



# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**



## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **ANÁLISIS DINÁMICO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO FLOTANTE PARA EL EMBALSE DE MAZAR**

#### **COMPONENTE A: ANÁLISIS PARA LA ZONA 3 – COTA INFERIOR**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN  
INGENIERÍA MECÁNICA**

**BRYAN ALEXANDER CHILLAGANA VALVERDE**

Bryan.chillagana@epn.edu.ec

**DIRECTOR: ING. GUACHAMIN ACERO WILSON IVÁN. PhD**

Wilson.guachamin@epn.edu.ec

**DMQ, Agosto 2023**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, Bryan Chillagana 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.

**BRYAN ALEXANDER CHILLAGANA VALVERDE**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Chillagana Bryan, bajo mi supervisión.

**Ing. ESTEBAN ALEJANDRO VALENCIA TORRES, PhD.**

**JEFE DE DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA (S)**

Certificamos que revisamos el presente trabajo de integración curricular.

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmo que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como los productos resultantes 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 me corresponde como autor que he 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.

BRYAN ALEXANDER CHILLAGANA VALVERDE

## **DEDICATORIA**

Dedico el presente proyecto a la persona más importante e influyente en mi vida tanto personalmente como profesionalmente mi querida madre María Valverde; quién me enseñó a no abandonar mis sueños, a mi padre Marco Chillagana por el ejemplo de esfuerzo y dedicación, a mis hermanas Jenny, Erika, Vanessa por su paciencia y tolerancia, a mi hermano Marco por su increíble valentía, a mi gran amigo Andrés y demás por su amistad, a mis profesores quienes fueron determinantes para formarme profesionalmente.

## **AGRADECIMIENTO**

Expreso mi sincera gratitud a mis padres por apoyarme económica y brindarme la oportunidad de estudiar y cumplir uno de mis objetivos. Agradezco a mi director Dr. Wilson Guachamin por su paciencia, atención y conocimiento brindado en este trabajo de titulación. Agradezco a la facultad de Ingeniería Mecánica, sus profesores, administración y demás por acogerme y permitir mi desarrollo profesional y también a la Escuela Politécnica Nacional por las enseñanzas brindadas en durante toda la carrera.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	V
INDICE DE FIGURAS	VII
INDICE DE TABLAS	VIII
ABREVIATURAS	VIII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
<b>1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivo general	2
1.2. Objetivos específicos	2
1.3. Alcance	2
1.4. Marco teórico	2
1.4.1. Plantas fotovoltaicas flotantes	2
1.4.2. Cargas medioambientales	4
1.4.3. Ecuación de Morrison	6
1.4.4. Sistema de amarre	6
1.4.5. Sistema de referencia y dirección	9
<b>2. METODOLOGÍA</b>	<b>11</b>
2.1. Análisis de datos topográficos	12
2.1.1. Nivel del agua	12
2.1.2. Perfil transversal topográfico de la zona 3	12
2.2. Modelo conceptual	13
2.3. Dimensionamiento geométrico de la FPV	13
2.3.1. Desplazamientos lineales y angulares restringidos	15
2.4. Análisis de datos medioambientales	16
2.4.1. Análisis de los datos del caudal	16
2.4.2. Carga de corriente	16
2.4.3. Carga de viento	17
2.4.4. Carga de oleaje	19

<b>2.5. Sistema de amarre disperso</b>	<b>20</b>
2.5.1. Ubicación y dirección de puntos de amarre	20
2.5.2. Líneas de amarre	20
2.5.3. Cálculo de parámetros inerciales de los cuerpos sumergidos	22
<b>2.6. Modelo numérico</b>	<b>24</b>
2.6.1. Estructura flotante	24
2.6.2. Cuerpos sumergidos	25
2.6.3. Poleas	25
2.6.4. Líneas de amarre y puntos de anclaje	26
<b>2.7. Escenarios de estudio</b>	<b>26</b>
2.7.1. Variación del espectro de oleaje	26
2.7.2. Variación de parámetros inerciales de los cuerpos sumergidos	27
2.7.3. Variación del patrón de amarre	27
<b>3. RESULTADOS</b>	<b>29</b>
3.1. Respuestas dinámicas variando el espectro de ola	31
3.2. Respuestas dinámicas variando parámetros inerciales	32
3.3. Respuestas dinámicas variando el patrón de amarre	34
<b>4. CONCLUSIONES</b>	<b>37</b>
<b>5. RECOMENDACIONES</b>	<b>38</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>42</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Variación de cota; Zona 3.	1
Figura 1.2. Planta fotovoltaica flotante.	3
Figura 1.3. Accidentes de una FPV	4
Figura 1.4. Cargas medioambientales que actúan sobre la FPV.	4
Figura 1.5. Principales parámetros asociados a las olas	5
Figura 1.6. Sistema de líneas dispersas	7
Figura 1.7. Patrones de amarre.	8
Figura 1.8. Sistemas de amarre.	9
Figura 1.9. Sistemas de referencia y dirección.	10
Figura 2.1. Metodología para el análisis dinámico de una FPV	11
Figura 2.2. Variación de cota por año	12
Figura 2.3. Perfil trasversal topográfico y geometría de la FPV en la zona 3	13
Figura 2.4. Vista superior y detalle de la FPV	14
Figura 2.5. Simplificación para el momento de inercia de la FPV	15
Figura 2.6. Desplazamientos máximos de la FPV en la zona 3; Vista superior	15
Figura 2.7. Variación de caudal anual (intervalo 2011-2018)	16
Figura 2.8. Ubicación de la FPV y dirección de la corriente.	17
Figura 2.9. Velocidad del viento y ráfagas	18
Figura 2.10. Dirección del viento	18
Figura 2.11. Direcciones de oleaje	19
Figura 2.12. Ubicación y distribución de puntos de amarre y anclaje.	20
Figura 2.13. Geometría de la línea de amarre	21
Figura 2.14. Vistas de la FPV con líneas de amarre.	21
Figura 2.15. Rigidez vs diámetro del cable.	22
Figura 2.16. Diagrama de cuerpo libre de la FPV y cuerpos sumergidos	23
Figura 2.17. Modelo numérico de estructura flotante	25
Figura 2.18. Modelo numérico de los cuerpos suspendidos	25
Figura 2.19. Modelo número simplificado para poleas	26
Figura 2.20. Modelo simplificado de la FPV y sistema de amarre en AQWA	26
Figura 2.21. Patrones de amarre que se usarán para simulación.	28
Figura 3.1. Posición y rotación del COG.	30
Figura 3.2. Respuesta dinámica de la posición COG en x vs tiempo	31
Figura 3.3. Desplazamiento en x vs variación del espectro	31
Figura 3.4. Posición y desplazamiento en función de la masa de CS: SA3-1C.	33
Figura 3.5. Posición y desplazamiento en función de la masa de CS: SA1-1	34
Figura 3.6. Desplazamiento en X vs Dirección de la 1ra línea de amarre: 4X1	34
Figura 3.7. Desplazamiento en X vs Dirección de la 1ra línea de amarre: 4X1-CY	35
Figura 3.8. Desplazamiento en X vs Dirección de la 1ra línea de amarre: 4X1-CX	36

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Valores de masa de los componentes principales de la FPV_____	14
Tabla 2.2. Datos de oleje_____	19
Tabla 2.3. Parámetros inerciales de cuerpos sumergidos_____	20
Tabla 2.4. Escenarios de estudio relacionados con el espectro de ola_____	27
Tabla 2.5. Escenarios de estudio variando los parámetros inerciales de CS_____	27
Tabla 2.6. Escenarios de estudio variando el patrón de amarre_____	28
Tabla 3.1. Datos de las líneas de amarre para diferentes escenarios_____	32

## ABREVIATURAS

<b>FPV</b>	Planta fotovoltaica flotante
<b>CELEC</b>	Corporación Eléctrica del Ecuador
<b>CS</b>	Cuerpos sumergidos
<b>Cota</b>	Nivel del agua
<b>COG</b>	Centro de gravedad

## UNIDADES

<b>m</b>	Metros
<b>mm</b>	Milímetros
<b>msnm</b>	Metros sobre el nivel del mar
<b>°</b>	Grados
<b>MW</b>	Mega watt
<b>Ton</b>	Toneladas
<b>kg</b>	Kilogramos
<b>N</b>	Newton

## RESUMEN

Actualmente a nivel mundial, la demanda de recursos renovables se ha incrementado. La energía fotovoltaica es un recurso renovable atractiva para el Ecuador por tres motivos: ubicación geográfica, radiación solar y complementariedad energética en tiempos de estiaje. El embalse de Mazar dispone de una gran superficie de agua que puede ser aprovechada para la instalación de una planta fotovoltaica flotante (FPV), la cual consta de una estructura flotante, paneles fotovoltaicos y un sistema amarre. En el transcurso del año, las lluvias, estiaje, inundaciones y drenados generan grandes variaciones del nivel del agua (cota) en el embalse, los sistemas de amarre tradicionales no son capaces de restringir el movimiento de una FPV con estas variaciones de cota. En este proyecto se propone un modelo conceptual de una FPV con un sistema de amarre pasivo, que se adapta a la variación de cota y garantiza la estabilidad bajo cargas medioambientales. El componente inicia con un análisis topográfico de la zona 3 del embalse de Mazar para la cota inferior, seguido se realiza el dimensionamiento de la FPV, se propone una geometría preliminar para el sistema de amarre y se analiza las cargas medioambientales. Posteriormente se plantea un modelo numérico que recoge toda la información anterior, se define escenarios de simulación clasificados en: variación del espectro de ola, variación de parámetros inerciales de los cuerpos sumergidos y variación del patrón de amarre. Finalmente se analiza las respuestas dinámicas y estabilidad del modelo. Los resultados muestran que un sistema de amarre compuesto de poleas, líneas de amarre y cuerpos sumergidos restringen el movimiento y garantiza la estabilidad de la FPV para la cota inferior. El desplazamiento oscilante de la FPV depende considerablemente de los parámetros inerciales de los cuerpos sumergidos del sistema de amarre, también depende en menor medida de la disposición y dirección de las líneas de amarre.

**PALABRAS CLAVE:** FPV, sistemas de amarre, cota, espectro de ola y estabilidad.

## **ABSTRACT**

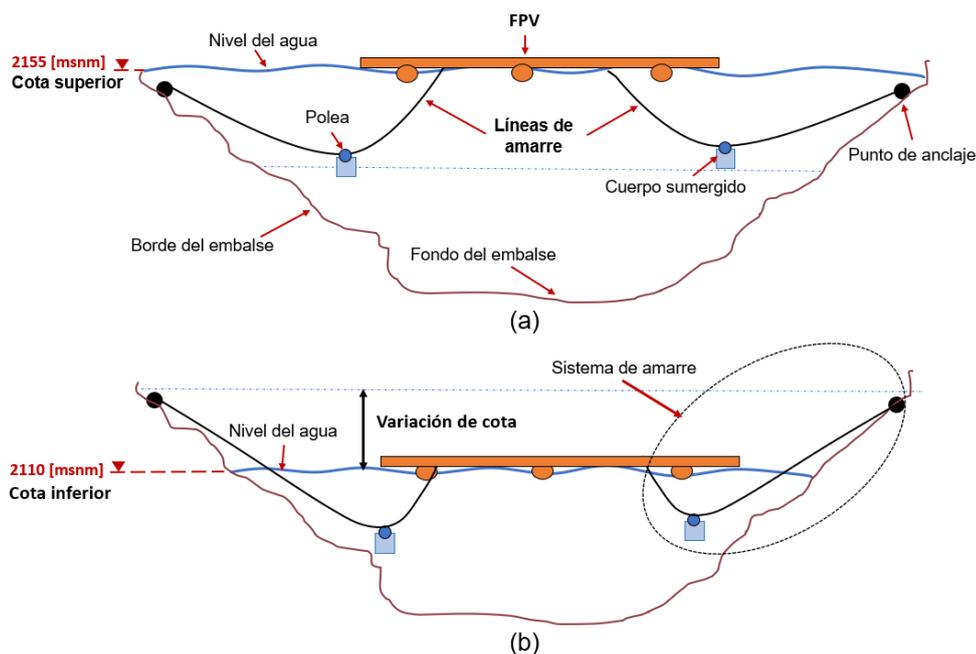
Currently, the demand for renewable resources has increased. Photovoltaic energy is an attractive renewable resource for Ecuador for three reasons: geographic location, solar radiation, and energy complementarity in times of drought. The Mazar reservoir has a large surface area of water that can be used for the installation of a floating photovoltaic plant (FPV), which consists of a floating structure, photovoltaic panels, and a mooring system. During the year, the rain, dry season, flood, and drainage generate large variations in the water level (elevation) in the reservoir. Traditional mooring systems are not capable of controlling the movement of an FPV with these variations in water level. This project proposes a conceptual model of an FPV with a passive mooring system, which adapts to elevation variation and guarantees stability under environmental loads. The component begins with a topographic analysis of zone 3 of the Mazar reservoir for the lower level, followed by the geometric dimensioning of the FPV. A preliminary geometry for the mooring system is proposed and environmental loads are analyzed. A numerical model is developed and various simulation scenarios are conducted considering variation of the wave spectrum, variation of inertial parameters of submerged bodies, and variation of the mooring pattern. Finally, the dynamic responses and stability of the model are analyzed. The results show that a mooring system composed of pulleys, mooring lines, and submerged bodies restricts movement and guarantees FPV stability for the lower elevation. The oscillating displacement of the FPV depends on the gravity of the inertial parameters of the submerged bodies of the mooring system, it also depends to a lesser extent on the arrangement and direction of the mooring lines.

**KEYWORDS:** FPV, mooring systems, elevation, wave spectrum and stability.

# 1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

El presente proyecto tiene como objetivo analizar dinámicamente una planta fotovoltaica flotante para el embalse de Mazar, considerando dos condiciones principales: variación de cota y cargas medioambientales. Primero se analiza estadísticamente los datos meteorológicos y los datos topográficos, seguido se determina el perfil transversal según la zona elegida, por consiguiente, se realiza el dimensionamiento y geometría de un módulo que represente una planta fotovoltaica flotante (FPV).

A un sistema de amarre tradicional se añade poleas y cuerpos sumergidos, estos se desplazan en las líneas de amarre, permitiendo el movimiento vertical de una FPV, lo que resuelve la adaptabilidad ante la variación de cota, a su vez, las poleas y cuerpos sumergidos suspenden de las líneas de amarre, lo que genera fuerzas de restauración que permiten contrarrestar las cargas medioambientales. En la figura 1.1 muestra un esquema de un modelo geométrico de una FPV cuando se encuentra en la cota superior e inferior.



**Figura 1.1. Variación de cota; Zona 3. (a) FPV cota superior. (b) FPV cota inferior**

Se caracteriza las cargas medioambientales y se define la geometría del sistema de amarre. Seguido se realiza un modelo numérico y se propone diferentes escenarios de estudio como: variación de parámetros inerciales de los cuerpos sumergidos, parámetros de oleaje y patrón de amarre. Los resultados permiten proponer sistemas de amarre adecuados para condiciones medioambientales específicas, logrando la estabilidad de la FPV dentro de restricciones de movimiento definidas.

## **1.1. Objetivo general**

Analizar dinámicamente un sistema fotovoltaico flotante para el embalse de Mazar.

## **1.2. Objetivos específicos**

- a. Analizar los datos geométricos, topográficos y meteorológicos del embalse de Mazar
- b. Caracterizar las cargas medioambientales.
- c. Definir una geometría y un sistema de amarre para una FPV.
- d. Simular el comportamiento dinámico de una FPV bajo cargas medioambientales.
- e. Analizar las respuestas dinámicas y estabilidad de la FPV.

## **1.3. Alcance**

El alcance del presente proyecto es proponer un modelo conceptual de una FPV con un sistema de amarre pasivo, que se adapte a una variación de cota de 45 [m] y garantice la estabilidad bajo cargas medioambientales específicas. Para ello, se analiza los datos topográficos y meteorológico, se dimensiona una FPV, se define la geometría del sistema de amarre; adecuado para la cota inferior de la zona 3 del embalse de Mazar, se caracteriza las cargas medioambientales, seguido se propone un modelo numérico de una FPV y se simula diferentes escenarios en ANSYS AQWA. Se analiza las respuestas dinámicas y estabilidad de la FPV.

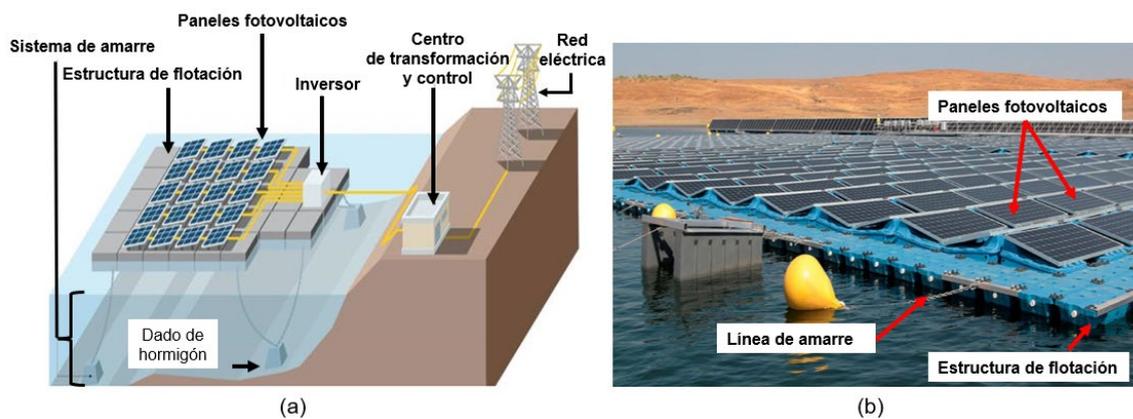
## **1.4. Marco teórico**

### **1.4.1. Plantas fotovoltaicas flotantes**

Consiste en una central fotovoltaica que flota sobre una superficie de agua. Una FPV absorbe radiación solar mediante un conjunto de paneles fotovoltaicos ubicados sobre flotadores, estos se unen para formar arreglos, conjuntos y bloques. La capacidad de generación eléctrica depende del número de paneles fotovoltaicos e inversores. La energía generada por los paneles solares pasa a través de un inversor DC-CA [4], un centro de transformación-control, una red eléctrica y finalmente se procede a la distribución a hogares o industrias. Una FPV tiene algunos beneficios comparados con un sistema fotovoltaico terrestre, estos son: mayor rendimiento en la generación de energía; debido a la refrigeración, ahorro de suelo, evita la evaporación del agua y el mantenimiento es más sencillo [2].

Una FPV consta de 3 principales sistemas: **Sistema flotante.** - Son estructuras que flotan sobre la superficie del agua; consta de una estructura y un flotador, sobre estos se instala los paneles fotovoltaicos. **Sistema de amarre.** - Son elementos que restringen el movimiento de la FPV, permiten la estabilidad e integridad. Consta de líneas de amarre, anclaje, boyas y pesos muertos. **Sistema Fotovoltaico.** – Son instrumentos o equipos que permiten la generación de energía como: paneles fotovoltaicos, inversores, cables submarinos, centro de transformación-control y red eléctrica.

En la figura 1.2 muestra la infografía e imagen de una FPV instalada en Cáceres-España, ubicada en la orilla sur del embalse de Sierra Barra. La planta se extiende a lo largo de 12000 [m<sup>2</sup>]; cuenta con 3000 paneles solares que generan 1.1 megavatios de energía. El sistema de amarre tradicional consta de dados de hormigón y cadenas [3].



**Figura 1.2. Planta fotovoltaica flotante.** (a) Infografía de la FPV; (b) FPV de Sierra Brava

Fuente: [3]

Otro ejemplo de FPV se encuentra ubicada en Leyda-Chile, su instalación se realizó en 2019 y se encuentra sobre un reservorio de agua para evitar la evaporación. La generación de potencia es de 115 [kW], consta 766 flotadores con paneles solares por cada flotador. Sino se realiza un análisis dimensional y una correcta selección del sistema de amare de una FPV, esta puede sufrir accidentes.

En la figura 1.3a muestra que la cota del reservorio de agua descendió de tal manera que la estructura de flotación terminó en el fondo, produciendo daños tanto en los flotadores como en los paneles fotovoltaicos.

En la Figura 1.3b muestra la planta Kyocera TCL Solar de 13.7 [MW], donde el paso del tifón Faxai causó el fallo de las conexiones de los flotadores, lo cual ocasionó el desplazamiento y colisión de la FPV con el costado del cuerpo de agua [4].



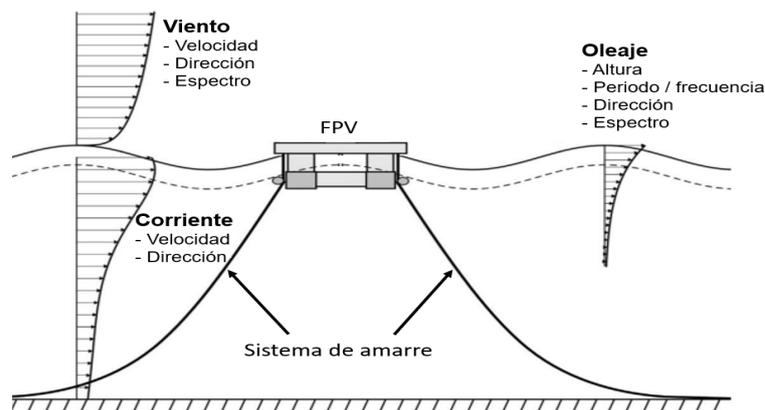
**Figura 1.3. Accidentes de una FPV.** (a) Descenso de cota y mala selección del sistema de amarre; (b) Colisión de una FPV con la orilla por fallo en conexiones de flotadores.

Fuente: [4]

Por lo tanto, la selección adecuada del sistema de amarre en plantas fotovoltaicas flotantes requiere de un análisis dimensional y dinámico donde se considere; variación de cota y cargas medioambientales. Lo que evita accidentes mortales, ambientales y económicos.

#### 1.4.2. Cargas medioambientales

Una FPV experimenta cargas medioambientales debido a la existencia de viento, corriente y oleaje como muestra la figura 1.4. Las cargas medioambientales que actúan sobre una FPV son soportadas por la fuerza de restauración del sistema de amarre.



**Figura 1.4. Cargas medioambientales que actúan sobre la FPV.**

Fuente: [5], modificado por el autor

El diseño de un sistema de amarre debe proporcionar la estabilidad de una FPV, es decir: soportar las cargas medioambientales, restringir el movimiento y mantener la posición.

### A. Carga del viento

El viento impone cargas estáticas-dinámicas sobre una PFV, también generan corrientes y olas que inciden en la estructura de flotación incluso al sistema de amarre. Se caracteriza por; velocidad, dirección y espectro. Como explica Yong Luo en su libro indica que la velocidad del viento se define con el promedio en un intervalo de tiempo a una altura específica [6], usualmente a 10 [msnm].

Para un cálculo preliminar de la carga de viento, se utiliza la ecuación 1.1 a velocidad constante. Donde  $\rho_v$ : Densidad del fluido (aire:  $1.29 \frac{kg}{m^3}$ ),  $C_a$ : Coeficiente de arrastre,  $A_c$ : Área proyectada perpendicular a la dirección de la velocidad,  $v$ : Velocidad media del viento.

$$F_v = \frac{1}{2} \rho C_a A_c v^2 \quad (1.1)$$

### B. Carga de oleaje

La carga de oleaje es generada principalmente por el viento. Los parámetros asociados a las olas se pueden apreciar en la figura 1.5.

**Altura de la ola:** corresponde a la distancia vertical desde la cresta hasta el valle. **La longitud de ola:** es la distancia que existe entre dos crestas. **El periodo de ola:** es el tiempo entre la llegada de crestas consecutivas. **Dirección:** propagación de la ola,

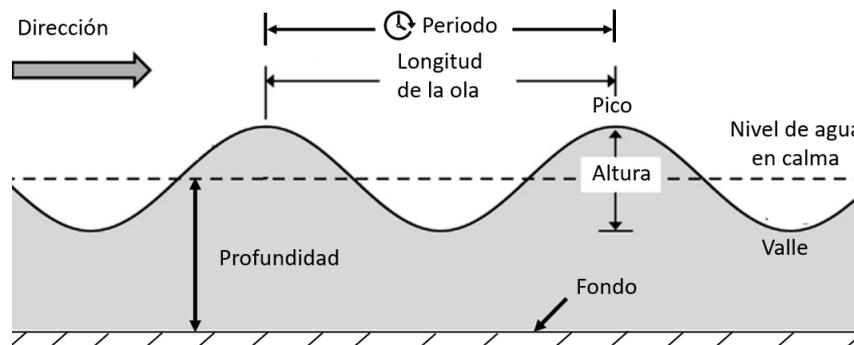


Figura 1.5. Principales parámetros asociados a las olas

Fuente: [6]

La caracterización de la acción del oleaje irregular se puede usar modelos paramétricos analíticos. En el caso de reservorios de agua, embalses y lagos se utiliza el espectro JONSWAP [5].

### **C. Carga de corriente**

La velocidad del agua genera fuerzas de arrastre. La carga es mayor comparado con el viento, debido a que la densidad del fluido es el agua, cuyo valor es 773 veces mayor. La carga de arrastre se puede aproximar mediante la ecuación 1.1. Donde;  $\rho$ : Densidad el agua ( $997 \frac{kg}{m^3}$ ),  $C_a$ : Coeficiente de arrastre,  $A_c$ : Área sumergida y perpendicular a la dirección del fluido,  $v$ : Velocidad media de la corriente. La influencia de la carga de oleaje y corriente pueden ser estimadas con la ecuación de Morrison.

#### **1.4.3. Ecuación de Morrison**

La ecuación de Morrison se utiliza para estimar las cargas de oleaje en estructuras flotantes marinas. La ecuación está compuesta de dos componentes: Fuerza de inercia; depende de la aceleración de flujo localmente y fuerza de arrastre; depende de la velocidad instantánea.

La ecuación 1.2 se utiliza para calcular la fuerza lineal total sobre un cuerpo  $F_M$ , donde  $F_I = \rho C_m V \dot{u}$ : Fuerza de inercia,  $\rho V \dot{u}$ : Fuerza de Froude-Krylov,  $C_m = 1 + C_a$ : Coeficiente de inercia,  $C_a$ : Coeficiente de masa añadida.  $V$ : Volumen de un cuerpo,  $A$ : Área de referencia (área transversal perpendicular al fluido),  $F_D = \frac{1}{2} \rho C_d A u |u|$ : Fuerza de arrastre,  $u = u(t)$ : Velocidad del fluido,  $\dot{u}$ : Aceleración del fluido en función del tiempo [9].

$$F_M = \rho C_m V \dot{u} + \frac{1}{2} \rho C_d A u |u| \quad (1.2)$$

Cabe indicar que esta ecuación tiene su limitante, analiza estructuras delgadas. Donde la longitud de onda es mayor que el diámetro del cilindro o el ancho transversal de la estructura. A través de la ecuación de Morrison se analiza el sistema de amarre.

#### **1.4.4. Sistema de amarre**

Un sistema de amarre consta de líneas de amarres, anclajes, boyas y pesos muertos. Los tipos de amarre se clasifican en dos: dispersos y de un solo punto. El sistema de amarre de un solo punto permite rotaciones considerables de una estructura. En el caso de una FPV este sistema no es apto para restringir el movimiento.

Para el diseño del sistema de amarre se requiere: geometría de una FPV, profundidad, topografía, condiciones de cargas medioambientales, restricciones del sistema y criterios de diseño.

Un criterio de diseño considera las cargas medioambientales de tal manera que todos sus componentes cumplan con los requisitos de resistencia.

### A. Sistema de amarre disperso

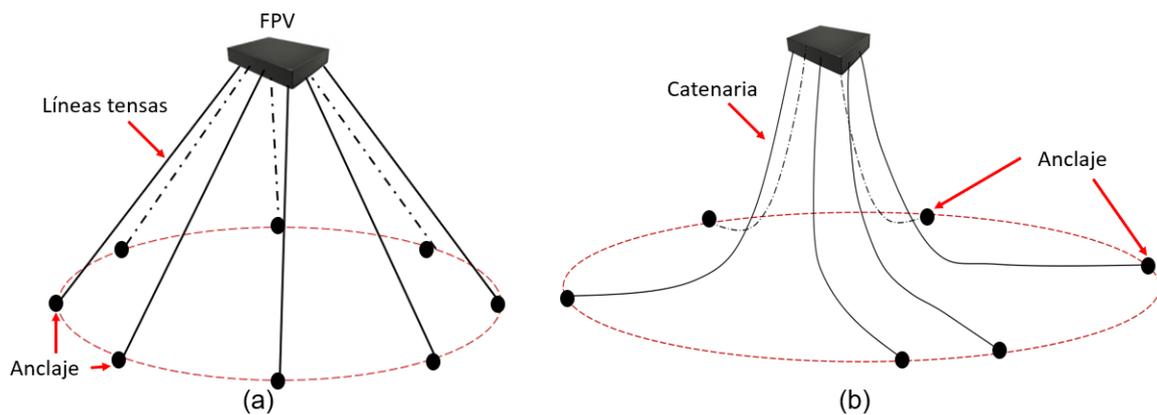
El sistema de amarre tradicional consiste en varias líneas de amarre dispersas de forma simétrica o asimétrica dependiendo de la estructura flotante o topografía, como muestra la figura 1.6. En el caso de una FPV, las líneas de amarre se conectan en diferentes puntos de la estructura flotante, con cables de acero o fibras sintéticas y se anclan al fondo del embalse.

Según Yong Luo en su libro indica los aspectos a considerar si se va a diseñar un sistema de amarre, estos son: perfil de amarre, patrón de amarre, composición de la línea y anclaje [6].

### B. Perfiles de amarre

Los perfiles de amarre más usados son: catenaria y tensos. La diferencia principal entre estos son su fuerza de restauración. En las líneas de amarres tipo catenaria; las fuerzas de restauración se deben al cambio del peso suspendido, mientras que las líneas tensas; su fuerza de restauración se debe principalmente a la elasticidad de esta.

En la figura 1.6 muestra los perfiles de amarre tipo catenaria y líneas tensas. Usualmente estos perfiles son los más usados en sistemas flotantes de producción [6].



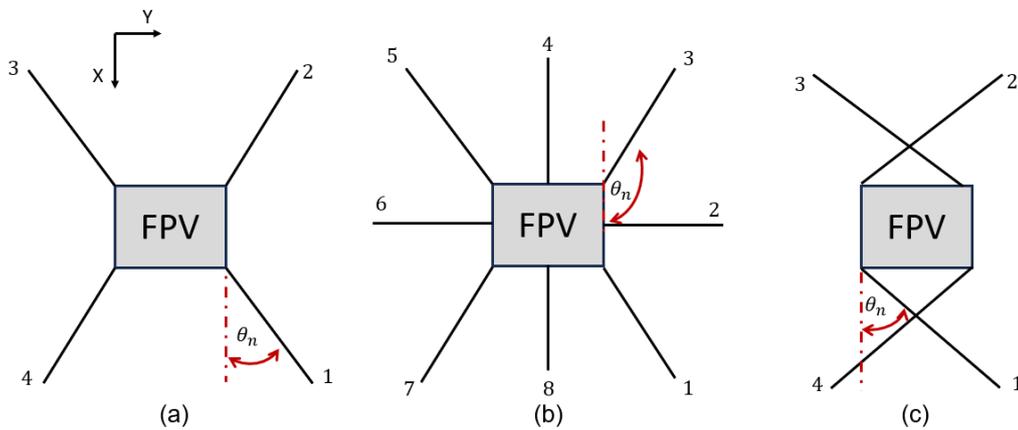
**Figura 1.6. Sistema de líneas dispersas.** (a) Líneas de amarre tensas; (b) Líneas de amarre tipo catenaria.

La geometría de la catenaria sigue la ecuación 1.3, donde  $\rho_{sum} = \rho_{acero} - \rho_{agua}$  (diferencia de densidades del acero y agua),  $g$ : gravedad,  $A$ : área transversal del cable,  $T_0$ : tensión horizontal. Para reducir la ecuación se propone una constante  $a = \frac{\rho_{sum} \times A \times g}{T_0}$  [6].

$$y = \left(\frac{1}{2a}\right) \left(e^{ax} + e^{-ax} - \frac{1}{a}\right) \quad (1.3)$$

### C. Patrón de amarre

Un patrón de amarre se compone de: número de líneas de amarre, distribución y dirección. En la figura 1.7 muestra tres patrones de amarre 4x1, 8x1 y 4x1 cruzado. El ángulo de dirección de la línea se toma desde el X+ en sentido antihorario. En un patrón de amarre 4X1 y 8x1 las líneas de amarre están uniformemente distribuidas, debido a su simetría respecto a los ejes X y Y.



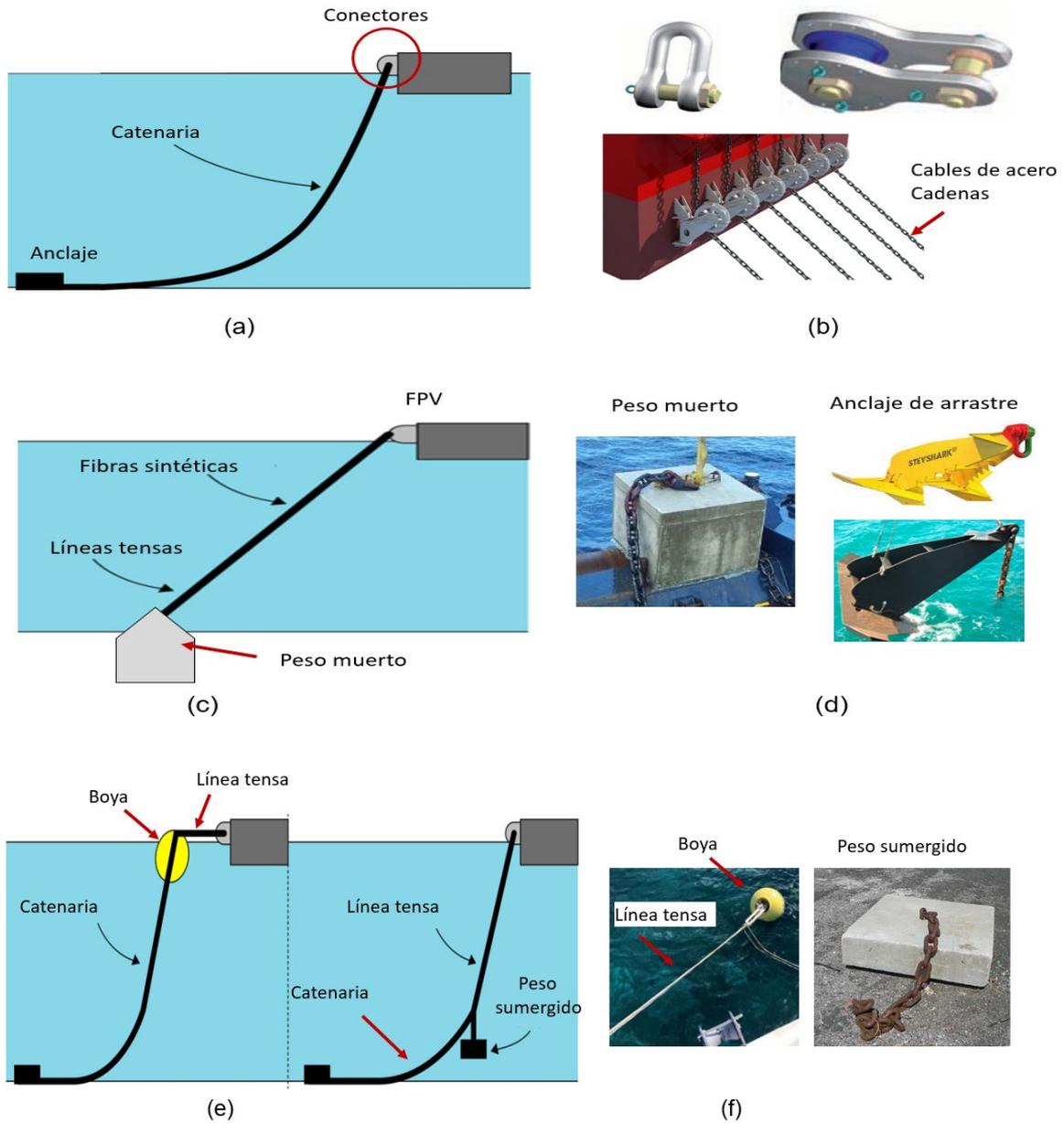
**Figura 1.7. Patrones de amarre.** (a) 4x1; (b) 8x1; (c) 4x1 cruzado

Los patrones de amarre 4x1 pueden ser aplicados en plantas fotovoltaicas flotantes debido a que en Ecuador las condiciones ambientales presentes no son agresivas.

### D. Composición de la línea de amarre

La línea de amarre puede estar compuesta de: cadenas, cables de acero, fibras sintéticas, conectores, boyas, pesos muertos y anclajes.

En la figura 1.8 muestra la composición de tres diferentes perfiles de amarre (a, c, e): tipo catenaria, tensos y semi-tensos. Además, se muestra los elementos que comprenden un sistema de amarre como: conectores, anclajes, boyas y pesos sumergidos.



**Figura 1.8. Sistemas de amarre.** (a) Perfil de amarre catenaria; (b) Conectores de la FPV; (c) Perfil de amarre tenso; (d) Tipos de anclaje; (e) Perfil de amarre semi-tenso; (f) Boyas y pesos sumergidos

El sistema de amarre para que sea factible y viable debe ser un sistema pasivo, debido a la cantidad de líneas de amarre, estructuras de flotación, anclajes, paneles fotovoltaicos y demás.

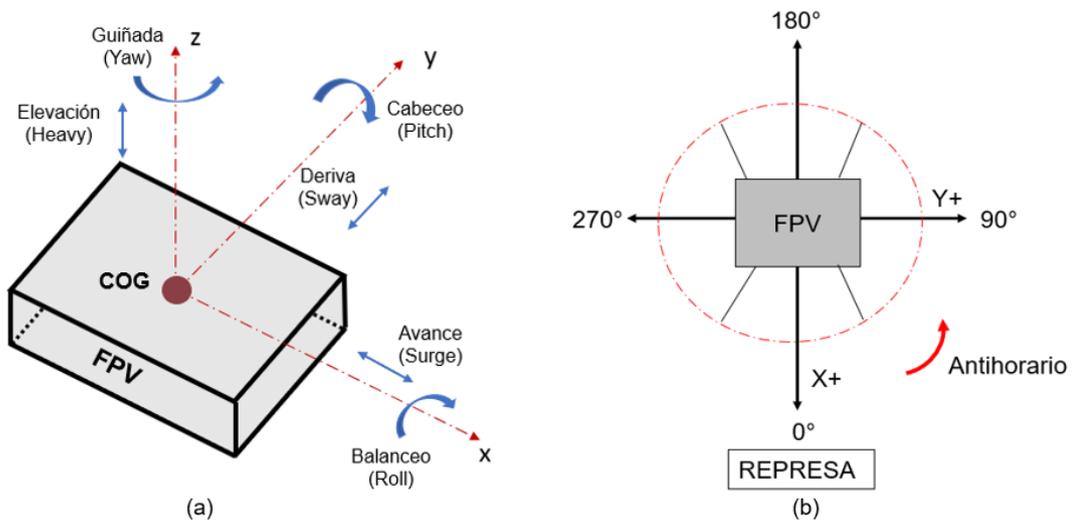
#### 1.4.5. Sistema de referencia y dirección

Las cargas medioambientales producen desplazamientos y rotaciones, dando como resultado 6 grados de libertad que puede tener una FPV.

En la figura 1.9 muestra el sistema de referencia usado en este proyecto, donde el centro de gravedad (COG) o centro de masa de la FPV corresponde al origen, la dirección del eje z debe señalar hacia arriba.

En la figura 1.9a muestra los grados de libertad que tiene una FPV. Debido a que la altura de una FPV no es significativa respecto al largo y ancho. Los movimientos de cabeceo y balanceo son insignificantes. Sin embargo, los movimientos de avance, deriva elevación y guiñada son considerables.

Las direcciones (ángulos de referencia) de viento, oleaje y corriente deberán ser consideradas desde X+ en sentido antihorario, como se muestra en la figura 1.9b.

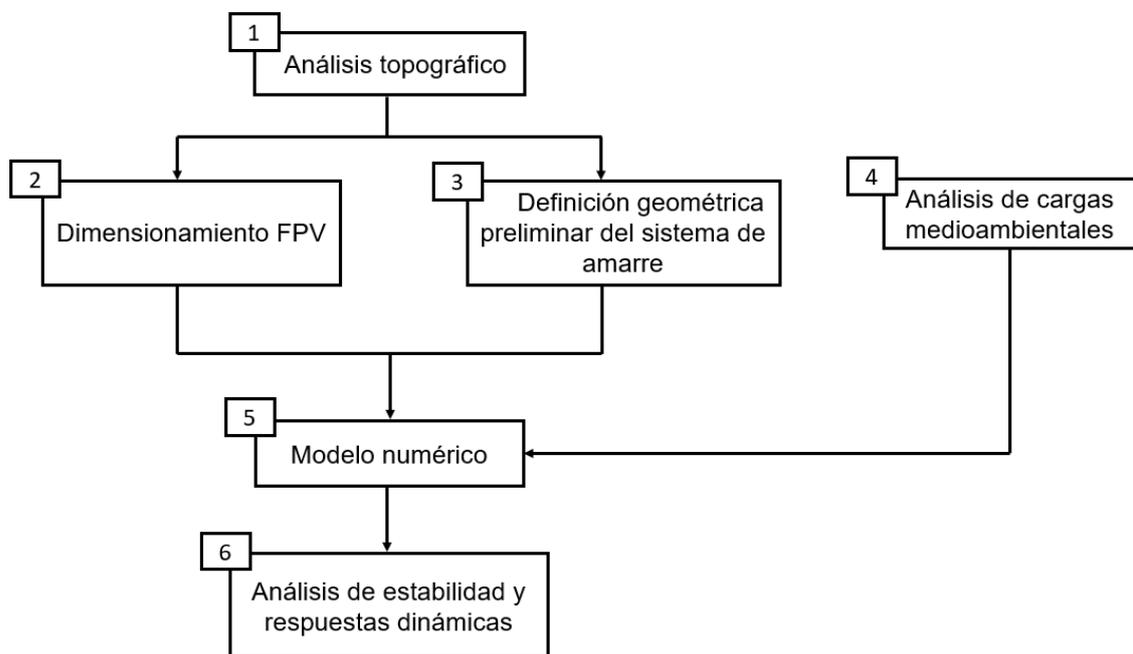


**Figura 1.9. Sistemas de referencia y dirección.** (a) Sistema de referencia (b) Consideración del ángulo de referencia.

Las direcciones de las líneas de amarre de igual manera se miden desde X+ en sentido antihorario.

## 2. METODOLOGÍA

La figura 2.1 detalla la metodología que se utiliza en el presente proyecto, inicia con el análisis de datos topográficos, datos de variación de cota y perfil transversal de la zona 3 del embalse de Mazar. A continuación, se realiza un dimensionamiento geométrico de una FPV; se recoge información del perfil transversal topográfico, se propone la dimensión del ancho y el largo depende de la capacidad del inversor. Simultáneamente, se define la geometría preliminar del sistema de amarre; se realiza un cálculo preliminar de los parámetros inerciales de cuerpos los sumergidos. También se analiza las cargas medioambientales, como son: viento, oleaje y corriente.



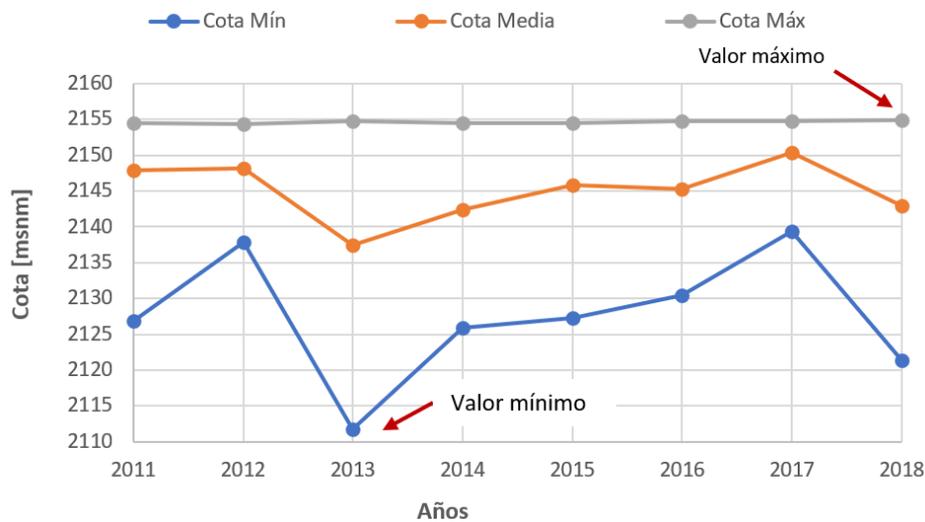
**Figura 2.1. Metodología para el análisis dinámico de una FPV**

Se propone un modelo numérico y se simula diferentes escenarios de estudio, variando los parámetros inerciales de los cuerpos sumergidos, espectro de oleaje y patrones de amarre. Finalmente, se realiza un análisis de las respuestas dinámicas y estabilidad de la FPV.

## 2.1. Análisis de datos topográficos

### 2.1.1. Nivel del agua

Los datos de cota entregados por la Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC), pasan por un proceso de filtración y eliminación de datos con caudales negativos e iguales a cero. En la figura 2.2 muestra la variación de cota por año en un intervalo de tiempo de 8 años con una confiabilidad del 95%. La media absoluta de la cota (promedio de las medias) tiene un valor de 2145.02 [msnm]. El valor máximo de cota es 2154.92 [msnm] y mínimo; 2111.77 [msnm], la variación de cota entre la máxima y mínima es 43.15 [m].

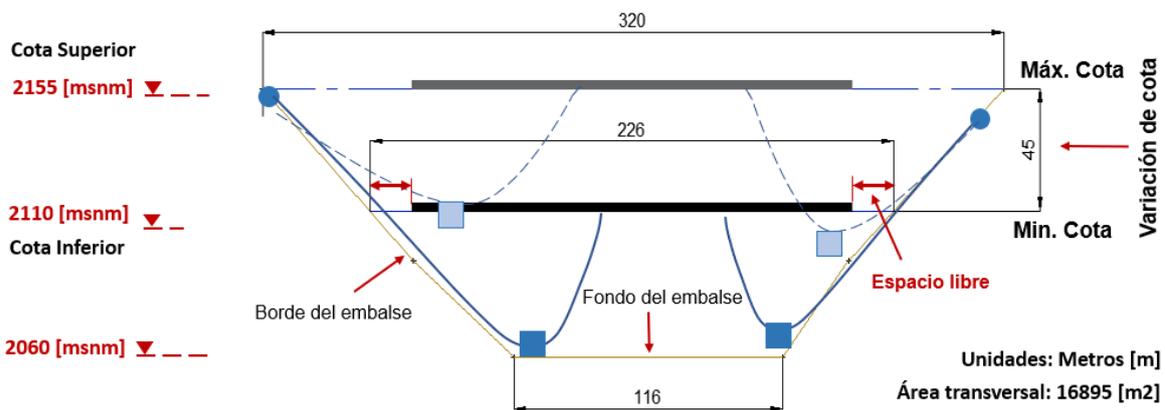


**Figura 2.2. Variación de cota por año (intervalo 2011-2018)**

Por tanto, para el diseño del sistema de amarre se considera una variación de cota de 45 [m], considerando la cota superior de 2155 [msnm] e inferior de 2110 [msnm].

### 2.1.2. Perfil transversal topográfico de la zona 3

En función de las zonas del embalse de Mazar definidas por CELEC, se elige la zona 3 para definir la geometría y perfil transversal topográfico. Se aprecia en la figura 2.3, el perfil transversal y geometría de la FPV. Para la cota superior, el ancho del perfil es 320 [m]. Para la cota inferior es 226 [m]. El ancho del perfil en la cota inferior restringe el ancho de la FPV.



**Figura 2.3. Perfil transversal topográfico y geometría de la FPV en la zona 3**

La estructura de flotación tiene desplazamientos hacia los costados del embalse, por tanto, se debe considerar el espacio libre entre los bordes del embalse y la FPV.

## 2.2. Modelo conceptual

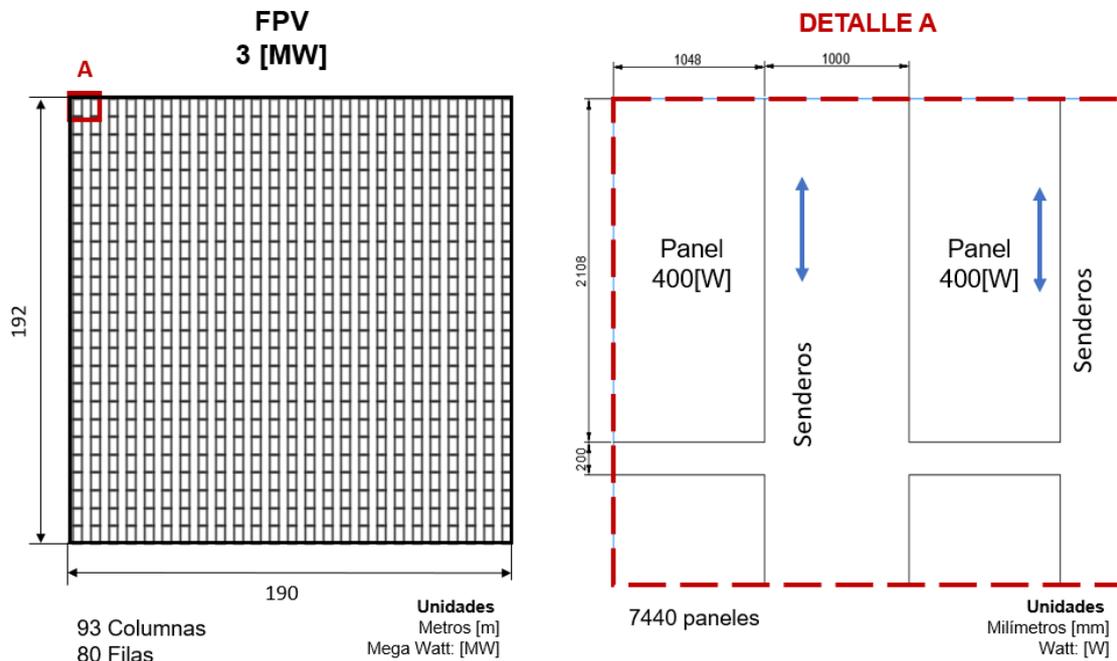
Se compone de una estructura flotante anclada con un sistema de amarre pasivo. El sistema de amarre consiste en líneas de amarre, poleas y cuerpos sumergidos (pesos muertos) y anclaje. Las poleas junto con los pesos muertos se encuentran suspendidos en las líneas de amarre, a su vez, estos pueden desplazarse sobre la misma. Con el aumento de la cota, la FPV asciende, de tal manera que el conjunto polea-cuerpo sumergido se desplazan en la línea de amarre, permitiendo el movimiento vertical de FPV y adaptándose al aumento de cota. Cuando la FPV asciende o desciende por la variación del nivel del agua el conjunto está produciendo tensión en el cable por el peso que suspende, lo que genera fuerzas de restauración que permiten contrarrestar las cargas medioambientales.

## 2.3. Dimensionamiento geométrico de la FPV

El limitante del ancho de la FPV es la distancia entre bordes del perfil transversal en la cota de 2115 [msnm] (ver figura 2.3.). Se considera un espacio libre de 10 [m] a cada lado de la FPV para permitir desplazamientos controlados. El ancho de la FPV es de 190 [m].

El largo de la FPV es restringido por la capacidad del inversor de corriente propuesto por CELEC, cuya capacidad es de 3 [MW]. Cada bloque es independiente y tiene una capacidad de generación menor que el inversor de corriente. Los bloques contienen paneles fotovoltaicos que se distribuyen en filas y columnas. Entre columnas se considera senderos para el mantenimiento, reparación y limpieza.

En la figura 2.4 muestra un bloque con una generación de energía de 3 [MW], el cual consta de 93 columnas y 80 filas.



**Figura 2.4. Vista superior y detalle de la FPV**

La FPV contiene 7440 paneles fotovoltaicos con una capacidad de aproximación de 2.97 [MW]. Por tanto, el largo de la FPV se establece como 192 [m].

#### A. Masa de la FVP

Se calcula la masa de acuerdo con la cantidad de paneles fotovoltaicos, cableado, inversor de corriente y accesorios. En la tabla 2.1 muestra los valores de masa de cada componente importante de la FPV.

**Tabla 2.1. Valores de masa de los componentes principales de la FPV**

Elementos principales FPV	Masa [Ton]
Paneles fotovoltaicos	186
Inversor: 3 [MWp]	3.4
Cables	15.2
Subtotal	204.6
Accesorios	20.46
Total	225.06

La masa total de la FPV es 225.06 Toneladas.

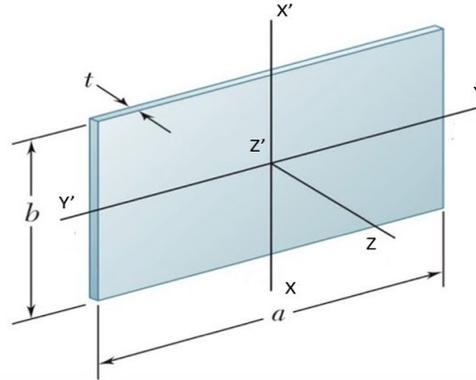
## B. Momento de inercia de masa

El cálculo del momento de inercia de masa se calcula como muestra la figura 2.5.

$$I_{xx} = \frac{1}{12} ma^2 \quad (2.1)$$

$$I_{yy} = \frac{1}{12} mb^2 \quad (2.2)$$

$$I_{zz} = \frac{1}{12} m(b^2 + a^2) \quad (2.3)$$

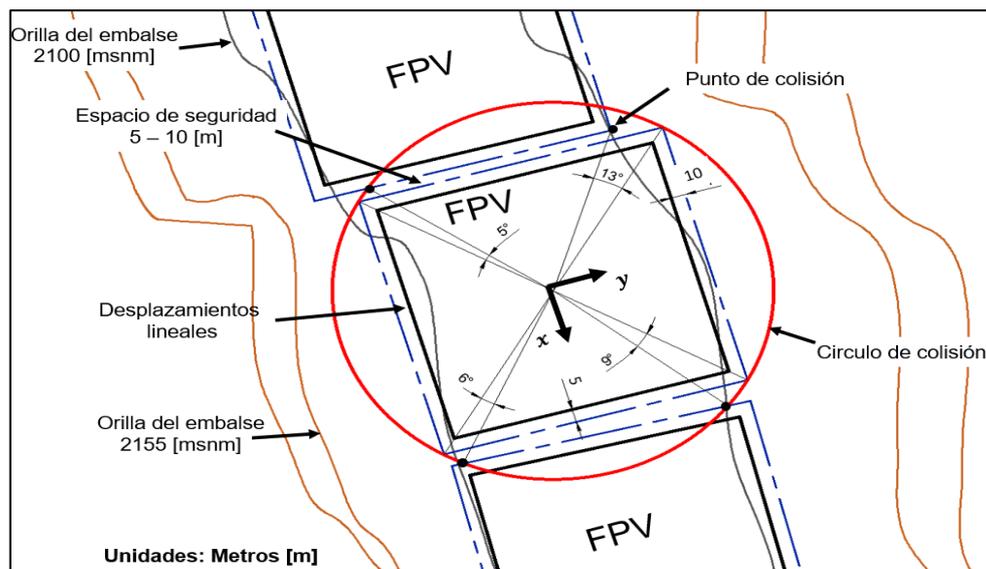


**Figura 2.5. Simplificación para el momento de inercia de la FPV**

El valor  $a=190$  [m],  $b=192$  [m]. Los momentos de inercia de masa son  $I_{xx}= 6.70e8$  [ $kg \cdot m^2$ ];  $I_{yy}= 6.91e8$  [ $kg \cdot m^2$ ],  $I_{zz}=1.36e9$  [ $kg \cdot m^2$ ]. El momento de inercia de masa respecto al eje  $z$  es mayor comparado con el eje  $x$  y el eje  $y$ .

### 2.3.1. Desplazamientos lineales y angulares restringidos

La FPV debe tener desplazamientos máximos que evitan que colisionen una con otra. Se estable los desplazamientos de acuerdo con la geometría y topografía de la zona 3. En la figura 2.6 muestra el desplazamiento lineal de la FPV, donde se considera un espacio de seguridad de 10 [m] entre FPV y cada una puede desplazarse linealmente 5 [m] desde su punto de instalación.



**Figura 2.6. Desplazamientos máximos de la FPV en la zona 3; Vista superior**

El desplazamiento angular se considera en el caso que la FPV se desplace linealmente 5 [m]. Se establece un círculo de colisión donde se identifican los puntos de colisión con otra FPV o con las orillas del embalse. Se calcula los grados que debe girar la FPV para que exista colisión. En la figura 2.6 muestra los puntos de colisión y los grados desde el punto de instalación. El valor mínimo que puede girar la FPV es 5° en sentido horario o antihorario.

## 2.4. Análisis de datos medioambientales

Se analiza los datos de caudal del embalse de Mazar, para lo cual se realiza un análisis estadístico con una confiabilidad del 95% para la media del viento y caudal. Se establece la media del caudal y velocidad del viento. El caudal se relaciona con la velocidad superficial, con ello se define la velocidad de la corriente.

### 2.4.1. Análisis de los datos del caudal

El caudal varía debido a factores como: lluvia, deslaves y apertura de compuertas de contención. En la figura 2.7 muestra los datos máximos, mínimos y medio del caudal. El valor del caudal máximo es  $325 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$ , mínimo  $3 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$  y medio  $78 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$ . La dispersión de los datos respecto a la media es considerable, por tanto, la variable de interés es el caudal máximo en un intervalo de tiempo de ocho años.

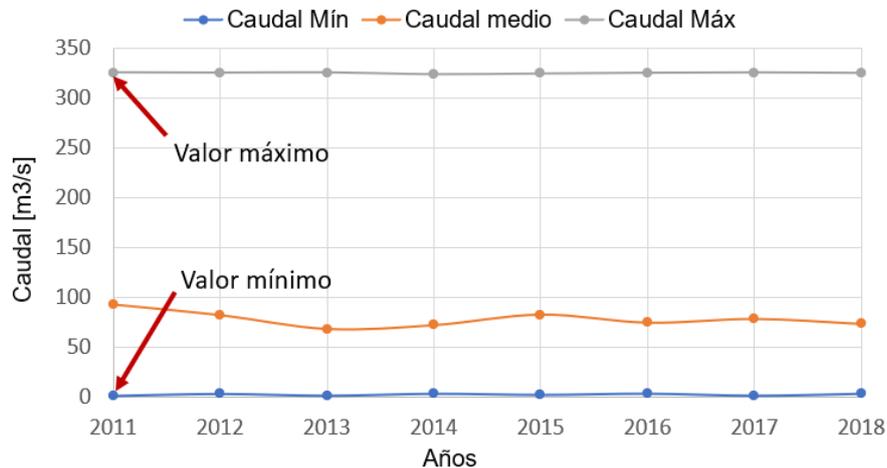
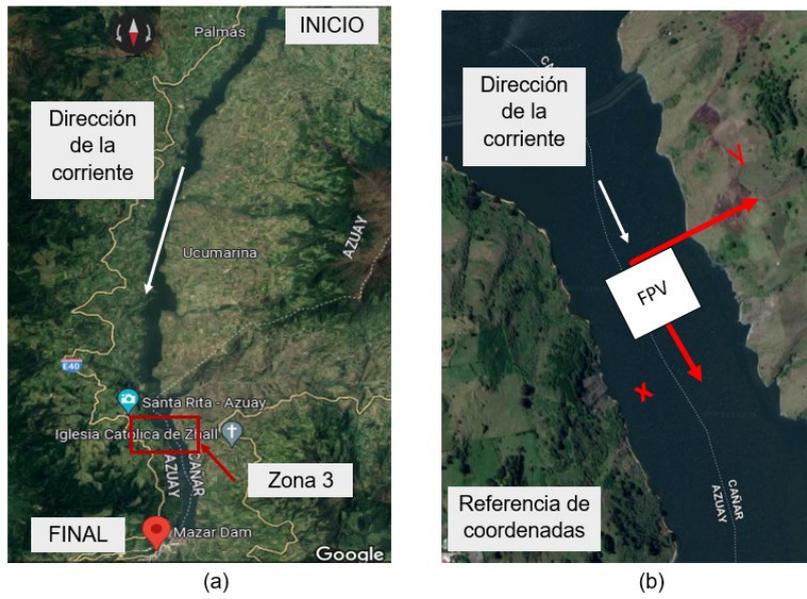


Figura 2.7. Variación de caudal anual (intervalo 2011-2018)

### 2.4.2. Carga de corriente

El caudal del embalse no es suficiente para determinar la corriente, está depende de la ubicación, pendiente topográfica y geometría transversal mojada. Se utiliza la formula del caudal  $Q = V \cdot A$  para estimar un valor de velocidad de la corriente, donde  $V$ : es la velocidad

del cuerpo de agua (se considera constante) y  $A$ : es el área transversal mojada (perpendicular a la dirección del caudal). Se obtiene un valor de corriente de  $0.12 \left[ \frac{m}{s} \right]$ . En la figura 2.8 muestra la dirección de la corriente, donde esta sigue la pendiente del embalse, es decir aguas abajo. La dirección de la corriente se establece a  $0^\circ$  para coincidir con el eje  $x$  positivo (o paralelo al largo de la PFV).



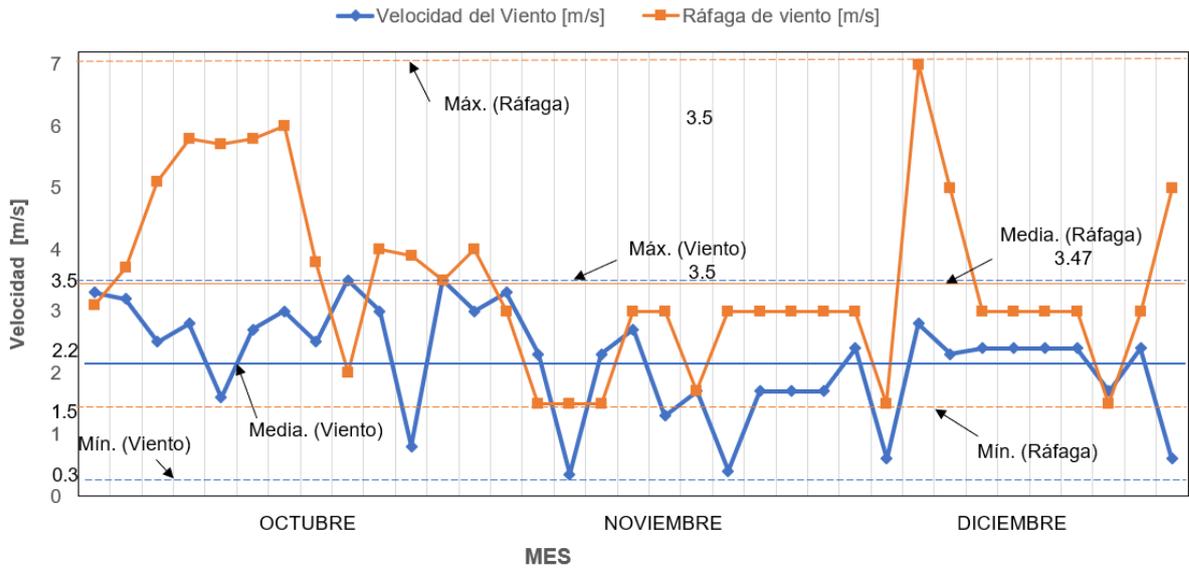
**Figura 2.8. Ubicación de la FPV y dirección de la corriente.** (a) Inicio y Final del embalse de Mazar; (b) Ubicación y orientación de la FPV y corriente.

La dirección de la corriente cambia una vez entra en contacto con la FPV, por ello se considera direcciones de  $45^\circ$  y  $-45^\circ$  medidos desde  $x+$  en sentido antihorario.

### 2.4.3. Carga de viento

Los datos de viento se obtuvieron de MeteoBlue [9] y Windfinder [10]. Se considera datos de: dirección, velocidad y ráfaga de viento. Usualmente la ráfaga de viento tiene mayor velocidad comparada con el viento. Se clasifican los datos con los siguientes criterios: dirección del viento, sentido del viento, coincidencia de la velocidad y ráfaga de viento.

En la figura 2.9 muestra una gráfica de la velocidad y ráfaga de viento en la zona 3 del embalse de Mazar, los datos históricos corresponden a un intervalo de tres meses desde octubre a diciembre del 2022. La velocidad máxima es de  $3.5 \text{ [m/s]}$ , mínima  $0.3 \text{ [m/s]}$  y media de  $2.2 \text{ [m/s]}$ . En cambio los valores de ráfaga de viento son mayores: máximo valor  $7 \text{ [m/s]}$ , mínimo  $1.5 \text{ [m/s]}$  y media  $3.47 \text{ [m/s]}$ .

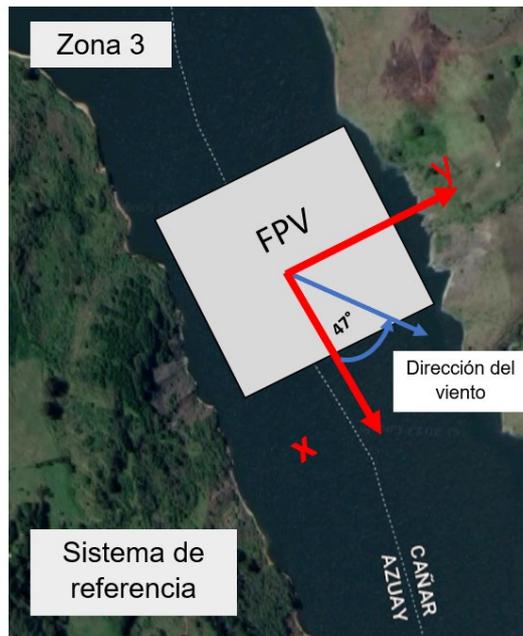


**Figura 2.9. Velocidad del viento y ráfaga (2022)**

El caso más crítico es cuando la dirección del viento y la ráfaga coinciden. Se utiliza la ecuación 2.4; suma de vectores, para obtener la carga total del viento  $\vec{v}_{cv}$ . Donde  $\vec{v}_v$ : carga debido al viento y  $\vec{v}_f$ : carga por ráfaga de viento.

$$\vec{v}_{cv} = \vec{v}_v + \vec{v}_f \quad (2.4)$$

En la figura 2.10 muestra la dirección de la velocidad total del viento. La dirección de viento total se define como  $47^\circ$ , con una velocidad de  $5.68 \left[ \frac{m}{s} \right]$ .

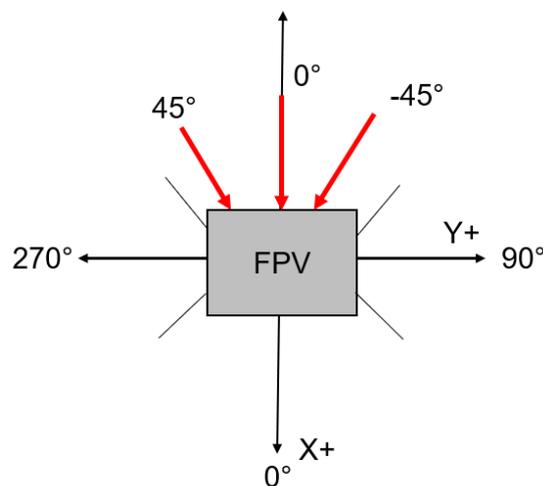


**Figura 2.10. Dirección del viento**

La dirección del viento genera un ángulo que siempre será medido desde el componente  $x+$  en sentido antihorario. El componente en  $x$  del viento coincide con la dirección de la corriente.

#### 2.4.4. Carga de oleaje

Los datos de altura significativa de ola y la frecuencia para el embalse de Mazar son tomados de referencias bibliográficas. Se toma dichos valores y se propone tres direcciones de oleaje. La figura 2.11 muestra las direcciones que puede tener el espectro de ola.



**Figura 2.11. Direcciones de oleaje**

En la tabla 2.2 muestra los datos de altura significativa y frecuencia que se usa para caracterizar el espectro de ola [7].

**Tabla 2.2. Datos de ola**

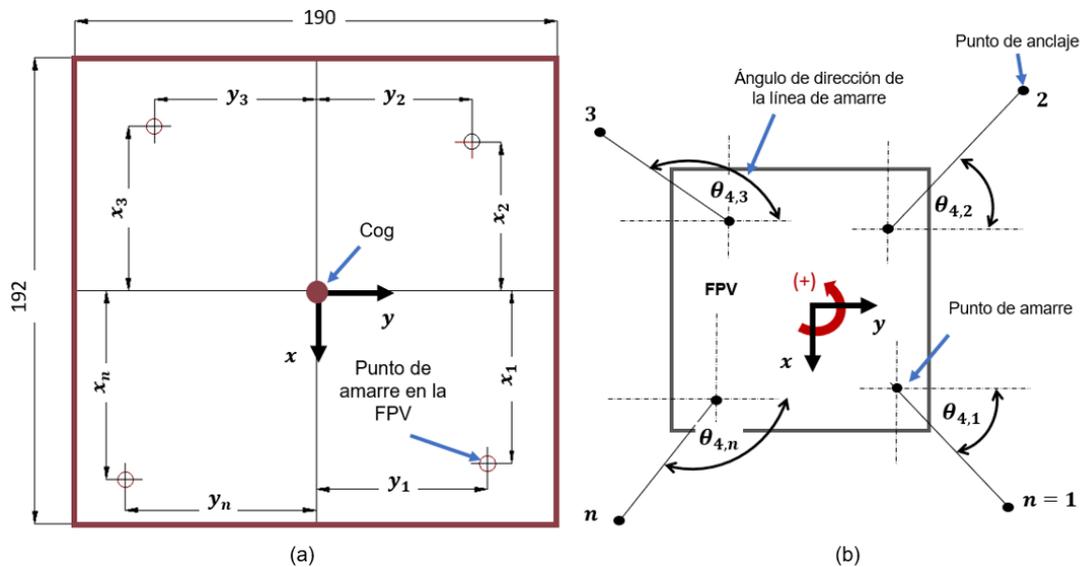
Hs [m]	$\omega_p$ [rad/s]
0.03	5.2
0.04	4.5
0.1	2.5

El espectro que se utiliza es Jonswap. Las variables para caracterizar son: gamma, altura significativa y frecuencia pico. El valor de gamma es 3.3 [6].

## 2.5. Sistema de amarre disperso

### 2.5.1. Ubicación y dirección de puntos de amarre

En la figura 2.12a se aprecia las ubicaciones de los puntos de amarre y anclaje en función del eje  $x$  y el eje  $y$ . Las variables  $x_n$  y  $y_n$  (donde  $n$  es el número de línea de amarre) dependen de la topografía del embalse, la accesibilidad y la instalación. La distribución de las líneas de amarre más adecuado es de manera simétrica, pero no siempre es posible instalar de manera simétrica las líneas de amarre. En la figura 2.12b se aprecia un patrón de amarre 4x1, también se aprecia los ángulos de dirección  $\theta_{4,n}$  de las líneas de amarre y los puntos de anclaje.

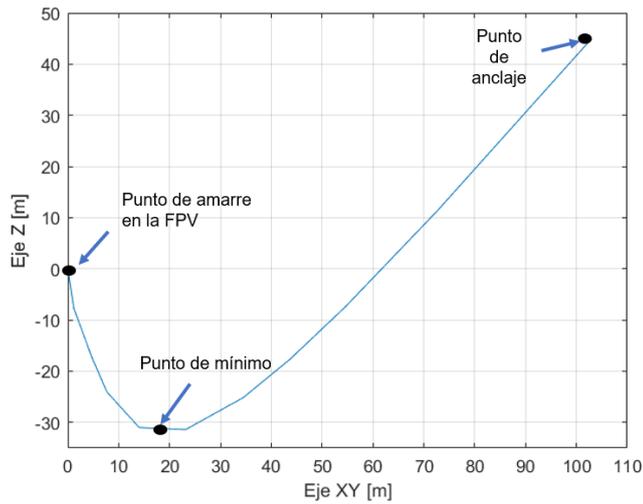


**Figura 2.12. Ubicación y distribución de puntos de amarre y anclaje.** (a) Ubicación de los puntos de amarre; (b) Patrón y distribución de las líneas de amarre

Mediante el análisis de resultados, se puede definir los rangos que puede variar el ángulo de dirección  $\theta_{4,n}$ , los puntos de amarre y anclaje, para conseguir la estabilidad de la FPV.

### 2.5.2. Líneas de amarre

En la figura 2.13 muestra la geometría de una catenaria en función de la longitud del cable, donde el eje  $z$  coincide con el eje  $z$  del sistema de referencia (figura 1.9a), mientras que el eje  $x$  y el eje  $y$  corresponde a un eje que gira alrededor de  $z$  hasta coincidir con el ángulo de dirección de la línea de amarre (ver figura 2.12b). Se identifica tres puntos: punto de amarre, punto de anclaje y punto mínimo. Los puntos de anclaje son ubicados en los bordes superiores del embalse, esto se establece por facilidad de instalación y mantenimiento.

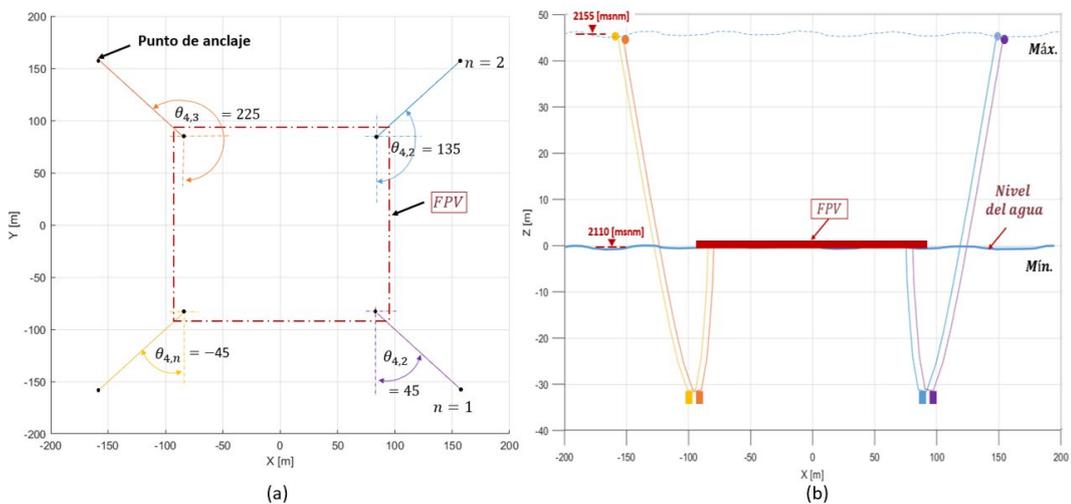


**Figura 2.13. Geometría de la línea de amarre**

La geometría de la línea de amarre permite establecer el punto mínimo, cuyo valor es  $z=-32$  [m], punto donde se ubica el cuerpo sumergido para restringir el movimiento de la FPV.

Se genera un código para encontrar los puntos de las líneas de amarre y la longitud de la línea (Anexo 1). El código tiene como variables de entradas el número de las líneas de amarre, coordenadas x, y del punto de anclaje en la FPV, el ángulo de dirección de la línea de amarre (ver figura 2.14).

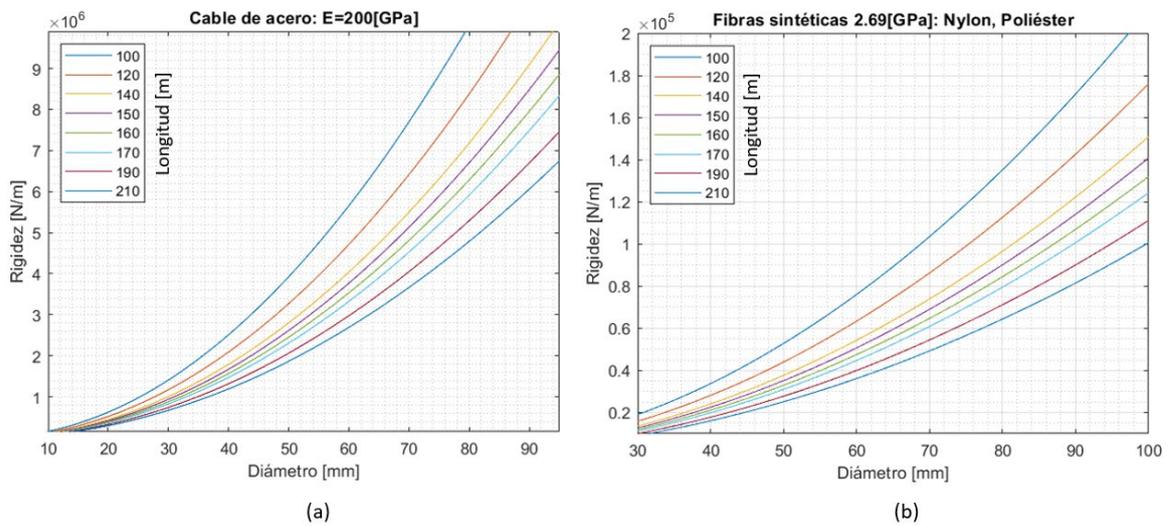
En la figura 2.14a se puede apreciar un sistema de amarre disperso simétrico. La coordenada en Z del punto de anclaje máximo puede ser 45 [m] que corresponde a la cota de 2155 [msnm], y mínimo no menos de la cota 2110 [msnm] es decir la coordenada  $z=0$  [m]. (ver figura 2.14b).



**Figura 2.14. Vistas de la FPV con líneas de amarre. (a) Vista superior; (b) Vista frontal**

Para la simulación en AQWA, el nivel de agua corresponde a la posición cero en el eje z, como el análisis de la FPV será en la cota mínima (2110 [msnm]), los puntos de anclaje serán ubicados en el eje z positivo, por encima de la FPV. Para definir líneas de amarre en ANSYS AWQA [8] los datos de entrada son: puntos (nodos) en coordenadas XYZ, rigidez y longitud de la línea de amarre.

En la figura 2.15 se muestra las gráficas rigidez vs diámetro dependiendo la longitud del cable. Los cables de acero tienen un módulo de elasticidad (E) 74 veces mayor que el nylon o poliéster (fibras sintéticas). Si se compara un cable de acero con diámetro 10 [mm] cuya rigidez es  $1.6E5$  (longitud 100 m) con un cable de fibra sintética (misma rigidez y longitud) el diámetro de la fibra sintética tiene que ser de 87 [mm].



**Figura 2.15. Rigidez vs diámetro del cable. (a) Cable de acero; (b) Fibras sintéticas**

Las gráficas que se presentan en la figura 5.15 permiten obtener rápidamente valores de rigidez en función del diámetro y longitud. Para los diferentes escenarios de simulación permiten seleccionar un cable adecuado.

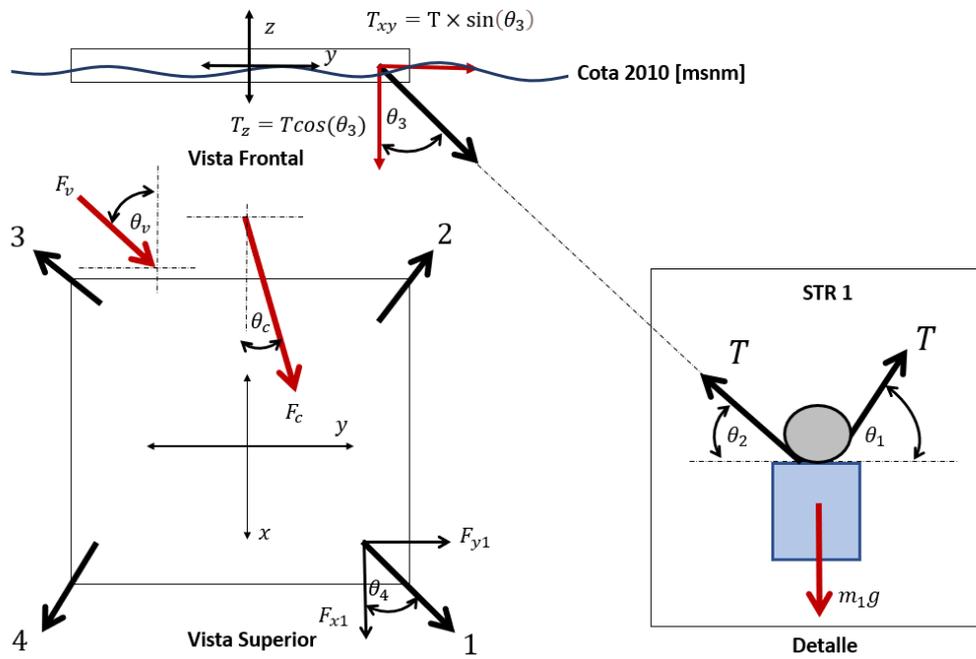
### 2.5.3. Cálculo de parámetros inerciales de los cuerpos sumergidos

Se realiza el diagrama de cuerpo libre de la FPV y de los cuerpos sumergidos. En primera instancia son 4 cuerpos sumergidos que permitirán restringir el movimiento. El desarrollo de las ecuaciones se obtiene con la sumatoria de fuerzas iguales a cero en las direcciones de los ejes X, Y, Z. Se utiliza proyecciones de las fuerzas para encontrar una relación entre las cargas de viento, corriente y peso de cuerpos sumergidos. Donde la carga del viento  $F_v$  y corriente  $F_c$  vienen expresadas coordenadas x y como muestra las siguientes ecuaciones:

$$F_{vy} = \frac{1}{2} \rho_v C_a A_v v_v^2 \cos(\theta_v) \quad F_{vx} = \frac{1}{2} \rho_v C_a A_v v_v^2 \sin(\theta_v) \quad (2.5, 2.6)$$

$$F_{cy} = \frac{1}{2} \rho_c C_c A_c v_c^2 \sin(\theta_c) \quad F_{cx} = \frac{1}{2} \rho_c C_c A_c v_c^2 \cos(\theta_c) \quad (2.7, 2.8)$$

En la figura 2.16 se presenta el diagrama de cuerpo libre de la FPV y de un cuerpo sumergido 1 (línea de amarre 1). Donde  $\theta_v$  es la dirección del viento;  $47^\circ$ ,  $\theta_c$  es la dirección de corriente es  $0^\circ$ , T es la tensión total del cable,  $\theta_2$  y  $\theta_3$  depende de la geometría de la línea de amarre y  $\theta_{n,4}$  es la dirección de la línea de amarre, n es el número de las líneas de amarre.



**Figura 2.16. Diagrama de cuerpo libre de la FPV y cuerpos sumergidos**

Se asume la siguiente expresión:

$$m_2 = 2m_1 \quad m_3 = 1.5m_4 \quad (2.9, 2.10)$$

Se realiza sumatoria de fuerzas en X, Y Z iguales a cero; se obtiene las siguientes expresiones:

$$A = \left( \frac{g \times \sin(\theta_3) \times \sin(\theta_4)}{(\sin(\theta_1) + \sin(\theta_2))} \right) \quad B = \left( \frac{g \times \sin(\theta_3) \times \cos(\theta_4)}{(\sin(\theta_1) + \sin(\theta_2))} \right) \quad (2.11, 2.12)$$

$$m_1 = \frac{F_{vx} + F_{cx}}{B} - 0.5m_4 \quad (2.13)$$

$$m_4 = \frac{3}{4} \left( \frac{F_{vx} + F_{cx}}{B} \right) + \frac{1}{4} \left( \frac{F_{vy} + F_{cy}}{A} \right) \quad (2.14)$$

Las dimensiones del cuerpo sumergido son 2.5x2.5x3 [m]. La tabla 2.3 muestra los datos sobre los parámetros inerciales de los cuerpos sumergidos. Cuyo valor más alto es 3.43 toneladas.

**Tabla 2.3. Parámetros inerciales de los cuerpos sumergidos**

Cuerpo sumergido	Masa [kg]	Momentos de inercia de masa		
		$I_{xx}$ [ $kgm^2$ ]	$I_{yy}$ [ $kgm^2$ ]	$I_{zz}$ [ $kgm^2$ ]
STR 1	1.71E3	0.89E3	0.89E3	1.78E3
STR 2	3.43E3	1.78E3	1.78E3	3.57E3
STR 3	3.34E3	1.74E3	1.74E3	3.48E3
STR 4	2.23E3	1.16E3	1.16E3	2.32E3

Los valores de masa y momento de inercia se modifican acorde a los resultados de las simulaciones, estos pueden aumentar hasta cierto valor, dependiendo los aspectos constructivos, de transporte y montaje de cuerpos sumergidos.

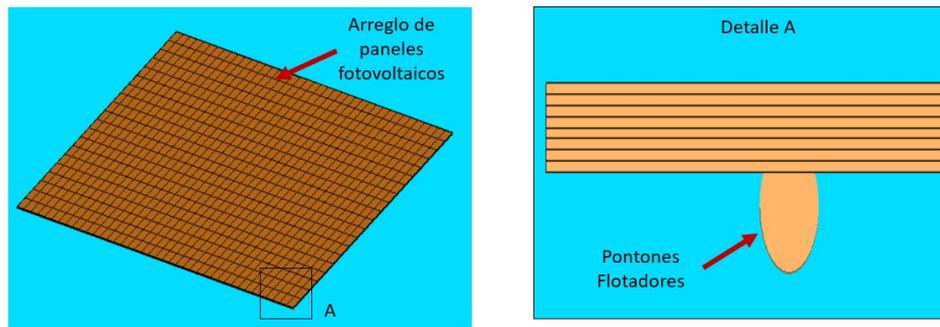
## 2.6. Modelo numérico

El modelo numérico de la FPV para simulación se resume a 5 cuerpos rígidos unidos mediante líneas de amarre y poleas. Los paneles fotovoltaicos forman un módulo fotovoltaico flotante estos se consideran como un cuerpo rígido flotante y los flotadores se consideran como pontones. Los cuerpos sumergidos son 4, cada cuerpo sumergido está conectado a una polea y ambos están suspendidos en la línea de amarre. El análisis de flotabilidad se realiza en el componente B del presente estudio, se determina el volumen sumergido y los coeficientes de arrastre de la FPV.

Para analizar la variación de cota se considera dos casos: cota superior: 2155 [msnm] (Componente B) y cota Inferior: 2110 [msnm] (Componente A). La simplificación del comportamiento dinámico tanto para la cota superior e inferior considera los siguientes aspectos: dimensiones y parámetros inerciales de la FPV-cuerpos sumergidos, longitud y rigidez de las líneas de amarre.

### 2.6.1. Estructura flotante

Una planta fotovoltaica flotante abarca varios componentes como: inversores, cables de conexión, pasarelas, articulaciones y cajas de conexión. La simplificación para la estructura flotante se considera un cuerpo rígido con forma de paralelepípedo rectangular.

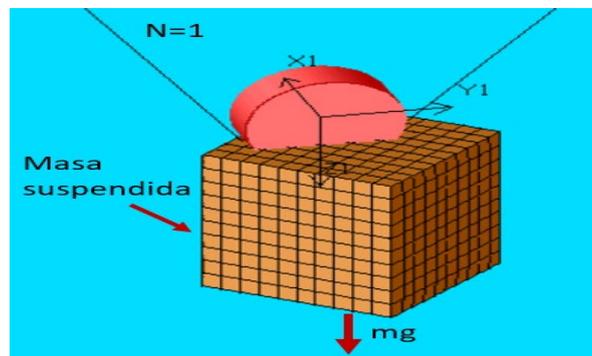


**Figura 2.17. Modelo numérico de estructura flotante**

Previo a la simulación se establece el volumen sumergido de la FPV, el diámetro apropiado de los pontones, el espesor, densidad del material, así como los coeficientes de arrastre (revise el componente B del presente proyecto).

### 2.6.2. Cuerpos sumergidos

Los cuerpos sumergidos o pesos muertos se consideran como un cuerpo rígido representado como un paralelepípedo cuadrangular, cuyos parámetros inerciales se calculan en numeral 2.5.3.

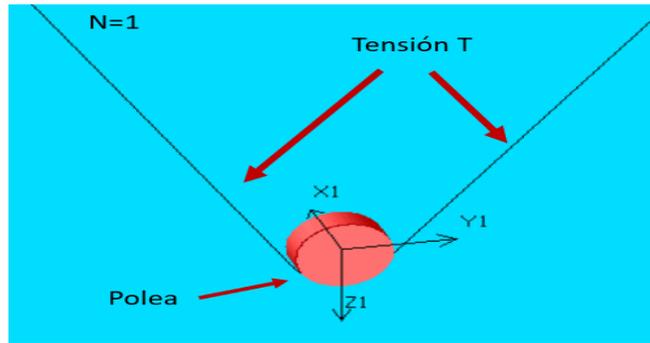


**Figura 2.18. Modelo numérico de los cuerpos suspendidos**

La ubicación de la polea se encuentra en el cuerpo sumergido con un ángulo de dirección que coincide con el ángulo de dirección de la línea de amarre.

### 2.6.3. Poleas

Las poleas serán ubicadas en los cuerpos sumergidos. En primera instancia se asume una polea por cada línea de amarre. La polea no tiene masa y su radio no influye en los resultados de la simulación.

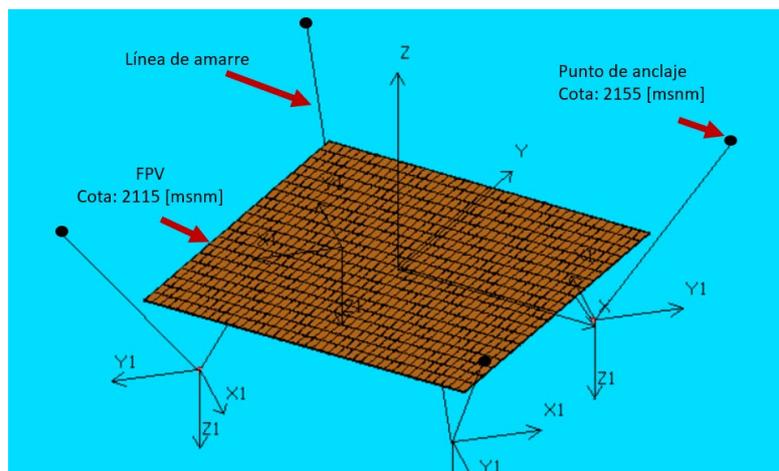


**Figura 2.19. Modelo número simplificado para poleas**

El número de líneas de amarre dependerá de los resultados de las simulaciones, por ende, el número de poleas.

### 2.6.4. Líneas de amarre y puntos de anclaje

Las líneas de amarre se consideran como cables elásticos lineales, no tienen masa y se representan geoméricamente como líneas rectas. Los valores de entrada son la rigidez, longitud y puntos de conexión.



**Figura 2.20. Modelo simplificado de la FPV y sistema de amarre en AQWA**

Un extremo de la línea de amarre se conecta con la FPV y el otro extremo se conecta al punto de anclaje fijo (en este caso orillas del embalse). La polea descansa sobre un punto mínimo de la línea de amarre.

## 2.7. Escenarios de estudio

### 2.7.1. Variación del espectro de oleaje

En la tabla 2.4 se presenta los escenarios de estudio. Se considera tres direcciones, tres espectros con altura significativa y frecuencia pico distintos.

**Tabla 2.4. Escenarios de estudio relacionados con el espectro de ola**

Dirección del espectro [°]	0	45	-45
	Caracterización del espectro		
Hs: 0.03 $\omega_s$ : 5.2	SA1-1	SA1-2	SA1-3
Hs: 0.06 $\omega_s$ : 3.8	SA2-1	SA2-2	SA2-3
Hs: 0.12 $\omega_s$ : 2.5	SA3-1	SA3-2	SA3-3

### 2.7.2. Variación de parámetros inerciales de los cuerpos sumergidos

En la tabla 2.5 muestra los escenarios de estudio variando la masa de los cuerpos sumergidos (CS). La masa varía entre 6 a 15 toneladas, el momento de inercia varía acorde a la masa del cuerpo. La dirección del espectro de oleaje es 0°.

**Tabla 2.5. Escenarios de estudio variando los parámetros inerciales de CS**

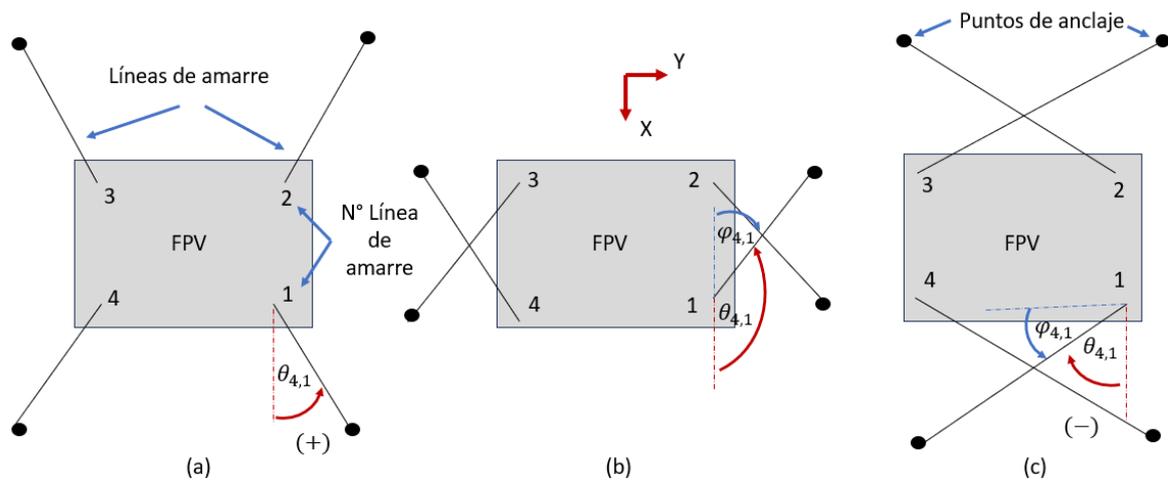
	Masa del cuerpo sumergido $\times 10^3 [kg]$									
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Escenario	S0-1	S0-1	S0-2	S0-3	S0-4	S0-5	S0-6	S0-7	S0-8	S0-9
	Masa del cuerpo sumergido $\times 10^3 [kg]$									
	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	
Escenario	S1-1	S1-2	S1-3	S1-4	S1-5	S1-6	S1-7	S1-8	S1-9	

### 2.7.3. Variación del patrón de amarre

Los patrones de amarre presentados a continuación guardan simetría respecto al eje x y al eje y. Se consideran patrones 4x1, 4x1 cruzado respecto a X (4x1-CX) y 4x1 cruzado respecto a Y (4X1-CY). Dependiendo el ángulo que tome la primera línea de amarre se clasifica un patrón de amarre de tipo 4x1, 4X1-CX o 4X1-CY.

Un patrón de amarre 4x1; la dirección de la primera línea de amarre varía entre  $0 \leq \theta_{4,1} \leq 90$ . Un patrón 4x1-CX;  $90 < \theta_{4,1} < 180$ . Un patrón 4x1-CY;  $-90 < \theta_{4,1} < 0$ .

En la figura 2.21 muestra los patrones que se utilizan en las simulaciones.



**Figura 2.21. Patrones de amarre que se usarán para simulación. (a) 4x1; (b) 4x1-CX; (c) 4x1-CY.**

La variable  $\varphi_{4,1}$  es el suplemento en el caso de un patrón 4X1-CX, mientras que para un patrón 4x1-CY es el complemento. La longitud de las líneas de amarre es mayor para un patrón 4X1-CY y menor para un patrón 4x1-CX.

Los escenarios de estudio de acuerdo con el patrón de amarre se muestran en la tabla 2.6. La dirección corresponde a la primera línea de amarre.

**Tabla 2.6. Escenarios de estudio variando el patrón de amarre**

Patrón de amarre	Ángulo de dirección	Dirección de la línea de amarre [°]						
		Línea de amarre 1.						
4x1	$\theta_{4,1}$	0	15	30	45	60	75	90
		P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6	P-7
4x1 CX	$\varphi_{4,1}$	15	17.5	20	22.5	25	27.5	30
	$\theta_{4,1}$	165	162.5	160	157.5	155	152.5	150
			PCX-2	PX-3	PX-4	PX-5	PX-6	
4X1 CY	$\varphi_{4,1}$	15	20	35	30	35	40	45
	$\theta_{4,1}$	-75	-70	-65	-60	-55	-50	-45
		PY-1	PY-2	PY-3	PY-4	PY-5	PY-6	PY-7

### 3. Resultados

En la figura 3.1 se indica una muestra representativa de la respuesta dinámica de la posición y rotación del centro de gravedad COG de la FPV en función del tiempo.

En la figura 3.1a, la variación de la posición en x se encuentra entre 3.51 y -2.89 [m], siendo estos valores máximo y mínimo respectivamente. El cambio de la posición respecto a 0 [m] es mayor para una dirección de oleaje de 0°. La posición COG es similar para las direcciones -45° y 45°, esto se esperaba debido a que las direcciones son simétricas respecto al eje x.

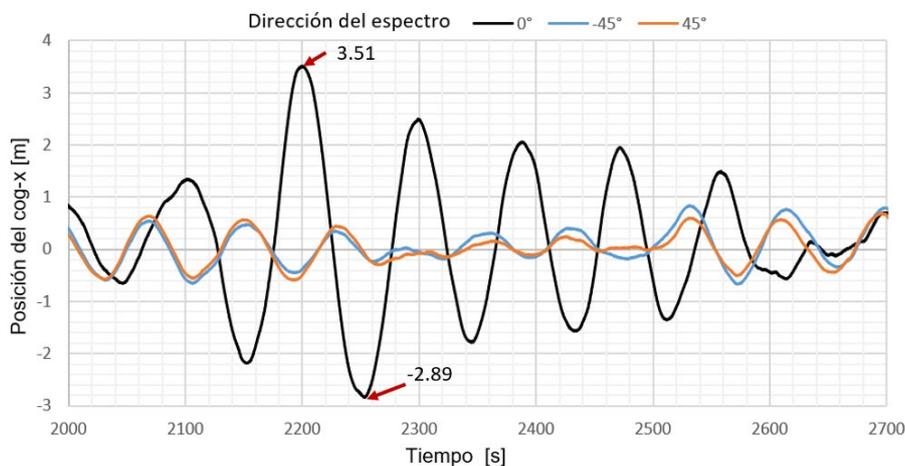
En la figura 3.1b se aprecia la posición en Y vs tiempo. La posición máxima y mínima correspondiente son 0.54 y -0.53 [m]. La posición del centro de gravedad es mayor en el eje x comparado con el eje y.

Si la dirección del espectro de oleaje cambia a 45° o -45°, la posición en el eje Y del COG es mayor comparada con una dirección de espectro a 0°.

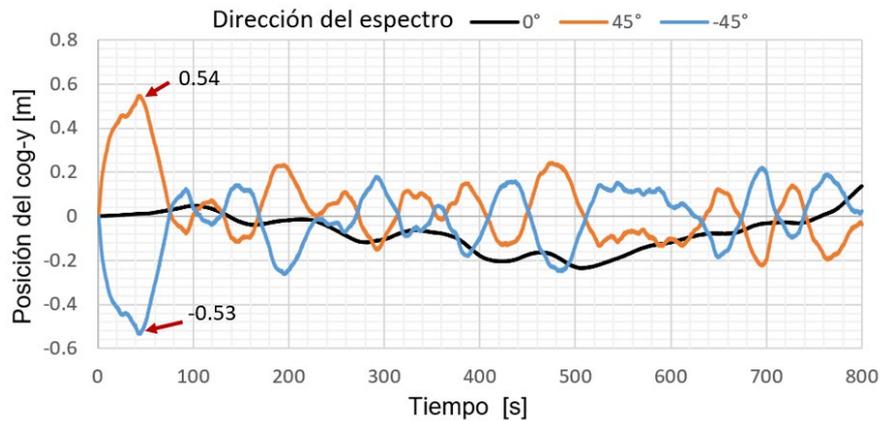
La carga de viento en el eje x, corriente y oleaje coinciden en la dirección 0°, por tanto, el movimiento oscilatorio de la FPV en el eje x es mayor comparada con los ejes Y y Z. La variación de la posición en el eje x es mayor independientemente de la dirección del espectro.

En la figura 3.1c muestra la posición angular de la FPV respecto al eje Z. La posición angular máxima y mínima son 0.2 y -0.21 [°].

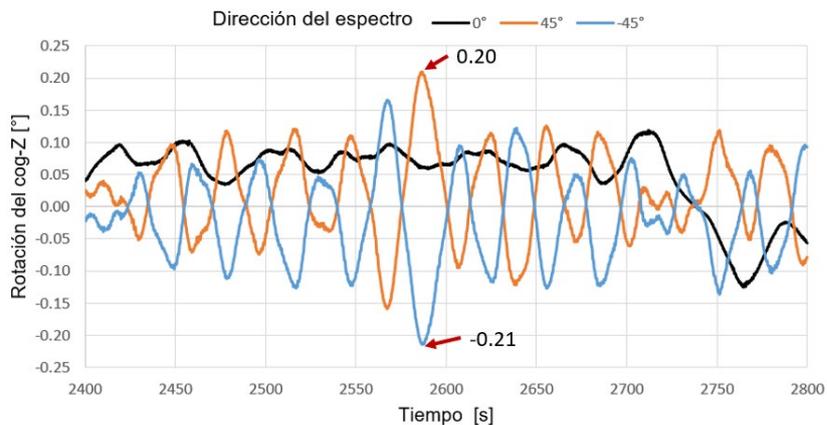
La posición angular no es considerable respecto a la restricción definida en numeral 2.3.1, donde se indica que la FPV no debe girar mas de 5° desde su punto de instalación.



(a)



(b)



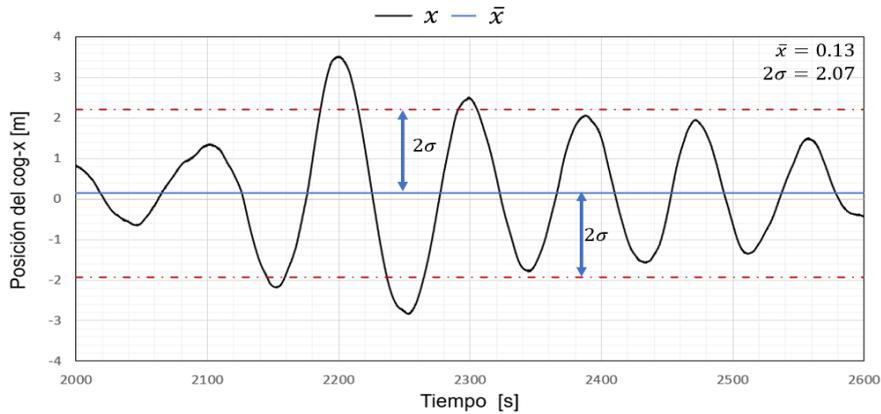
(c)

**Figura 3.1. Posición y rotación del COG.** (a) Posición eje x; (b) Posición eje y; (c) Rotación alrededor de z

La posición media del COG muestra el punto donde la FPV se estabiliza, este valor debe ser cercano a 0. La respuesta dinámica importante es el valor de 2 desviaciones estándar ( $2\sigma$ ) que representa el desplazamiento oscilante que va a tener la FPV respecto a la posición media del COG.

Las simulaciones tienen una duración de 1 a 1.5 horas. Los datos fueron procesados con un análisis estadístico con confiabilidad del 95 [%]. El análisis de estabilidad se define con la media de la posición del COG y dos desviaciones estándar, cuyo valor absoluto no debe superar los 5 [m].

Se aprecia en la figura 3.2 una muestra significativa de la posición del COG en X vs el tiempo, la media tiene un valor de 0.13 [m] y 2 desviaciones estándar de 2.07 [m].



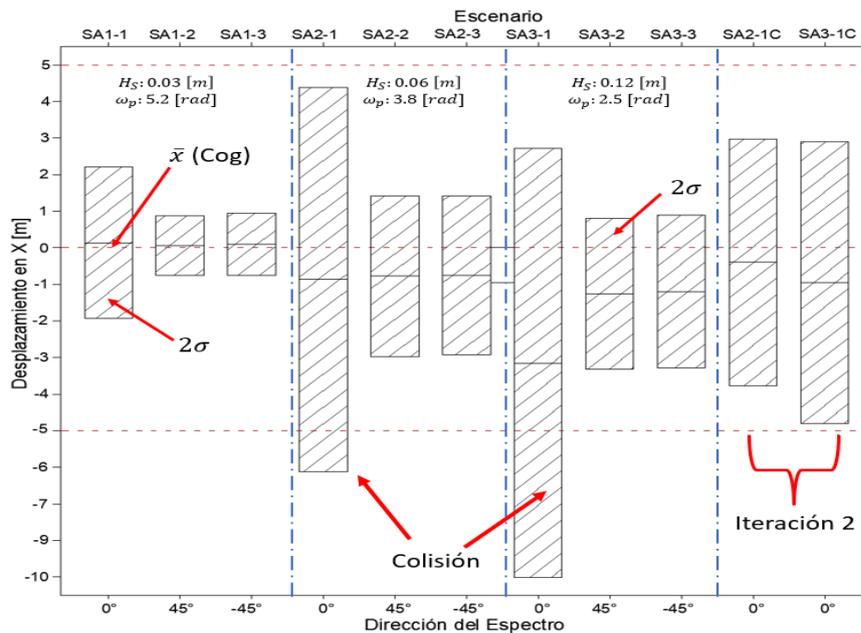
**Figura 3.2. Respuesta dinámica de la posición COG en X vs tiempo**

El valor  $2\sigma$  es menor que 5 [m], el sistema de amarre restringe adecuadamente los desplazamientos de la FPV, por lo que se garantiza la estabilidad de la FPV.

### 3.1. Respuestas dinámicas variando el espectro de ola

Se considera un sistema de amarre simétrico 4x1, compuesto por 4 líneas de amarre, cada una con una polea y un cuerpo sumergido para los siguientes escenarios.

En la figura 3.3 muestra los desplazamientos en el eje x variando el espectro de ola y dirección. Los desplazamientos en eje x de los escenarios SA1, SA2-2, SA2-3, SA3-2 y SA3-3 son menores que 5 [m]; la estabilidad se cumple. En cambio, los escenarios SA2-1 y SA3-1, los desplazamientos son mayores, por lo que la estabilidad no se cumple por ello se vuelve a iterar.



**Figura 3.3. Desplazamiento en x vs variación del espectro**

Para encontrar la estabilidad de la FPV se recurre a variar el número-rigidez de las líneas y parámetros inerciales de los cuerpos sumergido, dando como resultado los escenarios SA2-1C y SA3-1C. Los resultados de los desplazamientos se encuentran dentro de los valores permitidos.

Si aumenta la altura significativa y disminuye la frecuencia pico del espectro de ola, por tanto, el desplazamiento aumenta considerablemente.

En la tabla 3.1 muestra los datos sobre el sistema de amarre en los distintos escenarios para encontrar la estabilidad de la FPV.

**Tabla 3.1. Datos de las líneas de amarre para diferentes escenarios**

Escenario	Patrón de amarre	Masa del cuerpo sumergido [Ton]	Tensión total promedio [N]	Diámetro [mm]	Tensión de rotura [N]
SA1-1	4x1	4.13	5.50E4	24	11E4
SA1-2	4x1	4.13	5.48E4	24	11E4
SA1-3	4x1	4.13	5.49E4	24	11E4
SA2-1C	4x2	7.5	10.0E4	28	15E4
SA2-2	4x1	4.13	5.51E4	24	11E4
SA2-3	4x1	4.13	5.51E4	24	11E4
SA3-1C	4x2	12.5	16.8E4	36	24E4
SA3-2	4x1	4.13	5.53E4	24	11E4
SA3-3	4x1	4.13	5.52E4	24	11E4

Para determinar la tensión total promedio se consideró un factor de seguridad de 2 [6]. Las líneas de amarre son de nylon o poliéster [11]. Se puede usar cables de acero, considerando la tensión de ruptura, el diámetro requerido será menor.

El escenario SA3-1C es el más crítico, debido a los valores de desplazamiento y tensión total promedio.

### 3.2. Respuestas dinámicas variando parámetros inerciales

Para el escenario SA3-1C, se varía los parámetros inerciales de los cuerpos sumergidos, desde 6 a 15 [Ton].

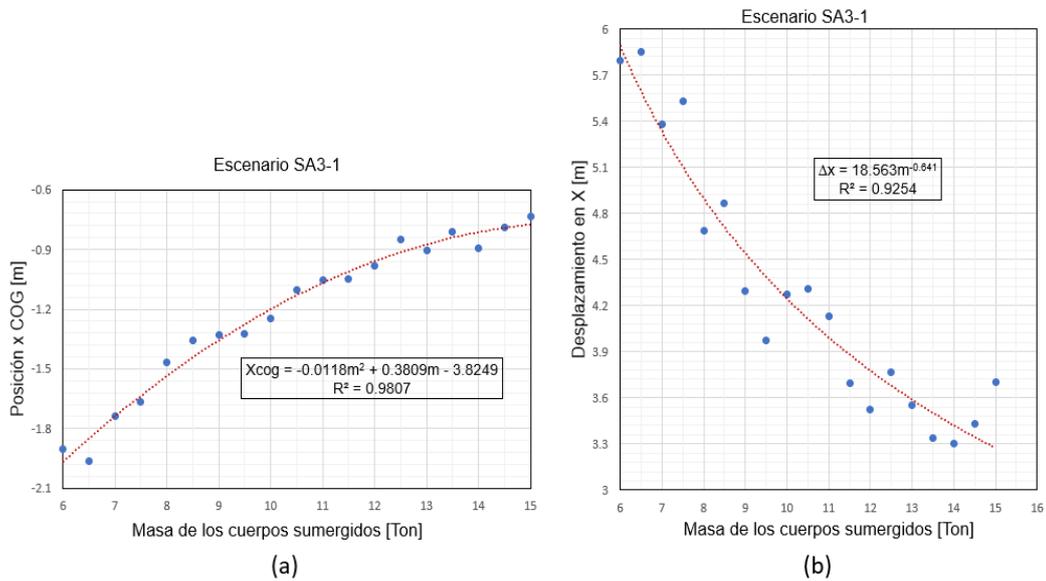
En la figura 3.4a muestra la posición del COG en el eje x vs la masa de los cuerpos sumergidos. La posición tiende a cero cuando los valores de masa aumentan.

La posición del COG depende de los parámetros inerciales de los cuerpos sumergidos, con los datos obtenidos se aproxima una función polinómica de grado 2, creciente y con un

coeficiente de determinación es 98.07 [%], donde la posición depende del valor de masa del cuerpo sumergido.

En la figura 3.4b muestra el desplazamiento de la FPV vs la masa de los cuerpos sumergidos. El desplazamiento oscilante de la FPV se reduce conforme la masa de los cuerpos sumergidos aumenta.

Con los datos obtenidos se aproxima a una función potencial decreciente, con un coeficiente de determinación de 92.54 [%], donde el desplazamiento depende de la masa del cuerpo sumergido.

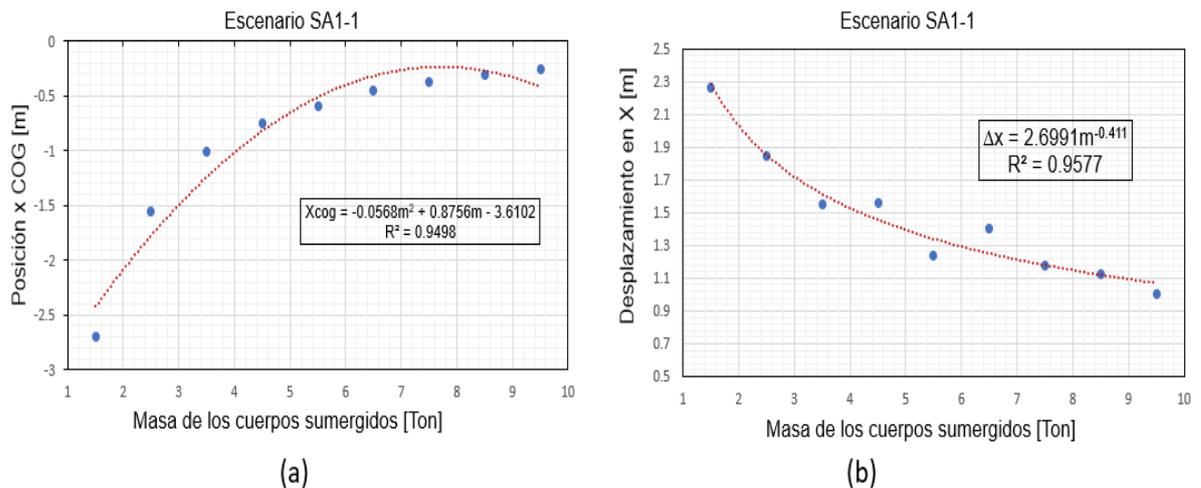


**Figura 3.4. Posición y desplazamiento en función de la masa de CS: SA3-1C.**

(a) Posición del COG vs Masa de CS; (b) Desplazamiento en X de la FPV vs Masa de CS. Se considera un segundo escenario SA1-1, donde se varía los parámetros inerciales de los cuerpos sumergidos.

En la figura 3.5a muestra la posición de COG en el eje x que tiende a 0 con el aumento de la masa de los cuerpos sumergidos. Con los resultados obtenidos se aproxima a una función polinomial creciente de grado 2 y el coeficiente de determinación es 94.98 [%].

En la figura 3.5b muestra como el desplazamiento de la FPV se reduce conforme la masa aumenta. Con los resultados se aproxima a una función potencial decreciente con un coeficiente de determinación de 95.77 [%].



**Figura 3.5. Posición y desplazamiento en función de la masa de CS: SA1-1**

(a) Posición del COG vs Masa de CS; (b) Desplazamiento en X de la FPV vs Masa de CS

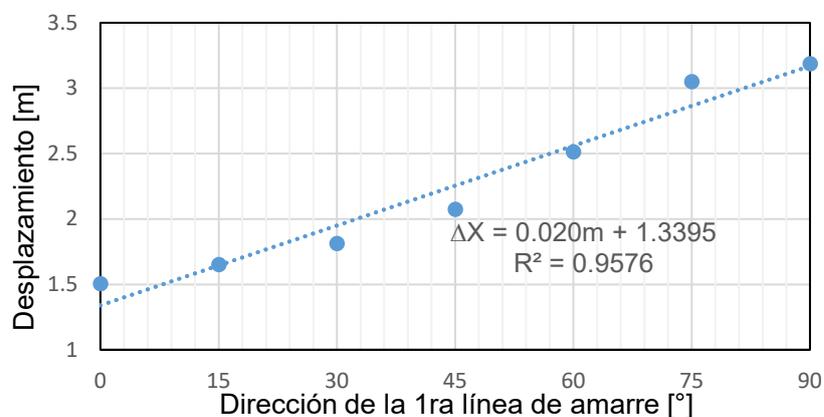
La estabilidad de la FPV depende de manera significativa de los parámetros inerciales de los cuerpos sumergidos cuando se utiliza un tipo de patrón 4x1 simétrico respecto a los ejes x, y.

### 3.3. Respuestas dinámicas variando el patrón de amarre

Para el escenario SA1-1 se varía la dirección de las líneas de amarre.

#### A. 4X1

En la figura 3.6 muestra el desplazamiento vs la dirección de la primera línea de amarre entre  $0^\circ \leq \theta_{4,1} \leq 90^\circ$ . Los resultados muestran un aumento del desplazamiento cuando se aumenta el ángulo de la línea de amarre. Para una dirección de  $0^\circ$ ; el desplazamiento es 1.5 [m], para  $90^\circ$ ; el desplazamiento es 3.2 [m]. Con resultados obtenidos se aproxima una recta creciente con un coeficiente de determinación de 95.76 %.



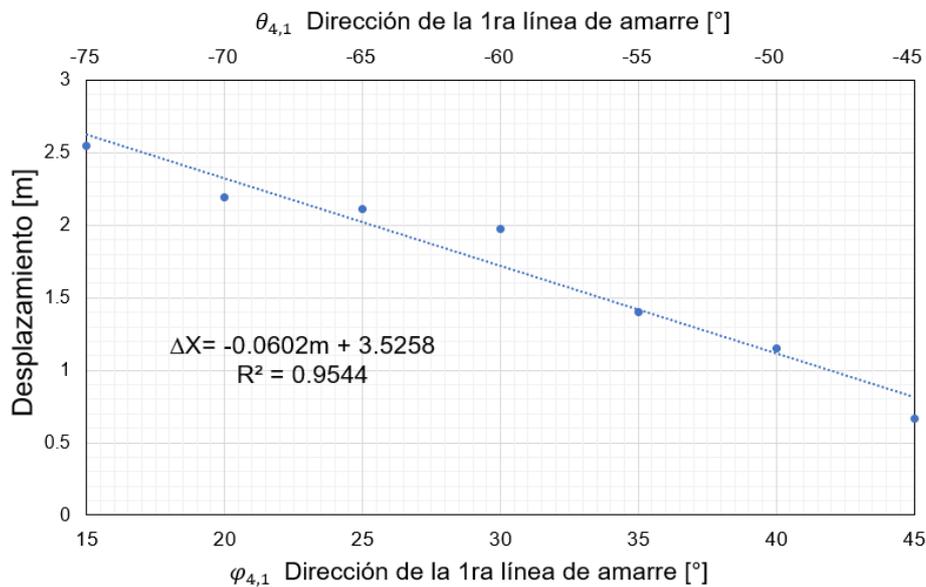
**Figura 3.6. Desplazamiento en X vs Dirección de la 1ra línea de amarre: 4X1**

Por tanto, para un patrón de amarre 4x1 simétrico, el ángulo de la primera línea de amarre puede variar  $15^\circ \leq \theta_{4,1} \leq 60^\circ$ .

### B. 4X1-CY

En la figura 3.7 muestra el desplazamiento de la FPV variando la dirección de la primera línea de amarre es  $-75^\circ < \theta_{4,1} < -45^\circ$  ( $15^\circ \leq \varphi_{4,1} \leq 45^\circ$ ).

Para una dirección de  $\varphi_{4,1}$  de  $15^\circ$  el desplazamiento es 2.5 [m], para  $45^\circ$ ; el desplazamiento es 0.7 [m]. Con los datos obtenidos se aproxima a una recta decreciente, con coeficiente de terminación de 95.44[%].



**Figura 3.7. Desplazamiento en X vs Dirección de la 1ra línea de amarre: 4X1-CY**

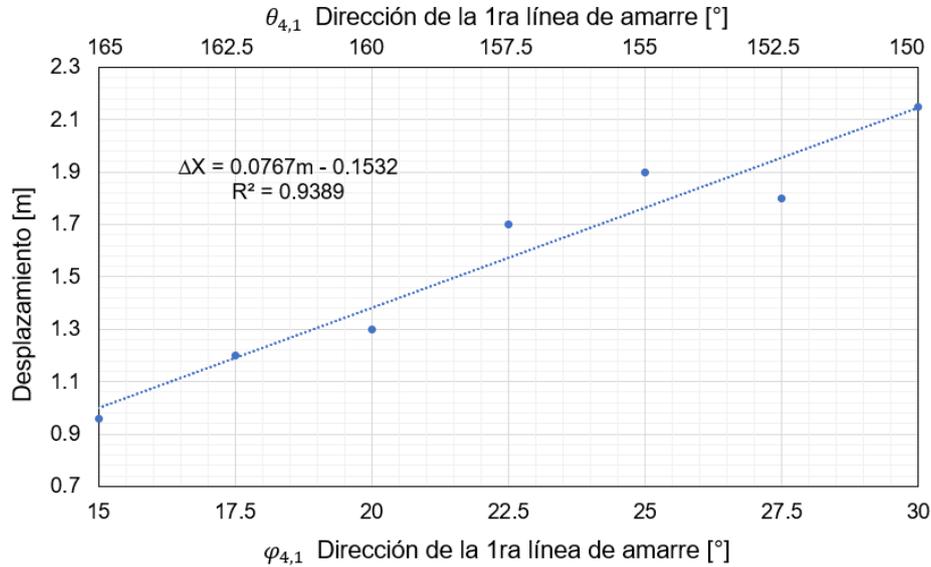
Si se aumenta el ángulo  $\varphi_{4,1}$ , la longitud de la catenaria aumenta significativamente, lo que no es recomendable.

Por tanto, en un patrón de amarre 4x1-CY simétrico, el ángulo  $\varphi_{4,1}$  de la primera línea de amarre, puede variar  $30^\circ \leq \varphi_{4,1} \leq 45^\circ$  ( $-50^\circ \leq \theta_{4,1} \leq -45^\circ$ ).

### C. 4X1-CX

En la figura 3.8 muestra el desplazamiento vs dirección de la primera línea de amarre de un patrón 4x1-CX. La dirección varía  $150 < \theta_{4,1} < 165$ , también se considera la variable  $\varphi_{4,1}$ .

Conforme aumenta el valor del ángulo  $\varphi_{4,1}$  el desplazamiento de la FPV aumenta, para una dirección de  $15^\circ$ , el desplazamiento es 0.96 [m], y para  $30^\circ$ ; el desplazamiento es 2.15 [m]. La dirección  $\varphi_{4,1}$  no puede aumentar debido a la topografía del embalse.



**Figura 3.8. Desplazamiento en X vs Dirección de la 1ra línea de amarre: 4X1-CX**

Por tanto, para el patrón de amarre 4x1-CY; la dirección  $\varphi_{4,1}$  de la primera línea de amarre puede variar  $15^\circ < \varphi_{4,1} < 30^\circ$  o  $150^\circ < \theta_{4,1} < 160^\circ$ .

La dirección de las líneas de amarre con un sistema de amarre disperso pasivo influye en el movimiento de la FPV. Los desplazamientos oscilantes de la misma tienen dependencia de la dirección de las líneas de amarre, no de manera significativa como lo que se muestra variando los parámetros inerciales de los cuerpos sumergidos.

## 4. Conclusiones

En este proyecto se propone un modelo conceptual de la FPV con un sistema de amarre pasivo para el embalse de Mazar, mismo que se adapta a la variación del nivel de agua (cota) y garantiza la estabilidad bajo cargas medioambientales.

Se analiza los datos topográficos para definir el perfil transversal de la zona 3, considerando el ancho del embalse dependiendo el nivel del agua. Lo que permite el dimensionamiento de la FPV y las líneas de amarre.

Se analiza los datos meteorológicos para caracterizar las cargas medioambientales presentes en la zona 3 del embalse Mazar: viento, corriente y oleaje. La dirección de la corriente y oleaje son paralelas al largo de la FPV ( $0^\circ$ ).

Se propone un modelo geométrico de un sistema de amarre innovador para plantas fotovoltaicas flotantes con una variación de cota 45[m]. El sistema de amarre consta de cables de acero, poleas y cuerpos sumergidos, estos permiten la adaptabilidad y garantizan la estabilidad al cambio del nivel del agua y cargas medioambientales.

Se realiza un modelo numérico que permite el análisis dinámico de la FPV considerando las cargas medioambientales para la cota inferior del embalse de Mazar. Se considera 9 escenarios de estudio variando los parámetros del oleaje. El sistema de amarre propuesto restringe el movimiento de la FPV y garantiza su estabilidad para la cota inferior.

Las respuestas dinámicas muestran que el desplazamiento es mayor en dirección de la corriente. Existe un aumento significativo del desplazamiento de la FPV a medida que se aumenta la altura de la ola y se reduce la frecuencia pico. La estabilidad de la FPV depende considerablemente de los parámetros inerciales de los cuerpos sumergidos, también depende, pero en menor medida de la dirección de las líneas de amarre.

## **5. Recomendaciones**

Se recomienda la validación del modelo conceptual propuesto en el presente proyecto, mediante un modelo experimental con una escala 1:100, considerando la variación de los parámetros de oleaje.

El complemento a este proyecto debe enfocarse en el diseño a fatiga de elementos como; conectores, poleas, cuerpos sumergidos y anclaje.

El sistema de amarre propuesto es suficiente para restringir los movimientos de la FPV, pero no se considera cargas de impacto e inundaciones o criterios de diseño en función de la ruptura de una línea de amarre.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ingnova, «Ingnova Proyectos,» 2018. [En línea]. Available: <https://proyectos.ingnova.es/servicios/plantas-fotovoltaicas-flotantes/>.
- [2] Suárez, «Diseño de pre factibilidad de generación fotovoltaica flotante en el embalse de Mazar-201[MW],» 2019.
- [3] Isifloating, «Isifloating,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.isifloating.com/project/acciona-sierra-brava/>.
- [4] S. Moghadam, «Destrucción del 70 % de la central eléctrica de la empresa de YAMAKURA,» *¿Qué dicen los informes preliminares sobre el accidente de la central eléctrica fotovoltaica?*, 202.
- [5] K.-T. L. Y. K. T. y. W. Y. Ma, «Mooring System Engineering for Offshore Structures. Elseive,» 2019.
- [6] L. Yong, M. Kai-Tung, Chi-Tat, K. Thomas y W. Yongyan, *Mooring System Engineering for Offshore Structure*, Elsevier Science & Technology, 2019.
- [7] D. Allauca y E. Núñez, *Análisis dinámico y diseño estructural de una plataforma de acceso para un FPV sobre el embalse de Mazar*, Quito, 2022.
- [8] ANSYS, *AQWA Theory Manual*, Canonsburg: Southpointe, 2008.
- [9] Meteoblue, «<https://www.meteoblue.com/es>,» [En línea]. [Último acceso: Diciembre 2022].
- [10] Windfinder, «Windfinder,» [En línea]. [Último acceso: Diciembre 2022].
- [11] Probisa, «Probisa,» [En línea]. Available: [https://www.probrisa.com/wp-content/uploads/2017/07/Cabo\\_nylon.pdf](https://www.probrisa.com/wp-content/uploads/2017/07/Cabo_nylon.pdf). [Último acceso: 15 Junio 2023].
- [12] L. Carvajal, *Metodología de la Investigación Científica. Curso general y aplicado*, 28 ed., Santiago de Cali: U.S.C., 2006, p. 139.
- [13] Open Oregon, «Open Oregon,» 2015. [En línea]. Available: <https://openoregon.pressbooks.pub/earthscience/chapter/13-1-waves/#footnote-845-1>.
- [14] National Weather Service, «Estimating Wind Speed and Sea State,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.weather.gov/pqr/beaufort>.
- [15] D. & Z. M. & D. A. & S. S. & Y. N. Sugianto, «Wave height forecasting using measurement wind speed distribution equation in Java Sea,» *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2017.
- [16] C. G. Aubeny, *The Performance of Drag Embedment Anchors (DEA)*, Texas: Texas A & M University, 2011.

- [17] C. G. Barrera, On the importance of mooring system parametrisation for accurate floating structure designs, *Marine Structures*, 2020.
- [18] C. G. R. R. Z. E. M. K. C. C. D. A. Y. P. C. C. a. B. R. Aubeny, «The Performance of Drag Embedment Anchors (DEA),» *Texas A & M University*, 2011.
- [19] C. G. R. R. Á. A. J. A. y. L. I. J. Barrera, «On the importance of mooring system parametrisation for accurate floating structure designs. *Marine Structures*,» n° 102765, 2020.
- [20] S. S. y. E. P. Bidgoli S., «Sensitive Analysis of Different Types of Deep Water Risers to Conventional Mooring Systems,» *Semantic Scholar*.
- [21] A. Charles, «Geomecánica de anclas marinas,» *Boca Raton*, n° ISBN 9781351237352, 2017.
- [22] M. d. E. y. R. N. N. R. MERNNR, «Plan Maestro de Electricidad: 2016-2025,» 2016.
- [23] S. A. D. N. y. J. S. Moghadam S., «Destrucción del 70 % de la central eléctrica de la empresa de Yamakura, ¿qué dicen los informes preliminares?,» 2020.
- [24] O. F. V. D. C. M. M. G. B. V. V. V. S. D. Polo V., «Estudio de prefactibilidad para la generación fotovoltaica en el embalse de Mazar.,» 2017.
- [25] A. Santos, «Sistemas de anclaje y posicionamiento de buques y plataformas offshore,» *Universidad de La Laguna*, 2015.
- [26] G. M. B. S. F. M. L. & B. F. Tina, «analysis of water environment on the performances of floating photovoltaic plants,» *Renewable Energy*, n° 281–295, p. 175, 2021.
- [27] I. N. V. G. Z. y. P. V. Touzon, «Frequency domain modelling of a coupled system of floating structure and mooring Lines: An application to a wave energy converter,» *Ocean Engineering*, n° 220, 2021.
- [28] W. H. k. B. K. I. ,. L. Y. Tongphong, «n estudio sobre el diseño y rendimiento del convertidor de energía undimotriz ModuleRaft,» *SciencDirect*, vol. 163, pp. 649-673, 2021.
- [29] M. Willuhm, «El fin de semana decía: No tires la precaución al viento,» 2020.
- [30] S. W. S. y. G. S. C. Xu, «Review of mooring design for floating wave energy converters,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n° 595-621, 2019.
- [31] B. D. Diaz, M. Rasulo, C. P. Aubeny, C. M. Fontana, S. R. Arwade, D. J. DeGroot y M. Landon, «Multiline anchors for floating offshore wind towers,» *OCEANS/MTS/IEEE*, 2016.
- [32] M. R. S. Gourvenec, «Ingeniería Geotécnica Offshore,» *CRC Presione*, n° ISBN 978-113807472-9, 2017.

- [33] C. R. M. R. M. O'Loughlin, «Centrifuge Tests on Dynamically Installed Anchors,» *Offshore Geotechnics; Petroleum Technology*, vol. 7, p. 391–399, 2009.
- [34] C. Medeiros, «Low Cost Anchor System for Flexible Risers in Deep Waters,» 2002.
- [35] k. H. B. V. P. G. R. H. V. H. M. I. G. G. D. Collins, «A Physical Mooring Comparison for a Floating,» *Drake Circus*, pp. 8-9, 30 Agosto 2017.
- [36] R. Kanotra, «TheNavalArch,» 4 Febrero 2019. [En línea]. Available: <https://thenavalarch.com/mooring-system-design-and-analysis/>. [Último acceso: Noviembre 2021].
- [37] G. M. D. Hamidreza, «Parametric study of catenary mooring system on the dynamic response of the semi-submersible plataform,» *Ocean Engrinnering*, 2018.
- [38] A. Ageitos, *Sistemas de anclaje y posicionamiento de buques y plataformas Offshore*, San Cristóbal de La Laguna: Universidad de La Laguna, 2015.
- [39] C. Z. H. V. L. K. K. A. X. Q. J. L. H. W. S. T. T. C. L. W. Jian Daia, «Design and construction of floating modular photovoltaic,» *Design and construction of floating modular photovoltaic system for water reservoirs*, vol. 191, nº 116549, 2018.
- [40] D. Suárez, «DISEÑO DE PRE FACTIBILIDAD DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA FLOTANTE EN EL EMBALSE MAZAR – 201 MWp,» 2019.