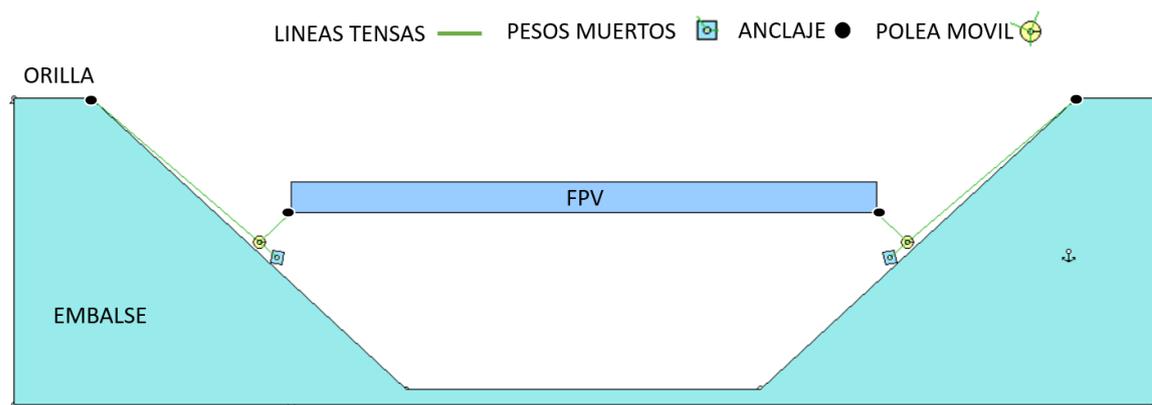
El sistema propuesto en la Figura 2.14, consta de una línea de amarre sobre la cual se coloca una polea móvil misma que tiene conectada un peso muerto, este sistema de polea permite que el peso muerto se mueva ante las variaciones de la cota sin quitar la tensión en las líneas de amarre.



**Figura 2. 14** Sistema de amarre tensado con pesos muertos y poleas cota superior

Fuente: Propia

Continuando con el análisis en la Figura 2.15, se observa que el sistema funciona de la forma esperada la polea se mueve conforme el nivel de agua varia, por tal motivo este es el sistema de amarre que se elige para realizar el análisis y los cálculos respectivos.



**Figura 2. 15** Sistema de amarre tensado con pesos muertos y poleas cota inferior

Fuente: Propia

### Ángulo crítico del sistema de amarre.

Una vez determinado el sistema de amarre se determina un ángulo crítico al que pueden llegar las líneas tensas antes de que estas choquen con el embalse, debido a que se escogió un perfil ideal, la topografía podría tener zonas irregulares en las que puede existir riesgo de atrapamiento.

Se establece un ángulo de  $48^\circ$  como crítico, que se lo toma con respecto a la vertical del embalse, como se puede ver en la figura 2.16.

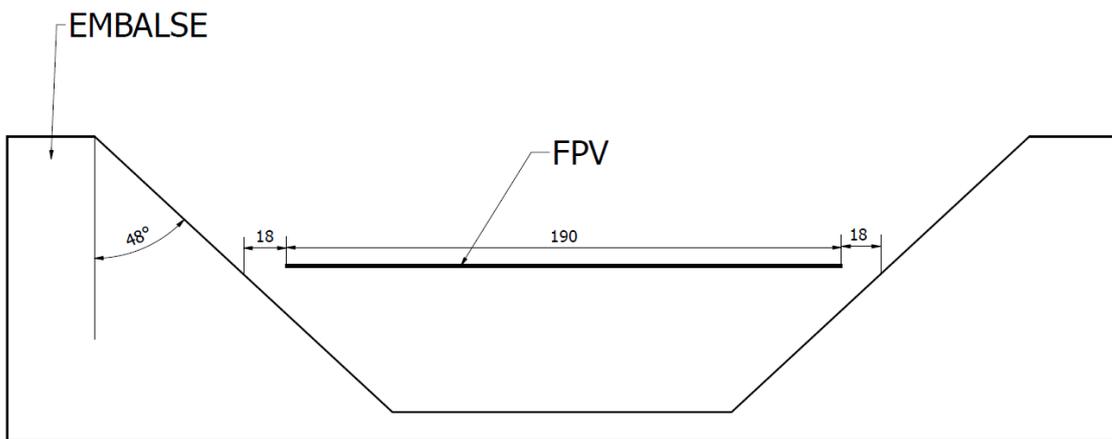


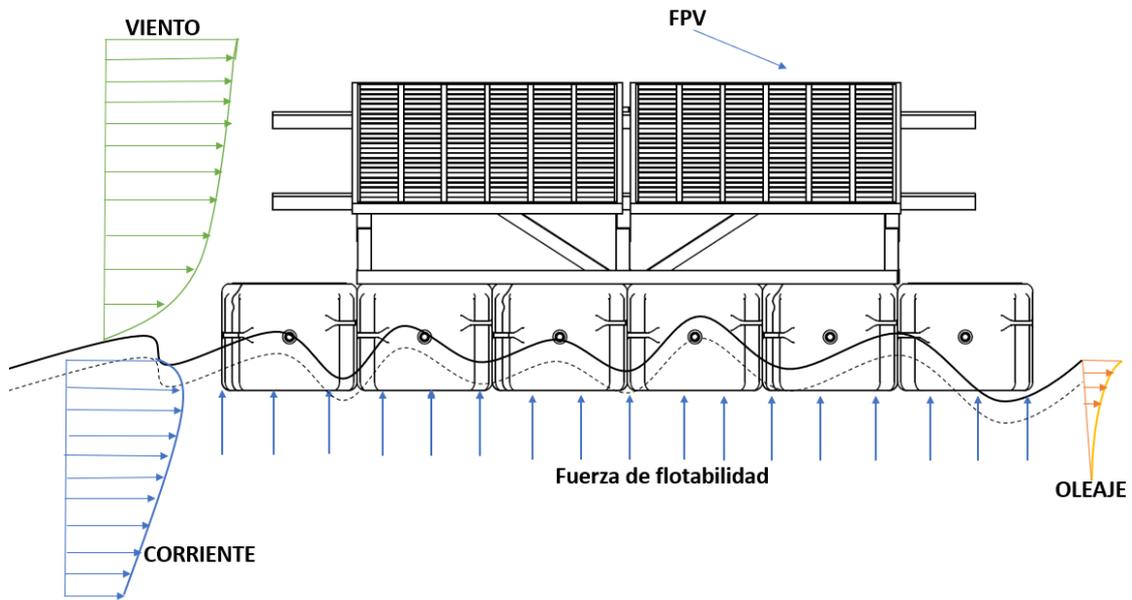
Figura 2. 16. Determinación del ángulo crítico para selección de sistema de amarre.

Fuente: Propia

## 2.4 Caracterización de cargas sobre un FPV

En la Figura 2.17, se pueden observar todas las cargas estáticas y dinámicas que actúan sobre un FPV, la principal carga estática que se analiza es la fuerza de flotabilidad que debe vencer el FPV sobre el fluido para conservar su estabilidad evitando hundimientos.

Dentro de las cargas que actúan sobre un FPV se empieza considerando al viento para el cual el valor que se considera su dirección y velocidad, para el caso de la corriente es importante conocer la velocidad de esta y el vector de su dirección, los parámetros mencionados anteriormente son importantes para modelar las cargas por el oleaje.



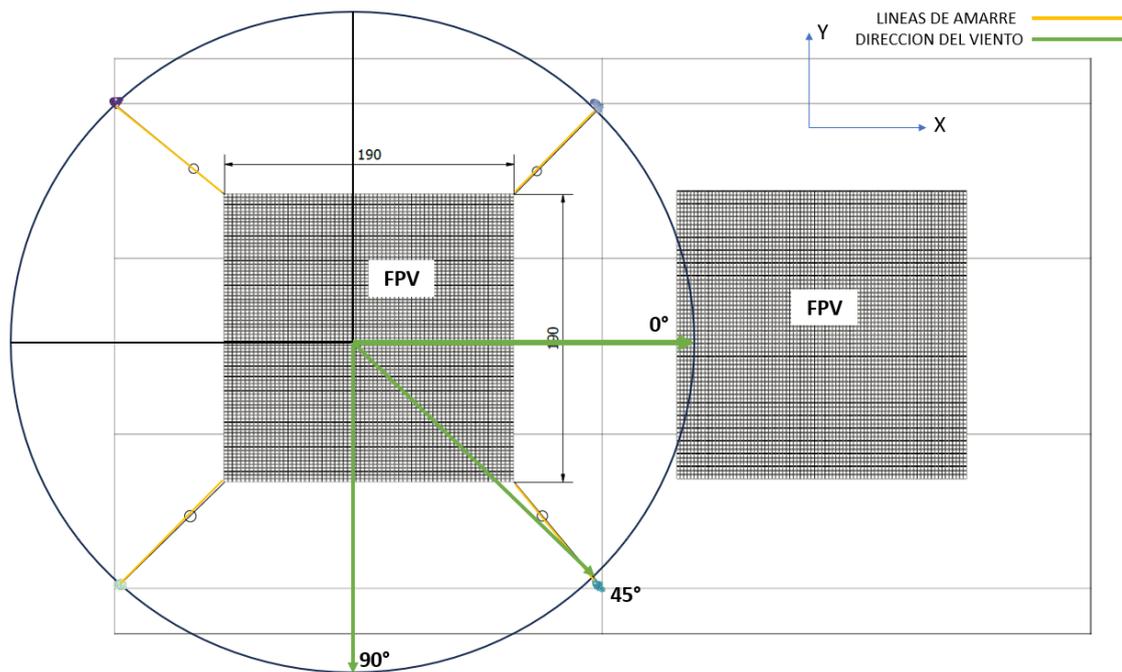
**Figura 2. 17** Cargas que actúan sobre un FPV.

**Fuente:** Propia

### **Velocidad del Viento.**

La velocidad del viento se estima evaluando los datos de la estación meteorológica más próxima al embalse de Mazar, este análisis se lo realizo considerando las velocidades promedio de los años 2010-2022, ver ANEXO 2; se obtiene un valor de velocidad media de 4.27 m/s, a la cual aplicando la ecuación 1.3 con una altura aproximada de 2m del FPV, se obtiene una velocidad de 3,49 m/s.

La velocidad del viento puede afectar al modelo en varias direcciones, considerando la falta de datos sobre la dirección del viento y considerando la topografía se van a tomar 3 ángulos a 0°, 45° y 90°. Ver figura 2.18.



**Figura 2. 18** Dirección del viento sobre un FPV.

**Fuente:** Propia

### **Velocidad de la corriente.**

Para el caso de la corriente se analizan los datos de caudal proporcionados por CELEC EP durante el periodo de tiempo 2010-2018, para determinar la velocidad se realiza un cálculo en función del área transversal de la zona escogida del embalse de Mazar, obteniéndose una velocidad de corriente de 0.071 m/s. Ver ANEXO 3.

Según investigaciones realizadas la influencia de la velocidad de la corriente sobre las olas empieza a influir a partir de 0,5 m/s a 1m/s.

### **Cargas por oleaje**

Las cargas del oleaje son determinadas por el espectro de Josnwap, para realizar el análisis del modelo numérico únicamente se considera la acción del viento para determinar los parámetros de altura significativa de la ola  $H_s$  y la frecuencia angular pico  $w_p$ .

Para realizar este análisis se consideran los valores de la longitud de alcance del viento  $F_{ech}$  al igual que  $w_p$ , usados por Núñez, [1], y se calculan

los valores de Hs, para diferentes ángulos mismos que se muestran en la Tabla 2.2.

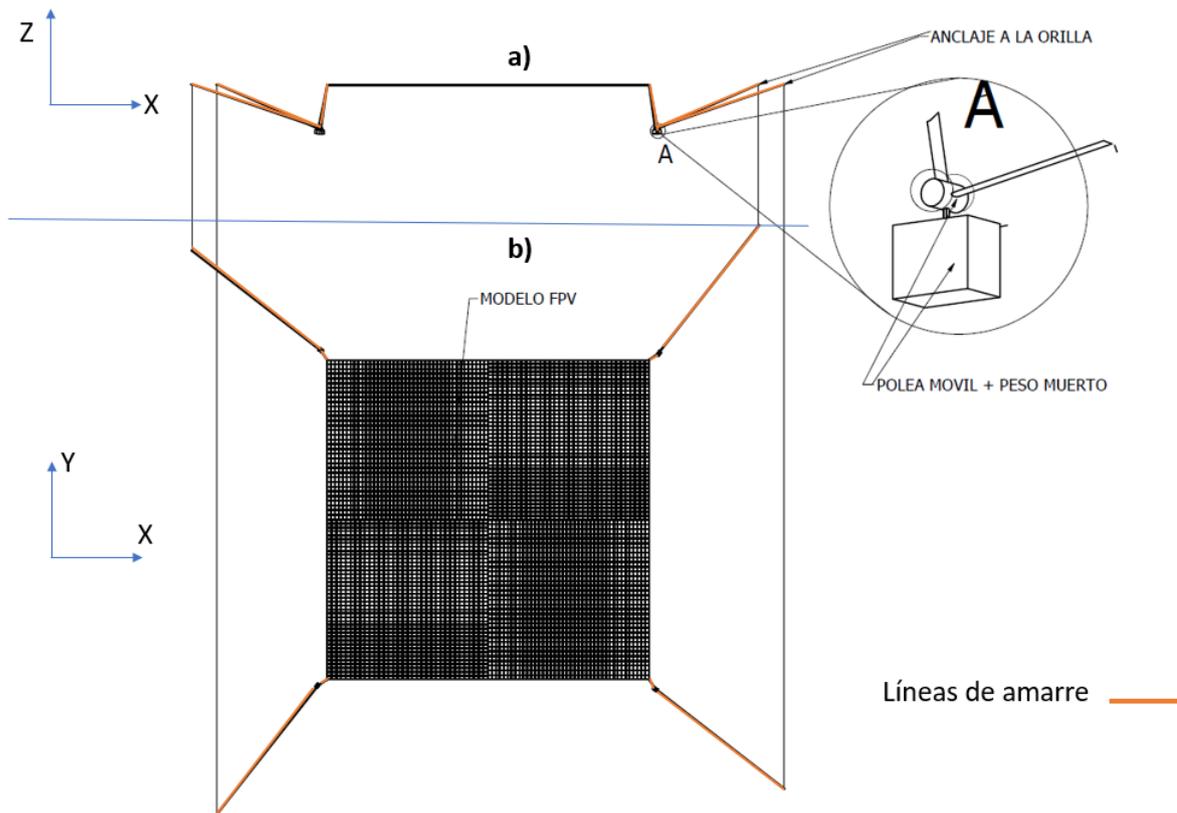
**Tabla 2. 2** Parámetros para 3 direcciones del viento.

**Fuente:** Propia

<b>DIRECCIÓN (°)</b>	<b>Fech (m)</b>	<b>Hs (m)</b>	<b>wp(rad/s)</b>
<b>0</b>	450	0,04	4.52
<b>45</b>	650	0,05	4.42
<b>90</b>	3790	0,09	2.73

## **2.5 Modelo Numérico.**

Para el desarrollo del modelo numérico se usa el software ANSYS AQWA, realizando una simplificación del modelo se consideran los puntos evaluados anteriormente y se realiza un modelo de un FPV, mismo que consta de un paralelepípedo con las medidas de un FPV, a nivel de la orilla del embalse, del cual sobresalen las líneas de amarre, mismas que se conectan a una polea que contiene un peso muerto, y la línea se conecta a la orilla. Ver figura 2.19.

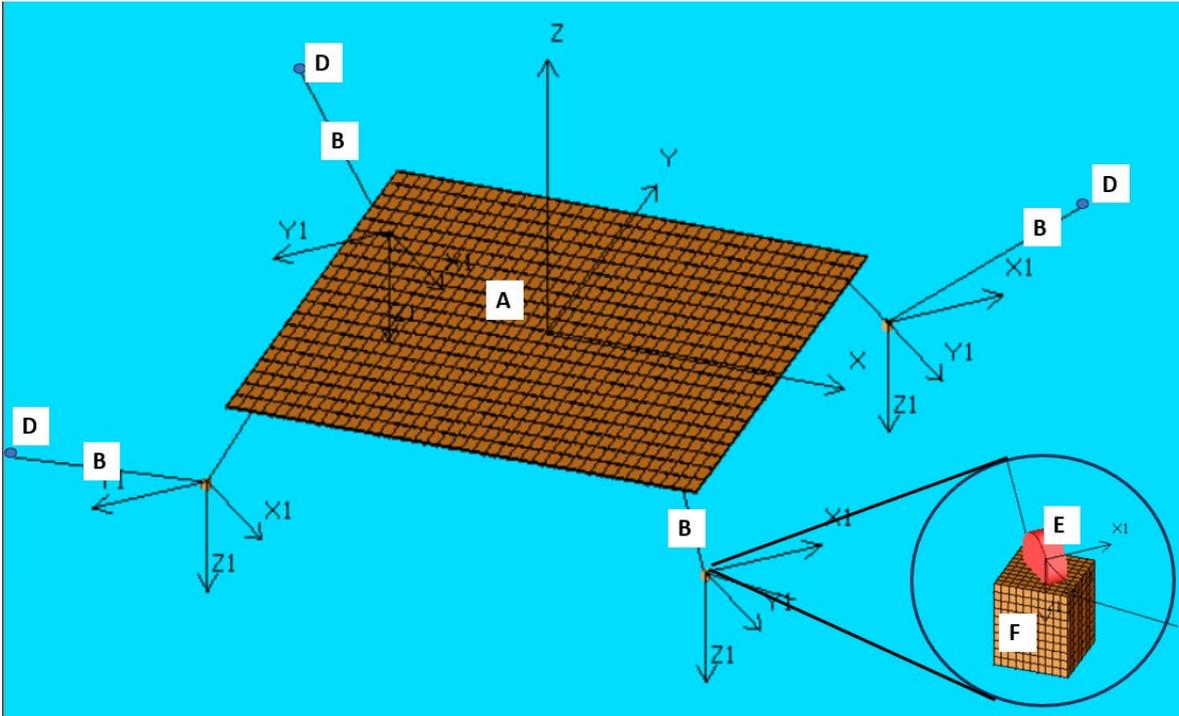


**Figura 2. 19** Modelo FPV con sistema de amarre cota superior, a) vista frontal, b) vista superior

Fuente: Propia.

**Modelo en ANSYS AQWA.**

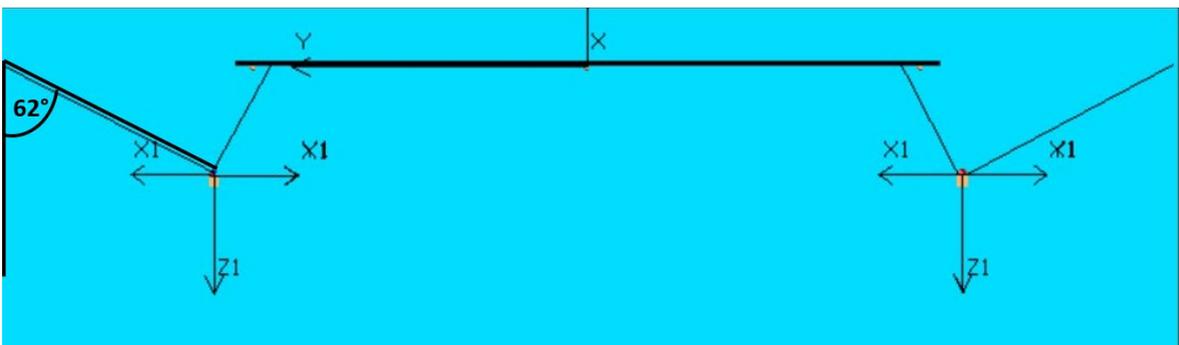
Considerando lo evaluado previamente en los puntos 2.1 al 2.4, se realiza el modelo de un FPV, tomando en cuenta las medidas geométricas y de forma, sistema de amarre, ubicación de los puntos de anclaje en el embalse, ancho del embalse, ángulos críticos, valores estimados de masa, viento, etc., para lo que se considera el manual de ANSYS AQWA, obteniendo el modelo mostrado en la Figura 2.20. [28]



**Figura 2. 20** Modelo Numérico ANSYS AQWA vista Isométrica, A) FPV, B) Líneas de amarre, D) Anclajes en la orilla, E) Polea, F) Peso Muerto.

**Fuente:** Propia

Se realiza un preanálisis del modelo numérico, revisando principalmente si no hay colisión con las paredes del embalse al subir el nivel de agua, por lo que una vez alcanzado el equilibrio estático y considerando la misma longitud de líneas de amarre propuestas por Bryan Chillagana, en el desarrollo del componente A, a través del software inventor se realiza la evaluación del ángulo que mantiene las líneas de amarre con el embalse mismo que debe ser mayor a  $48^\circ$  ver Figura 2.16, verificando que cumple sin problema con  $62^\circ$  ver Figura 2.21.



**Figura 2. 21** Modelo Numérico Vista Lateral, Ángulo respecto del embalse

**Fuente:** Propia

Fueron usados 3 de los módulos de Ansys Aqwa para el desarrollo del proyecto, Aqwa Line, Librium y Drift.

Empezando por Aqwa Line, se desarrolla un modelo numérico, en este módulo básicamente se realiza el modelo geométrico, a través de la unión de nodos además de realizar un mallado, también se pueden incluir características geométricas como centros de masa, pesos, aplicar simetrías.

En el módulo de Aqwa Librium, se realiza un análisis de equilibrio estático, en donde se incluyen parámetros que caracterizan a las cargas hidrodinámicas y aerodinámicas como la velocidad del viento y su dirección, además de otros parámetros que afectan a una estructura flotante, en este caso se busca el equilibrio estático de la estructura.

Aqwa Drift, proporciona un estudio de los movimientos tanto angulares como lineales efectuados por la acción de las cargas que afectan a la estructura, en un determinado tiempo.

### **Casos de análisis.**

Dentro de los casos de estudio se ha determinado importante realizarlos en función del efecto de las direcciones del viento, con los que se determinaron los parámetros espectrales principales, estableciendo los escenarios de la Tabla 2.3.

Se considera además que los desplazamientos tanto en el eje X como en el Y, no deben superar los 5 metros que es un margen que se establece como medida de seguridad para evitar colisiones de las líneas de amarre con el embalse y con otros módulos FPV.

**Tabla 2. 3.** Escenarios de simulación propuestos para la simulación.

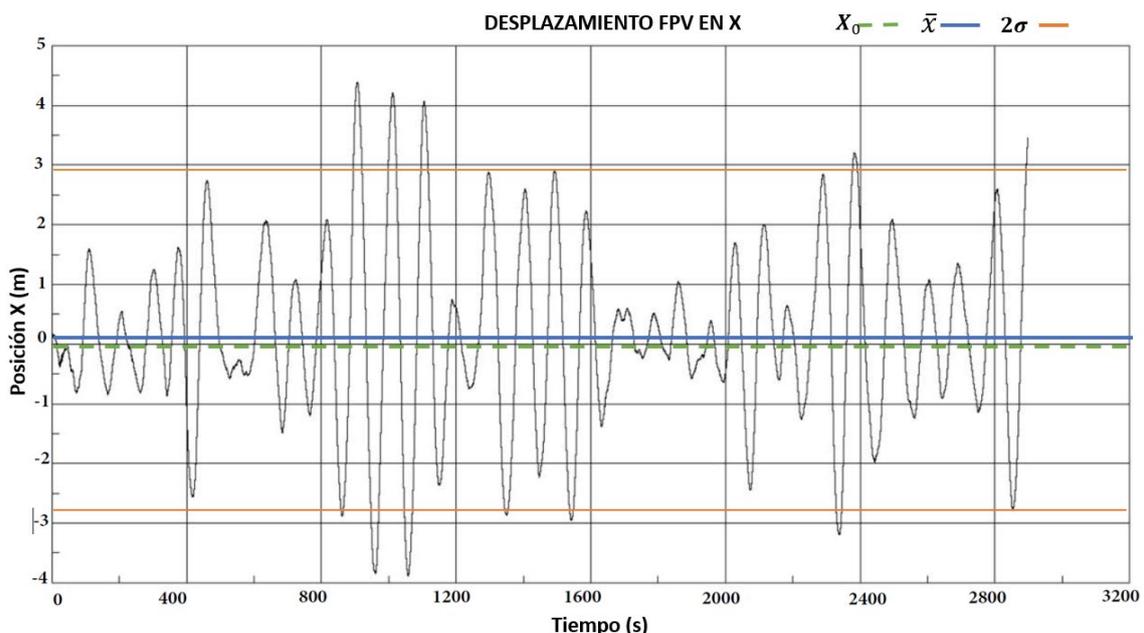
**Fuente:** Propia

<b>Escenario</b>	<b>Dirección viento (°)</b>	<b>Hs (m)</b>	<b>wp(rad/s)</b>	<b>#lines de amarre</b>
<b>A1</b>	0	0,04	4.52	4
<b>A2</b>	45	0,05	4.42	4
<b>A3</b>	90	0,09	2.73	4

### 3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 3.1 Resultados

La respuesta que se obtiene del sistema es una señal irregular de movimiento oscilatorio que parte de la posición de equilibrio  $X_0$  y varía en función del tiempo, en donde a través de consideraciones estadísticas se establece la media de los valores  $\bar{X}$ , y el desplazamiento significativo en función de la media considerando dos veces la desviación estándar  $2\sigma$  que considera los datos más significativos de la oscilación de los datos tomados con respecto a la respuesta de las condiciones ambientales. Ver Figura 3.1.



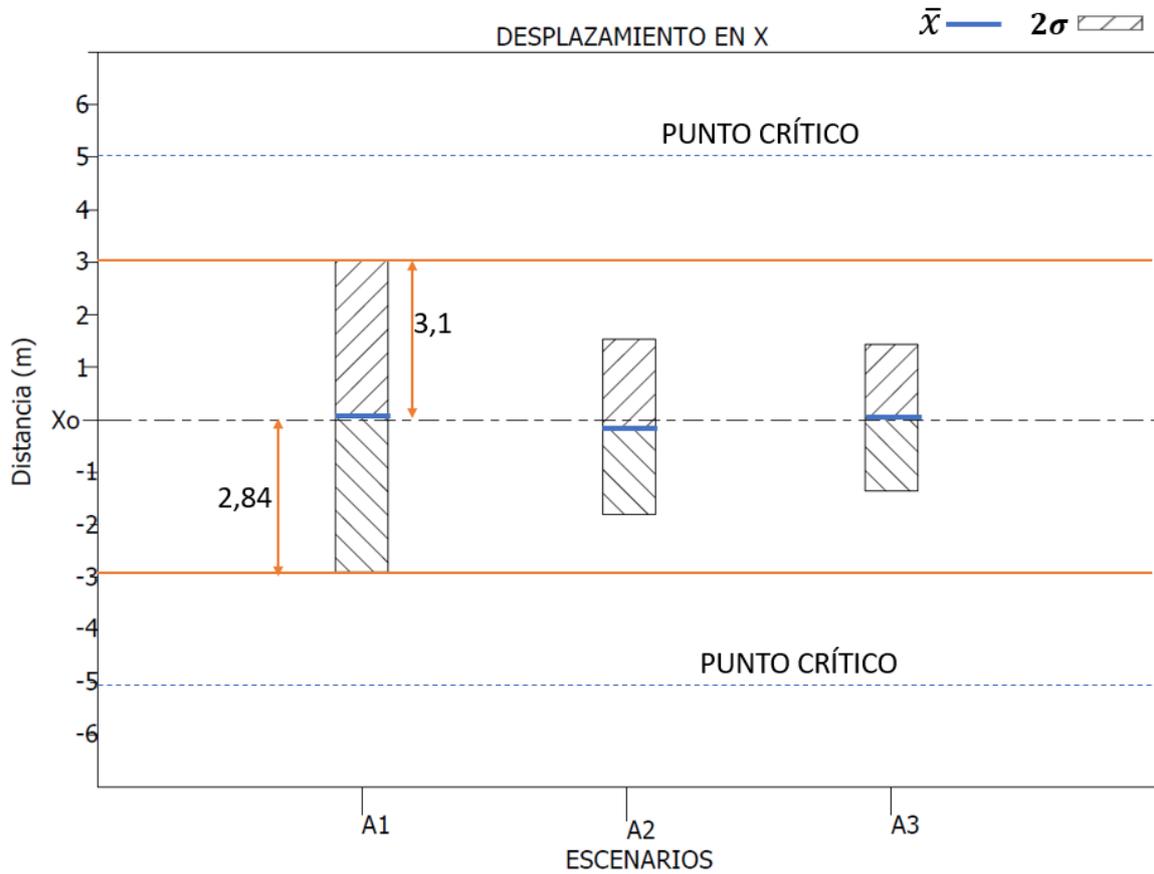
**Figura 3. 1.**Desplazamiento FPV en el eje X en función del tiempo

**Fuente:** Propia

Para realizar la evaluación de los escenarios se considera la Tabla 2.3, donde a partir de la evaluación de las condiciones propuestas se obtienen las respuestas de desplazamiento en los ejes X, Y, Z, así como la rotación alrededor de cada uno, de los cuales para el análisis se toma el desplazamiento en X, Y, y para la rotación alrededor del eje Z, puesto que al realizar las simulaciones las variaciones son más considerables en dichos casos.

Al realizar la evaluación de los casos A1, A2, A3, ver Tabla 2.3, sobre el eje X, se obtiene la Figura 3.2, en la que se pueden observar que el caso de análisis más representativo es A1, mismo que tiene la dirección del viento y la corriente en el mismo sentido obteniendo un valor de 3,1 (m) y 2,84 (m), al igual que una posición media de 0,14 m, estos datos se

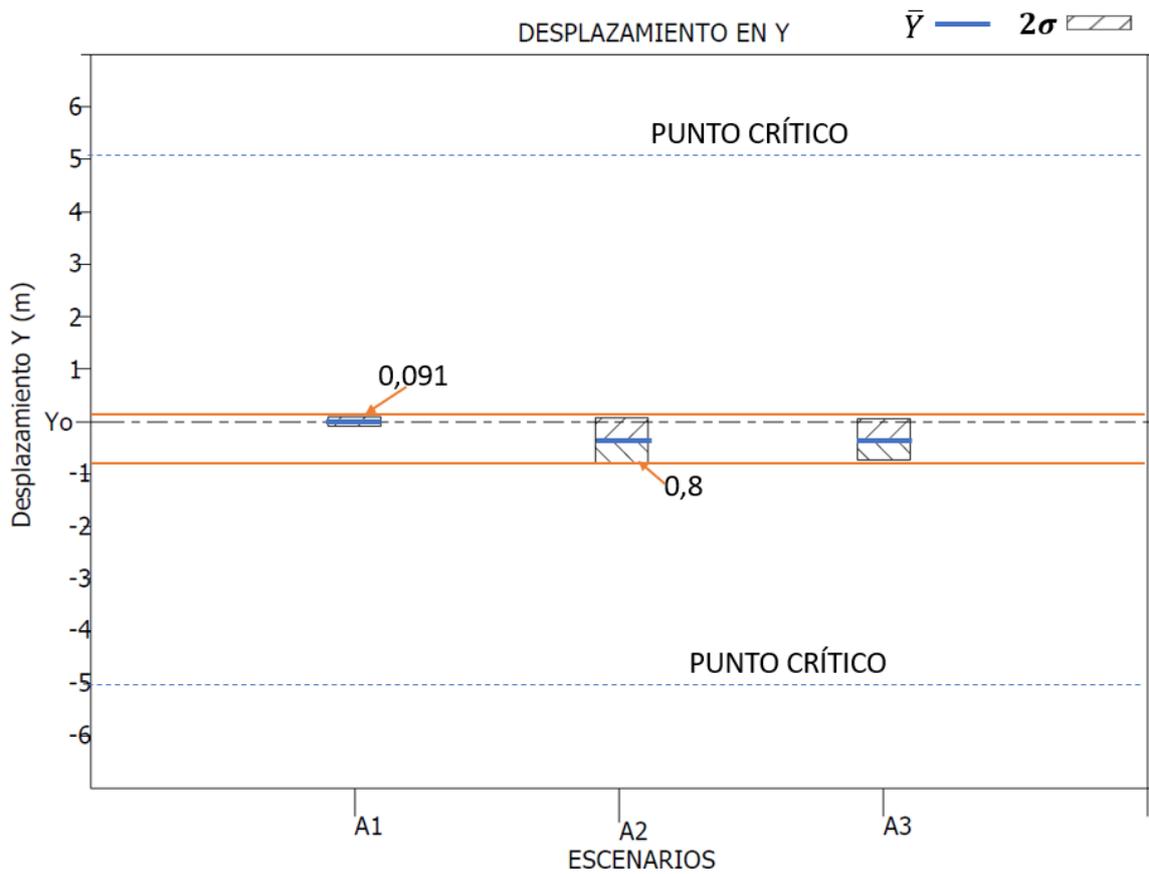
encuentran dentro de los límites propuestos de 5 m para el análisis y se puede comprobar que el sistema de amarre cumple su función.



**Figura 3. 2.** Desplazamiento FPV en X para casos propuestos.

**Fuente:** Propia

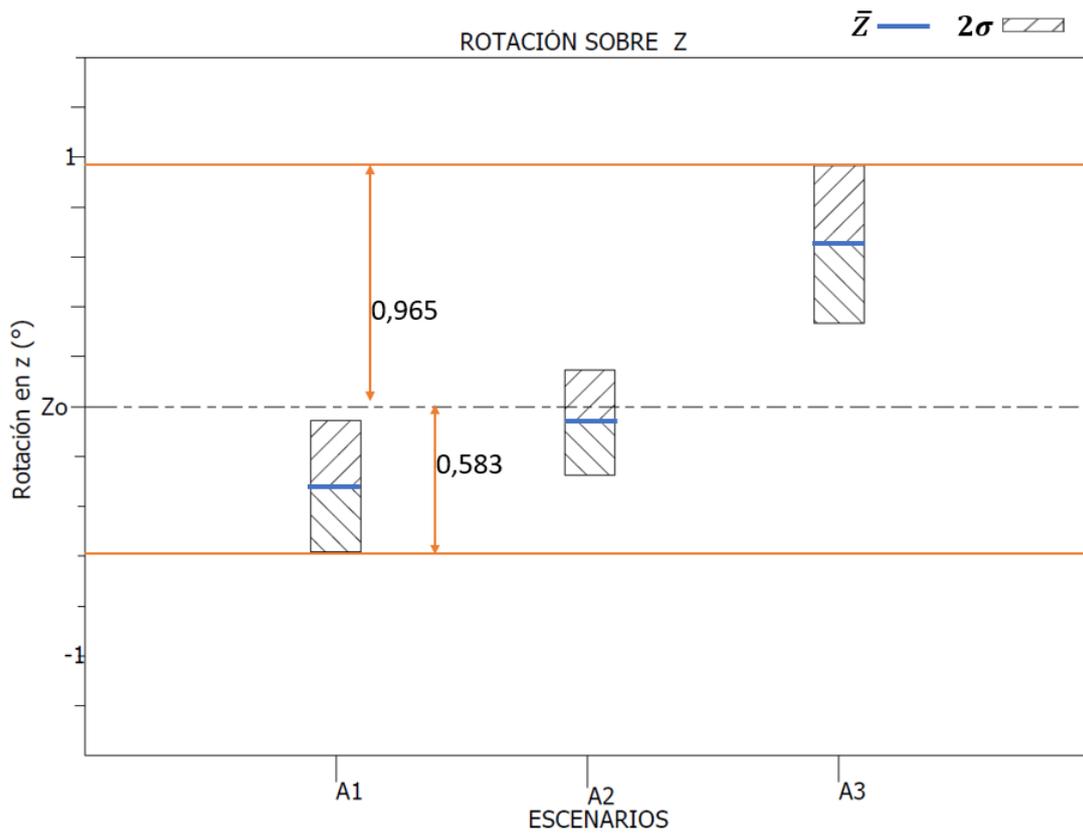
En el caso del desplazamiento en el eje Y, se realiza la Figura 3.3, de donde se puede establecer que para las condiciones propuestas en los casos de estudio la estructura no tiene un desplazamiento significativo, sin embargo, la influencia de las cargas se observa que son más significativas en el caso A2, los máximos movimientos observados no superan 1m, por lo que también cumple adecuadamente.



**Figura 3. 3** Desplazamiento FPV en Y, para casos propuestos

**Fuente:** Propia

Realizando las mismas consideraciones de los casos anteriores se evalúa el desplazamiento que tiene el FPV sobre el eje Z, para cada uno de los casos y se obtiene la Figura 3.4, en donde la rotación que sufre el FPV es de menos de  $1^\circ$ , por lo que cumple de igual manera sin problema en los casos de estudio propuestos.



**Figura 3. 4** Rotación FPV, sobre el eje Z para casos propuestos

**Fuente:** Propia

Considerando los efectos que puede tener el espectro de olas, cada uno de los espectros se evalúan en ángulos adicionales a fin de estudiar el efecto de cada espectro al variar este parámetro sobre el FPV, para realizar esta evaluación se toma en consideración la Tabla 3.1.

**Tabla 3. 1.** Escenarios variando el ángulo para cada espectro

**Fuente:** Propia

Escenario	Dirección viento (°)	Hs (m)	wp(rad/s)	#líneas de amarre
A1-0	0	0,04	4.52	4
A2-0	0	0,05	4.42	4
A3-0	0	0,09	2.73	4
A1-45	45	0,04	4.52	4
A2-45	45	0,05	4.42	4
A3-45	45	0,09	2.73	4
A1-90	90	0,04	4.52	4
A2-90	90	0,05	4.42	4
A3-90	90	0,09	2.73	4

Realizando las simulaciones para cada uno de los casos se obtiene los valores de la Tabla 3.2, donde al igual que en los primeros casos los valores más representativos de desplazamiento se encuentran en el eje X, evidenciando que cuando la dirección de la corriente coincide con el espectro de olas el desplazamiento es mayor.

**Tabla 3. 2.** Respuesta dinámica de varios escenarios variando el ángulo del espectro de olas.

**Fuente:** Propia

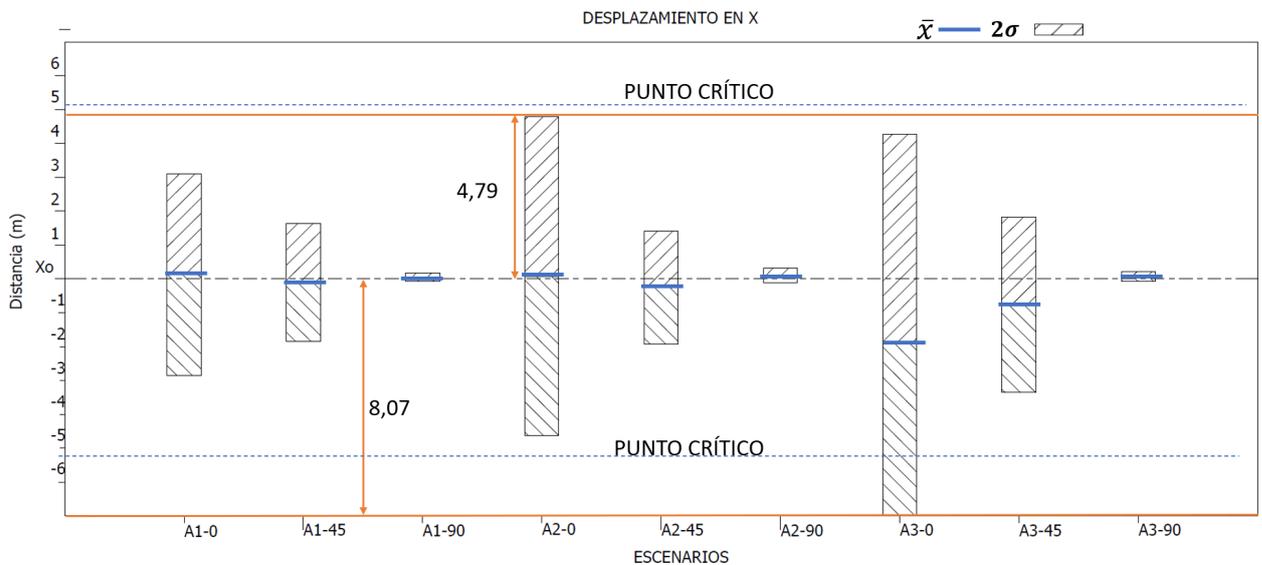
ESCENARIOS	$\bar{X}$	$2\sigma$	$\bar{Y}$	$2\sigma$	$\bar{AZ}$	$2\sigma$
A1-0	0,13	2,97	0,004	0,087	-0,32	0,263
A2-0	0,078	4,71	0,00015	0,0645	0,049	0,3234
A3-0	-1,9	6,17	0,016	0,061	0,011	0,061
A1-45	-0,11	1,74	-0,19	0,34	-0,15	0,21
A2-45	-0,255	1,67	-0,36	0,4337	-0,0078	0,21
A3-45	-0,77	2,59	-1,18	0,49	0,1846	0,39
A1-90	0,0458	0,12	0,037	0,23	-0,5722	0,22
A2-90	0,047	0,22	-0,1844	0,5832	0,77	0,45
A3-90	0,075	0,14	-0,3352	0,389	0,65	0,315

Evaluando los valores mas representativos se considera la Figura 3.5, de donde se puede considerar los desplazamientos máximos en X, de acuerdo con los escenarios cuando el espectro coincide con la dirección de la positiva esta es mayor.

Para cada caso se observa el mayor desplazamiento se obtiene al usar el espectro A3 , con el ángulo de 0°, dado este caso el sistema de amarre fallaría en el desplazamiento negativo llegando a un valor de 8,07m, sin embargo en desplazamiento positivo se tendría al caso A2-0 que tiene uno de 4,72m, este caso si cumple.

Para cumplir con las condiciones mínimas de movimiento en el caso de dichos escenarios se tendría que evaluar la masa de los pesos muertos a fin de compensar los desplazamientos, se considera además que estos casos se evalúan únicamente para

verificar la factibilidad del sistema de amarre, ya que se realiza una estimación en el ángulo del espectro.



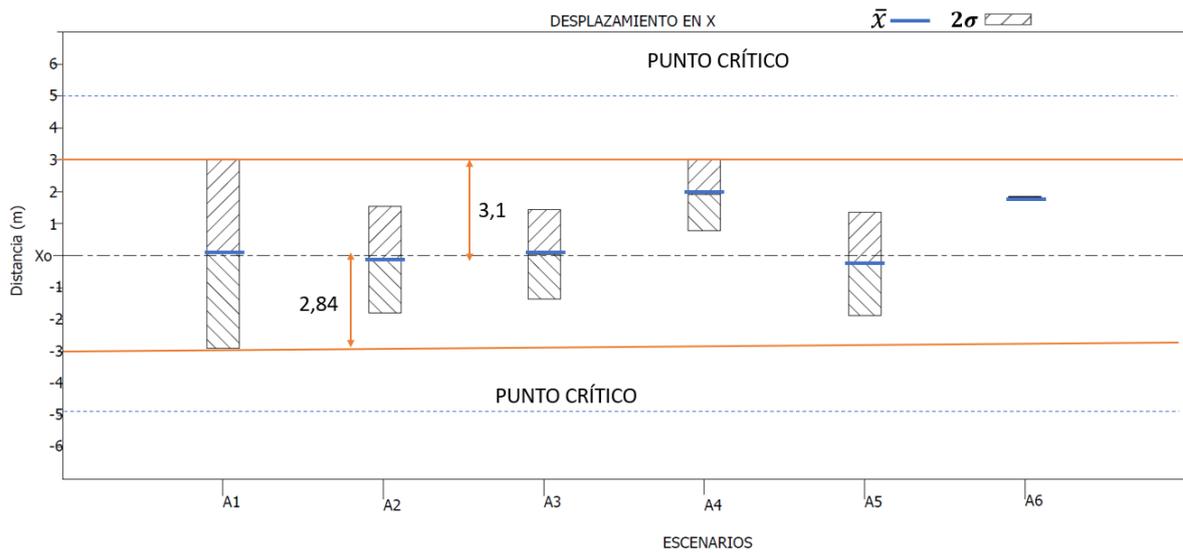
**Figura 3. 5.** Desplazamiento en X, FPV varios escenarios

Fuente: Propia

Una vez realizada la evaluación de los casos de estudio, se toma en consideración casos aislados donde se considera subir la velocidad de la corriente para los casos evaluados, según la bibliografía estudiada la corriente a partir de una velocidad de 0.5 m/s afecta considerablemente sobre el oleaje. Considerando la premisa se crean los casos A4, A5 y A6, en función de los casos A1, A2, A3 respectivamente. [29]

La velocidad de la corriente actúa directamente sobre la altura de las olas y su energía, especialmente cuando coinciden en dirección.

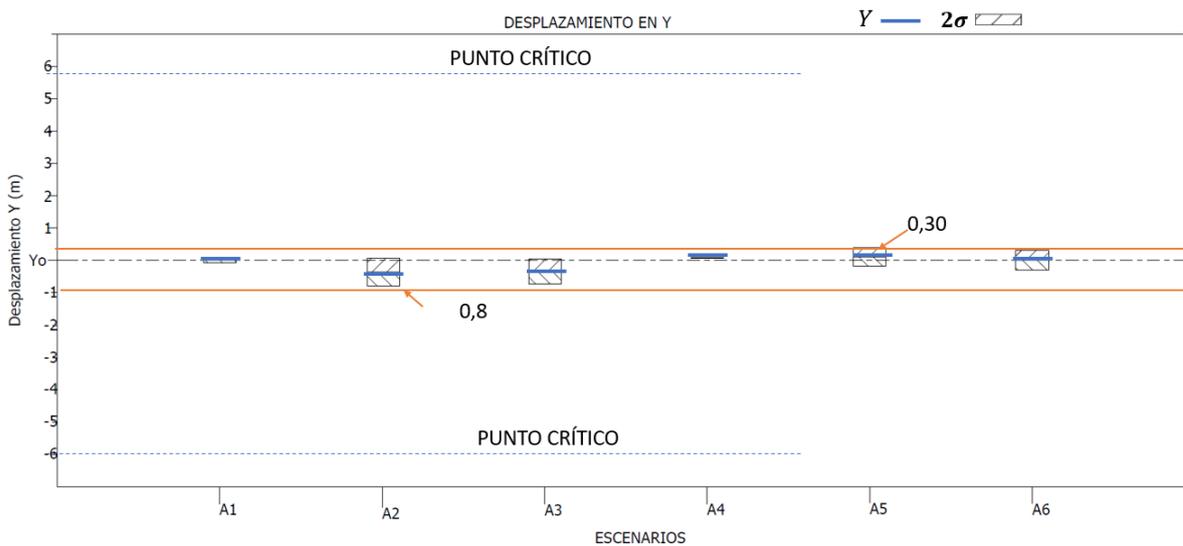
En la figura 3.6 se evalúa los desplazamientos en X, para los casos A4, A5, A6, mismos en los que se usa una velocidad de corriente de 0.5 m/s, en este caso se puede determinar que la media de valores aumenta en comparación con los casos de estudio al igual que la oscilación de los datos manteniéndose dentro de los requerimientos para que no falle el sistema.



**Figura 3. 6** Desplazamiento FPV, eje X casos A4-A6, velocidad de corriente 0.5 m/s

**Fuente:** Propia

Se realiza un análisis de los desplazamientos con respecto en el eje Y, y, la rotación en el eje Z, sin embargo, no se consideran para el análisis ya que son mínimos en el aumento de velocidad de la corriente, en la Figura 3.7 se observa la variación en los casos A4, A5, y A6 es mínima, y disminuye con relación a los casos A1, A2, A3. Ver Figura 3.6.



**Figura 3. 7** Desplazamiento FPV, eje Y casos A4-A6, velocidad de corriente 0.5 m/s

**Fuente:** Propia

Considerando la variación de la velocidad se concluye que a una velocidad de 0.5 m/s, el sistema aun cumple con las necesidades de la estructura.

Se realiza un incremento de en la velocidad de la corriente a fin de evaluar cual sería la velocidad máxima que pueda soportar el sistema de amarre antes de fallar, en la tabla 3.3, se muestra un resumen de las simulaciones realizadas considerando el incremento de la velocidad de la corriente.

Se considera que la falla se produce en el escenario A1 con velocidad de corriente de 0,8 m/s donde alcanza un desplazamiento en x máximo de 5.59 m, considerando los valores máximos que puede alcanzar en el tiempo.

**Tabla 3. 3.** Respuesta dinamica de varios escenarios variando la velocidad de la corriente

Fuente: Propia

ESCENARIOS	V. corriente (m/s)	$\bar{X}$	$2\sigma$	$\bar{Y}$	$2\sigma$	$\bar{AZ}$	$2\sigma$
A1	0,071	0,13	2,97	0,004	0,087	-0,32	0,263
A2	0,071	-0,255	1,67	-0,36	0,4337	-0,0078	0,21
A3	0,071	0,075	0,14	-0,3352	0,389	0,65	0,315
A4	0,5	1,906	1,129	0,0065	0,073	0,0084	0,139
A5	0,5	1,782	0,56	-0,1074	0,2887	0,017	0,094
A6	0,5	1,839	0,34	0,013	0,31	-0,064	0,2771
A7	1	7,303	1,15	-0,0005	0,062	0,0031	0,00512
A8	1	7,26	1,13	-0,049	0,1646	0,019	0,058
A9	1	7,27	1,11	0,17	0,17	-0,64	0,26
A1	0,6	2,71	1	-0,004	0,071	0,0017	0,119
A1	0,7	3,64	0,88	0,0027	0,077	0,0027	0,1
A1	0,8	4,73	0,86	0,00154	0,076	0,0065	0,086
A1	0,9	5,95	1,069	0,0024	0,068	0,2573	0,03

En la figura 3.7, se realiza la evaluación del caso que tiene más desplazamiento encontrado, mismo que parte del escenario A1 usado para encontrar un punto de falla, que es el que tiene la dirección de la corriente con la dirección del viento.

Al realizar el estudio es se puede evidenciar que al aumentar el valor de la velocidad de la corriente también incrementan las características del oleaje, al observar la figura 3.8 se puede observar que hasta 0,5 m/s el sistema no muestra mayores variaciones.

La variación principal observada en el cambio de la velocidad de la corriente es la posición media del FPV, que para el caso de 0,5 m/s es de 1.96 m, a medida que va aumentando la velocidad también aumenta la posición media, a partir de este análisis el punto de falla vendría al pasar 0,7 m/s, donde el punto máximo estaría contemplado en 4.52 m y el punto medio en 3.64 m.



## **3.2 Conclusiones**

Se realiza el análisis dinámico de un sistema de amarre para un FPV, evaluando la factibilidad a las condiciones de la cota superior del embalse de Mazar. Se selecciona un sistema que incluye una línea de amarre con una polea móvil que sostiene un peso muerto, al evaluar los resultados, el sistema de amarre cumple con las condiciones operativas necesarias.

Se realiza un estudio topográfico del embalse de Mazar recopilando información necesaria para el análisis. Esto permite identificar las limitaciones de la zona crítica y realizar los ajustes necesarios al sistema de amarre para una integración efectiva con el FPV.

Se desarrollo un modelo conceptual simplificado para analizar el sistema de amarre, en el que se establece una geometría considerando la topografía y un margen de error al que puede someterse la estructura antes de colisionar con las orillas o con otras estructuras.

Se efectuó un análisis opciones de varios sistemas de amarre, incluyendo sistemas convencionales y adaptaciones de elementos como pesos muertos, poleas, boyas, tras analizar pros y contras se escogió el sistema con línea de amarre polea y peso muerto. La ubicación del anclaje considerando las limitaciones del embalse se puso en la orilla.

Se caracterizaron las principales cargas que afectan al modelo. Se usaron datos históricos para estimar velocidad y dirección del viento, y la corriente. Con esta información se caracterizó el espectro de oleaje. Se observo que los parámetros requeridos en el embalse son relativamente bajos a diferencia de embalses con mayor afectación climática.

Se elaboró un modelo numérico en ANSYS AQWA para evaluar la respuesta dinámica del sistema de amarre en varios escenarios. En cada caso el sistema de amarre dio una respuesta favorable, obteniendo desplazamientos mayores en la dirección de la corriente.

Se consideraron llevaron a cabo casos con valores más altos a los propuestos a fin de de identificar los límites de operación del sistema de amarre seleccionado.

## **3.3 Recomendaciones**

En este estudio se consideran datos estimados de acuerdo con condiciones cercanas al embalse de Mazar para los cuales funcionan, sin embargo, para un análisis más detallado de las condiciones se debe mediciones más exactas sobre el embalse para realizar el diseño completo del sistema.

Se recomienda considerar el sistema de amarre con líneas tensas y pesos muertos propuesto en el punto 2.3, ya que puede suponer un menor desgaste de la línea de amarre por la fricción de la polea ya que estaría anclada en un solo punto, para este análisis no se consideró este sistema porque no se tiene conocimiento preciso de protuberancias dentro de la topografía marina.

Se debe realizar una prueba de concepto con lo propuesto y considerar otras formas de anclaje ya sea a medio embalse, o en el fondo del lecho marino, para tener un análisis completo del sistema.

## 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] «V.Allauca,E. Nunez - TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍ.pdf». Accedido: 25 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/23695/1/CD%2013003.pdf>
- [2] S. M. Choi, C.-D. Park, S.-H. Cho, y B.-J. Lim, «Effects of various inlet angle of wind and wave loads on floating photovoltaic system considering stress distributions», *J. Clean. Prod.*, vol. 387, p. 135876, feb. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.135876.
- [3] A. Ghosh, «A comprehensive review of water based PV: Flotovoltaics, under water, offshore & canal top», *Ocean Eng.*, vol. 281, p. 115044, ago. 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.115044.
- [4] E. Muñoz-Cerón, J. C. Osorio-Aravena, F. J. Rodríguez-Segura, M. Frolova, y A. Ruano-Quesada, «Floating photovoltaics systems on water irrigation ponds: Technical potential and multi-benefits analysis», *Energy*, vol. 271, p. 127039, may 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.127039.
- [5] «LOJA | Proyectos de Energía Solar | E/C», *SkyscraperCity Forum*, 9 de enero de 2014. <https://www.skyscrapercity.com/threads/loja-proyectos-de-energ%C3%ADa-solar-e-c.1602222/> (accedido 14 de junio de 2023).
- [6] P. Ortiz y S. Romero, «1 ¿Qué es la fotovoltaica flotante?».
- [7] «Plantas solares flotantes: una alternativa más para generar energía renovable», *Endesa*, 27 de mayo de 2022. <https://www.endesa.com/es/la-cara-e/energias-renovables/plantas-solares-flotantes-alternativa-generacion-energia-renovable> (accedido 18 de junio de 2023).
- [8] J. Song, J. Kim, W. C. Chung, D. Jung, Y. J. Kang, y S. Kim, «Wave-induced structural response analysis of the supporting frames for multiconnected offshore floating photovoltaic units installed in the inner harbor», *Ocean Eng.*, vol. 271, p. 113812, mar. 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.113812.
- [9] P. Rosa-Clot, «Chapter 9 - FPV and Environmental Compatibility», en *Floating PV Plants*, M. Rosa-Clot y G. Marco Tina, Eds., Academic Press, 2020, pp. 101-118. doi: 10.1016/B978-0-12-817061-8.00009-9.
- [10] J. Yu, H. Ding, Y. Yu, S. Wu, Q. Zeng, y W. Ma, «A novel risk analysis approach for FPSO single point mooring system using Bayesian Network and interval type-2 fuzzy sets», *Ocean Eng.*, vol. 266, p. 113144, dic. 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.113144.
- [11] X. Xu y S. Day, «Experimental investigation on dynamic responses of a spar-type offshore floating wind turbine and its mooring system behaviour», *Ocean Eng.*, vol. 236, p. 109488, sep. 2021, doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.109488.
- [12] R. Claus y M. López, «Key issues in the design of floating photovoltaic structures for the marine environment», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 164, p. 112502, ago. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112502.
- [13] K.-T. Ma, Y. Luo, T. Kwan, y Y. Wu, «Chapter 2 - Types of mooring systems», en *Mooring System Engineering for Offshore Structures*, K.-T. Ma, Y. Luo, T. Kwan, y Y. Wu, Eds., Gulf Professional Publishing, 2019, pp. 19-39. doi: 10.1016/B978-0-12-818551-3.00002-8.
- [14] R. Claus y M. López, «Key issues in the design of floating photovoltaic structures for the marine environment», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 164, p. 112502, ago. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112502.
- [15] «Where-Sun-Meets-Water-Floating-Solar-Handbook-for-Practitioners.pdf». Accedido: 5 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/418961572293438109/pdf/Where-Sun-Meets-Water-Floating-Solar-Handbook-for-Practitioners.pdf>
- [16] «Technical considerations to ensuring bankable floating PV projects.pdf». Accedido: 9 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://solar->

- media.s3.amazonaws.com/assets/Pubs/PVTP24/Technical%20considerations%20to%20ensuring%20bankable%20floating%20PV%20projects.pdf
- [17] «The weekend read: Don't throw caution to the wind», *pv magazine International*, 22 de febrero de 2020. <https://www.pv-magazine.com/2020/02/22/the-weekend-read-dont-throw-caution-to-the-wind/> (accedido 9 de julio de 2023).
- [18] F. Yu, Y. Su, Y. Liu, H. Liu, y F. Duan, «Dynamic response of the mooring system in the floating photovoltaic power station», *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2087, n.º 1, p. 012028, nov. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2087/1/012028.
- [19] S. Verde y E. N. Lages, «A comparison of anchor loads, planar displacement, and rotation for nylon and polyester moored systems for a 15 MW floating wind turbine in shallow water», *Ocean Eng.*, vol. 280, p. 114404, jul. 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.114404.
- [20] A. Ghigo, E. Faraggiana, M. Sirigu, G. Mattiazzo, y G. Bracco, «Design and Analysis of a Floating Photovoltaic System for Offshore Installation: The Case Study of Lampedusa», *Energies*, vol. 15, n.º 23, Art. n.º 23, ene. 2022, doi: 10.3390/en15238804.
- [21] H. Pouran, M. Padilha Campos Lopes, H. Ziar, D. Alves Castelo Branco, y Y. Sheng, «Evaluating floating photovoltaics (FPVs) potential in providing clean energy and supporting agricultural growth in Vietnam», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 169, p. 112925, nov. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112925.
- [22] V. Ramasamy y R. Margolis, «Floating Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2021 Installations on Artificial Water Bodies», NREL/TP-7A40-80695, 1828287, MainId:77479, oct. 2021. doi: 10.2172/1828287.
- [23] A. C. Pillai, T. J. Gordelier, P. R. Thies, D. Cuthill, y L. Johannung, «Anchor loads for shallow water mooring of a 15 MW floating wind turbine—Part II: Synthetic and novel mooring systems», *Ocean Eng.*, vol. 266, p. 112619, dic. 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.112619.
- [24] V. G. Toro, F. J. Ocampo-Torres, P. Osuna, H. García-Nava, X. Flores-Vidal, y R. Durazo, «Análisis del crecimiento del oleaje limitado por el fetch usando radares de alta frecuencia en el golfo de Tehuantepec», *Cienc. Mar.*, vol. 40, n.º 2, pp. 113-132, 2014, doi: 10.7773/cm.v40i2.2403.
- [25] «J.M.J. Journée and W.W. Massie-OffshoreHydromechanics\_Intro.pdf». Accedido: 9 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: [http://kashti.ir/files/ENBOOKS/OffshoreHydromechanics\\_Intro.pdf](http://kashti.ir/files/ENBOOKS/OffshoreHydromechanics_Intro.pdf)
- [26] I. Young, «Wind-Generated Waves», en *Ocean Wave Dynamics*, WORLD SCIENTIFIC, 2020, pp. 1-20. doi: 10.1142/9789811208676\_0001.
- [27] B.-Y. Choi, H.-J. Jo, K.-H. Lee, y D.-H. Byoun, «Development of Wind Induced Wave Predict Using Revisited Methods», *J. Adv. Res. Ocean Eng.*, vol. 4, n.º 3, pp. 124-134, 2018, doi: 10.5574/JAROE.2018.4.3.124.
- [28] «AQWA Reference Manual.pdf». Accedido: 16 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://cyberships.files.wordpress.com/2014/01/aqwa\\_ref.pdf](https://cyberships.files.wordpress.com/2014/01/aqwa_ref.pdf)
- [29] W. Li, S. Ke, J. Chen, T. Zhu, y H. Ren, «Hydrodynamic response and energy analysis in a very large floating structure supporting a marine airport under typhoon-driven waves», *Ocean Eng.*, vol. 266, p. 112987, dic. 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.112987.
- [30] «Anuario\_Metereologico\_INHAMI\_2013.pdf». Accedido: 13 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://www.inamhi.gob.ec/docum\\_institucion/anuarios/meteorologicos/Am\\_2013.pdf](https://www.inamhi.gob.ec/docum_institucion/anuarios/meteorologicos/Am_2013.pdf)
- [31] «Anuario\_Metereologico\_INHAMI\_2013 – Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología». <https://www.inamhi.gob.ec/biblioteca/> (accedido 13 de junio de 2023).
- [32] «Meteoblue datos históricos 1970-2023». Accedido: 16 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://www.meteoblue.com/es/tiempo/archive/windrose/para%c3%adso\\_ecuador\\_3653427?fcstlength=-15&year=2010&month=7](https://www.meteoblue.com/es/tiempo/archive/windrose/para%c3%adso_ecuador_3653427?fcstlength=-15&year=2010&month=7)