



# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



## FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

### “ANÁLISIS DINÁMICO Y DISEÑO ESTRUCTURAL DE UNA PLATAFORMA DE ACCESO PARA UN FPV SOBRE EL EMBALSE DE MAZAR”

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO

ALLAUCA CHASIPANTA DARWIN VLADIMIR  
darwinalluca002@gmail.com

NÚÑEZ CALERO ERICK ALEXANDER  
erick.a.nunez@outlook.com

DIRECTOR: Ing. Wilson Guachamín PhD  
wilson.guachamin@epn.edu.ec

Quito, marzo 2023

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **DARWIN VLADIMIR ALLAUCA CHASIPANTA** y **ERICK ALEXANDER NÚÑEZ CALERO**, bajo mi supervisión.



---

Ing. Wilson Guachamín PhD

**DIRECTOR DE PROYECTO**

## DECLARACIÓN

Nosotros, **Darwin Vladimir Allauca Chasipanta y Erick Alexander Núñez Calero**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.



---

Darwin Vladimir Allauca Chasipanta



---

Erick Alexander Núñez Calero

## **DEDICATORIA**

A la memoria de mi madre que gracias a su ejemplo de perseverancia ha sido un pilar fundamental en mi formación como profesional, por brindarme los recursos, la confianza y el valor para lograr una meta más en mi vida.

**Darwin**

A mis padres, que en el trayecto de mi vida han guiado mis pasos. Han sido el mejor ejemplo de honestidad, respeto, perseverancia y solidaridad que he tenido.

**Erick**

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres y hermanas que son el motor para seguir cumpliendo mis metas, por estar siempre a mi lado en los momentos más difíciles, su apoyo fue vital en mi formación.

A la universidad y especialmente a quienes la conforman la facultad de ingeniería mecánica que de manera directa o indirecta fueron partícipes de este proceso.

Al Dr. Wilson Guachamín por el compromiso para aclarar cualquier duda existente, agradecerle por la claridad y exactitud con la que impartía sus clases.

**Darwin**

A mis padres, que siempre han dado lo mejor de sí, que han hecho todo lo que ha estado a su alcance para que me sea posible alcanzar mis sueños.

Al Dr. Wilson Guachamín quien se ha caracterizado por ser un excelente guía y profesor, agradezco la confianza y el apoyo brindado para llevar a cabo el presente trabajo.

A todas las personas quienes conforman la Facultad de Ingeniería Mecánica y que cumplen su labor con dedicación.

**Erick**

# ÍNDICE

.....	i
INTRODUCCIÓN.....	11
<b>Objetivo general</b> .....	12
<b>Objetivos específicos</b> .....	12
1. MARCO TEÓRICO .....	13
1.1 Plantas de energía fotovoltaica flotantes (FPV) .....	13
1.2 Cargas principales soportadas por una estructura FPV .....	15
1.2.1 Fuerza de flotación .....	15
1.2.2 Carga aerodinámica .....	15
1.2.3 Cargas hidrodinámicas .....	16
2. METODOLOGÍA.....	18
2.1 Modelo conceptual del FPV .....	20
2.2 Modelación en Ansys Aqwa .....	26
2.2.1 Ecuación de movimiento.....	27
2.2.2 Carga aerodinámica .....	27
2.2.3 Carga hidrodinámica.....	28
2.2.4 Masas de anclaje.....	31
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	33
3.1 Resultados obtenidos .....	33
3.1.1 Respuestas dinámicas del sistema.....	33
3.1.2 Contribución de las cargas a la respuesta total.....	35
3.1.3 Respuesta dinámica del sistema FPV frente a condiciones de carga distintas 36	
3.1.4 Tensiones en líneas de anclaje .....	38
3.2 Análisis de resultados.....	38
3.2.1 Dimensionamiento de elementos principales.....	38
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	45
4.1 Conclusiones .....	45
4.2 Recomendaciones .....	45
<b>Referencias Bibliográficas</b> .....	46
ANEXO I. MASA ESTIMADA PARA EL MODELO CONCEPTUAL.....	48
ANEXO II. NÚMERO DE REYNOLDS PARA LOS PONTONES.....	49
ANEXO III. RESPUESTA DINÁMICA DEL MÓDULO FPV. ....	50
ANEXO IV. FLEXIÓN SOBRE LOS PONTONES .....	52
ANEXO V. TENSIONES DE LAS LÍNEAS DE AMARRE .....	55

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Distribución de plantas FPV Según su tamaño, a diciembre de 2018. ....	13
Figura 1.2. Densidad espectral usando un modelo JONSWAP de olas.....	17
Figura 2.1. Metodología para el dimensionamiento preliminar de pasarelas y sistema de anclaje. ....	18
Figura 2.2. Ubicación de los 10 módulos FPV.....	19
Figura 2.3. Variación anual del nivel del agua (2011 - 2018).....	19
Figura 2.4. Perfiles de montaña para cada posición de módulos FPV propuestos. ....	20
Figura 2.5. Estructuras del modelo conceptual FPV. ....	20
Figura 2.6. Sección esquemática del bloque fotovoltaico (estructuras 4 y 8). ....	21
Figura 2.7. Bloque de paneles fotovoltaicos (estructuras 4 y 8). ....	21
Figura 2.8. Sección del bloque PV. ....	22
Figura 2.9. Sección del bloque PV sin paneles montados.....	22
Figura 2.10. Configuración de amarres entre pasarelas y bloques fotovoltaicos.....	23
Figura 2.11. Pasarelas (estructuras 1,2,3,5,6,7,9,10 y 11).....	23
Figura 2.12. Componentes del modelo conceptual de pasarela.....	24
Figura 2.13. Estructura de perfiles IPN de la pasarela. ....	24
Figura 2.14. Articulación entre pasarelas. ....	25
Figura 2.15. Propuesta de sistema de anclaje, sobre la pasarela. ....	25
Figura 2.16. Posición de los puntos de anclaje planos XZ y XY.....	26
Figura 2.17. Modelo numérico del sistema FPV (Ansys Aqwa).....	26
Figura 2.18. Modelo FPV con el sistema de anclaje en Ansys Aqwa, planos XY (panel superior) y XZ (panel inferior). ....	27
Figura 2.19. Coeficientes de arrastre para perfiles rectangulares. ....	28
Figura 2.20. Direcciones consideradas para el viento. ....	29
Figura 2.21. Denominación de pontones para los coeficientes $C_D$ y $C_M$ .....	29
Figura 2.22. Coeficiente de arrastre para un arreglo de dos cilindros. ....	30
Figura 2.23. Coeficiente de masa añadida para un arreglo de dos cilindros. ....	30
Figura 2.24. Representación flujo paralelo a los pontones.....	31
Figura 2.25. Denominación de las líneas de anclaje. ....	31
Figura 3.1. Parámetros estadísticos de la respuesta dinámica del sistema.....	33
Figura 3.2. Estadística de respuestas dinámicas del sistema (posición, dirección X)..	34
Figura 3.3 Estadística de respuestas dinámicas del sistema (posición, dirección Y)...	35
Figura 3.4. Estadística de la respuesta del sistema para cargas aisladas. ....	35
Figura 3.5. Estadística de la respuesta dinámica del sistema para el escenario 6.. ....	36
Figura 3.6. Estadística de la respuesta dinámica del sistema FPV para velocidades de corriente.....	37
Figura 3.7. Estadística de la respuesta dinámica del sistema FPV para la variación de la dirección de la corriente.....	37
Figura 3.8. Simplificación del estado de carga de los pontones. ....	39
Figura 3.9. Representación esquemática del eje de las poleas.....	40
Figura 3.10. Diagramas de cortante y momento flector para el eje de las poleas.....	41
Figura 3.11. Modelo estructural. ....	42
Figura 3.12. Cargas del modelo estructural. ....	42
Figura 3.13. Esfuerzos axiales [MPa] en el modelo estructural, SAP 2000. ....	43
Figura 3.14. Factor de uso de elementos estructurales, SAP 2000.....	44

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Elementos principales de algunos tipos de sistemas FPV para proyectos implementados. ....	14
Tabla 1.2. Coeficiente de Hellman para distintas superficies. ....	16
Tabla 2.1. Parámetros espectrales para tres distintas direcciones del viento.....	29
Tabla 2.2. Coeficientes de arrastre y masa añadida para los pontones. ....	30
Tabla 2.3. Proporción de las masas suspendidas para compensar la asimetría .....	32
Tabla 3.1. Escenarios de simulación.....	33
Tabla 3.2. Respuesta dinámica del sistema.....	34
Tabla 3.3. Parámetros espectrales $H_s$ y $\omega_p$ .....	36
Tabla 3.4. Tensión en las líneas de anclaje. ....	38
Tabla 3.5. Esfuerzos de compresión en los pontones. ....	39
Tabla 3.6. Concentradores de esfuerzo a flexión en un eje cilíndrico.....	41



## RESUMEN

La creciente demanda de energía se ha incrementado a partir de la segunda mitad del siglo XX, lo que ha conllevado a la explotación de combustibles fósiles. Actualmente, se trata de cubrir esta demanda con fuentes alternativas como la energía solar, utilizando sistemas fotovoltaicos (PV).

Los sistemas PV tienen limitaciones debido al área necesaria para su montaje y el sobrecalentamiento de los paneles. Para solucionar estos problemas, la industria ha propuesto el uso de sistemas híbridos y sistemas solares fotovoltaicos flotantes (FPV). El FPV tiene la ventaja de aprovechar la superficie del mar en calma y de embalses, además, la evaporación del agua enfría los paneles solares. Los sistemas de anclaje utilizados en la bibliografía son adecuados para niveles de agua constantes, debido a esto, resultan ineficaces para grandes variaciones de nivel como la de Mazar.

Este trabajo propone una solución para sistemas FPV con grandes variaciones de nivel del agua. El sistema propuesto se compone por líneas de anclaje, poleas y masas suspendidas que contrarrestan las fuerzas del viento, olas y corriente. El sistema de anclaje demuestra ser estable para varios escenarios de carga. Finalmente, este trabajo realiza un diseño estructural preliminar de los componentes principales, incluyendo los sistemas de acceso, poleas, ejes y pontones.

**Palabras clave:** Planta fotovoltaica flotante, embalse, hidroeléctrica, anclaje autorregulable, análisis dinámico.

## ABSTRACT

The increasing demand of energy has increased from the second half of the twentieth century, which has led to exploitation of fossil fuels. Nowadays, we try to compensate this demand alternative sources, e. g. solar energy, using photovoltaics systems (PV).

PV systems have limitations on large areas for their deployment and overheating. To solve these issues the industry has proposed the use of hybrid and floating solar photovoltaic (FPV) systems. The FPV has the advantage of using available sheltered seas and reservoir areas, however, water evaporation cools down the solar panels. The anchor systems used in the applications are suitable for constant water levels, however, there are useless for large level variations such as that of Mazar.

This work proposes a solution for FPV systems with large water level variations. The proposed system is composed of anchor lines, pulleys and suspended masses that counteract wind, wave and current forces. The anchor system proves to be stable for various load scenarios. Finally, this work conducts a preliminary structural design of main components including access systems, pulleys, shafts and pontoons.

**Keywords:** Photovoltaic floating plant, reservoir, hydroelectric, adjustable anchorage system, dynamic analysis.

# **“ANÁLISIS DINÁMICO Y DISEÑO ESTRUCTURAL DE UNA PLATAFORMA DE ACCESO PARA UN FPV SOBRE EL EMBALSE DE MAZAR”**

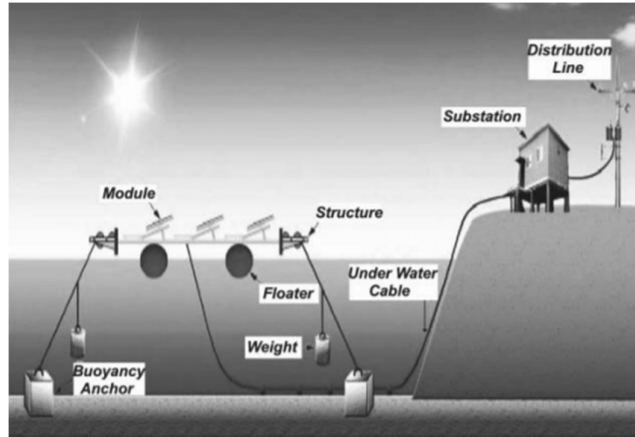
## **INTRODUCCIÓN**

Los sistemas fotovoltaicos flotantes (FPV) surgen en el contexto de la política energética actual, centrada en: desarrollo sostenible, incremento de la eficiencia energética, reducción de emisiones y uso de energías de bajo carbón [1], [2].

En el caso de Ecuador, con el objetivo de aumentar la generación eléctrica y reducir las emisiones de carbono, en el año 2016 se puso en marcha el plan “Cambio de la matriz energética”, implementando diferentes fuentes de energía renovable como: eólica, biomasa y solar [3].

La explotación de la energía solar resulta imprescindible, debido a su abundancia en el planeta, sea de manera directa o indirecta. Para hacerlo directamente se utilizan métodos térmicos (calentamiento de agua y climatización) o fotónicos (producción de electricidad). Un proceso fotónico aprovecha la interacción de los fotones de luz con la película fotovoltaica, logrando desplazar electrones y generando corriente continua, posteriormente empleando un inversor se transforma la corriente directa a alterna para ser distribuida a través de la red nacional [4].

El incremento en la eficiencia y la reducción de costos de producción de paneles PV, han convertido esta tecnología en una alternativa importante para la generación eléctrica en el futuro. Sin embargo, limitantes como el uso de suelo han hecho que se planteen alternativas flotantes (FPV), sobre la superficie de lagos, presas y el mar [5]. Por ejemplo, una planta con capacidad de 100 MW requiere 1.7 Km<sup>2</sup> de desiertos extremadamente soleados [6]. En la siguiente figura se presenta el esquema básico de los elementos que conforman una planta flotante fotovoltaica: estructura de paneles PV sustentada por flotadores, líneas de anclaje y cableado eléctrico.



Planta solar fotovoltaica flotante.  
(Fuente: [7])

Los sistemas FPV deben presentar características como modularidad, adaptabilidad, y robustez. Estos requerimientos pueden ser satisfechos con soluciones técnicas existentes, aunque se siguen perfeccionando. Para los anclajes se emplea arreglos de cables o cuerdas, cuando el nivel del agua varía un par de metros. Sin embargo, no existe un sistema de anclaje para variaciones de cota superiores. [8]

## Objetivo general

Analizar dinámicamente la plataforma de acceso para un sistema fotovoltaico flotante (FPV) sobre el embalse de Mazar.

## Objetivos específicos

- Recopilar información referente a sistemas FPV para plantear un modelo conceptual aplicable a las condiciones del caso de estudio.
- Determinar las cargas y condiciones a las que se someterá el módulo para elaborar un modelo numérico en Ansys Aqwa.
- Modelar numéricamente la estructura FPV, condiciones de carga y el sistema de anclaje.
- Analizar la respuesta dinámica del módulo FPV y probar su estabilidad al variar los parámetros de carga.
- Realizar un diseño estructural preliminar de los principales elementos del sistema de acceso al FPV.

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1 Plantas de energía fotovoltaica flotantes (FPV)

En 2007, con fines investigativos, se inicia la construcción e instalación de plantas fotovoltaicas flotantes en Aichi – Japón (20 kW) [9]. Posteriormente se instalan las plantas Far Niente Wineries y Gundlach Bunshu Wineries en California (175 y 30 kW respectivamente) [10]. En 2008 se registra la primera patente de un sistema FPV en Italia, con una estructura de acero galvanizado y flotadores, proyectos con características similares se construyen en Italia en Solarolo (2009), Petra (2010) y en el lago Colignola (2011) [8]. En 2012 se instala el proyecto Pommeraie-sur-Sevre en Francia, con un módulo estructural constituido por plástico (polietileno de alta densidad), posteriormente varias compañías siguen este esquema [8].

La investigación relacionada a sistemas FPV se ha incrementado recientemente en países como: EEUU, Italia, Francia, Corea del Sur, España y Singapur [11]. En la Figura 1.1 se observa como China se convirtió en líder mundial de generación de plantas FPV en el 2017, instalado proyectos de mayor escala. Para el 2018 China representaba el 73% del total global, seguido por Japón, Corea, Taiwán, Reino Unido y con solo un 2% el resto del mundo. [12].

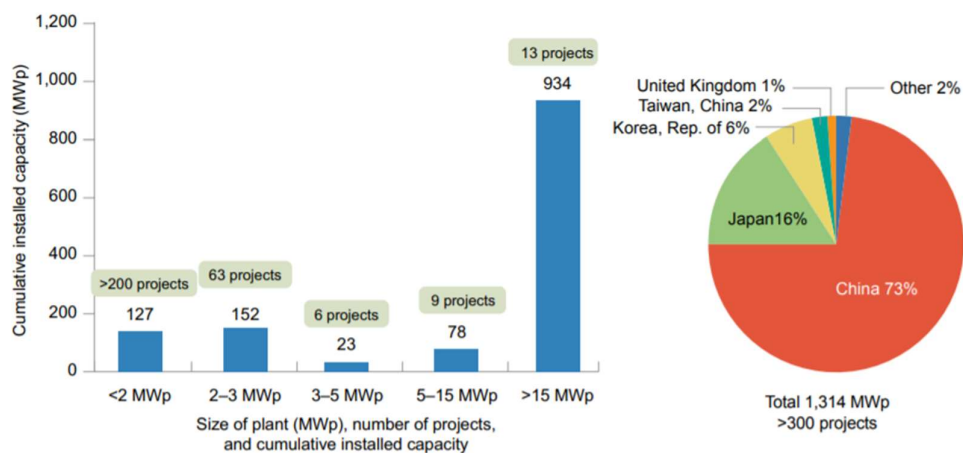
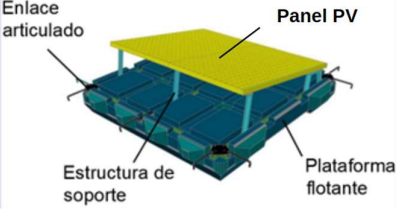

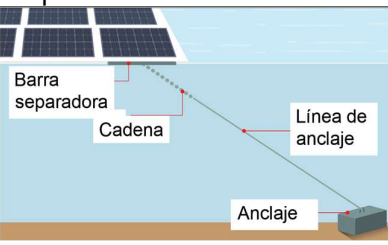
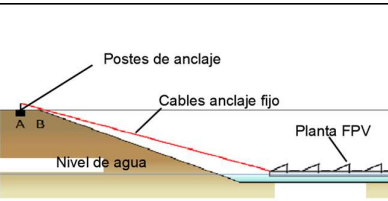



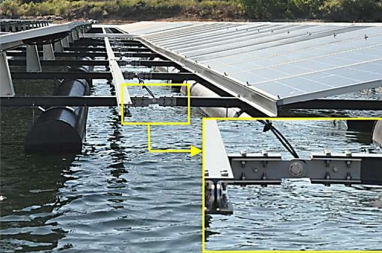
Figura 1.1. Distribución de plantas FPV Según su tamaño, a diciembre de 2018. (Fuente: [12])

El uso de plantas FPV frente a PV supone algunas ventajas que incluyen el aumento de la eficiencia de los paneles, gracias a la refrigeración generada por la evaporación. Limitación en el crecimiento de algas. Se reduce el costo de compra o alquiler de superficie terrestre. Reducción de la evaporación de los cuerpos de agua y disminución de la erosión de riberas en ríos [6], [13], [14], [15].

En la Tabla 1.1 se presentan las partes principales para algunos tipos de sistemas FPV. Adicionalmente, algunos tipos de anclaje convencional y la conexión entre módulos.

Tabla 1.1. Elementos principales de algunos tipos de sistemas FPV para proyectos implementados.

Estructura			
Tipo	Descripción	Esquema	Referencia
Módulos flotantes	Utilizado en proyectos de mediana y gran escala. Constituido por un flotador cuadrangular robusto. Comúnmente de polietileno y sobre este montado el panel fotovoltaico.		[16]
Estructura rígida	Constituida por una estructura robusta de acero galvanizado o material compuesto. Soporta los paneles fotovoltaicos y se monta sobre pontones cilíndricos de polietileno.		Planta PV flotante Suvereto en Italia y banco de pruebas de SERIS en la cuenca de Tiengi, Singapur [17]
Sistemas de anclaje			
Tipo	Descripción	Esquema	Referencia
Líneas de anclaje al fondo de la cuenca	Generalmente se utilizan: cables de acero, alambres de acero galvanizado, cadenas, cables de fibra sintética y como ancla bloques de concreto. Funciona para niveles de agua fijos.		[12]
Líneas de anclaje hacia las orillas	Se utilizan los mismos componentes que en anclajes al fondo, con la opción de uso de bolardos en las orillas como anclas. Funciona para niveles de agua fijos.		[8]

Conexión entre módulos			
Tipo	Descripción	Esquema	Referencia
Líneas de amarre	Se utilizan para la conexión de unidades estructurales de gran tamaño.		Planta fotovoltaica de la bahía de Buksin, Corea [18]
Articulación metálica	Para unir los módulos rígidos de la estructura, se emplean articulaciones de acero inoxidable y pernos.		Planta fotovoltaica ubicada en el reservorio Otae, Corea [19]

(Fuente:(propia))

Los tipos de anclaje expuestos en la Tabla 1.1, son aplicables solamente a casos en los que la cota de agua sea fija o poco variable. En el embalse de Mazar, la variación del nivel es de 34,8 m. Ninguno de los sistemas de anclaje es aplicable para el caso de estudio.

## 1.2 Cargas principales soportadas por una estructura FPV

### 1.2.1 Fuerza de flotación

Un módulo de generación fotovoltaica flotante garantiza su flotabilidad y estabilidad frente a cargas aerodinámicas e hidrodinámicas. A partir de un análisis estático es posible estimar la fuerza de flotación requerida por el FPV empleando la Ecuación 1.1. Donde  $F_f$  es la fuerza de flotación,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $g$  la gravedad y  $V_{sumergido}$  es el volumen de fluido que ha sido desplazado [20].

$$F_f = \rho * g * V_{sumergido} \quad (1.1)$$

### 1.2.2 Carga aerodinámica

El viento genera arrastre sobre los componentes de un FPV de manera proporcional al área de contacto (normal a la dirección del viento). La Ecuación 1.2 permite estimar la fuerza de arrastre ( $F_D$ ),  $\rho_a$  es la densidad del fluido (aire),  $C_F$  es el coeficiente de forma del cuerpo,  $V_z$  velocidad del viento y  $A$  el área proyectada sobre el plano normal a la dirección del viento [20].

$$F_D = \frac{\rho_a}{2} C_F A V_z^2 \quad (1.2)$$

La velocidad del viento puede ser estimada empleando la Ecuación 1.3, propuesta en 1916 por Hellman [21]. Esta considera la teoría de capa límite, generando un perfil de velocidades para una altura de hasta 100 metros sobre la superficie.

$$\frac{U}{U_o} = \left( \frac{h}{h_o} \right)^\alpha \quad (1.3)$$

Donde  $U$  es la velocidad del viento a la altura  $h$ ,  $U_0$  es la velocidad medida a la altura  $h_0$  y  $\alpha$  es el coeficiente de Hellman, ver Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Coeficiente de Hellman para distintas superficies.

Superficie	$\alpha$
Agua	0,13
Gramina	0,14 - 0,16
Cultivos y arbustos	0,2
Bosques	0,25
Zonas urbanas	0,4

(Fuente: [22])

La inclinación de los paneles fotovoltaicos está estrechamente relacionada con las fuerzas de arrastre producidas. Es posible estimar el aumento de la fuerza de arrastre sobre un FPV con base en el ángulo de inclinación de los paneles. Algunos estudios muestran que a partir de ángulos superiores a  $5^\circ$ , la fuerza de arrastre aumenta considerablemente [23] [16].

### 1.2.3 Cargas hidrodinámicas

Las cargas hidrodinámicas generadas por el oleaje y la corriente pueden ser estimadas con la ecuación de Morison, ver Ecuación 1.4. Esta posee una componente inercial y una de arrastre, mismas que dependen de la aceleración y la velocidad del fluido respectivamente, ver Ecuación 1.5.  $F$  es la fuerza por unidad de longitud del cuerpo,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $u$  es la velocidad relativa del fluido al cuerpo flotante,  $D$  es el diámetro efectivo,  $C_D$  es el coeficiente de arrastre y  $C_M$  el coeficiente inercial.

$$F_{(t)} = F_{inercial(t)} + F_{arrastre(t)} \quad (1.4)$$

$$F_{(t)} = \frac{\pi}{4} \rho C_M D^2 * \dot{u}(t) + \frac{1}{2} \rho C_D D * u(t) |u(t)| \quad (1.5)$$

#### *Generación de Olas*

Las olas son producidas en embalses principalmente por el viento. Este genera olas gracias a la interacción ejercida sobre la superficie del agua, acelerando y aumentando su altura mientras el viento pueda transferirle energía [24] [25].

Para la predicción del oleaje se han desarrollado modelos paramétricos de espectro de olas. Según Wallingford [24] es recomendable emplear dos tipos de espectros para reservorios de agua, estos son SMB/Saville (Sverdrup Munk Bretschneider) y Donelan/JONSWAP (Joint North Sea Wave Analysis Project). Para generar los parámetros espectrales se requiere emplear velocidades y direcciones de viento de la estación meteorológica más apropiada.

Centrándose en reservorios de agua largos y delgados existe la preferencia por usar el modelo Donelan/JONSWAP, pues se ha probado que el modelo SMB/Saville puede llegar a subestimar la altura de olas [26].



### Espectro de olas JONSWAP

El espectro JONSWAP se define con las Ecuaciones 1.6 y 1.7,  $\omega$  es la frecuencia angular,  $T_p$  el periodo pico,  $\sigma$  es una función paso ( $\sigma = 0,07$  cuando  $\omega < \omega_p$  y  $\sigma = 0,09$  cuando  $\omega > \omega_p$ ),  $\gamma$  el factor de pico (3,3 típicamente) y  $H_s$  la altura significativa de ola [27].

$$S_{\zeta}(\omega) = \frac{320 \cdot H_s^2}{T_p^4} \cdot e^{\left(\frac{-1950}{T_p^4} \cdot \omega^{-4}\right) \cdot \gamma^A} \quad (1.6)$$

$$A = e^{-\left(\frac{\omega}{\omega_p} - 1\right)^2} \quad (1.7)$$

La altura significativa de ola  $H_s$  se define como el promedio del tercio más alto de olas en los datos medidos en una respuesta temporal. Estadísticamente  $H_s$  es el equivalente a  $4\sqrt{M_0}$ , donde  $\sqrt{M_0}$  es obtenido como la raíz del área bajo la curva del espectro de densidad de energía ( $M_0$  es la varianza o momento espectral cero).

El periodo pico  $T_p$  corresponde al periodo (frecuencia) asociado al punto máximo del espectro de densidad de energía, ver Figura 1.2. [27].

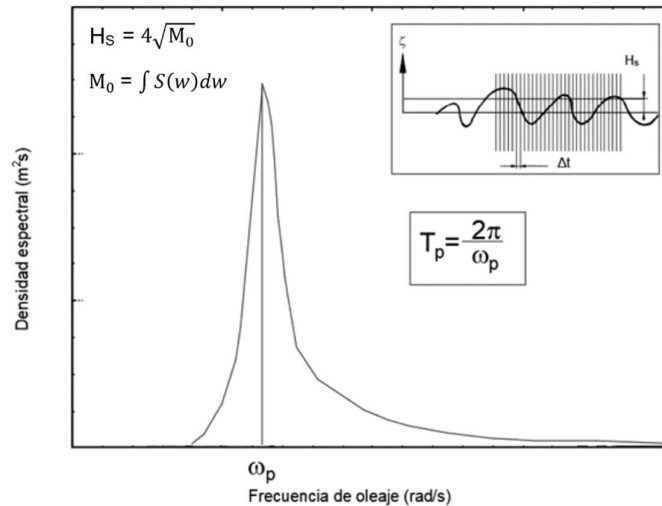


Figura 1.2. Densidad espectral usando un modelo JONSWAP de olas.  
(Fuente: ([27]))

$H_s$  y  $T_p$  pueden ser estimados paramétricamente mediante las formulaciones planteadas con base en los del lago Ontario en Canadá (modelo Donelan/JONSWAP para no condiciones de mar abierto). Las Ecuaciones 1.8 y 1.9 estiman la altura significativa de ola y el periodo pico respectivamente,  $U$  es la velocidad de diseño del viento,  $F$  la longitud del área expuesta en la dirección del viento y  $g$  es la gravedad [28].

$$H_s = 0.00366g^{-0.62}U^{1.24}F^{0.38} \quad (1.8)$$

$$T_p(1.85g^{0.77}U^{-0.54}) = F^{0.23} \quad (1.9)$$

## 2. METODOLOGÍA

La Figura 2.1 detalla la metodología desarrollada para este trabajo, la cual puede ser agrupada en 3 fases. En la primera fase se determinan los requerimientos del modelo (dimensiones del embalse y la variación del nivel) para con base en estas seleccionar el tipo de estructura y elementos del modelo conceptual.

La segunda fase es llevada a cabo en el código de estado del arte de Ansys Aqwa, donde se genera un modelo numérico para la plataforma FPV acorde a los parámetros de la primera fase. Las cargas son modeladas empleando parámetros como el espectro de olas y las velocidades de corriente y viento. Para el sistema de anclaje se utiliza un sistema innovador de poleas, con líneas de amarre y masas suspendidas.

En la tercera fase se emplea el modelo numérico para probar la estabilidad del sistema para distintos escenarios, la contribución a la respuesta dinámica de cada una de las cargas y la respuesta del sistema frente a distintas condiciones de carga.

Finalmente, en la cuarta etapa se selecciona la cuerda para las líneas de anclaje y se dimensiona el espesor de pontones y el eje de las poleas que soportan las masas suspendidas. Empleando un modelo estructural preliminar de pasarelas en SAP2000 se dimensiona la estructura.

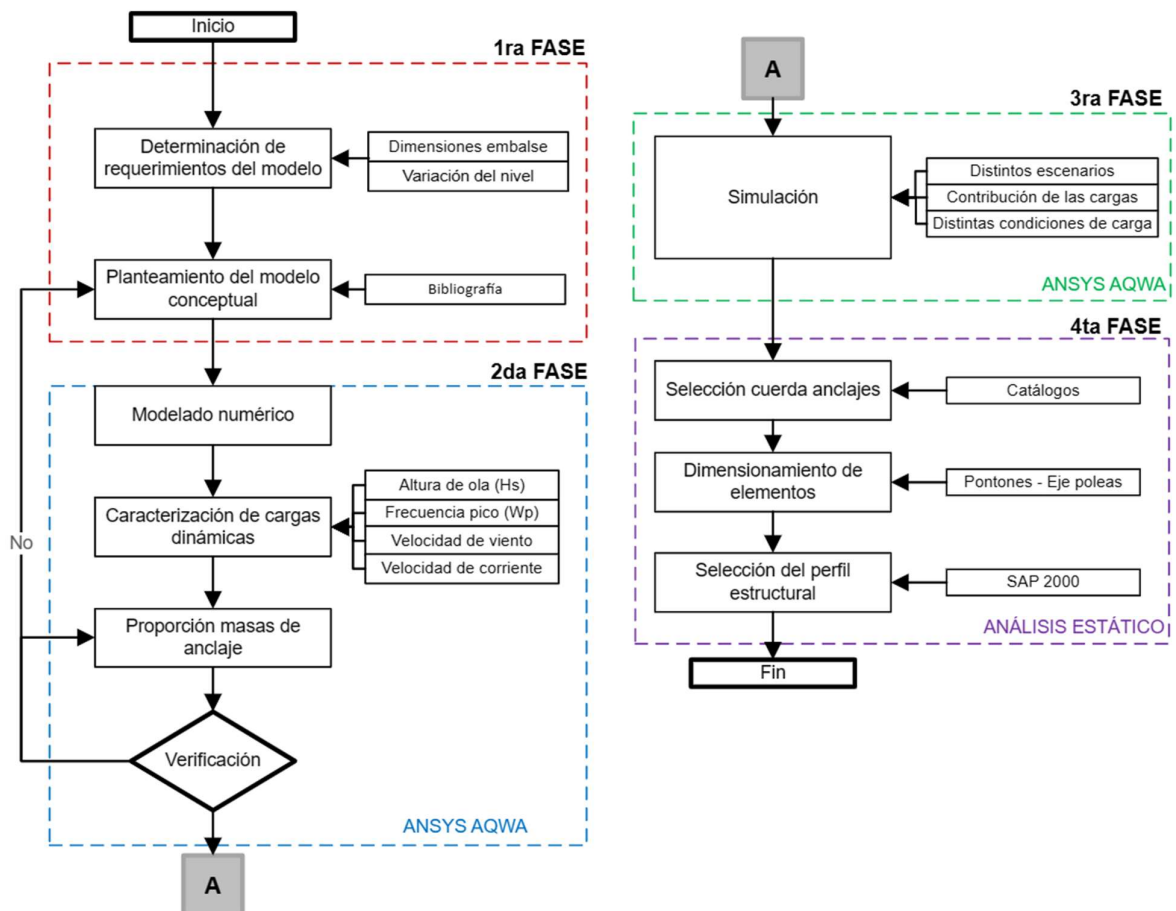


Figura 2.1. Metodología para el dimensionamiento preliminar de pasarelas y sistema de anclaje. (Fuente: propia)

El proyecto fotovoltaico de Mazar busca colocar paneles PV sobre una gran extensión del embalse y garantizar el acceso desde orilla hasta cada uno de los paneles PV. Para este proyecto se ha considerado un arreglo de 10 módulos PV independientes, ver Figura 2.2, donde acceder a los módulos es relativamente sencillo a través de un bote. Las restricciones de dimensionamiento son la variación del nivel y el ancho del embalse.

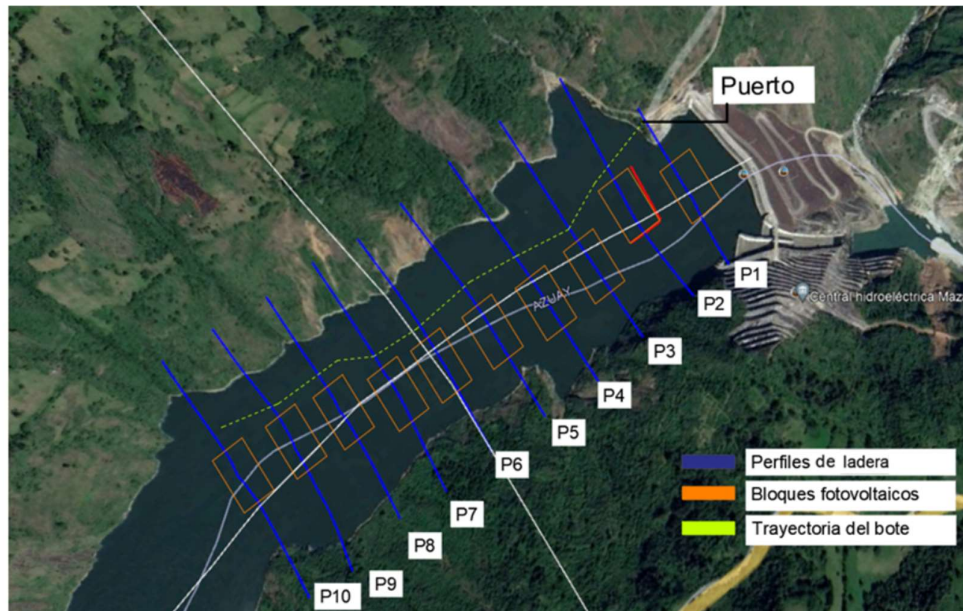


Figura 2.2. Ubicación de los 10 módulos FPV.  
(Fuente: propia)

La Figura 2.3 representa la variación del nivel en el periodo (2011 - 2018). El parámetro de diseño será la máxima diferencia de los valores históricos. Se omite el mínimo del 2013 (punto A) debido a que este valor se alcanzó por el vaciado voluntario de la presa, debido a un problema con el desagüe de fondo. Con esta consideración el máximo y mínimo históricos corresponden a 2121,4 msnm (punto B) y 2156,2 msnm (punto C) respectivamente. La variación máxima de cota es 34,8 m, con lo que las soluciones de anclaje existentes en el mercado no son aplicables.

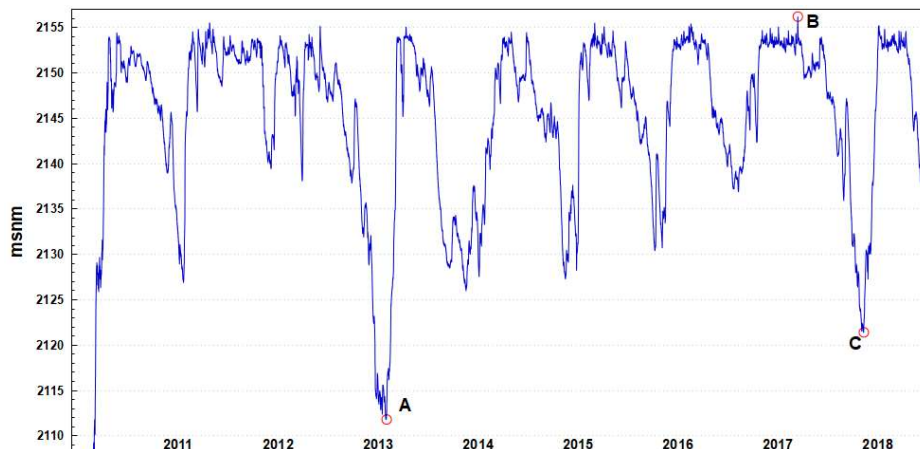


Figura 2.3. Variación anual del nivel del agua (2011 - 2018).  
(Fuente: propia)

El ancho del embalse es variable, puesto que depende de la topografía montañosa del lugar. Para obtener estas medidas se emplea Google Earth y Global Mapping. Las líneas de perfil (P1 - P10) de la Figura 2.4, sirven de referencia para obtener un perfil de montaña para los módulos FPV.

El sistema de anclaje debe permitir la navegación de un bote, por lo que la condición crítica se dará en la sección más estrecha del embalse. En la Figura 2.4 la apertura mínima es de 188,71 m, correspondiente al perfil 5. El ancho máximo para el módulo FPV se reduce en 15 m a cada lado (para la navegación), es decir el ancho máximo es de 158,71 m.

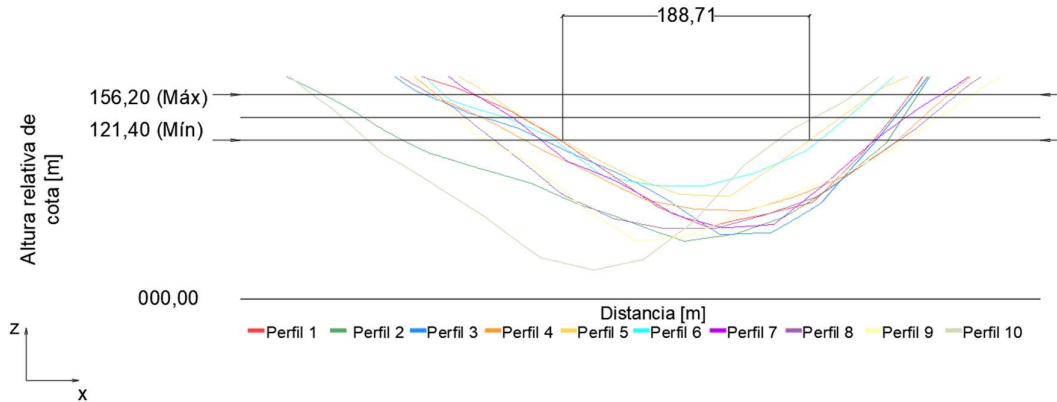


Figura 2.4. Perfiles de montaña para cada posición de módulos FPV propuestos. (Fuente: propia)

## 2.1 Modelo conceptual del FPV

El módulo FPV se encuentra constituido por los elementos de la Figura 2.5. El modelo posee 11 cuerpos rígidos: 9 pasarelas que permiten el acceso (estructuras 1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 10 y 11) y 2 bloques de paneles PV (estructuras 4 y 8). La unión entre elementos se realiza empleando: articulaciones entre pasarelas, líneas de amarre entre pasarelas y bloques PV, y líneas de anclaje entre las pasarelas y las montañas.

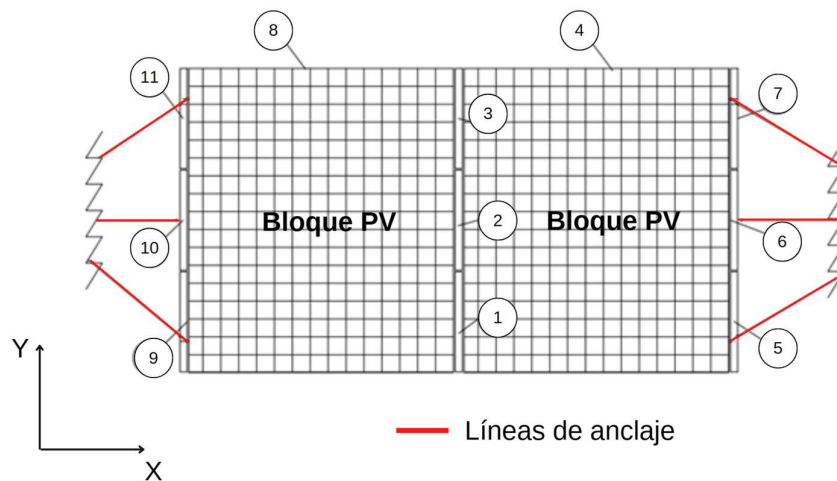


Figura 2.5. Estructuras del modelo conceptual FPV. (Fuente: propia)

### Estructura de paneles PV (Bloque fotovoltaico)

Se compone de una estructura de acero galvanizado similar a la del proyecto en Tienge, Singapur [16], que flota sobre pontones de polietileno longitudinales, ver Figura 2.6.

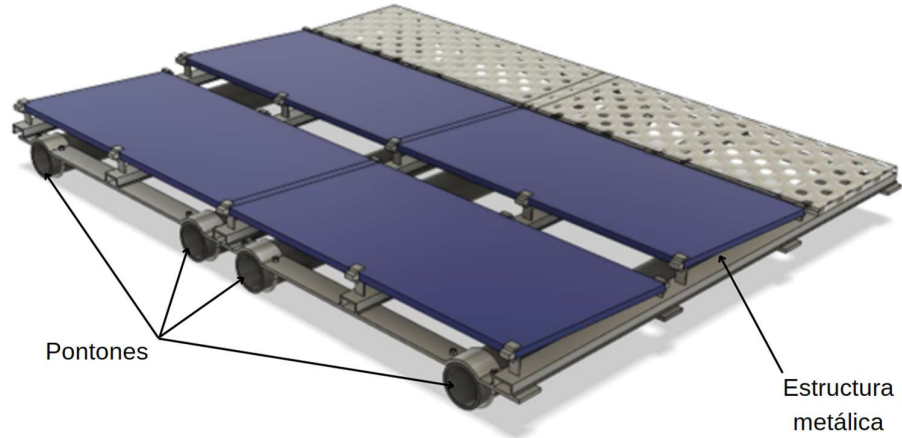


Figura 2.6. Sección esquemática del bloque fotovoltaico (estructuras 4 y 8).  
(Fuente: propia)

En la Figura 2.7 se representa el total de 2368 paneles PV en un arreglo de 64 x 37, que es el máximo número de paneles que no sobrepasa el ancho máximo de 158,71 m. Se dispone de pasarelas secundarias que dan acceso hasta cada panel PV para labores de mantenimiento. La sección del bloque PV es detallada en las Figuras 2.8 y 2.9.

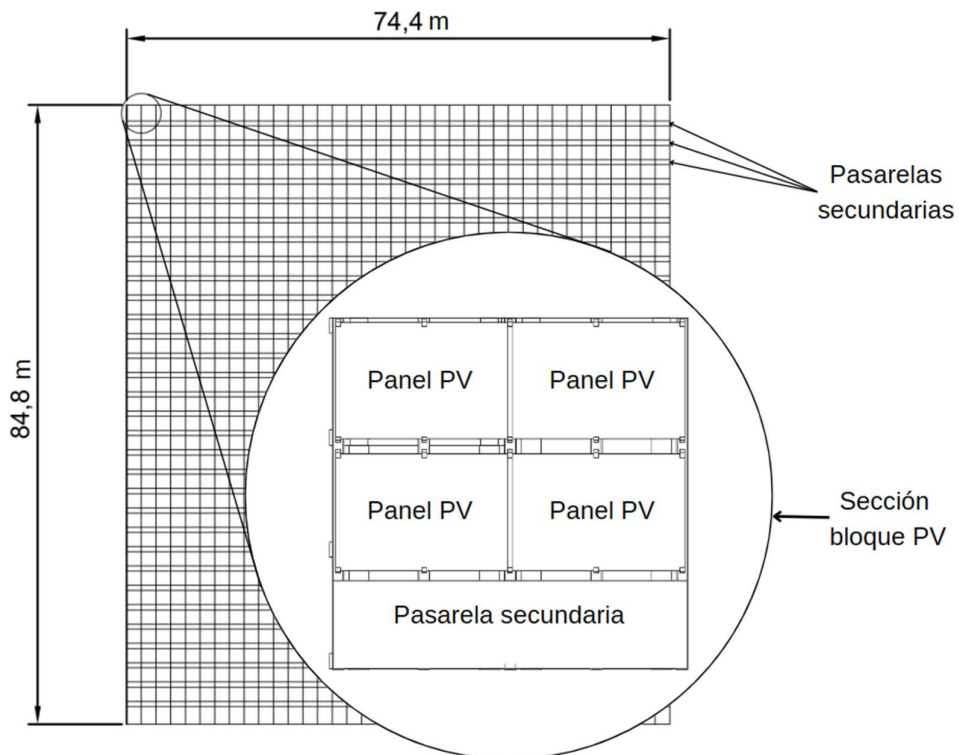


Figura 2.7. Bloque de paneles fotovoltaicos (estructuras 4 y 8).  
(Fuente: propia)

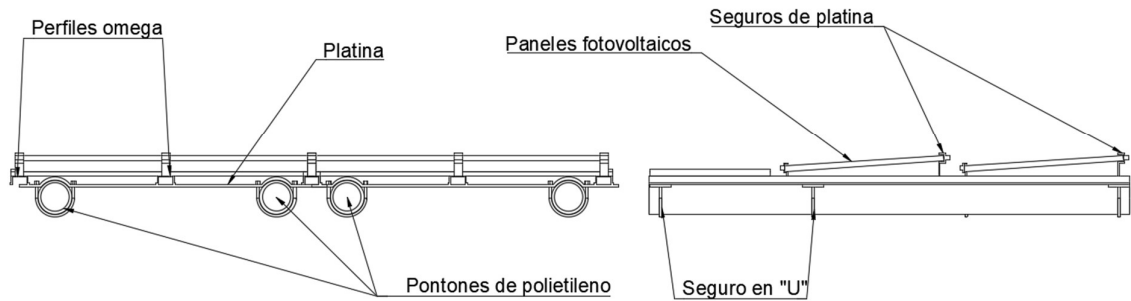


Figura 2.8. Sección del bloque PV.  
(Fuente: propia)

En la Figura 2.8 se observa como los pontones de polietileno se encuentran asegurados a la estructura, conformada por platina metálica y perfiles omega, con seguros en forma de "U". Los paneles PV se encuentran ligeramente inclinados y fijados empleando seguros de platina y pernos, colocados en las 4 esquinas de cada panel.

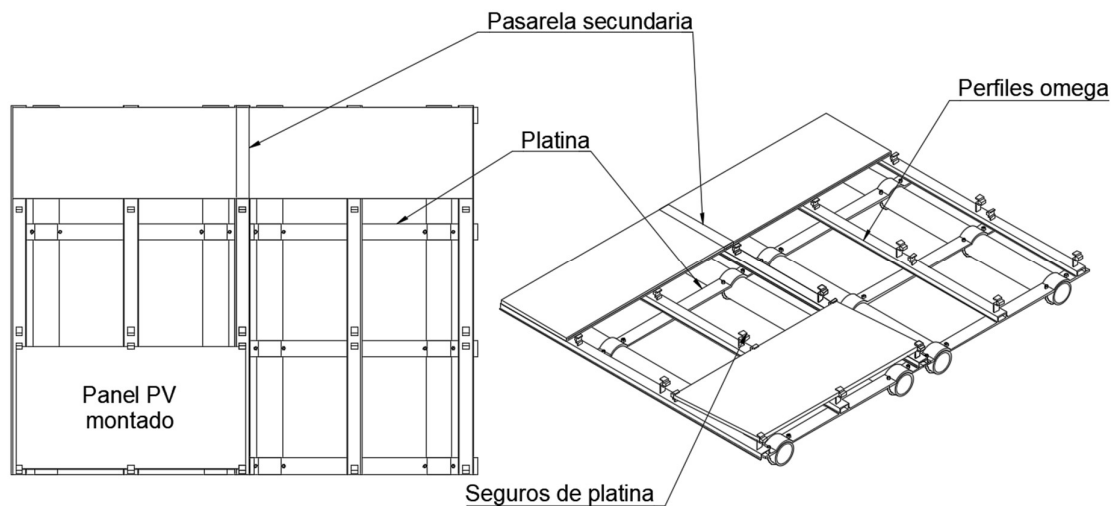


Figura 2.9. Sección del bloque PV sin paneles montados.  
(Fuente: propia)

En la Figura 2.9 (sin todos los paneles PV montados) se presenta como se conforma la estructura, con 3 perfiles omega longitudinales y 2 platinas transversales por panel PV. El arreglo de perfiles omega y platinas sostiene la pasarela secundaria y los paneles PV.

La unión entre pasarelas y bloques emplea líneas de amarre y fenders (llantas) que, amortiguan las fuerzas de contacto, ver Figura 2.10.

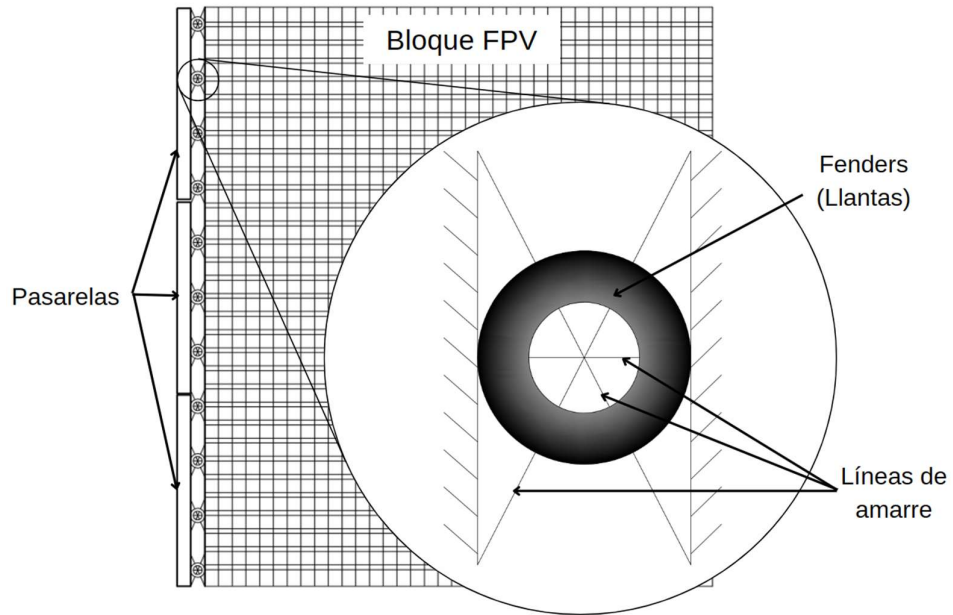


Figura 2.10. Configuración de amarres entre pasarelas y bloques fotovoltaicos.  
(Fuente: propia)

El peso referencial para el bloque fotovoltaico y el radio de los pontones necesarios para la flotación son detallados en el Anexo I.

### *Pasarelas*

Compuestas de manera similar a los bloques fotovoltaicos, su estructura está basada en el diseño del proyecto Otae en Corea [19], ver Figura 2.11.

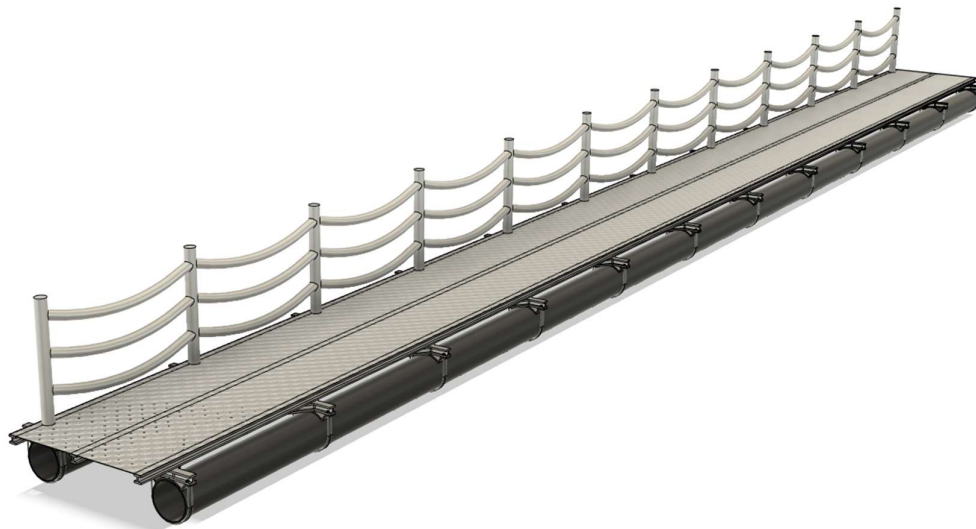


Figura 2.11. Pasarelas (estructuras 1,2,3,5,6,7,9,10 y 11).  
(Fuente: propia)

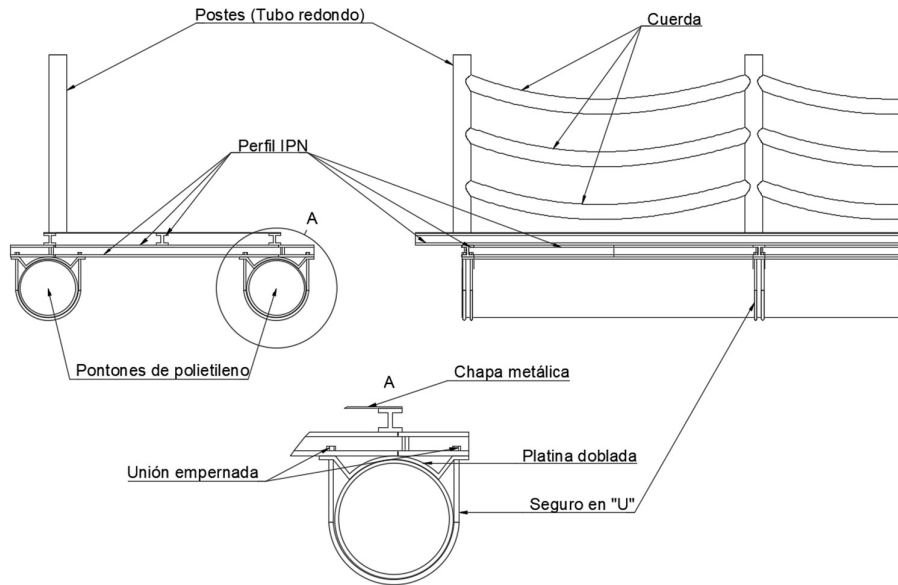


Figura 2.12. Componentes del modelo conceptual de pasarela.  
(Fuente: propia)

En la Figura 2.12 se presenta la pasarela montada sobre 2 pontones de polietileno, que se encuentran asegurados a perfiles IPN empleando una platina moldeada a la forma del pontón y seguros metálicos en forma de "U". La pasarela posee un arreglo de perfiles IPN, ver Figura 2.13, sobre los cuales se colocan chapas metálicas para contar con superficies transitables. Finalmente, como barandales se emplean tubos redondos y cuerdas.

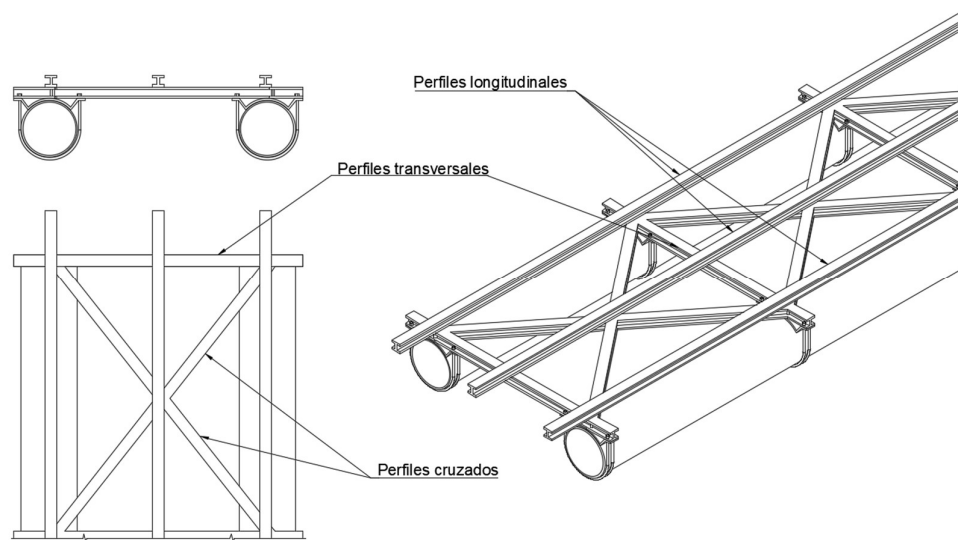


Figura 2.13. Estructura de perfiles IPN de la pasarela.  
(Fuente: propia)

Para unir una pasarela a otra se emplea una unión articulada, ver Figura 2.14, misma que se encuentra montada sobre perfiles IPN.



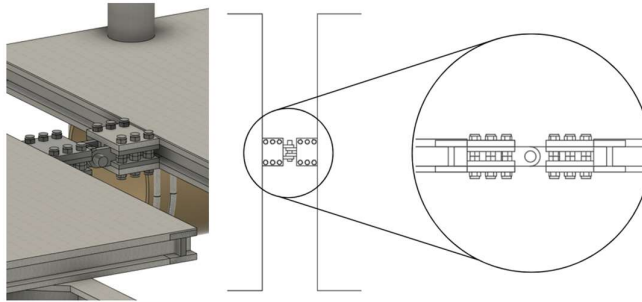


Figura 2.14. Articulación entre pasarelas.  
(Fuente: propia)

El sistema de anclaje propuesto en este estudio emplea poleas y masas suspendidas para restringir el movimiento sin la necesidad de actuadores. La Figura 2.15 representa el sistema montado sobre la pasarela.

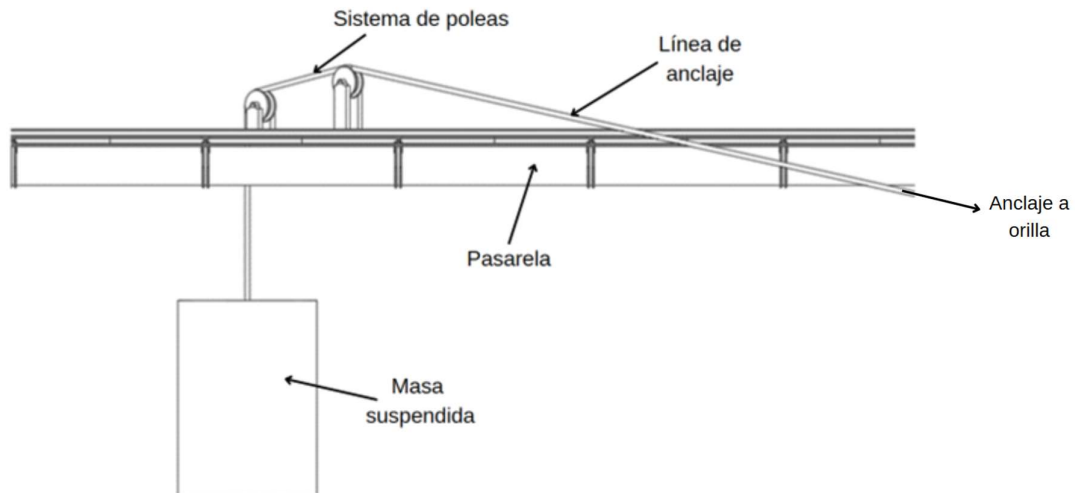


Figura 2.15. Propuesta de sistema de anclaje, sobre la pasarela.  
(Fuente: propia)

El peso referencial de la pasarela y el radio de pontones necesarios para la flotación se detallan en el Anexo I.

#### *Posicionamiento de los anclajes*

Numéricamente se analizará un solo módulo FPV. La posición escogida es la No. 2 (ver figura 2.16), ya que es donde existe mayor separación entre orillas. Para la correcta colocación de los puntos de anclaje se toman 2 perfiles de montaña adicionales.

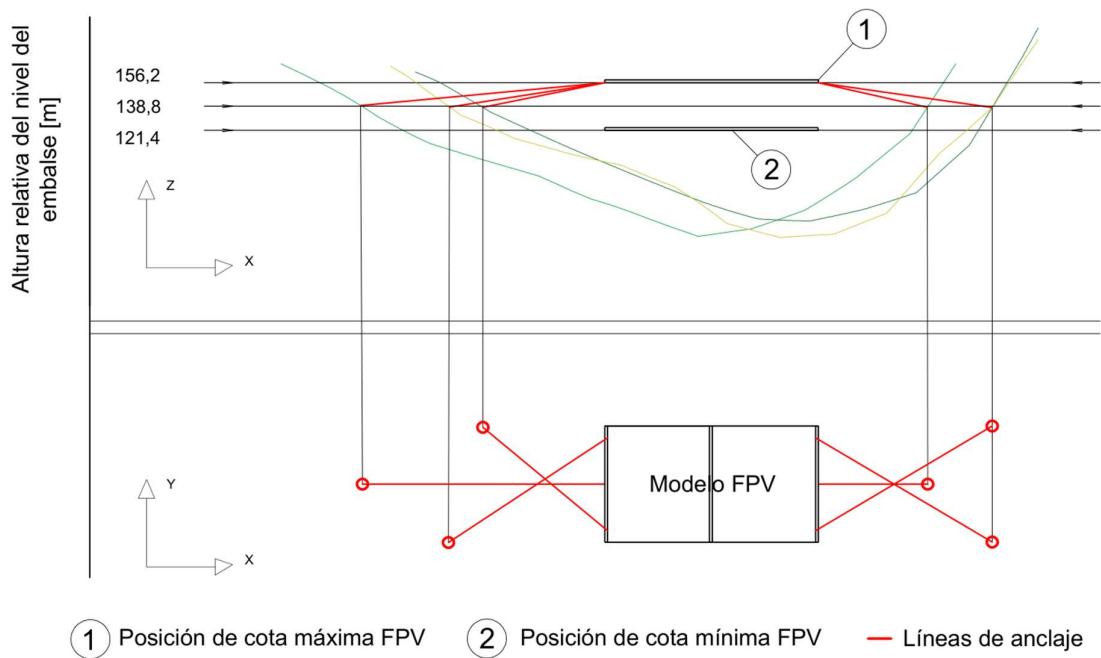


Figura 2.16. Posición de los puntos de anclaje planos XZ y XY.  
(Fuente: propia)

En la Figura 2.16 se encuentra la representación en dos planos del módulo FPV con la posición que toman los anclajes cuando el nivel del embalse es máximo. Haciendo uso de esta representación se obtienen las posiciones exactas de los puntos de anclaje para ubicarlos en la plataforma Aqwa.

## 2.2 Modelación en Ansys Aqwa

La Figura 2.17 muestra el modelo numérico en Ansys Aqwa, el cual cuenta con los mismos cuerpos del modelo conceptual: 9 pasarelas y 2 bloques fotovoltaicos. Adicionalmente posee 6 puntos de masa para la carga suspendida en los anclajes.

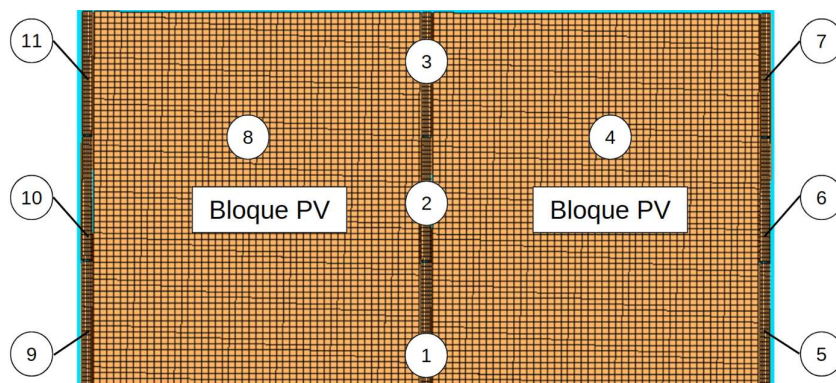


Figura 2.17. Modelo numérico del sistema FPV (Ansys Aqwa).  
(Fuente: propia)

En la Figura 2.18 se presenta el modelo anclado en la posición mínima del nivel.

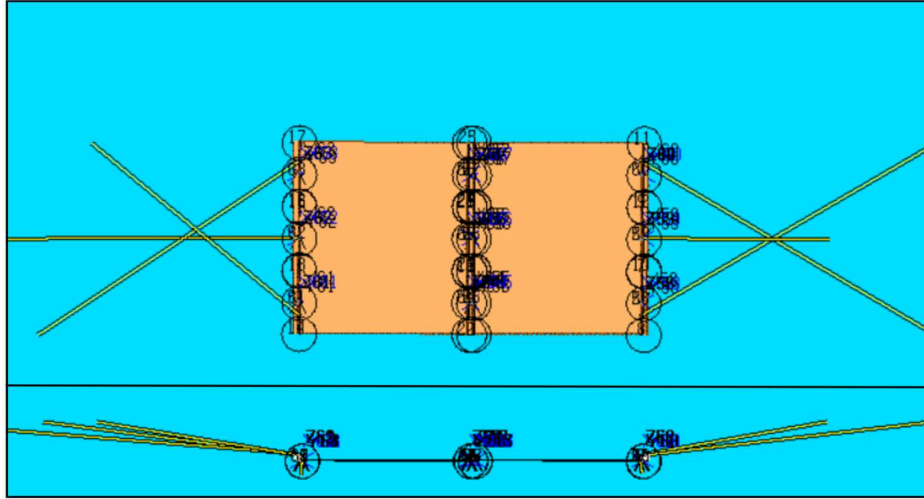


Figura 2.18. Modelo FPV con el sistema de anclaje en Ansys Aqwa, planos XY (panel superior) y XZ (panel inferior).  
(Fuente: propia)

### 2.2.1 Ecuación de movimiento

El software resuelve la ecuación de movimiento del modelo FPV, ver Ecuación 2.1.  $M$ ,  $C$  y  $K$  son las matrices de masa estructural y añadida, amortiguamiento y rigidez.  $\ddot{x}$ ,  $\dot{x}$  y  $x$  son los vectores de aceleración, velocidad y posición de las estructuras.  $F$  es la fuerza resultante de las cargas aerodinámicas, hidrodinámicas y líneas de amarre que actúan sobre las estructuras.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F \quad (2.1)$$

Ansys Aqwa resuelve la aceleración para cada intervalo de tiempo, empleando un algoritmo predictor-corrector de dos niveles del módulo de Aqwa Drift [29]. El tiempo total para cada simulación es de 3 h, con un intervalo de tiempo de 0,05 s.

### 2.2.2 Carga aerodinámica

Debido a la falta de datos de velocidad de viento para el embalse de Mazar, se toman los valores de la estación meteorológica más cercana (INAMHI M0031). El viento en Aqwa es modelado con una magnitud constante. En este estudio se considera el valor de velocidad media para el mes de agosto (valor medio más alto) de 3,17 m/s [30]. Para obtener la velocidad a la altura de la estructura (~ 2 m) se emplea la Ecuación 1.3 y se obtiene un valor de 2,7 m/s.

Para modelar la carga de arrastre en Ansys se debe asignar coeficientes de forma a cada cuerpo. Se asume que los coeficientes pueden ser estimados con la Figura 2.19. Se debe

mantener en consideración que este tipo de cuerpos presentan una invariabilidad del coeficiente frente a la variación del número de Reynolds [31].

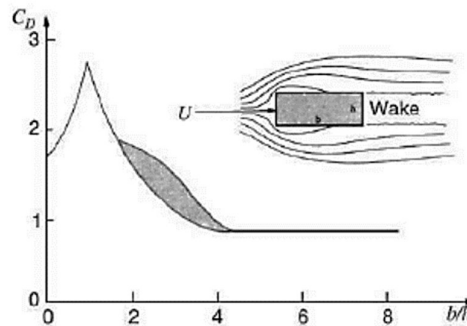


Figura 2.19. Coeficientes de arrastre para perfiles rectangulares. (Fuente: [31])

Las relaciones longitud/espesor del modelo son mucho mayores a 8 por lo tanto se considera un valor de 1,0 para todos los coeficientes de forma.

### 2.2.3 Carga hidrodinámica

Los parámetros de modelamiento son: velocidad de la corriente, espectro de olas y coeficientes de arrastre y masa añadida.

#### *Velocidad de corriente*

La velocidad media de corriente en el embalse es estimada con la Ecuación 2.2.

$$V_m = \frac{F}{A_T} \tag{2.2}$$

Donde  $V_m$  es la velocidad media de fluido,  $F$  es el caudal y  $A_T$  es el área transversal del flujo. El caudal en el embalse generalmente se encuentra entre 200 a 400  $m^3/s$ , el área transversal (nivel mínimo del embalse en el perfil 5) es obtenida empleando Autocad (4979,8  $m^2$ ). La velocidad máxima estimada es de 0,08 m/s.

#### *Espectro de olas*

Con base en la información presentada en la sección 1.2.2, se asume que la estructura experimentará la carga de olas generadas exclusivamente por acción del viento. Los parámetros espectrales se estiman considerando un embalse delgado como el de Mazar.

Para definir el espectro JONSWAP se requieren los valores de altura de ola significativa y la frecuencia pico. Para estimar  $H_s$  se emplea la Ecuación 1.4, la velocidad del viento asumida es de 2,7 m/s, sin embargo, al tratarse de un valor medio mensual sin dirección, se plantean 3 direcciones de flujo para nuestro análisis, ver Figura 2.20.

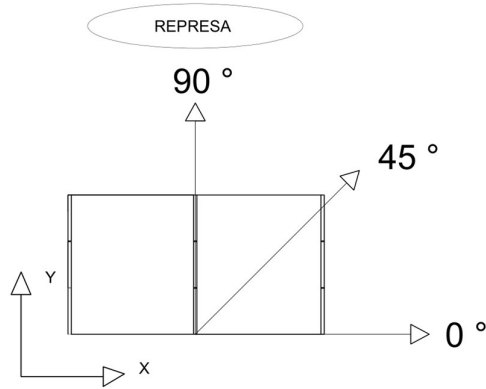


Figura 2.20. Direcciones consideradas para el viento.  
(Fuente: propia)

La longitud del área expuesta al viento ( $F$ ) es medida con base en la recomendación para embalses curvos [26], se asume una longitud de área ligeramente curva estimada a través de Google Earth para las 3 direcciones consideradas, ver Tabla 2.1. Los valores de  $H_s$  estimados son relativamente bajos. Los valores de frecuencia ( $\omega_p$ ) son asumidos con base en la altura de ola, son comparables con los parámetros empleados en Álvarez [32].

Tabla 2.1. Parámetros espectrales para tres distintas direcciones del viento.

Dirección [°]	$F$ [m]	$H_s$ [m]	$\omega_p$ [rad/s]
0	450	0,03	5,2
45	650	0,04	4,5
90	3790	0,07	3,1

(Fuente: propia)

#### Coefficientes de arrastre y masa añadida

La Figura 2.21 presenta la denominación que reciben los pontones según su ubicación. Es notable que el primer pontón de la pasarela generará un efecto escudo sobre el segundo, este a su vez sobre el primero del bloque y así sucesivamente.

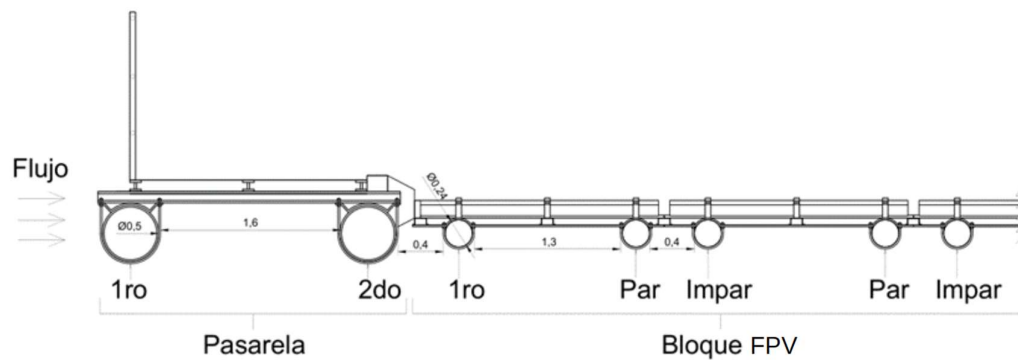


Figura 2.21. Denominación de pontones para los coeficientes  $C_D$  y  $C_M$  (flujo transversal).  
(Fuente: propia)

Para estimar los coeficientes  $C_D$  y  $C_M$  bajo la acción del efecto escudo se pueden emplear las Figuras 2.22 y 2.23 obtenidas para un par de pontones con un número de Reynolds de hasta  $10^5$ . El número de Reynolds calculado para los pontones se encuentra en el Anexo II.

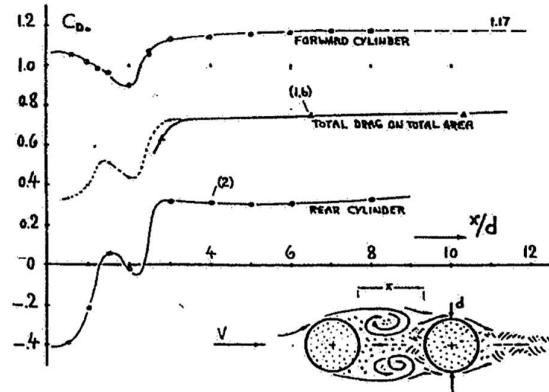


Figura 2.22. Coeficiente de arrastre para un arreglo de dos cilindros. (Fuente: [33])

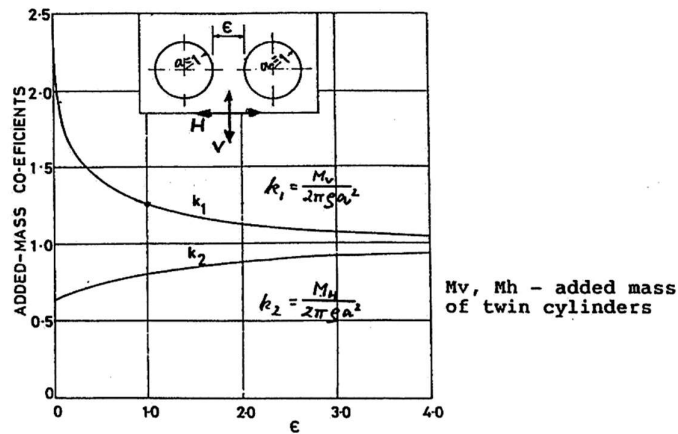


Figura 2.23. Coeficiente de masa añadida para un arreglo de dos cilindros. (Fuente: [33])

Los coeficientes obtenidos para todos los pontones se presentan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Coeficientes de arrastre y masa añadida para los pontones (flujo transversal).

Pasarelas		
Pontones	$C_D$	$C_M$
1ro	1,12	0,86
2do	0,31	0,86
Bloques fotovoltaicos		
Pontones	$C_d$	$C_m$
1ro	0,32	0,71
Pares	0,38	0,71
Impares	0,05	0,71

(Fuente: propia)

En el caso de flujo paralelo a la orientación de los pontones, ver Figura 2.24. Para Reynolds mayores a  $10^3$  el coeficiente  $C_D$  es de 0,99 [33]. El coeficiente de masa añadida asumido es el de un disco plano  $C_M = 2,66$  (considerado como el caso crítico) [33].

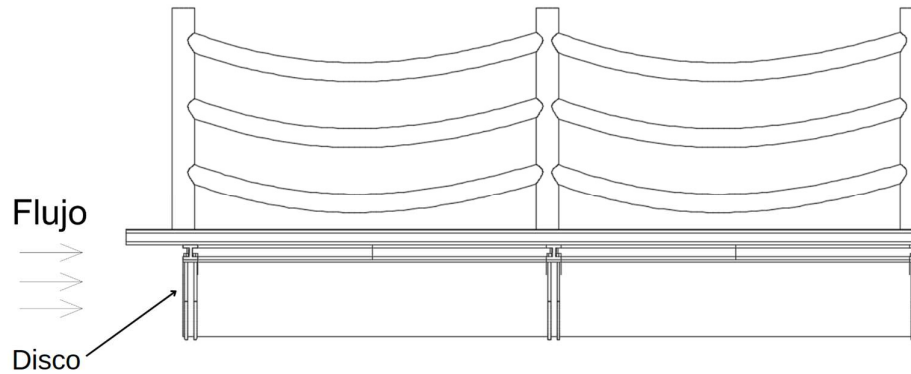


Figura 2.24. Representación flujo paralelo a los pontones.  
(Fuente: propia)

### 2.2.4 Masas de anclaje

Las líneas de anclaje deben mantener el equilibrio del módulo pese a la asimetría del sistema. En la Figura 2.25 se presenta el esquema empleado para determinar una proporción entre las masas, donde se enumeran las líneas del 1 al 6.

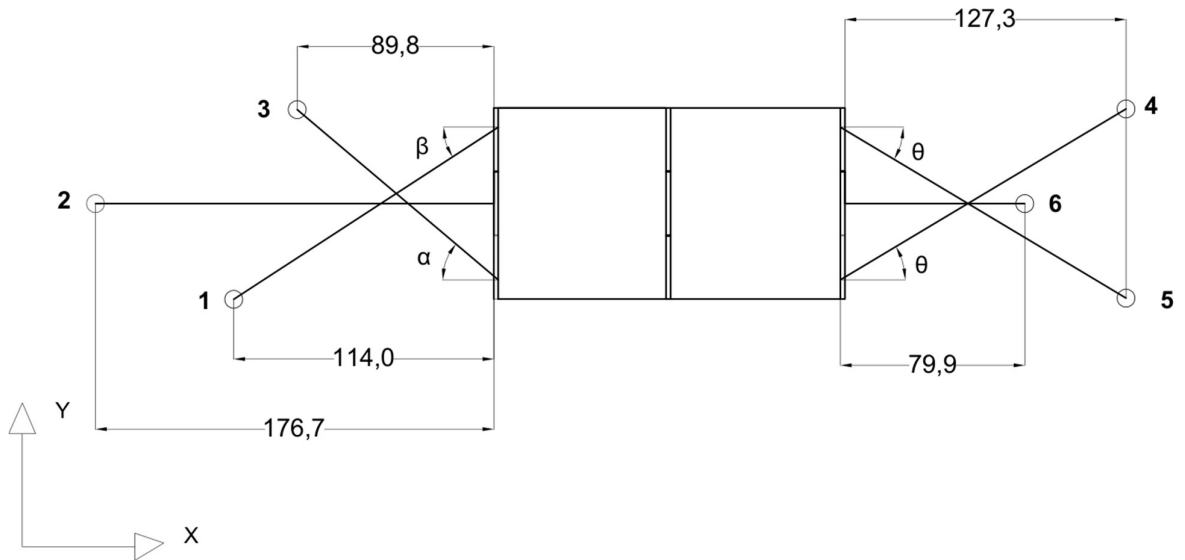


Figura 2.25. Denominación de las líneas de anclaje.  
(Fuente: propia)

Las Ecuaciones 2.3 y 2.4 establecen el equilibrio del módulo planteando una igualdad entre las tensiones de los cables.

$$\sum F_x = 0$$

$$T_3(\cos \alpha) + T_2 + T_1(\cos \beta) = T_4(\cos \theta) + T_5(\cos \theta) + T_6 \quad (2.3)$$

$$\sum F_y = 0$$

$$T_3(\text{sen } \alpha) + T_1(\text{sen } \beta) = T_4(\text{sen } \theta) + T_5(\text{sen } \theta) \quad (2.4)$$

El valor de tensión depende directamente de la masa suspendida, por lo tanto, se puede plantear las ecuaciones en función de  $m$ , ver Ecuaciones 2.5 y 2.6.

$$m_3(\text{cos } \alpha) + m_2 + m_1(\text{cos } \beta) = m_4(\text{cos } \theta) + m_5(\text{cos } \theta) + m_6 \quad (2.5)$$

$$m_3(\text{sen } \alpha) + m_1(\text{sen } \beta) = m_4(\text{sen } \theta) + m_5(\text{sen } \theta) \quad (2.6)$$

Para obtener una igualdad en las Ecuaciones 2.4 y 2.5 se emplean las sustituciones listadas en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Proporción de las masas suspendidas para compensar la asimetría

Masas del sistema pasivo	
$m_1 = \frac{m}{\text{sen } \beta}$	$m_3 = \frac{m}{\text{sen } \alpha}$
$m_5 = \frac{m}{\text{sen } \theta}$	$m_4 = \frac{m}{\text{sen } \theta}$
$m_2 = m (\cot \alpha + \cot \beta + 2 \cot \theta) + m_6$	

(Fuente: propia)

Donde  $m$  y  $m_6$  son los mínimos valores que logran el equilibrio del sistema, previo al análisis dinámico. Estas masas son calibradas a través de prueba y error en Ansys Aqwa.  $m = 800$  Kg y  $m_6 = 1300$  Kg.



### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### 3.1 Resultados obtenidos

La respuesta del sistema es analizada con base en la posición que éste toma a través del tiempo. Se asume que la respuesta de la estructura 4 (uno de los bloques fotovoltaicos) representa la respuesta de todo el modelo debido a su tamaño.

Las traslaciones en el plano XY y la rotación alrededor de Z son mínimas y presentan un comportamiento oscilante, ver Anexo III, indicando que el método de anclaje funciona. En la Figura 3.1 se representan los parámetros con base en los que se analiza la respuesta dinámica del sistema. Posición inicial ( $X_0$ ), oscilación significativa (2 desviaciones estándar,  $2\sigma$ ) y la media de la respuesta dinámica ( $\bar{X}$ ).

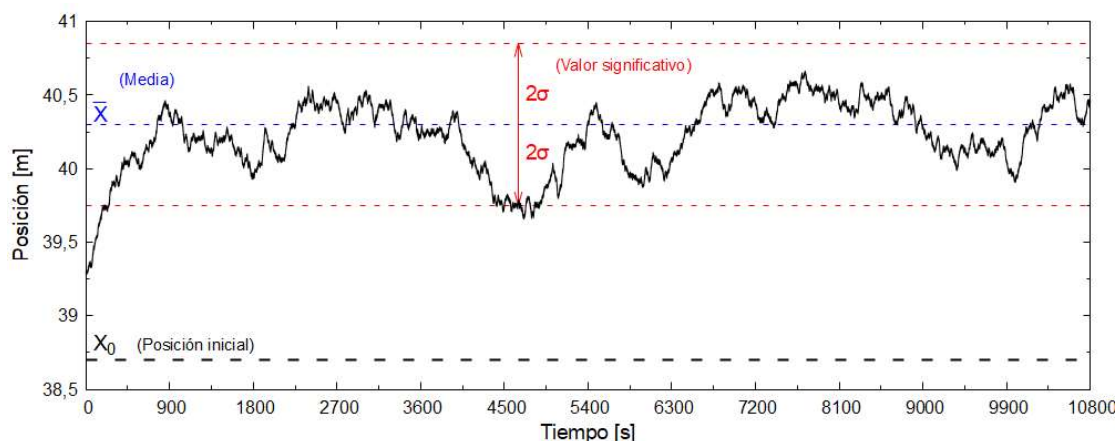


Figura 3.1. Parámetros estadísticos de la respuesta dinámica del sistema, escenario 6 dirección X. (Fuente: propia)

El módulo debe mantener la estabilidad para varios escenarios mostrados en la Tabla 3.1. Se consideran la acción de 3 espectros de olas y 3 posiciones para el nivel del agua en la represa (máxima, media y mínima), por lo que se proponen 9 escenarios de simulación.

Tabla 3.1. Escenarios de simulación.

Posición vertical del módulo FPV [m]	Dirección del espectro [°]		
	0	45	90
156,20	1	2	3
138,80	4	5	6
121,40	7	8	9

(Fuente: propia)

#### 3.1.1 Respuestas dinámicas del sistema

La Tabla 3.2 presenta la respuesta dinámica para todos los escenarios simulados, incluyendo posiciones iniciales ( $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Rz_0$ ), la media de la respuesta dinámica ( $\bar{X}$ ,  $\bar{Y}$ ,  $\bar{Z}$ ,  $\bar{R}_z$ ) y el valor de oscilación significativa ( $2\sigma$ ).

Tabla 3.2. Respuesta dinámica del sistema.

Escenario	Desplazamientos						Rotación	
	X [m]		Y [m]		Z [m]		Z [°]	
	$X_0=38,7$		$Y_0=42,4$		$Z_0=0,26$		$R_{z_0}=0$	
	$\bar{X}$	$2\sigma$	$\bar{Y}$	$2\sigma$	$\bar{Z}$	$2\sigma$	$\bar{R}_z$	$2\sigma$
1	37,84	0,1009	43,03	0,2922	0,2623	0,00542	-0,94	0,202
2	36,8	0,558	42,91	0,13	0,2624	0,01	-0,652	0,077
3	38,47	0,427	42,75	0,416	0,262	0,0463	-0,464	0,141
4	39,72	0,107	42,78	0,222	0,262	0,00542	-0,957	0,174
5	38,42	0,643	42,86	0,152	0,262	0,0101	-0,662	0,0607
6	40,3	0,552	42,62	0,378	0,2619	0,045	-0,5	0,118
7	38,736	0,0809	42,65	0,26	0,262	0,00542	-0,96	0,167
8	37,323	0,697	42,852	0,121	0,262	0,01	-0,649	0,07
9	39,76	0,671	42,523	0,354	0,261	0,0458	-0,493	0,106

(Fuente: propia)

Con el objetivo de determinar el escenario que produce el mayor desplazamiento se elaboran las Figuras 3.2 y 3.3 para las direcciones X y Y respectivamente (No se considera Z y  $R_z$  debido a que la variación es mínima).

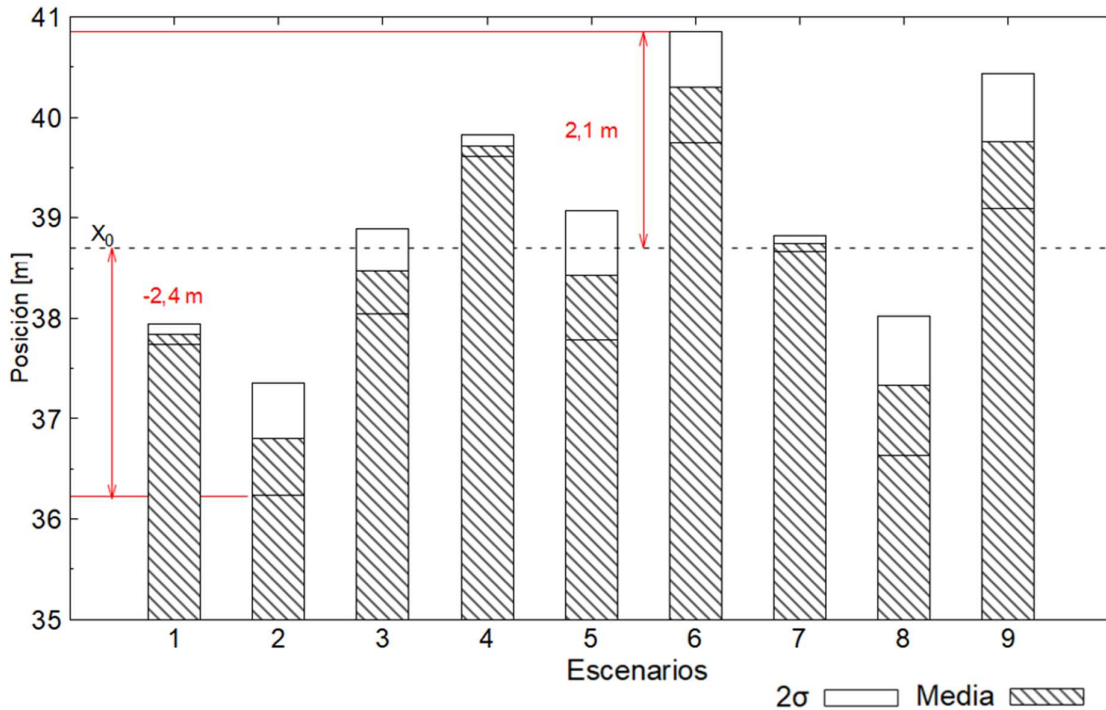


Figura 3.2. Estadística de respuestas dinámicas del sistema (posición, dirección X).

(Fuente: propia)

La Figura 3.2 presenta dos escenarios que producen mayores desplazamientos respecto a la posición inicial, - 2,4 m para el escenario 2 y 2,1 m para el escenario 6. Las desviaciones son similares por lo que ambos escenarios se consideran de interés.

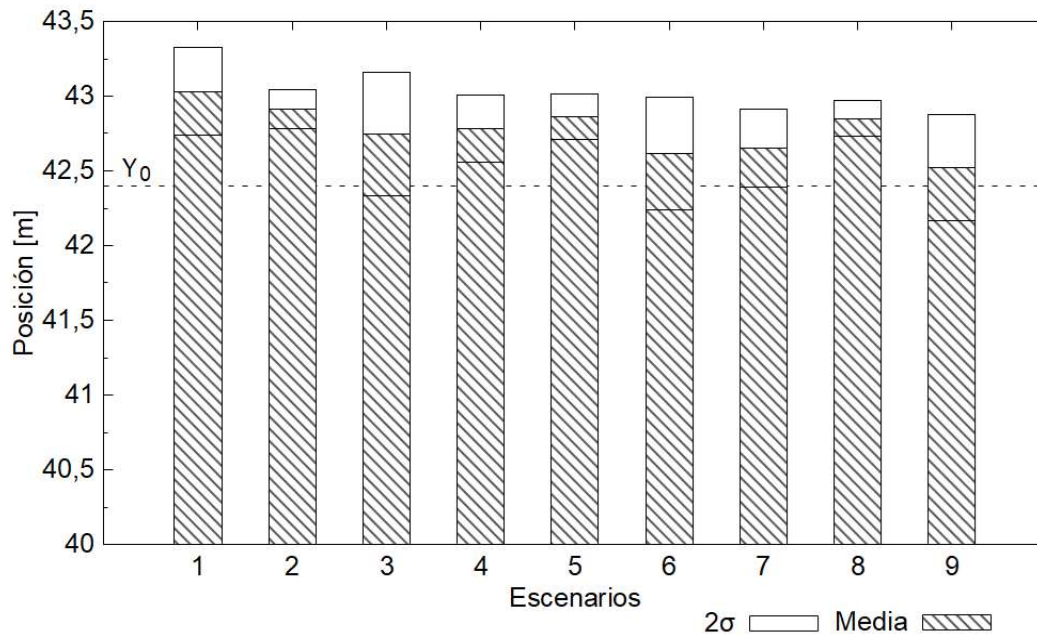


Figura 3.3 Estadística de respuestas dinámicas del sistema (posición, dirección Y).  
(Fuente: propia)

La Figura 3.3 presenta los parámetros estadísticos para los desplazamientos en la dirección Y. Es notable que estos son menores que en la dirección X. El valor significativo de oscilación ( $2\sigma$ ) del escenario 6 es aproximadamente 3 veces mayor que en el escenario 2, indicando un comportamiento menos estable.

### 3.1.2 Contribución de las cargas a la respuesta total

Con el objetivo de determinar la contribución de cada carga a la respuesta dinámica del FPV, se simula el escenario 6 bajo la acción aislada de cada carga. En la Figura 3.4 es notable como la corriente y el viento generan un desplazamiento estable mientras que el espectro de olas, la única fuerza armónica, genera una respuesta oscilante.

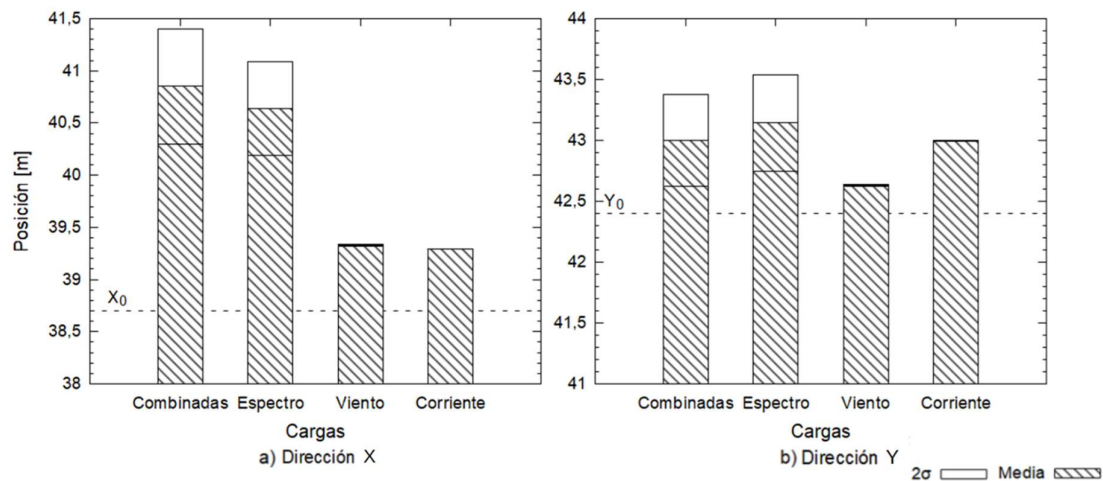


Figura 3.4. Estadística de la respuesta del sistema para cargas aisladas. a) Dirección X. b) Dirección Y.  
(Fuente: propia)

La carga generada por el espectro de olas contribuye mayoritariamente a las oscilaciones totales del sistema en ambas direcciones.

Las cargas de viento y corriente tienen menor influencia. Aunque, la corriente desplaza más a la estructura en la dirección Y.

### 3.1.3 Respuesta dinámica del sistema FPV frente a condiciones de carga distintas

Es necesario evaluar las respuestas dinámicas del sistema para distintos valores de carga, con el objetivo de probar que el modelo funciona para condiciones similares a las del caso de estudio. Los parámetros considerados por ejemplo (para el escenario 6) son: parámetros espectrales, la velocidad y dirección de la corriente, y las masas suspendidas.

#### Parámetros espectrales

En la Tabla 3.3 se encuentran los parámetros  $H_s$  y  $\omega_p$  para 5 espectros de olas y en la Figura 3.5 se presentan las respuestas dinámicas del sistema.

Tabla 3.3. Parámetros espectrales  $H_s$  y  $\omega_p$ .

Espectro	$H_s$ [m]	$\omega_p$ [rad/s]
1	0,01	7,0
2	0,01	5,2
3	0,03	5,2
4	0,12	2,5
5	0,14	2,5

(Fuente: propia)

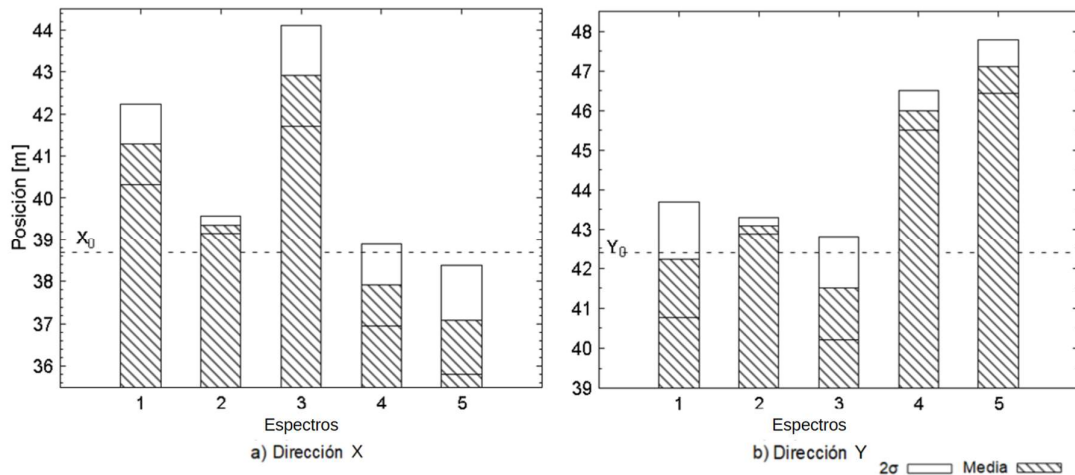


Figura 3.5. Estadística de la respuesta dinámica del sistema para el escenario 6. a) Dirección X. b) Dirección Y.

(Fuente: propia)

El espectro de olas 3 produce el mayor desplazamiento en la dirección X (5,2 m) pero tiene un efecto reducido en Y. Los espectros 4 y 5 que desplazan poco a la estructura en la dirección X, producen un mayor desplazamiento en Y. No obstante, los desplazamientos

alcanzados son aceptables, demostrando que el sistema se mantiene estable para los 5 espectros.

### Velocidad de la corriente

En la Figura 3.6 se presentan los desplazamientos alcanzados para el escenario 6, con distintos valores de velocidad de corriente. La velocidad máxima, que mantiene al sistema estable, de 0,2 m/s desplaza la estructura a 42,2 m en X y 45,6 m en Y.

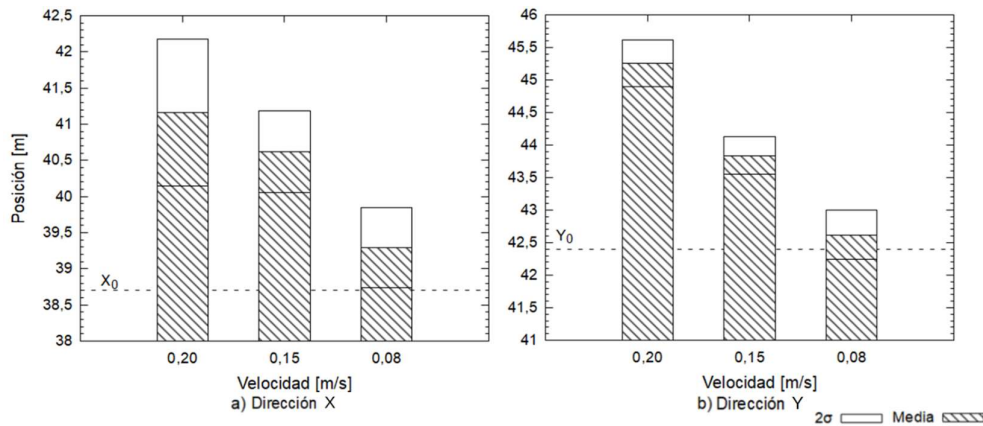


Figura 3.6. Estadística de la respuesta dinámica del sistema FPV para velocidades de corriente. a) Dirección X. b) Dirección Y. (Fuente: propia)

### Dirección de la corriente

El modelo se encuentra paralelo al cauce del río por lo que idealmente se espera que la corriente se encuentre a 90°, ver Figura 2.20, sin embargo, es posible que el modelo rote o presente un desalineamiento con la corriente. En la Figura 3.7, se presenta la respuesta del sistema para distintas direcciones, donde el rango máximo de variación admitido por el modelo es de 100 a 83°.

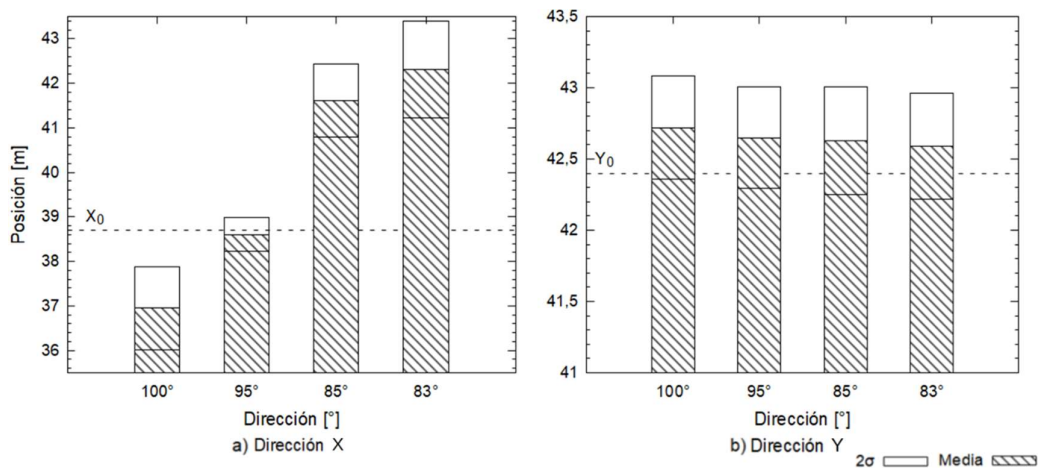


Figura 3.7. Estadística de la respuesta dinámica del sistema FPV para la variación de la dirección de la corriente. a) Dirección X. b) Dirección Y. (Fuente: propia)

### *Aumento de masas suspendidas*

Para comprobar que aumentando las masas de anclaje es posible aumentar los parámetros de carga del sistema, se eleva la masa  $m$  y  $m_6$  descritas en la sección 2.2.3 a 1500 kg y 1725 kg respectivamente. El radio de los pontones de las pasarelas se eleva a 27 cm para no comprometer la flotación del sistema.

La velocidad máxima admisible para la corriente con esta configuración es 0,5 m/s (ver respuestas dinámicas en el Anexo III). El rango de dirección de la corriente, para una velocidad de 0,2 m/s se eleva a  $100 - 80^\circ$  para esta nueva configuración (ver respuestas dinámicas en el Anexo III).

#### **3.1.4 Tensiones en líneas de anclaje**

Las cargas obtenidas presentan un comportamiento oscilatorio. Para obtener un valor referencial se promedian el 25% de los valores más altos obtenidos para cada línea, ver Tabla 3.4, los valores alcanzan un máximo 20,5 KN.

Tabla 3.4. Tensión en las líneas de anclaje.

Línea	1	2	3	4	5	6
Tensión [N]	15921	20455	16904	19126	18209	16420

(Fuente: propia)

### **3.2 Análisis de resultados**

El modelo planteado posee estabilidad para las condiciones de carga del embalse de Mazar, probando que el uso de poleas es una posible solución a un problema de anclaje complejo como el del caso de estudio (amplia variación del nivel).

El espectro es el parámetro que contribuye en mayor medida a la carga sobre la estructura, además es el que genera una respuesta oscilatoria al ser una fuerza impulsiva.

De manera general, si se aumentan las magnitudes de carga, la estructura se desplaza más en cualquiera de las dos direcciones (X, Y), alcanzando una velocidad de corriente máxima de 0,2 m/s y un rango de su dirección de  $100^\circ - 83^\circ$ . Para lograr alcanzar valores superiores de carga se debe aumentar las masas suspendidas.

#### **3.2.1 Dimensionamiento de elementos principales**

Los elementos de interés para esta sección son: las líneas de anclaje, pontones, eje de las poleas y un modelo estructural preliminar de pasarelas.

Para las líneas de anclaje se escoge la cuerda tipo Marine Ace SC de diámetro 18 mm, soporta una carga de 49,3 KN [34] y presenta un factor de seguridad de más de 2 frente a la carga máxima de 20,5 KN (ver Tabla 3.4).

#### *Pontones*

La pared del pontón debe resistir la presión hidrostática del agua, ver Figura 3.8. El problema es asumido como el caso de un tanque de pared delgada, con una presión

externa (P), asumida como P<sub>2</sub> (presión hidrostática del punto más bajo del pontón, cuando este se encuentre hundido por completo).

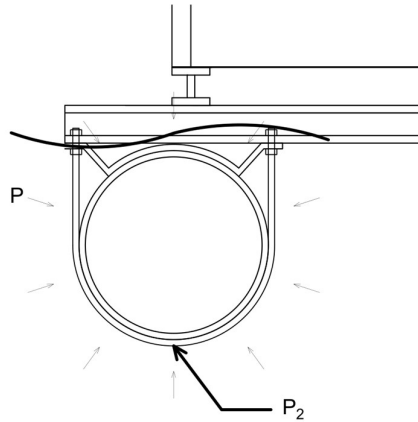


Figura 3.8. Simplificación del estado de carga de los pontones.  
(Fuente: propia)

La presión hidrostática se define por la Ecuación 3.1, donde ρ es la densidad del fluido, g es la gravedad y h es la altura de la columna de agua sobre el punto de análisis [20].

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad (3.1)$$

Los esfuerzos soportados por cada pontón son estimados empleando las Ecuaciones 3.2 y 3.3 [35], donde σ<sub>l</sub> es el esfuerzo axial, σ<sub>c</sub> es el esfuerzo radial, P es la diferencia de presiones entre el interior y exterior del tanque, r es el radio interno del cilindro y t es el espesor de la pared (asumido inicialmente en 2 mm).

$$\sigma_l = \frac{P \cdot r}{2t} \quad (3.3)$$

$$\sigma_c = \frac{P \cdot r}{t} \quad (3.4)$$

Los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 3.5, donde se obtienen esfuerzos máximos radiales de 13,17 MPa para las pasarelas y de 6,12 MPa para los bloques fotovoltaicos.

Tabla 3.5. Esfuerzos de compresión en los pontones.

Pontones	Presión hidrostática [Pa]	Esfuerzo axial [MPa]	Esfuerzo radial [MPa]
Pasarela	4890	6,59	13,17
Bloque	2347	3,06	6,12

(Fuente: propia)

La resistencia a la compresión del polietileno es de alrededor de 20 MPa [36], con lo que se verifica que los pontones cumplirán su función. Si se aumenta el espesor de los

pontones a 3 mm, el esfuerzo máximo de 13,17 MPa disminuye a 8,75 MPa, pasando de un factor de seguridad de 1,5 a 2,3.

La resistencia de los pontones a la flexión se comprueba en el Anexo IV, donde se obtienen valores de esfuerzo de 2,65 MPa para las pasarelas y 974 KPa para el bloque FPV. Estos valores resultan significativamente bajos comparados con la resistencia a la tracción del polietileno (20 – 30 MPa).

### *Eje de la polea*

El componente mecánico se analiza estáticamente, debido a que es un componente mecánico que experimentará un bajo número de ciclos durante su vida útil. La Figura 3.9 representa el eje asumido, con cojinetes en los puntos A y E, un hombro en la sección B y para asegurar la polea una chaveta en la sección D. Se considera el valor máximo de tensión en las líneas de anclaje (20455 N).

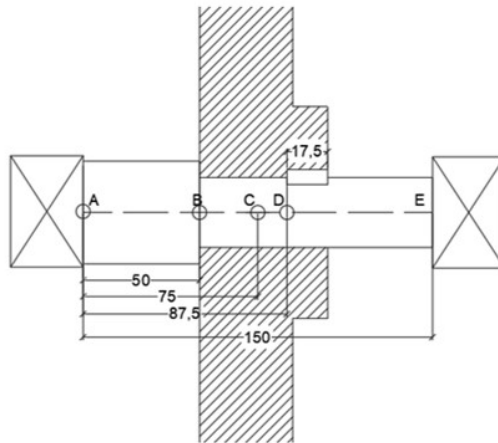


Figura 3.9. Representación esquemática del eje de las poleas.  
(Fuente: Propia)

La Figura 3.10 presenta las proyecciones de la carga en los planos XY y XZ, las reacciones en los apoyos y los diagramas de cortante y momento flector. Donde el punto máximo de carga se encuentra en la sección C, sin embargo, las secciones B y D resultan importantes para el análisis debido a que poseen concentradores de esfuerzo.



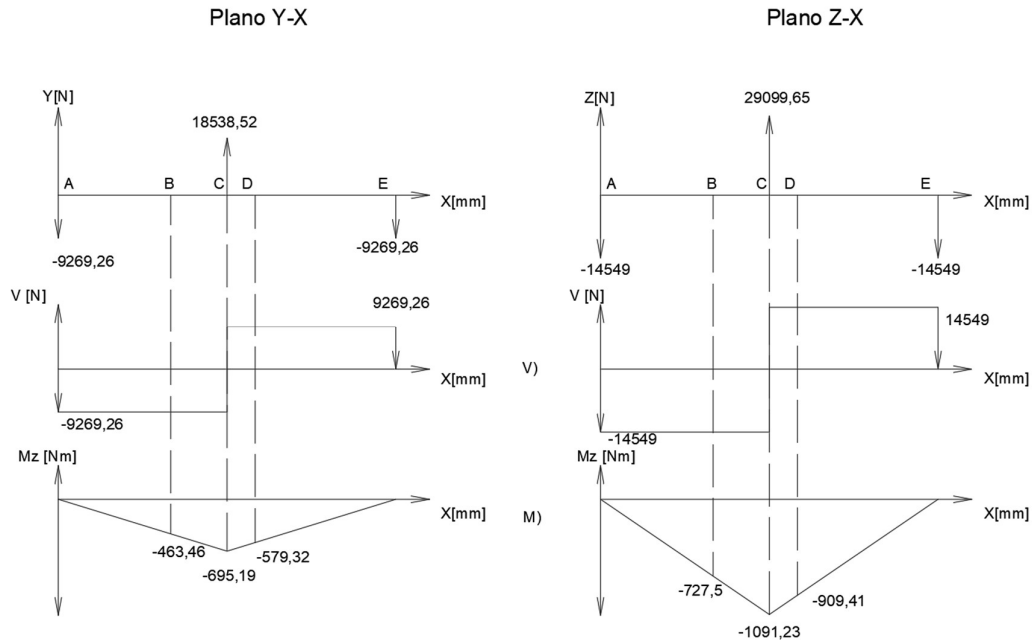


Figura 3.10. Diagramas de cortante y momento flector para el eje de las poleas.  
(Fuente: Propia)

Para la primera iteración para encontrar el diámetro del eje se consideran las siguientes relaciones para concentradores de esfuerzos por flexión, ver Tabla 3.6 [35].

Tabla 3.6. Concentradores de esfuerzo a flexión en un eje cilíndrico.

Sección	D/d	r/d	Kt
Hombro (B)	1,5	0,05	2,1
Cuñero fresado (D)	-	0,02	2,2

(Fuente: Propia)

Las Ecuaciones 3.5 y 3.6 [35] se emplean bajo la consideración de flexión pura y el criterio de falla de energía de la distorsión, para las secciones B y D.

$$\sigma_{max} > \frac{S_y}{n} \quad (3.5)$$

$$\left( \frac{32K_t M}{\pi d^3} \right) > \frac{S_y}{n} \quad (3.6)$$

Donde

- $S_y$  es la resistencia a la fluencia
- $\sigma_{max}$  es el esfuerzo de Von Mises simplificado para el caso
- $n$  es el coeficiente de seguridad
- $K_t$  es el factor de concentración de esfuerzos
- $M$  es el momento flector total

Con un factor de seguridad de 2 y un material AISI 1018CD ( $S_y = 370$  MPa) se obtiene un diámetro mínimo de 47 y 50 mm para las secciones B y D respectivamente. El diámetro mínimo de eje de la polea es de 50 mm.

### Selección de perfil estructural en pasarelas

Se considera como conjunto de análisis a la hilera de 3 pasarelas (estructura 9, 10 y 11, ver Figura 2.5). En la Figura 3.11 se representa la estructura de la pasarela en una armadura tipo Warren (con la longitud total de 84,8 m) y la distribución de 18 líneas de amarre, 3 de anclaje y 9 fenders.

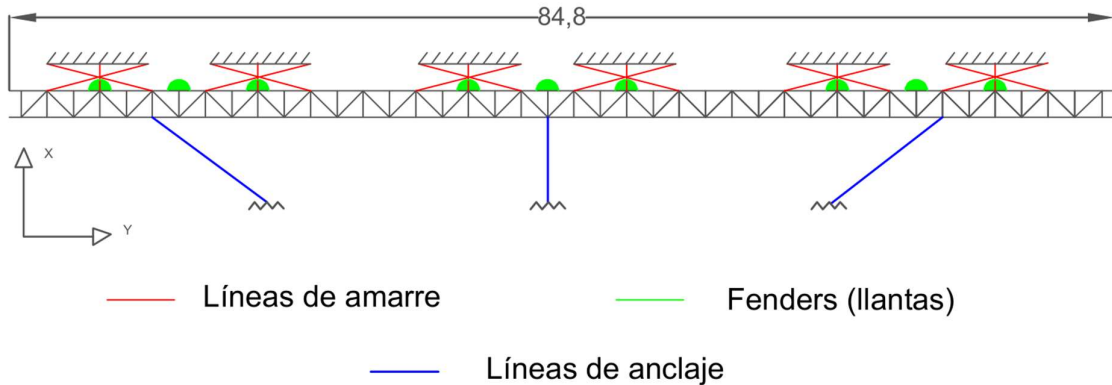


Figura 3.11. Modelo estructural.  
(Fuente: Propia)

La Figura 3.12 muestra las cargas que experimentará la armadura, las tensiones de amarre han sido consideradas solo en dirección X debido a que en Y son mínimas. Las cargas debidas a las condiciones ambientales (viento, corriente y olas) han sido modeladas como una carga distribuida. Las líneas de anclaje han sido sustituidas por dos articulaciones y un apoyo simple.

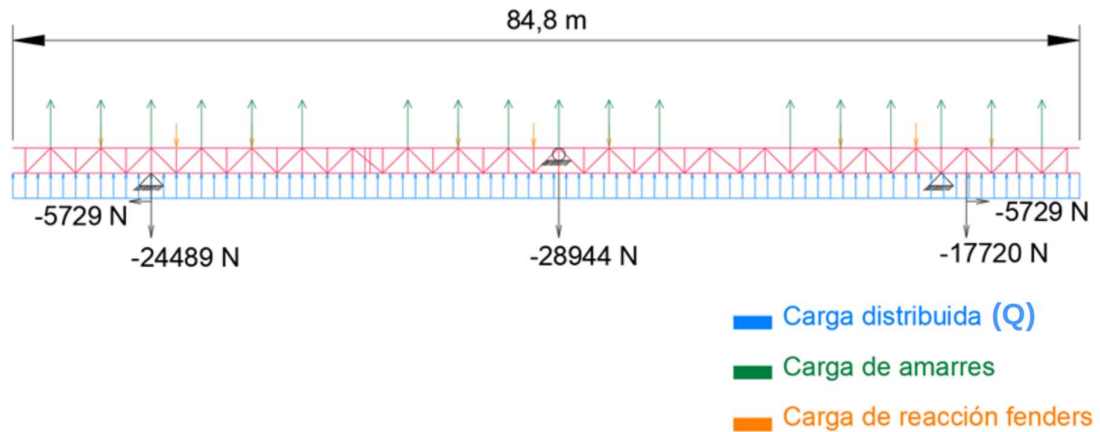


Figura 3.12. Cargas del modelo estructural.  
(Fuente: Propia)

Para determinar la carga distribuida se asume un escenario cuasi-estático. Donde empleando la Ecuación 3.7 es posible obtener una carga distribuida de 552 N/m.

$$Q = \frac{F_{Tx}}{L} \quad (3.7)$$

Donde:

- $Q$  Fuerza distribuida debida a las cargas ambientales
- $F_{Tx}$  Fuerza de restitución x (Proyecciones de las tensiones en los anclajes)
- $L$  Longitud total de la estructura (84,8 m)

La carga para cada amarre es 3966 N, obtenida dividiendo la tensión máxima de la estructura 11 (Anexo V) entre las 6 líneas de la Figura 3.12. La fuerza de los fenders es obtenida de manera similar con un valor de 968 N.

Para estimar el esfuerzo en los elementos del modelo estructural se emplea el software SAP 2000 con un perfil "I" M4x6<sup>f</sup> y la resistencia del acero A36. La única carga considerable es la axial para todos los elementos de la estructura, ver Figura 3.13. Se puede observar una distribución de esfuerzos de tracción y compresión, con valores de 64 MPa y 41 MPa respectivamente.

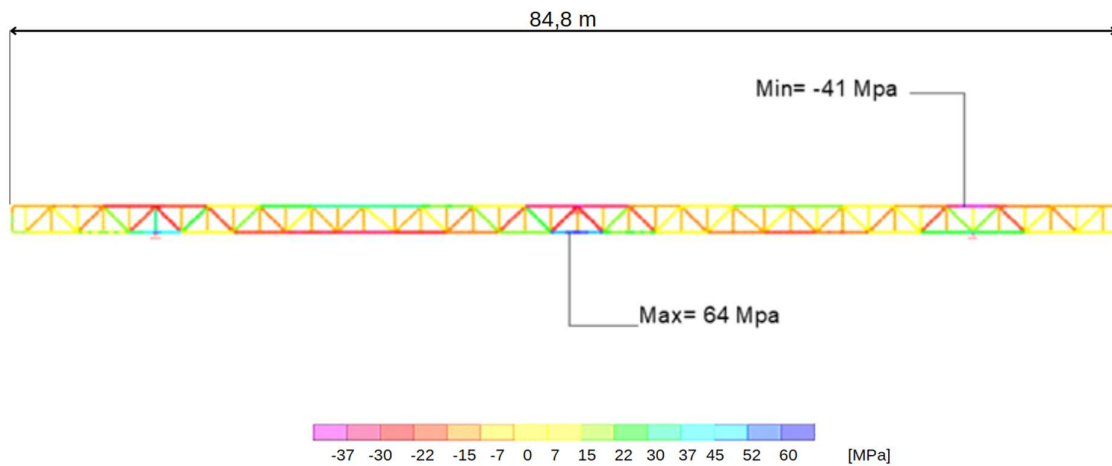


Figura 3.13. Esfuerzos axiales [MPa] en el modelo estructural, SAP 2000.  
(Fuente: Propia)

En la Figura 3.14 se obtiene la relación entre el esfuerzo y la resistencia del acero A36 (factor de uso). Es claro que no existen elementos sometidos a cargas críticas, pues se mantiene valores menores a 0,5.

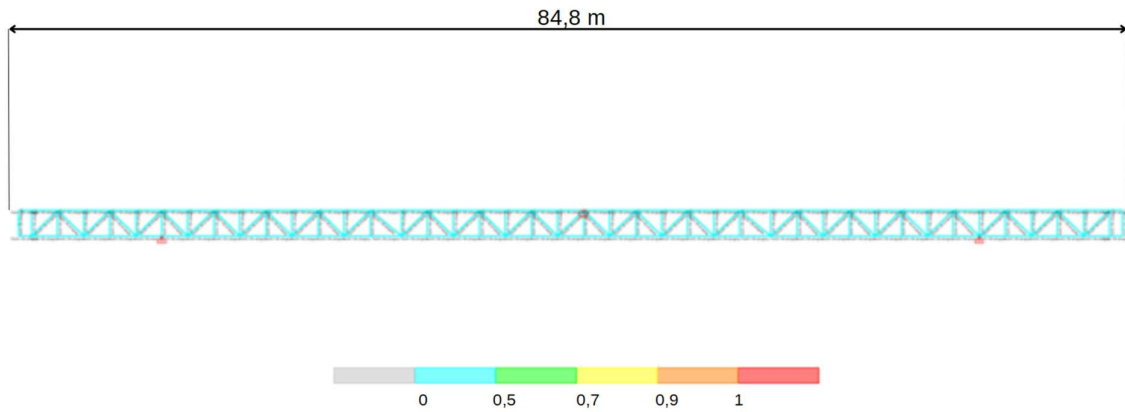


Figura 3.14. Factor de uso de elementos estructurales, SAP 2000.  
(Fuente: Propia)

El factor de seguridad de la armadura considerando el esfuerzo máximo obtenido y la resistencia del acero A36 (250 MPa) es de 3,9.

## **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **4.1 Conclusiones**

Se ha obtenido un modelo conceptual FPV con base en la información de proyectos similares. El modelo se compone de 9 pasarelas que permiten el ingreso a la estructura, 2 bloques que albergan los paneles fotovoltaicos y un sistema de anclaje autorregulable con poleas y masas suspendidas.

El modelo conceptual ha sido modelado numéricamente, bajo las limitaciones de Ansys Aqwa, para analizar sus respuestas dinámicas frente a las cargas de viento, corriente y oleaje. Se han considerado 9 escenarios de simulación con base en 3 posiciones respecto al nivel del embalse (mínimo, medio y máximo) y 3 posibles direcciones de viento. El sistema se mantiene estable para todos los escenarios demostrando su factibilidad técnica.

La configuración del sistema de anclaje mantiene al módulo FPV estable para todos los escenarios de simulación. Además, se prueba que para condiciones de carga superiores como por ejemplo una mayor velocidad de corriente, basta con aumentar el valor de las masas suspendidas por las poleas para alcanzar la estabilidad del sistema. Sin embargo, el aumento de masas implicaría un nuevo diseño de los elementos del sistema.

Se ha seleccionado y dimensionado preliminarmente las cuerdas de anclaje, los pontones, el eje de las poleas y el perfil estructural que conforma a las pasarelas.

La metodología establecida en este proyecto permite estudiar un modelo FPV en embalses con una amplia variación del nivel (34,8 m para el caso de estudio). El trabajo desarrollado es un aporte al desarrollo de conocimiento para aplicaciones de sistemas FPV a nivel nacional e internacional.

### **4.2 Recomendaciones**

El estudio en Ansys Aqwa indica que el modelo FPV es estable para las condiciones de carga consideradas en este proyecto. Sin embargo, es importante construir un banco de pruebas para validar los resultados del modelo numérico.

Este trabajo no se enfoca específicamente en la caracterización de las cargas de Mazar. Por ello se recomienda emplear valores de altura de ola, periodos pico y velocidad de corriente medidos para el sitio de estudio, además de un espectro de viento.

Para continuar con el desarrollo de este trabajo se debería llevar a cabo un estudio estructural para dimensionar detalladamente todos los miembros del modelo FPV.

## Referencias Bibliográficas

- [1] P. A. Owusu y S. Asumadu-Sarkodie, “A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation”, *Cogent Eng.*, vol. 3, núm. 1, p. 1167990, dic. 2016, doi: 10.1080/23311916.2016.1167990.
- [2] O. Edenhofer *et al.*, Eds., *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. doi: 10.1017/CBO9781139151153.
- [3] A. García Nieto, “Ficha Sector. Centrales hidroeléctricas en Ecuador 2018”. ICEX España Exportación e Inversiones, 2018. Consultado: el 10 de diciembre de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.icex.es/icex/es/navegacion-principal/todos-nuestros-servicios/informacion-de-mercados/paises/navegacion-principal/el-mercado/estudios-informes/DOC2018786164.html?idPais=EC>
- [4] J. Constante Segura y E. Palacios Chacón, *El recurso solar para generación de energía*, vol. 1. Quito Ecuador: Editorial Universitaria Abya-Yala, 2014.
- [5] “Solar energy”, *International Renewable Energy*, 2022 de 2011. <https://www.irena.org/solar> (consultado el 10 de diciembre de 2021).
- [6] S. Hegedus y A. Luque, “Achievements and Challenges of Solar Electricity from Photovoltaics”, en *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, John Wiley & Sons, Ltd, 2010, pp. 1–38. doi: 10.1002/9780470974704.ch1.
- [7] S. Pašalić, A. Akšamović, y S. Avdaković, “Floating photovoltaic plants on artificial accumulations — Example of Jablanica Lake”, en *2018 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, jun. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/ENERGYCON.2018.8398765.
- [8] M. Rosa-Clot y G. M. Tina, “Chapter 5 - The Floating PV Plant”, en *Submerged and Floating Photovoltaic Systems*, M. Rosa-Clot y G. M. Tina, Eds. Academic Press, 2018, pp. 89–136. doi: 10.1016/B978-0-12-812149-8.00005-3.
- [9] K. Trapani y M. Redón Santafé, “A review of floating photovoltaic installations: 2007–2013”, *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol. 23, núm. 4, pp. 524–532, 2015, doi: 10.1002/pip.2466.
- [10] M. Smyth, J. Russell, y T. Milanowski, *Solar Energy in the Winemaking Industry*. London: Springer London, 2011. doi: 10.1007/978-0-85729-844-7.
- [11] P. Ranjbaran, H. Yousefi, G. B. Gharehpetian, y F. R. Astaraei, “A review on floating photovoltaic (FPV) power generation units”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 110, pp. 332–347, ago. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.05.015.
- [12] Z. Dobrotkova, *Where Sun Meets Water: Floating Solar Handbook for Practitioners (English)*, vol. 4. Washington, D.C.: World Bank Group, 2019. Consultado: el 13 de diciembre de 2021. [En línea]. Disponible en: <http://documents.worldbank.org/curated/en/418961572293438109/Where-Sun-Meets-Water-Floating-Solar-Handbook-for-Practitioners>
- [13] M. Abdolzadeh y M. Ameri, “Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by spraying water over the front of photovoltaic cells”, *Renew. Energy*, vol. 34, núm. 1, pp. 91–96, ene. 2009, doi: 10.1016/j.renene.2008.03.024.
- [14] A. M. Pringle, R. M. Handler, y J. M. Pearce, “Aquavoltaics: Synergies for dual use of water area for solar photovoltaic electricity generation and aquaculture”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 80, pp. 572–584, dic. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.191.
- [15] Marco Antonio Esteves Galdino y Marta Maria de Almeida Olivieri, “Some Remarks about the Deployment of Floating PV Systems in Brazil”, *J Electr. Eng.*, vol. 5, núm. 1, ene. 2017, doi: 10.17265/2328-2223/2017.01.002.
- [16] M. Redón Santafé, J. B. Torregrosa Soler, F. J. Sánchez Romero, P. S. Ferrer Gisbert, J. J. Ferrán Gozálviz, y C. M. Ferrer Gisbert, “Theoretical and experimental analysis of a floating photovoltaic cover for water irrigation reservoirs”, *Energy*, vol. 67, pp. 246–255, abr. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.01.083.

- [17] R. Cazzaniga, M. Cicu, M. Rosa-Clot, P. Rosa-Clot, G. M. Tina, y C. Ventura, "Floating photovoltaic plants: Performance analysis and design solutions", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, pp. 1730–1741, Enero 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.269.
- [18] Y.-G. Lee, H.-J. Joo, y S.-J. Yoon, "Design and installation of floating type photovoltaic energy generation system using FRP members", *Sol. Energy*, vol. 108, pp. 13–27, oct. 2014, doi: 10.1016/j.solener.2014.06.033.
- [19] S. H. Kim, Y. S. Won, S. H. Seo, J. K. Park, y S. J. Yoon, "Fabrication and Construction of Floating Photovoltaic Energy Generation Structures Using Fiber Reinforced Polymer Plastic (FRP) Members", *Key Eng. Mater.*, vol. 730, pp. 613–619, 2017, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.730.613.
- [20] F. White, *Mecánica de Fluidos*, 7a ed. New York: Mc Graw Hill, 2011.
- [21] A. Spera y T. R. Richards, "MODIFIED POWER LAW EQUATIONS FOR VERTICAL WIND PROFILES", p. 12, jun. 1979.
- [22] J. M. G. Díaz, "Cuantificación del perfil del viento hasta 100 m de altura desde la superficie y su incidencia en la climatología eólica", p. 22, 2013.
- [23] AENOR, "Acciones generales - Acciones de Viento." UNE-EN 1991-1-4 Eurocódigo, 2007.
- [24] A. Yarde, L. Banyard, y N. Allsop, "Reservoir dams: wave conditions, wave overtopping and slab protection", HR Wallingford, 1996.
- [25] R. Marsal y D. Resendiz, *Presas de tierra y enrocamiento*. Mexico: Impresiones editoriales, 1983.
- [26] A. Kirby, M. MacDonald, y K. Dempster, "Wave surcharge on long narrow reservoirs-a reality check", en *14th conference of the British Dam Society*, London, 2006, p. 13.
- [27] J. Journée y W. Massie, *Offshore Hydromechanics*, 1a ed. Delft University of Technology, 2001.
- [28] 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, núm. 3, pp. 124–134, sep. 2018, doi: 10.5574/JAROE.2018.4.3.124.
- [29] Ansys Inc., "AQWA Reference Manual". 2012.
- [30] INAMHI, "Anuario metereológico", INAMHI, Quito, Ecuador, 2014. Consultado: el 5 de diciembre de 2021. [En línea]. Disponible en: [https://www.inamhi.gob.ec/docum\\_institucion/anuarios/meteorologicos/Am%202011.pdf](https://www.inamhi.gob.ec/docum_institucion/anuarios/meteorologicos/Am%202011.pdf)
- [31] E. Simiu y R. H. Scanlan, *Wind effects on structures: fundamentals and applications to design*, 3rd ed. New York: John Wiley, 1996. [En línea]. Disponible en: <http://lib.ugent.be/catalog/rug01:001267836>
- [32] O. Alvarez, "DETERMINACIÓN DEL REGIMEN MEDIO DE OLEAJE EN LA DESEMBOCADURA DEL RÍO LEÓN, BAHÍA COLOMBIA", 2012.
- [33] O. Oritsland, *Marintek*, vol. 3. Trondheim: Springer, 1989.
- [34] ASHIMORI, "Syntetic Fover Rope". 3-10-18, Kitahorie, Nishi-Ku, osaka City, 2018. [En línea]. Disponible en: [www.ashimori.co.jp](http://www.ashimori.co.jp)
- [35] R. Budynas y K. Nisbett, *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*, 8a ed. México: Mc Graw Hill, 2008.
- [36] "Compressive Strength Testing of Plastics", *MatWeb*. <https://www.matweb.com/reference/compressivestrength.aspx> (consultado el 31 de marzo de 2022).

## ANEXO I. MASA ESTIMADA PARA EL MODELO CONCEPTUAL

La masa preliminar del bloque fotovoltaico es obtenida con base en las longitudes necesarias de cada perfil u elemento. Se seleccionan pesos/metro de elementos disponibles en el país y de acero común, con dimensiones moderadas para el modelo. Esto debido a que al ser un modelo conceptual no se cuenta con valores de espesor o resistencia determinados.

Elementos que conforman el bloque PV						
Elemento	Denominación	Cantidad	Longitud unitaria	Longitud total [m]	Masa [kg/m]	Masa total [kg]
Platina	-	128	74,4	9523,2	1,3	12380,16
Perfil Omega	-	38	84,4	3207,2	4,35	13951,32
Paneles PV	-	2368	-	-	26,5	62752
Elemento	Cantidad	Área transversal [m <sup>2</sup> ]	Longitud unitaria [m]	Longitud total [m]	Densidad [kg/m]	Masa total [kg]
Pontones	74	0,00075	84,8	6275,2	935	4400,48
Chapa metálica	31	0,00105	74,4	2306,4	7800	18866,35
Total bloque PV						112350,32

El volumen sumergido necesario se obtiene empleando la Ecuación 1.1. Donde considerando un factor de seguridad de 2,5 se obtiene una masa de 280875,8 kg.

$$m * g = \rho * g * V_{sumergido}$$

$$V_{sumergido} = n * \pi * r^2 * l$$

Donde n es el número de pontones (74) y l la longitud (84,8 m), el radio de los pontones obtenido es 0,12 m.

La masa de las pasarelas se obtiene de manera similar al bloque fotovoltaico:

Elementos que conforman la pasarela						
Elemento	Denominación	Cantidad	Longitud unitaria [m]	Longitud total [m]	Masa [kg/m]	Masa total [kg]
Perfil IPN	Transversales	28	2,00	56,00	8,32	465,92
Perfil IPN	Longitudinales	2	28,00	56,00	8,32	465,92
Perfil IPN	Cruzados	28	2,23	62,44	8,32	519,50
Tubo redondo	-	30	1,00	30,00	2,74	82,20
Platina	-	56	0,60	39,20	1,90	74,48
Elemento	Cantidad	Área transversal [m <sup>2</sup> ]	Longitud unitaria [m]	Longitud total [m]	Densidad [kg/m]	Masa total [kg]
Chapa metálica	1	0,00400	28,00	0,112	7800,00	873,60
Pontones	2	0,00468	28,00	56,00	935,00	245,31
Total Pasarela [kg]						2726,93

El radio para los pontones de la pasarela se obtiene empleando las mismas ecuaciones que para el bloque PV. En la pasarela se debe considerar además la masa del anclaje más pesado (1828 kg, sección 2.2.3). Considerando un factor de seguridad de 2,5 y los dos pontones de 28 m de la pasarela se obtiene un radio de 0,25 m.



## ANEXO II. NÚMERO DE REYNOLDS PARA LOS PONTONES

El número de Reynolds se calcula con la Ecuación 1. Se considera el efecto del espectro y la corriente tomando la velocidad ( $u$ ) como la suma de la velocidad de corriente y la velocidad de olas ( $V$ ) estimada con la Ecuación 2.

$$R_e = \frac{u \cdot D}{\nu} \quad (1)$$

Donde:

- $u$  es la velocidad característica
- $D$  es la longitud característica
- $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido ( $10^{-6}$  Pa.s)

$$V = a \cdot \omega \quad (2)$$

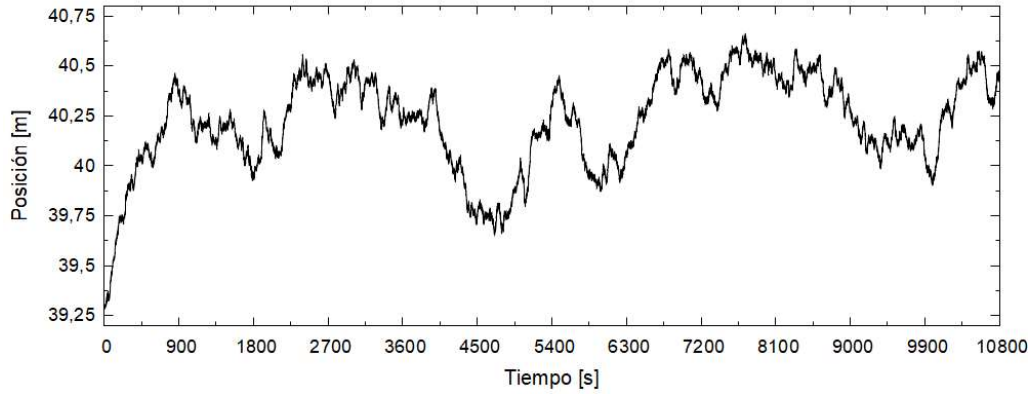
Donde:

- $a$  es la amplitud de ola (0,035 m)
- $\omega$  es la frecuencia del espectro (3,1 rad/s)
- $V$  es la velocidad de olas

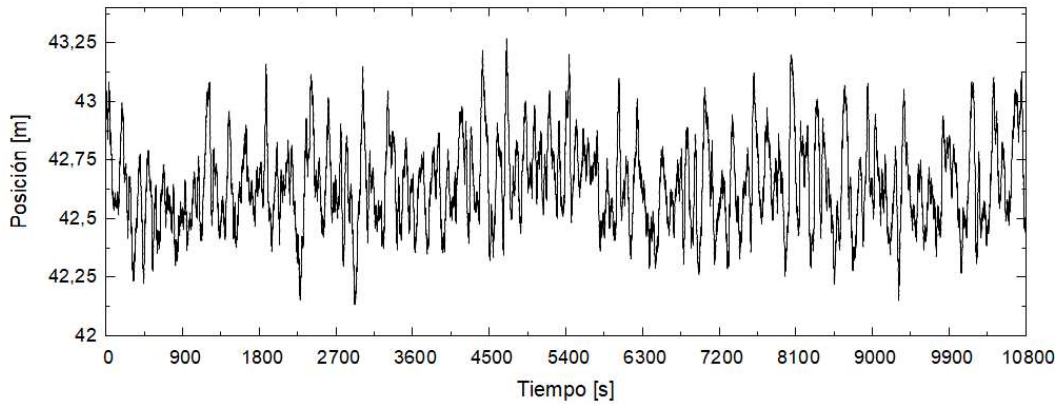
El número de Reynolds estimado para los pontones de la pasarela es 45600 ( $D = 0,5$  m) y 95000 para los pontones del bloque ( $D = 0,24$ ).

### ANEXO III. RESPUESTA DINÁMICA DEL MÓDULO FPV.

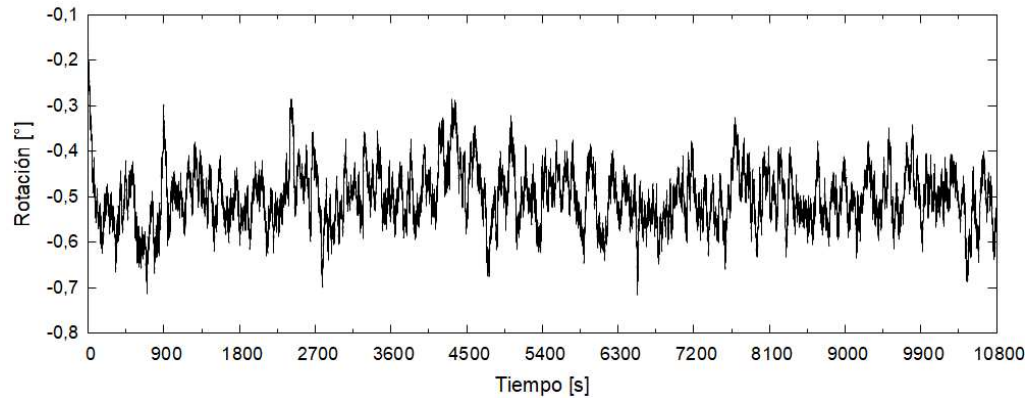
Las respuestas de traslación en el plano XY y la rotación alrededor del eje Z del modelo se encuentran en las siguientes figuras.



Respuesta dinámica en la dirección X, escenario 6.  
(Fuente: propia)

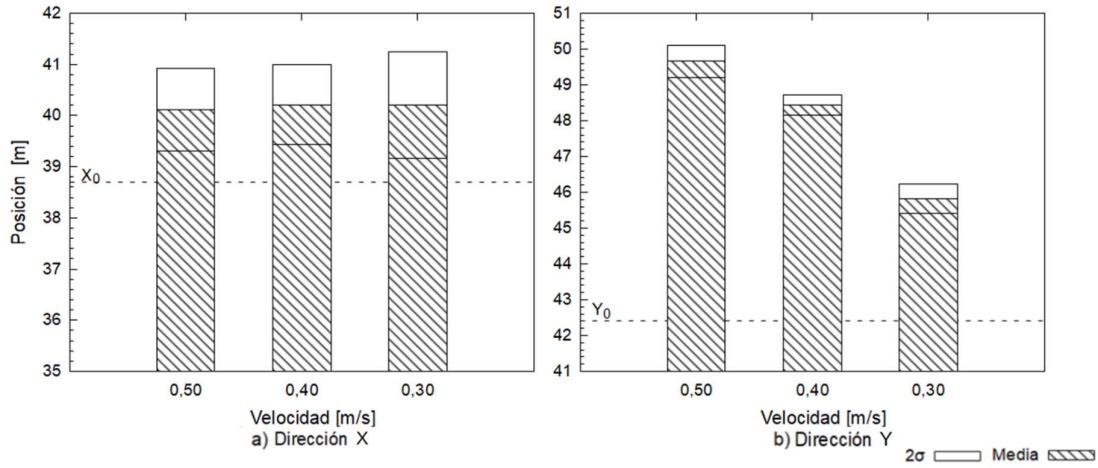


Respuesta dinámica en la dirección Y, escenario 6.  
(Fuente: propia)



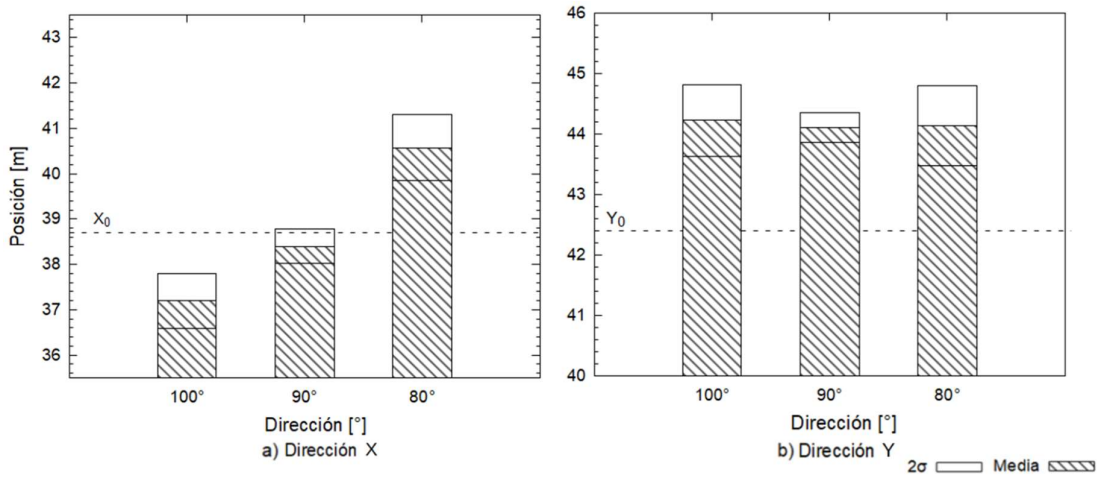
Respuesta dinámica alrededor de Z, escenario 6.  
(Fuente: propia)

La respuesta del sistema al aumentar los valores de las masas de anclaje bajo una velocidad de 0,5 m/s se presenta en la siguiente figura.



Estadística de la respuesta dinámica de la planta FPV para velocidades de hasta 0,5 m/s. a) Dirección X. b) Dirección Y. (Fuente: propia)

Al aumentar los valores de masas de anclaje la dirección de la corriente puede variar en un rango de 100 – 80°, con una velocidad media de 0,2 m/s de corriente. La respuesta del sistema se encuentra en la siguiente figura.



Estadística de la respuesta dinámica de la planta FPV para direcciones críticas. a) Dirección X. b) Dirección Y.

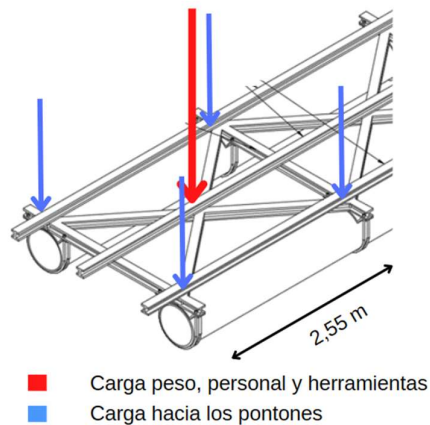
(Fuente: propia)

## ANEXO IV. FLEXIÓN SOBRE LOS PONTONES

La carga que soportan los pontones es la suma del peso de la estructura, el personal de mantenimiento y las herramientas/repuestos que pudieran transportarse.

Se asume que la carga se ubicará centrada y que se repartirá de manera equitativa a todos los puntos de apoyo sobre los pontones.

### *Pasarela*



El peso de la estructura es asumido en 248 Kg, considerando la proporción con respecto al total de la pasarela (2727 Kg). Para el personal de mantenimiento se considera el peso de 4 personas promedio (4 x 90 Kg) y 50 Kg para el peso de herramientas.

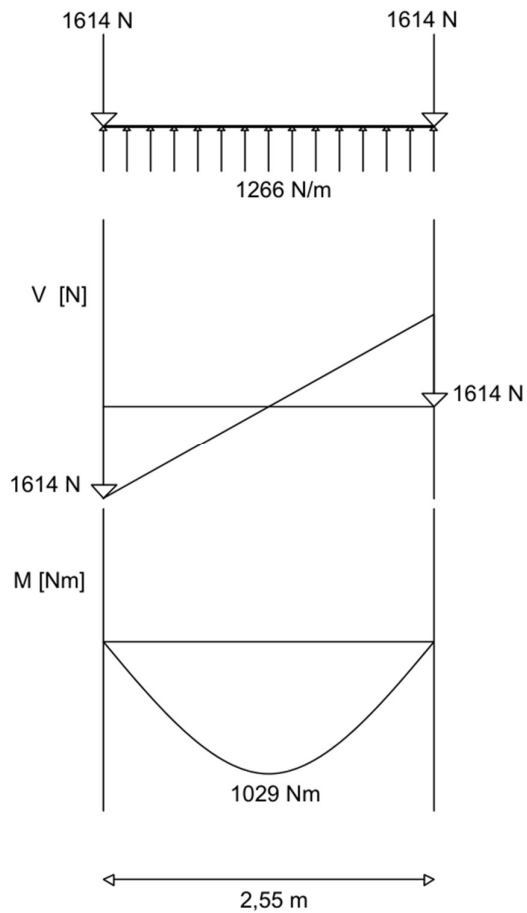
El esfuerzo máximo de flexión se obtiene empleando la Ecuación 3.

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I} \quad (3)$$

Donde:

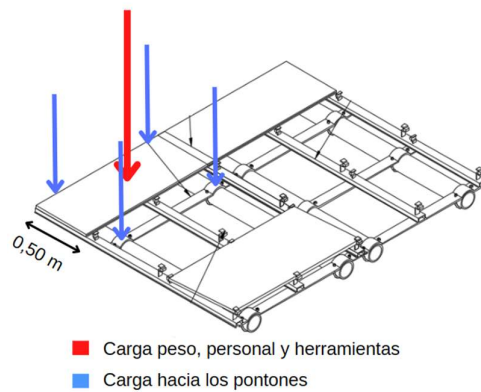
- $M$  es el momento flector máximo
- $c$  es la distancia desde el centroide hasta el punto más lejano de la sección
- $I$  es el valor de inercia de área de la sección

El valor total de carga para la sección de análisis de la pasarela es de 658 Kg que se asume se reparte equitativamente hacia los apoyos sobre los pontones (164,5 Kg). La fuerza de flotación es asumida como una carga distribuida que mantiene el equilibrio. En la siguiente figura se presenta el diagrama de cuerpo libre del pontón y los diagramas de fuerza cortante y momento flector.



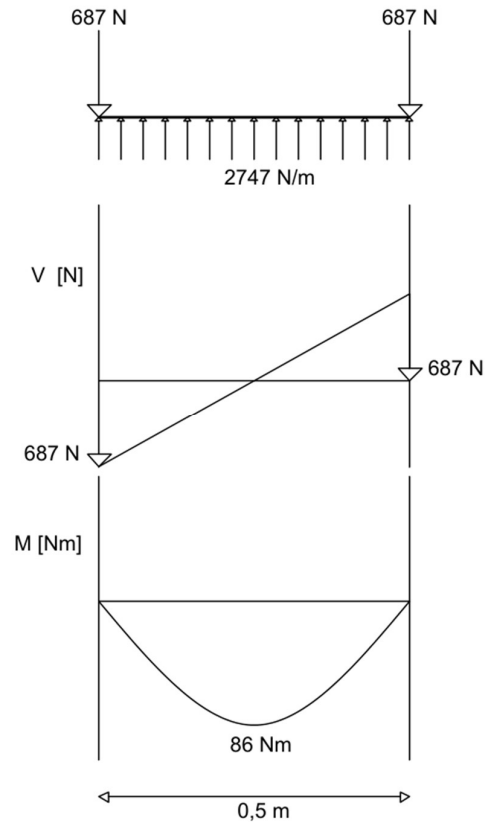
Empleando el momento flector máximo (1029 Nm), el radio de 0,25 m y el espesor de 2 mm del pontón en la Ecuación 3 se obtiene un esfuerzo máximo de 2,65 MPa.

### Bloque FPV



El peso de la estructura se asume de manera similar a la pasarela, con un valor de 50 Kg. Debido a que el espacio es reducido se considera solo el peso de 2 personas promedio y 50 Kg para el peso de herramientas.

El valor de carga para la sección de análisis del bloque FPV es de 280 Kg, la repartición del peso hacia los pontones es de 70 Kg y la fuerza de flotación es calculada de manera similar al caso de la pasarela. En la siguiente figura se presenta el diagrama de cuerpo libre del pontón y los diagramas de fuerza cortante y momento flector.



Empleando la Ecuación 3, el radio de 0,12 m y el espesor de 2 mm se obtiene un esfuerzo máximo de 974 KPa.

## ANEXO V. TENSIONES DE LAS LÍNEAS DE AMARRE

Las tensiones de las líneas de amarre se encuentran en la siguiente tabla.

Estructura	Tensión [N]	Estructura	Tensión [N]
1	398	5	750,3
	370,4		753,4
	344,9		21837
	353,4	6	750,7
	29850		759,6
	29934		22512
2	395,9	7	746
	372,9		758,9
	343,6		22128
	355,4	9	652
	28136		633,9
	29714		20957
3	394,6	10	651
	374,5		638
	342,6		21364
	356,9	11	647,3
	28852		639,5
	30403		23798

(Fuente: propia)