



FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO Y ADAPTACIÓN DEL DISEÑO  
DE UN ROMPEOLAS PARA CAPTAR LA  
ENERGÍA QUE ES REDIRIGIDA Y  
APROVECHARLA EN LA GENERACIÓN DE  
ELECTRICIDAD

Trabajo final de graduación sometido a la consideración de la

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

como parte de los requisitos  
para aspirar al título y grado de

LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECÁNICA


**Melissa Piedra Láscarez**

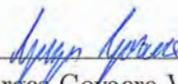
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio  
16 de febrero de 2023




## Hoja de tribunal

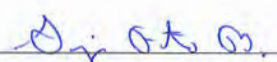
Este proyecto de graduación fue aceptado por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar por el grado y título de Licenciatura en Ingeniería Mecánica.

  
\_\_\_\_\_  
Director de la Unidad Académica  
Dr. Pietro Scaglioni Solano  
Escuela de Ingeniería Mecánica

  
\_\_\_\_\_  
Asesor director  
Dr. Georges Govaere Vicarioli  
Instituto de Investigaciones en Ingeniería

  
\_\_\_\_\_  
Asesor interno  
Mag. Juan Gabriel Monge Gapper  
Escuela de Ingeniería Mecánica

  
\_\_\_\_\_  
Asesor interno  
Lic. Denis Abarca Quesada  
Escuela de Ingeniería Mecánica

  
\_\_\_\_\_  
Evaluador externo  
Mag. Sergio Ferreto Brenes  
Escuela de Ingeniería Mecánica

  
\_\_\_\_\_  
Ponente  
Melissa Piedra Láscarez

## Agradecimientos

*Agradezco al equipo de IMARES-UCR por toda su colaboración, apoyo y guía en el desarrollo de esta investigación. A mis profesores que a lo largo de la carrera me brindaron las herramientas y conocimientos necesarios para convertirme en Ingeniera Mecánica. A mi familia por su apoyo incondicional y constante motivación, por impulsarme a creer que soy capaz.*

*“El mundo que hemos creado es un proceso de nuestro pensamiento. No se puede cambiar sin cambiar nuestra forma de pensar”*

*-Albert Einstein*

# Índice general

Hoja de tribunal . . . . .	ii
Agradecimientos . . . . .	iii
. . . . .	iv
Índice de ilustraciones . . . . .	viii
Índice de cuadros . . . . .	ix
Resumen . . . . .	x
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Descripción general . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. Objetivo general . . . . .	2
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	2
1.3. Justificación . . . . .	3
1.4. Antecedentes . . . . .	6
1.5. Alcance y limitaciones . . . . .	8
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>9</b>
2.1. Generalidades de los océanos . . . . .	9
2.2. Condiciones de oleaje . . . . .	14
2.3. Aprovechamientos energéticos . . . . .	18
2.4. Rompeolas o diques . . . . .	22
2.4.1. Estabilidad de un rompeolas . . . . .	25
2.5. Teoría lineal . . . . .	26
2.6. Análisis estadístico del oleaje a corto plazo . . . . .	29
2.7. Modelado hidráulico . . . . .	30
2.8. Turbinas hidráulicas . . . . .	38
<b>3. Metodología</b>	<b>43</b>
3.1. Etapa 1 Elaboración de la investigación teórica . . . . .	43
3.2. Etapa 2: Modelado a escala y pruebas . . . . .	43
3.3. Etapa 3 Viabilidad del proyecto. . . . .	53
<b>4. Resultados</b>	<b>54</b>
4.1. Condiciones de oleaje . . . . .	54
4.2. Evaluación de los ensayos . . . . .	55
4.2.1. Descripción de los modelos y las modificaciones planteadas . . . . .	55
4.2.2. Analisis de la captación de agua . . . . .	61
4.2.3. Determinación del potencial energético . . . . .	63

4.2.4. Selección del tipo de convertor de energía . . . . .	65
4.2.5. Análisis de la estabilidad del rompeolas . . . . .	65
<b>5. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>68</b>
5.1. Conclusiones . . . . .	68
5.2. Recomendaciones . . . . .	70
<b>Bibliografía</b>	<b>73</b>
<b>Anexos</b>	<b>74</b>

# Índice de figuras

1.1. Modelo 3D del rompeolas original a escala real. Fuente: [SmithGroup, 2016] . . .	2
1.2. Producción bruta de energía 2019 . . . . .	4
1.3. Producción bruta de energía 2020 . . . . .	4
1.4. Producción bruta de energía 2021 . . . . .	5
2.1. Diagrama mareas . . . . .	11
2.2. Mapa corrientes marinas . . . . .	12
2.3. Clasificación del oleaje . . . . .	13
2.4. Tipos de espectro de oleaje . . . . .	14
2.5. Perfil velocidades Costa Pacífica de Costa Rica . . . . .	15
2.6. Potencia promedio multianual Pacífico Sur . . . . .	16
2.7. Energía total anual Pacífico Sur, 20 m . . . . .	17
2.8. Energía total anual Pacífico Sur, 50 m . . . . .	17
2.9. Represa La Rance . . . . .	18
2.10. Turbina Open Hydro . . . . .	19
2.11. Sistema Pelamis . . . . .	19
2.12. Proyecto Aqua Power . . . . .	20
2.13. Proyecto Islay . . . . .	20
2.14. Dispositivo de Enel Green Power . . . . .	21
2.15. Proyecto Undimotriz . . . . .	21
2.16. Proyecto Red Dragon . . . . .	22
2.17. Diagrama rompeolas . . . . .	22
2.18. Dique vertical . . . . .	23
2.19. Dique vertical ejemplo . . . . .	23
2.20. Dique mixto . . . . .	24
2.21. Dique mixto ejemplo . . . . .	24
2.22. Dique con espaldón . . . . .	24
2.23. Dique con espaldón ejemplo . . . . .	25
2.24. Perfil de velocidades . . . . .	29
2.25. Productos adimensionales . . . . .	36
2.26. Disco nutante . . . . .	38
2.27. Turbina Kaplan . . . . .	39
2.28. Turbina Francis Pura . . . . .	39
2.29. Turbina Francis Mixta . . . . .	39
2.30. Turbina Pelton . . . . .	40
2.31. Turbina Michell Banki . . . . .	40



2.32. Microturbina axial . . . . .	41
2.33. Turbina turgo . . . . .	41
3.1. Dimensionado de escala . . . . .	44
3.2. Proceso de lijado . . . . .	44
3.3. Canal de oleaje . . . . .	45
3.4. Modificación piezas . . . . .	46
3.5. Unión mangueras . . . . .	47
3.6. Esmeril . . . . .	48
3.7. Taladro . . . . .	48
3.8. Rampas . . . . .	49
3.9. Rampas . . . . .	49
3.10. Diagrama configuración del modelo . . . . .	49
3.11. Modelo real . . . . .	50
3.12. Proceso de ensamblaje y desensamblaje del molde . . . . .	51
3.13. Proceso de elaboración de la mezcla . . . . .	51
3.14. Máquina perforadora extractora de núcleos . . . . .	52
3.15. Máquina perforadora extractora de núcleos . . . . .	53
4.1. Gráfico de altura de ola vs número de ola . . . . .	54
4.2. Gráfico de periodo de ola vs número de ola . . . . .	55
4.3. Piezas para ensayo 1: configuración original . . . . .	56
4.4. Piezas para ensayo 1: configuración original . . . . .	56
4.5. Diagrama piezas para ensayo 2 . . . . .	57
4.6. Piezas para ensayo 2 . . . . .	58
4.7. Diagrama piezas para ensayo 3 . . . . .	59
4.8. Piezas para ensayo 3 . . . . .	59
4.9. Diagrama piezas para ensayo 4 . . . . .	60
4.10. Piezas para ensayo 4 . . . . .	60
4.11. Volumen recolectado, oleaje regular . . . . .	62
4.12. Volumen recolectado, oleaje irregular . . . . .	62
4.13. Caudal saliente, oleaje regular . . . . .	63
4.14. Caudal saliente, oleaje irregular . . . . .	64
4.15. Propuesta turbinas . . . . .	66
4.16. Coeficiente de reflexión . . . . .	66

# Índice de cuadros

2.1. Potencial energético . . . . .	16
2.2. Estadísticos del oleaje . . . . .	29
2.3. Clasificación turbinas . . . . .	42
3.1. Equipo ensayos . . . . .	45
3.2. Condiciones de ensayo . . . . .	45
3.3. Parámetros a medir . . . . .	46
3.4. Materiales y herramientas para elaborar la mezcla . . . . .	51
4.1. volumen de agua recolectado . . . . .	61
4.2. volumen de agua recolectado . . . . .	61
4.3. Coeficiente de estabilidad . . . . .	67
4.4. Coeficiente de estabilidad . . . . .	67

# Resumen

Se estudió el potencial energético de un rompeolas modular para determinar la viabilidad de desarrollar un proyecto de generación eléctrica a partir de la estructura. Se trabajó con una base de datos de oleaje de Cabo Blanco, Costa Pacífica, Costa Rica. Se elaboraron cuatro modelos para poner a prueba en un canal de olas. Durante los ensayos el caudal redistribuido fue almacenado y medido. Se determinó el potencial energético instantáneo y unitario del rompeolas. Se estima una producción anual de energía de  $54,49 \text{ kW/m}$ . Se propone una turbina de flujo axial como conversor para el sistema. La energía extraída por medio del rompeolas es directamente proporcional al caudal recolectado y este depende a su vez de la longitud del rompeolas. Adicionalmente se estudió la estabilidad del rompeolas. Al tratarse de una estructura doble propósito se disminuye el impacto ambiental en la zona ya que el área a intervenir es menor. Además, se podría economizar en costos de construcción. Otra característica positiva de la estructura es que puede servir de hábitat para organismos marinos que se adhieran a sus paredes. Esta investigación contribuye a las iniciativas de descarbonización ya que ofrece una solución alternativa al abastecimiento de electricidad. La energía undimotriz o energía de las olas es un recurso presente de forma permanente las 24 horas del día los 365 días del año lo cual la hace capaz de contribuir a la estabilidad y constancia de la matriz energética del país de una manera sostenible.

# Abstract

The energy potential of a modular breakwater was studied to determine the feasibility of developing an electricity generation project from the structure. Work was done with a wave database from Cabo Blanco, Pacific Coast, Costa Rica. Four models were developed to be tested in a wave channel. During the tests the redistributed flow was stored and measured. The instantaneous and unit energy potential of the breakwater was determined. An annual energy production of  $54.49 \text{ kW/m}$  is estimated. An axial flow turbine is proposed as a converter for the system. The energy extracted through the breakwater is directly proportional to the collected flow and this in turn depends on the length of the breakwater. Additionally, the stability of the breakwater was studied. As it is a dual-purpose structure, the environmental impact in the area is reduced since the area to be intervened is smaller. In addition, construction costs could be saved. Another positive feature of the structure is that it can serve as a habitat for marine organisms that adhere to its walls. This research contributes to decarbonization initiatives as it offers an alternative solution to electricity supply. Wave energy or wave energy is a resource that is permanently present 24 hours a day, 365 days a year, which makes it capable of contributing to the stability and constancy of the country's energy matrix in a sustainable way.

Cítese este trabajo como:

Piedra, M. (2023) [Estudio y adaptación del diseño de un rompeolas para captar la energía que es redirigida y aprovecharla en la generación de electricidad] Trabajo final de graduación de grado de Licenciatura. San Pedro de Montes de Oca: Universidad de Costa Rica.

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Descripción general

El presente trabajo final de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Mecánica tiene como objetivo estudiar la viabilidad de modificar el diseño de un rompeolas para que la energía que redirige sea aprovechable en un proyecto de generación de energía eléctrica, en las costas pacíficas de Costa Rica. Esta investigación figura dentro de la modalidad de trabajo final de graduación debido a que se construirá un modelo físico, el cual será sometido a pruebas en el laboratorio de Ingeniería Marítima de Ríos y Estuarios (IMARES).

La descarbonización de la matriz energética a nivel mundial es una de las líneas para mitigar el cambio climático, lo cual hoy más que nunca es de gran importancia debido a las catástrofes que se han registrado y se pronostican que se seguirán presentando. La generación eléctrica a partir de fuentes renovables caracteriza a Costa Rica a nivel mundial. Sin embargo, la mayoría de las fuentes renovables en las que se sustenta la matriz energética costarricense, a excepción de la energía geotérmica, son estacionales y esto genera una inestabilidad en el abastecimiento de electricidad. Por otro lado, la energía aprovechable en los océanos es constante y su potencial para generar electricidad es mayor que el de todas las fuentes renovables existentes en el país juntas [Zumbado et al., 2020].

Propiamente, este trabajo está enfocado en un sistema de rompeolas patentado, **Figura 1.1**. Esta estructura tiene como función disminuir la energía reflejada al océano, por medio de una redirección del flujo de agua. Se observó que la energía redirigida por el sistema podía llegar a tener alto potencial para la generación de electricidad. Para el estudio de lo descrito anteriormente se elaboró un modelo de rompeolas a partir de estas piezas con el fin de determinar si es posible que este sistema tenga un segundo propósito: convertir en energía eléctrica la energía redirigida del oleaje. Lo cual es más rentable económica y ambientalmente. Ya que, teniendo dos sistemas en uno se ocuparía menos espacio marítimo y el costo podría ser menor.

Como resultados finales se propone un sistema modificado capaz de cumplir con eficiencia el doble propósito de redirigir y captar la energía del oleaje, junto con el mecanismo conversor de energía que mejor se adapta a la aplicación. Para esto se utilizó principalmente el modelado físico y el procesamiento de datos en hojas de cálculo.

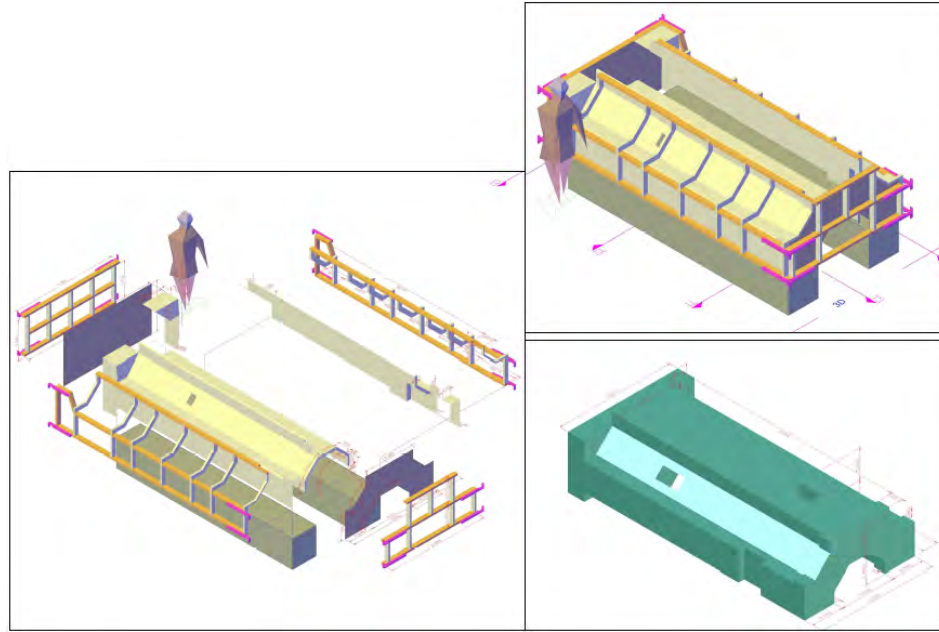


Figura 1.1: Modelo 3D del rompeolas original a escala real. Fuente: [SmithGroup, 2016]

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo general

Modificar la geometría de un rompeolas modular para redirigir el flujo de manera que pueda aprovecharse para la generación de energía eléctrica en las costas que dan al Océano Pacífico de Costa Rica.

### 1.2.2. Objetivos específicos

- Establecer las condiciones de oleaje de diseño según las características típicas del oleaje del Pacífico de Costa Rica que se utilizaran en la investigación,
- Evaluar el funcionamiento hidráulico de la configuración original de las piezas modulares para proponer y valorar las modificaciones necesarias para la canalización del flujo redirigido hacia un elemento convertidor de energía,
- Determinar el potencial de aprovechamiento energético a partir del flujo de agua redirigido para la evaluación de su viabilidad,
- Seleccionar el tipo de convertidor de energía óptimo a las condiciones de operación y al sistema que se va a proponer.

### 1.3. Justificación

La descarbonización de la matriz energética es una de las principales acciones a llevar a cabo con el objetivo de disminuir la emisión de gases de efecto invernadero para así desacelerar el cambio climático a nivel mundial. En la actualidad este tema se ha vuelto cada vez más importante ya que, la humanidad se encuentra en cuenta regresiva debido al aumento de la temperatura del planeta. Se pronostica que, para el 2050 la temperatura del globo aumentará 2 °C y las consecuencias de esto serán irreversibles [IPCC, 2018]. En 2018, el Grupo Intergubernamental de Expertos en el Cambio Climático, (IPCC) determinó que, si se logra limitar el aumento de la temperatura del planeta a solo 1,5 °C, en lugar de 2 °C muchos de los daños ocasionados por el cambio climático podrían evitarse, por ejemplo: se mantendría entre el 10 % y el 30 % de los arrecifes de coral. Para el 2100, el nivel del mar global crecería 10 cm menos. La probabilidad de tener en el verano un Océano Ártico sin hielo pasaría a ser una vez cada siglo en lugar de una vez cada década. Sin embargo, para lograr esto se requiere acciones rápidas y contundentes en: el sector industrial, el sector transportes, el sector energético y los edificios y ciudades en general [IPCC, 2018]. Por esta razón, varias naciones y organizaciones alrededor del mundo, incluyendo a Costa Rica, se han preocupado por aumentar y diversificar la investigación en el campo de la energía renovable para así prescindir cada vez en mayor medida del combustible fósil.

Costa Rica se caracteriza a nivel mundial por tener una matriz energética mayoritariamente basada en energía renovable. En **las figuras 1.2, 1.3 y 1.4** se observa la producción bruta de energía en giga watts producidos por cada uno de los sectores: hidroeléctrico, eólico, solar, geotérmico y térmico, para los años 2019, 2020 y 2021, respectivamente. Siendo el sector hidroeléctrico el que más electricidad genera y siendo el sector térmico el que menos electricidad genera. Esta última rama de generación eléctrica está compuesta por plantas que operan con combustible fósil y son encendidas únicamente como sistema de respaldo o bien para el mantenimiento del equipo. Las plantas térmicas deben entrar en operación periódicamente con el fin de asegurar su buen funcionamiento, por lo que generaron un 0,85 % [CENCE, 2020], un 0,21 % [CENCE, 2021] y 0,02 % de electricidad para el 2019, 2020 y 2021, respectivamente.

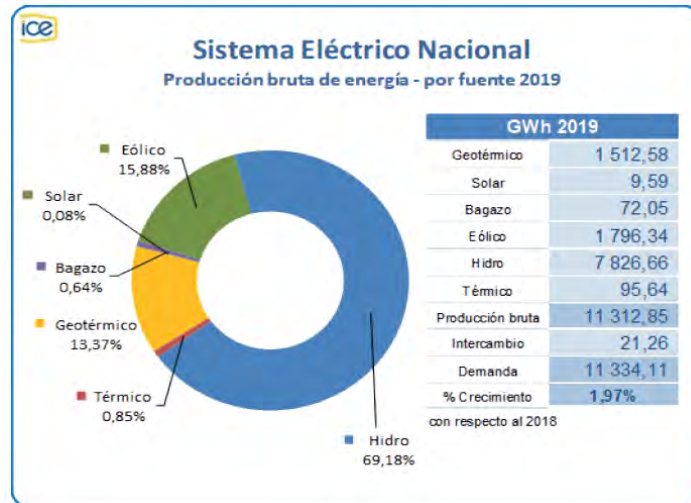


Figura 1.2: Registro anual de producción bruta de energía en megawatts para el año 2019.  
Fuente: [CENCE, 2020]

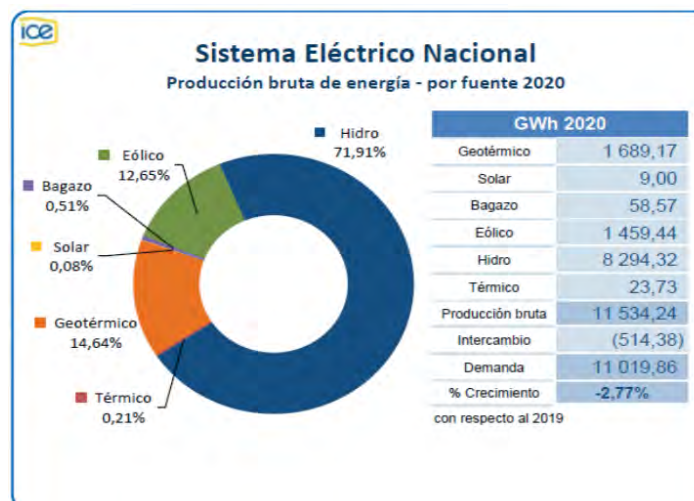


Figura 1.3: Registro anual de producción bruta de energía en megawatts para el año 2020.  
Fuente: [CENCE, 2021]



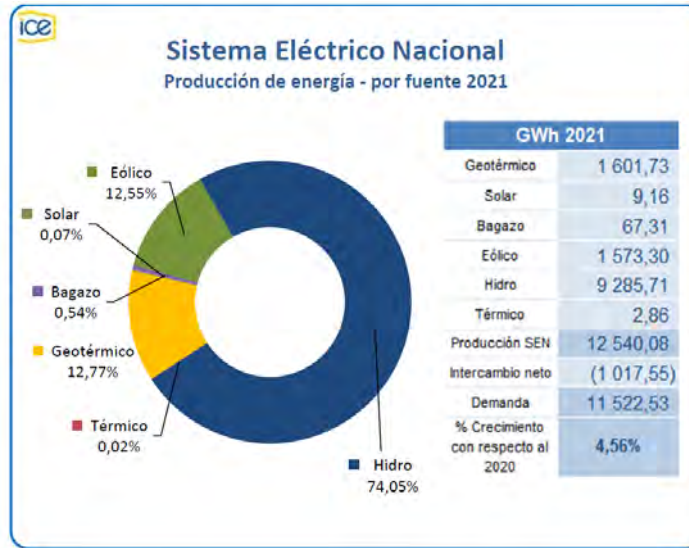


Figura 1.4: Registro anual de producción bruta de energía en megawatts para el año 2021. Fuente: [CENCE, 2022]

Pese a la fuerte matriz de energía renovable con la que cuenta el país, la mayoría de las fuentes utilizadas para generar electricidad, a excepción de la energía geotérmica, son estacionales; esto quiere decir que varía su capacidad de entrega a lo largo del año. Por ejemplo, los embalses tienden a reducir su nivel de agua en los meses más secos del año. Dependiendo de cuanto baje el nivel de agua, puede traducirse en un racionamiento del fluido eléctrico en distintas zonas del país. Asimismo, la energía solar es más aprovechable en días soleados y solo se puede generar electricidad en las horas que haya luz solar debido a que no se puede almacenar. De igual manera, la generación de energía eólica se ve reducida en los meses más húmedos, ya que la velocidad del viento disminuye. En resumen, la producción de energía en el país es fluctuante en el tiempo y en la actualidad todo el avance tecnológico existente y las nuevas modalidades de trabajo y estudio representan un crecimiento en la demanda eléctrica y la continuidad del abastecimiento. Sin embargo, Costa Rica se ubica en una posición muy privilegiada ya que cuenta con costas en el Océano Pacífico y el Mar Caribe, con una extensión total de 1290 km, en las cuales se presenta oleaje las 24 horas del día, los 365 días del año, con un nivel energético relativamente constante durante todos los meses del año [Brito, 2013]. Esta característica del territorio nacional invita a analizar el uso y el comportamiento de los sistemas undimotrices de generación eléctrica más adecuados para las aguas nacionales y así explotar el potencial energético del mar de manera limpia, eficiente y con un mínimo impacto ambiental en las zonas costeras.

Propiamente, este trabajo está enfocado en un sistema modular de rompeolas. Se observó que la energía redirigida por el sistema podía llegar a tener alto potencial para la generación de electricidad. Para lo anterior se requiere el estudio de su funcionamiento con el fin de determinar si es posible que este sistema tenga un doble propósito: convirtiendo en energía eléctrica la energía redirigida del oleaje. Si el doble propósito es viable esta obra podría representar una mayor rentabilidad económica y ambiental ya que, teniendo dos sistemas en uno se ocuparía menos espacio marítimo y el costo podría ser menor. Para lograrlo se determinó el flujo de

energía en el sistema, el potencial eléctrico del sistema, las modificaciones que deben hacerse para aumentar su eficiencia, determinar cuál será el dispositivo generador al que se conecte el sistema y valorar si es viable o no su doble propósito. Esta investigación involucra las siguientes áreas de competencia para la ingeniería mecánica: análisis termodinámico, mecánica de fluidos, diseño, motores y análisis económico, así como la responsabilidad ambiental.

## 1.4. Antecedentes

Como se mencionó anteriormente, varias naciones y organizaciones mundiales han invertido en la investigación de fuentes energéticas alternativas al combustible fósil. Una de las fuentes energéticas renovables que ha ganado presencia en los últimos años es la energía marina. El continente europeo ha sido uno de los principales promotores de este tipo de generación energética. En el 2003 se fundó el Centro Europeo de Energía Marina, (EMEC). Una organización con actual representación de países como: Canadá, China, Japón, Corea del Sur, Estados Unidos, Taiwán, Singapur, etc. Su objetivo es, a través de la energía marina, alcanzar una matriz energética global limpia con una reducción de costos, tiempo y riesgo. Desde su creación, esta institución ha probado varios proyectos de aprovechamiento del oleaje, aprovechamiento de las mareas, proyectos relacionados y la utilización de hidrógeno como combustible. Entre sus proyectos más destacados se pueden citar: En el 2004 la instalación de Pelamis, el primer dispositivo generador flotante conectado a la red eléctrica del Reino Unido que aprovecha el oleaje en la generación eléctrica. Para el 2008 en el Reino Unido se conectó a la red eléctrica la turbina de Open Hydro, la cual fue el primer dispositivo de aprovechamiento mareomotriz. En 2009 Aquamarine instala Oyster, el mayor dispositivo cercano a costa de aprovechamiento de oleaje. En el 2013, Voith implementó su turbina de aprovechamiento mareomotriz Hy-Tide de 1 MW. En el 2018 el EMEC fue reconocido por ser uno de los proyectos más inspiradores e importantes para contrarrestar el cambio climático [EMEC, 2021]. Actualmente las partes involucradas siguen investigando y poniendo a prueba nuevos prototipo o nuevas versiones de los acá descritos.

Asimismo, en América existe la red de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de oportunidades de integración de Redes Eléctricas iberoamericanas de las energías del Mar (CYTED REMAR), está liderada por España y forman parte nueve organismos de investigación, tres empresas y ocho países de la Región Iberoamericana: Brasil, Chile, Cuba, Ecuador, España, México, Perú y Portugal. Su objetivo es crear un espacio para el intercambio de información y una red de profesionales para el análisis y desarrollo de proyectos de integración de la producción de electricidad a partir de energía marina en las redes eléctricas iberoamericanas [REMAR, 2021]. Aunado a esto, en Chile la empresa Enel Green Power ha desarrollado diversos proyectos de generación eléctrica a partir de fuentes renovables: energía solar, energía eólica y energía hidroeléctrica. Para el 22 de abril del 2021 instaló su primer turbina de aprovechamiento undimotriz. Además, en Argentina la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente (ASADES), está conformada por personal de las principales instituciones, universidades, laboratorios, ONG ambientales y empresas de Argentina y se encarga de "fomentar el estudio y el desarrollo de la ciencia y la tecnología relacionada con el ambiente y la aplicación de energías renovables" [ASADES, 2021]. Respondiendo a su objetivo, el 27 de agosto del 2021 organizaron una conferencia virtual sobre energías del mar, a cargo del ingeniero Alejandro Haim, investigador del Proyecto Energía Undimotriz de la Escuela de Ingeniería Mecánica de

la Universidad Técnica Nacional de Argentina. Su proyecto consiste en el diseño, construcción e instalación del primer prototipo conversor de energía undimotriz del país a escala real y actualmente se encuentra en desarrollo [Undimotriz, 2021]. Adicionalmente, cabe destacar la presencia de Pan American Ocean Energy Students (POES) y la Red Iberoamericana de Energía Marina (RIBEMAR), agrupaciones que desarrollan también investigaciones en esta temática.

Otra iniciativa internacional es el proyecto Pruebas de laboratorio y transferencia de conocimiento para el desarrollo de estrategias sostenibles para la obtención de energía marina (SUSME) en el cual están involucradas las siguientes instituciones: la Universidad Nacional Autónoma de México, a través del Instituto de Ingeniería (II-UNAM), el coordinador), la Universidad de la República de Uruguay, la Universidad de Granada, la Escuela Universitaria de Diseño e Ingeniería de Barcelona, Sociedad Fraunhofer para la Promoción de la Investigación Aplicada de Alemania, la Universidad de Cantabria, el Consorcio para el diseño, construcción, equipamiento y explotación de la plataforma oceánica de Canarias y la Universidad de Costa Rica, a través de la Unidad de Ingeniería Marítima, Ríos y Estuarios del Instituto de Investigaciones en Ingeniería (IMARES-INII). El objetivo de IMARES dentro de este proyecto ha sido determinar el potencial energético del oleaje en el Pacífico de Costa Rica y estudiar cuáles dispositivos de extracción de energía son los más adecuados para las condiciones de la región. Bajo esta línea de investigación, dentro del proyecto SUSME, en IMARES se han desarrollado una serie de investigaciones, que se han sustentado en el informe solicitado por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) en el 2013. En este documento [Brito, 2013] determina el potencial teórico de energía undimotriz desde tres fenómenos: oleaje, mareas y corrientes marinas. Se identifica el potencial teórico bruto estimado en toda la Zona Económica Exclusiva, el potencial teórico disponible teniendo en cuenta restricciones en el espacio marítimo y el potencial técnico teniendo en cuenta las tecnologías existentes. Entre los proyectos desarrollados se pueden citar: [Zumbado, 2021] donde se evalúa el potencial teórico de un sistema undimotriz en la costa Pacífico norte de Costa Rica. Además, [G.Govaere et al., 2020] es una caracterización del oleaje en la zona Pacífica, a partir de modelos diseñados para las condiciones de parte norte de América y el continente europeo. Seguidamente, en el trabajo [Zumbado et al., 2020] se caracteriza el potencial teórico de la energía undimotriz en el Pacífico Norte de Costa Rica. Por último, en su investigación [Corrales, 2019] se presenta una propuesta de modelo de cálculo para el análisis del oleaje de la costa Pacífica costarricense. Fuera de IMARES en la Universidad de Costa Rica se tuvo una iniciativa en la Escuela de Ingeniería Mecánica en la cual [Arce et al., 2009] diseñan un dispositivo tipo boya apto para las condiciones de Costa Rica. Determinan que los dispositivos que aprovechan en oleaje son los más rentables, que la costa que tiene mayor potencial para el desarrollo de un proyecto de generación undimotriz es la costa Pacífica.

## 1.5. Alcance y limitaciones

Este trabajo forma parte del proyecto internacional: *Pruebas de laboratorio y transferencia de conocimiento para el desarrollo de estrategias sostenibles para la obtención de energía marina (SUSME)*, que se enfoca en determinar el potencial energético de las olas en el Pacífico de Costa Rica y los tipos de dispositivos de extracción de energía más adecuados para las condiciones de la región. La Universidad de Costa Rica, a través de la Unidad de Ingeniería Marítima de Ríos y Estuarios (IMARES) del Instituto de Investigaciones en Ingeniería (INII) es parte de la iniciativa SUSME. Esta investigación fue acogida por IMARES dentro de las investigaciones SUSME. Ya que el ingeniero Mauricio Wesson, quien forma parte del equipo que patentó el rompeolas, contactó con IMARES y manifestó el interés de que se elaborase una investigación en torno a su rompeolas para determinar la viabilidad de una doble funcionalidad. Desde IMARES y a través de SUSME se brindó el presupuesto para proveer los materiales para la elaboración de los modelos y las instalaciones para la realización de las pruebas pertinentes. Los datos generados en esta investigación serán de conocimiento público en beneficio de la mejora continua, la ciencia, la ingeniería y la investigación.

La investigación se enfoca en la elaboración de un modelo físico para estudiar su comportamiento y determinar su viabilidad mediante el análisis energético del comportamiento del sistema. Es decir que está centrado en el proceso de captación y el grado de potencial eléctrico. Por lo tanto, el diseño de un dispositivo generador o convertidor de la energía aprovechable a energía eléctrica se encuentra por fuera del alcance del trabajo y únicamente se sugiere un tipo de mecanismo convertidor con base en los resultados obtenidos. Se cuenta con un año para la conclusión de esta investigación y con un presupuesto definido para la ejecución de pruebas. Al finalizar la investigación se entregan los planos del rompeolas modificado y una descripción de las condiciones y parámetros de operación para los que fue diseñado.

## Capítulo 2

# Marco Teórico

En este capítulo se describen las principales bases teóricas en las que se sustenta esta investigación. En primer lugar, se hará una descripción de las generalidades del océano, el oleaje, las mareas y las corrientes, sus orígenes y fenómenos asociados. En segundo apartado se describen las condiciones particulares de la costa Pacífica y del oleaje que llega al país. En una tercera sección se describe brevemente las distintas formas de aprovechar la energía en los océanos para la generación eléctrica y se exponen ejemplos de mecanismos existentes. En una cuarta sección se abarca teoría de rompeolas y criterios de estabilidad. Seguidamente se mencionarán las distintas opciones de generadores o convertidores energéticos que podrían utilizarse en este sistema, para seleccionar el más adecuado en la etapa de modelado. Luego se expone la teoría detrás del modelado hidráulico para más adelante aplicar estos conocimientos en la construcción de un modelo físico, el cual será sometido a pruebas que proveerán los resultados de esta investigación.

### 2.1. Generalidades de los océanos

El planeta Tierra tiene forma de esfera achatada en los polos y recibe el nombre de gei-de. El planeta está compuesto por varias capas: la geosfera, la atmósfera, la biosfera y la hidrosfera. La geosfera: es la parte sólida del planeta, está compuesta por cuatro partes: la corteza, el manto, el núcleo externo y núcleo interno. La atmósfera: es la capa gaseosa en la que está envuelta la tierra, contiene el aire que se respira y protege de las radiaciones. La biosfera: es la capa en la que se encuentran los ecosistemas y seres vivos. La hidrosfera: es la capa conformada por toda el agua dulce y salada en el planeta. El objeto de estudio en este caso son los cuerpos de agua salada. La densidad y la temperatura de los mares y océanos varía en función de la latitud y profundidad. El mar puede dividirse en tres capas; el mar superficial el cual abarca los primeros diez metros es la capa que absorbe la mayor cantidad de radiación solar y se considera a condiciones atmosféricas. La capa termoclina: es una zona de transición entre el mar superficial y el mar profundo, por lo que tiene un alto gradiente de temperatura. El mar profundo: es una zona de baja temperatura y alta densidad.

El agua de los océanos baña las costas, las cuales se definen como la división entre mar y tierra; su forma y composición depende del ambiente marino local, el viento y de los procesos geológicos que las formaron. El nivel relativo del mar se ve afectado por eras de hielo, cambio climático, variaciones de órbita y movimientos tectónicos. Existen tres zonas en las costas:

Zona de rompimiento: es donde rompe la ola. Puede ser amplia debido a que el punto en que la ola se desestabiliza depende de su altura y de la profundidad del fondo del mar. En playas de pendiente pronunciada la zona de rompimiento es más corta. La Zona de “surf”: es donde se presenta toda la turbulencia luego del rompimiento de las olas. La más cercana a la playa es la zona de “swash” en la que se generan las olas más pequeñas que llegan a bañar la arena.

Como se mencionó anteriormente el viento tiene un papel muy importante en el comportamiento de los océanos y la forma y composición de las costas. El viento se origina por el cambio de densidad en el aire y en la presión atmosférica; su dirección se ve afectada por el efecto Coriolis, accidentes geográficos, el relieve de la zona, entre otros factores. Siendo un fluido en movimiento, el viento experimenta fricción al encontrarse con fronteras tales como la superficie del mar y producto de la fricción entre ambos fluidos se produce el oleaje. El día y la noche también provocan gradientes de temperatura que generan cambios en los patrones del viento. El estado del mar es función de la velocidad del viento, su persistencia y su fetch; que se define como la distancia rectilínea por la que sopla un viento en dirección e intensidad constantes. Existen tres tipos de viento: el primero, el viento regular: aquel que no varía en intensidad o dirección. En segundo lugar, el viento periódico: cuando el viento invierte su dirección con cierta periodicidad. Por último, el viento irregular: es el viento que no presentan periodicidad ni constancia.

En los océanos existen cuatro fenómenos que transportan la energía: el oleaje, las mareas, las corrientes y el gradiente de temperatura. Cada uno es provocado en mayor o menor escala por la acción del viento y por la interacción del Sol, la Tierra y la Luna. Por ejemplo, las corrientes y las mareas son originadas por las fuerzas gravitacionales resultado de la interacción de los tres cuerpos. Asimismo, el grado de exposición de las aguas marítimas y del aire al Sol, ya sea por profundidad o por ubicación geográfica, provoca en los océanos un gradiente térmico que se traduce en un cambio de densidad de ambos fluidos provocando la generación de vientos, oleaje y corrientes. Otro fenómeno relacionado a los cuerpos celestes es el Efecto Coriolis, el cual se debe a la aceleración gravitacional de la Tierra y provoca cambio en la presión atmosférica y también cambios en la dirección de corrientes, lo cual en las condiciones adecuadas podría influir en la formación de tormentas y huracanes. A continuación, se detallará cada uno de los fenómenos.

Las **mareas** son variaciones periódicas del nivel del mar. Son originadas por las interacciones entre la Luna y la Tierra y el Sol. Aunque la Luna es la que mayor efecto tiene sobre las mareas, debido a su cercanía con la Tierra [Haim, 2021]. Podemos citar las siguientes interacciones: en primer lugar, las interacciones del sistema Luna y Tierra, el cual tiene su centro de gravedad, baricentro, dentro de la Tierra, pero no coincide con el centroide terrestre. En segundo lugar, la fuerza gravitacional de la Luna sobre la Tierra influye directamente sobre las mareas. En tercer lugar, las fases lunares: en las fases de luna llena y luna nueva, la Luna se encuentra en línea con el Sol y gracias a la combinación de sus efectos gravitatorios se produce lo que se conoce como marea viva. Mientras que, en cuarto creciente y en cuarto menguante el Sol y la Luna se desalinean y se produce lo que se conoce como marea muerta. En cuarto lugar, los movimientos de la Luna y la Tierra son movimientos elípticos, por ende, existen puntos donde la distancia entre los cuerpos es mínima o máxima. Cuando los cuerpos se encuentran más cerca las fuerzas gravitacionales son mayores y como resultado las mareas también lo son. Por último, la inclinación del eje de la Luna de  $5^\circ$  genera aceleraciones dife-

rentes en lados opuestos a una misma latitud y también ocasiona una variación en la altura de las mareas. Esto provoca que en un día un punto de la tierra tenga 2 pleamareas iguales y dos bajamareas iguales. Por otro lado, existen puntos donde solo se da una pleamarea y una bajamarea por día, **2.1**. También, se debe tener cuenta que las islas y continente crean variaciones en las mareas ya que las desvían o reflejan y amortiguan o incrementan las ondas del mar.

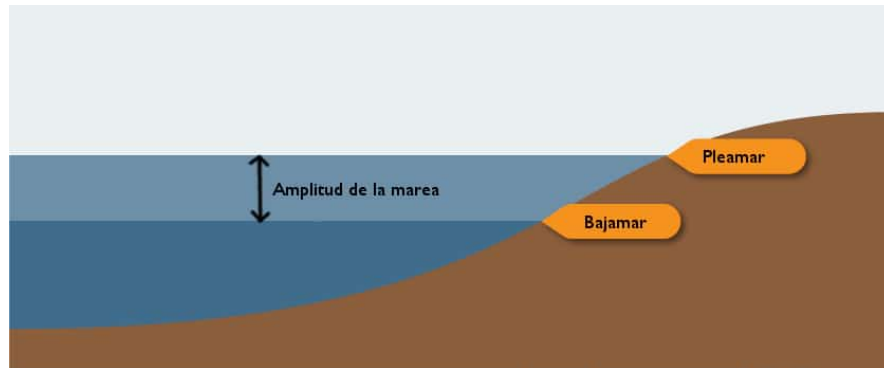


Figura 2.1: Diagrama de Mareas. Fuente: [Naútica, 2023]

Las **corrientes marinas** o corrientes oceánicas son movimientos dirigidos continuos del agua que se pueden crear por diferencia de temperatura, por vientos o por diferencia de densidades y pueden ser de tipo superficial o de tipo submarina. Su extensión puede abarcar muchos kilómetros y son de gran importancia para la definición de los climas en el planeta. La combinación de vientos y diferencia de densidades pueden crear corrientes semipermanentes. Las corrientes generadas por cambio de temperatura se llaman: cálidas, frías o mixtas. Las cálidas se originan en la zona intertropical y fluyen hasta latitudes más altas. Las frías fluyen desde latitudes altas por la rotación terrestre. Por último, las mixtas inician como frías y en su viaje cambian a corrientes cálidas. También se originan corrientes a lo largo de la costa para desalojar el volumen sobrante que ha sido acumulado en la playa. Otro grupo son las corrientes de resaca, las cuales se crean a partir de la masa de agua que se devuelve cuando las olas revientan en la costa, estas son un sistema inestable y son difíciles de predecir. En la **figura 2.2** se muestran las corrientes marinas en el planeta.

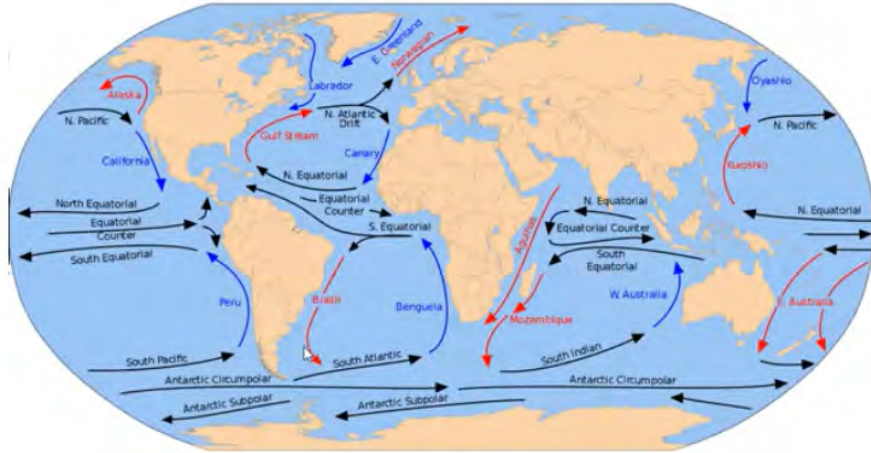


Figura 2.2: Mapa de las corrientes marinas. Fuente: [Haim, 2021]

El **oleaje** lo forman ondas aproximadamente sinusoidales que viajan en el agua transportando energía. Una onda se describe por su periodo, su altura desde la superficie libre del agua y su longitud de onda. La energía de las olas se disipa al romper sobre los sedimentos en la playa; una parte se devuelve al océano y otra es absorbida por los sedimentos. La celeridad, calculada con la **ecuación 2.1**, es la velocidad de la ola y depende de si esta se encuentra en mar profundo o en zonas cercanas a la costa.

$$c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \cdot \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)}, \quad (2.1)$$

Donde:  $c$ : se refiere a la celeridad o velocidad de la ola, medida en  $m/s$ ;  $g$  se refiere a la constante de la gravedad, en  $m/s^2$ ;  $L$ : se refiere a la longitud de la onda, en  $m$ ;  $d$  se refiere a la profundidad de la onda, en  $m$ .

Las olas se originan principalmente a causa del viento, y el área de generación donde se da la transferencia de energía entre el viento y la superficie del mar se conoce como alcance o *fetch*. Otras fuentes de oleaje son movimientos tectónicos, corrientes, islas, continentes y erupciones volcánicas. En la generación del oleaje interactúan las fuerzas generadoras y las fuerzas restauradoras. Las fuerzas generadoras son aquellas que perturban el equilibrio estático de la superficie del mar como, por ejemplo: el viento, la lluvia, las fuerzas gravitacionales y los movimientos tectónicos. Por otro lado, las fuerzas restauradoras son las que se encargan de intentar regresar la superficie a su equilibrio original y dan lugar a la propagación del oleaje en el tiempo y el espacio; entre ellas se pueden citar la tensión superficial, el peso del agua y la aceleración por efecto de Coriolis. En la **figura 2.3** se muestra la clasificación de los tipos de ondas según su periodo, fuerza restauradora, fuerza generadora y la cantidad de energía que normalmente porta cada onda.

Las olas de un mismo grupo pueden tener velocidades y periodos distintos. Las olas pueden tener efecto aditivo entre sí o bien cancelarse, por lo que en un grupo de olas lo que interesa es la velocidad del conjunto. Estos grupos de olas son lo que se conoce como oleaje. Cada ola avanza hasta el frente del grupo y muere mientras que en la cola del grupo se forman nuevas olas por lo que la energía se mantiene constante. La energía de una ola depende de su altura,



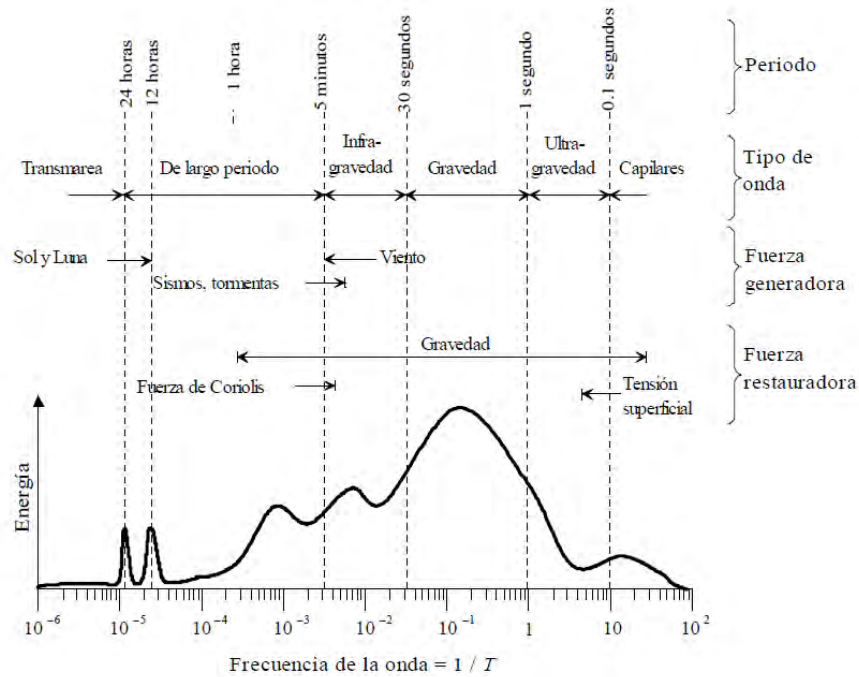


Figura 2.3: Clasificación del oleaje según la cantidad de energía que portan normalmente las olas. Fuente: [Silva, 2005]

la densidad del agua. El periodo y la frecuencia determinan la tasa con la que la energía llega a la costa. Dicha energía puede ser disipada por: la resistencia del aire, la viscosidad del agua, la interacción con otras olas. Una forma de determinar la energía contenida en una ola es mediante la **ecuación 2.2** para aguas profundas

$$P = \frac{\rho g^2 H^2 T}{64\pi} \quad (2.2)$$

Donde:  $P$ : se refiere a la energía o potencia contenida en la ola, medida en  $W/m$ ;  $g$  se refiere a la constante de la gravedad,  $9,81 \text{ m/s}^2$ ;  $H$ : se refiere a la altura de la ola, en  $m$ ;  $T$  se refiere al periodo de la ola, en  $s$ .

En su investigación, [Silva, 2005] brinda una clasificación de local o distante para el oleaje según su ubicación. El **oleaje local (SEA)** se presenta justo donde el viento afecta al mar. La secuencia, dirección y periodo de las olas no están definidos. El **oleaje distante (SWELL)** existe lejos de la zona SEA. Las olas se dispersan angular y radialmente a partir de la zona de generación, las olas más grandes van absorbiendo en su recorrido olas de menor tamaño y acumulando más energía. En esta zona el oleaje adquiere cierto orden.

## 2.2. Condiciones del oleaje en Costa Rica (costa del Pacífico)

Existen muchas técnicas para obtener información sobre el oleaje, una de las más trascendentales es la utilización de señales digitales y la predicción del oleaje mediante modelos paramétricos. Técnicas bajo esta metodología fueron utilizadas por [G.Govaere et al., 2020] en su informe, en el cual indican que el oleaje que alcanza la costa que da al Océano Pacífico en Costa Rica se origina principalmente al este de Nueva Zelanda. Las olas que llegan a esta zona viajan más de 1000 km y por ello tienen las características que se mencionan en esta sección.

Para empezar, son **olas de largo periodo**; conforme las olas avanzan en su recorrido absorben mayor cantidad de energía, por lo que su frecuencia disminuye. Se tiene un valor de periodo promedio de 15 s y en condiciones de tormenta se puede tener olas con periodos de 20 s.

Por otra parte, el **oleaje es similar y estable todo el año**, lo que permite establecer que existe un flujo continuo de energía. La mayoría de las olas son de entre uno y dos metros de altura, unas pocas alcanzan de tres a cuatro metros.

También hay **presencia de varias tormentas a la vez**; en Costa Rica, la mayor parte del tiempo se presentan varias tormentas simultáneamente, por lo que se tiene la interacción de varios grupos de olas a la vez, lo que origina espectros multipicos, como los que se ilustran en **la figura 2.4**. Esta particularidad debe ser analizada, especialmente su efecto en estructuras que se vayan a construir.

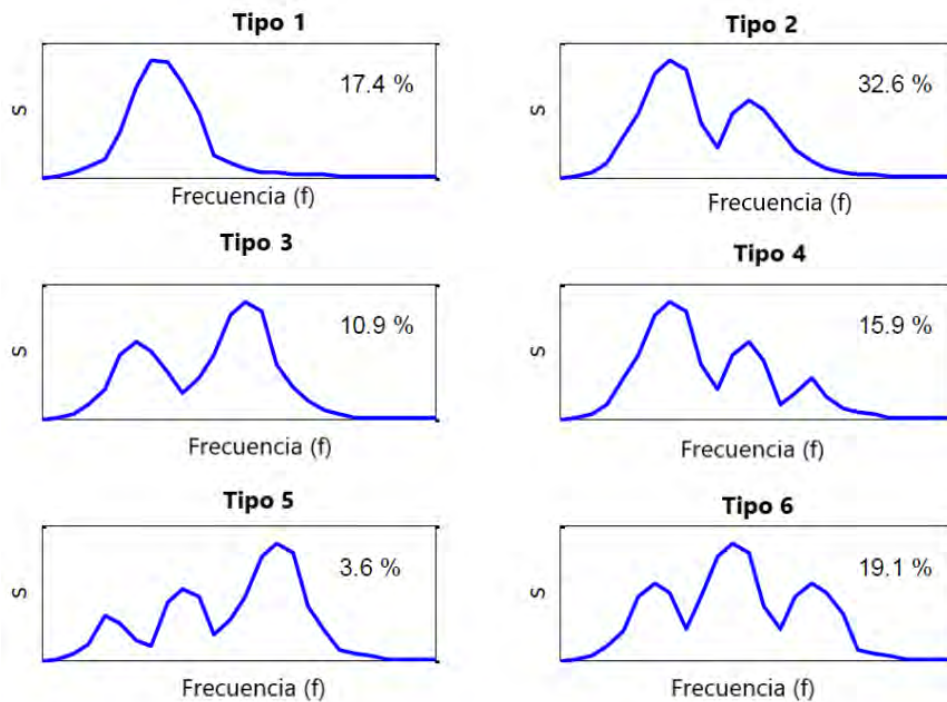


Figura 2.4: Tipos de espectro de oleaje presentes en la costa Pacífica de Costa Rica, según porcentajes. Fuente: [G.Govaere et al., 2020], Modificada

Parte de estas características implican que es posible una **alta precisión en la predicción del oleaje**; debido a su largo viaje es posible utilizar un programa de predicción de oleaje y determinar con suficiente confiabilidad cuánta será la energía que llegará a la costa.

Por último, esta costa recibe efecto de la **difracción producto de las Islas Galápagos** dado que el país se encuentra dentro de lo que se conoce como *Zona de Difracción de las Islas Galápagos*. Esta ubicación provoca que la energía incidente en la costa Pacífica sea menor, sin embargo, otros países donde el potencial de energía undimotriz es relativamente bajo, tales como: China, India y Corea del Sur, desarrollan este tipo de proyectos de aprovechamiento energético. Además, esta condición es ventajosa porque protege al país de grandes tormentas.

Una vez delimitadas estas particularidades del oleaje, hay que conocer cómo se comporta la energía contenida en el oleaje. Para esto es necesario conocer el perfil de velocidades de las olas que llegan a la costa Pacífica de Costa Rica. En la **Figura 2.5** se muestra el perfil de velocidades para un escenario típico de la costa Pacífica de Costa Rica. Donde se puede observar que el perfil de velocidad es prácticamente constante a lo largo de la columna de agua debido a los largos periodos de ola. Esta característica hace evidente la necesidad de aprovechar el movimiento horizontal del oleaje en toda la columna de agua para esta ubicación.



Figura 2.5: Ejemplo de perfil de velocidades horizontales de las partículas en un caso típico de oleaje de Costa Pacífica de Costa Rica

En cuanto al tema de potencial energético cabe destacar que en el informe de [Brito, 2013] se determina que el recurso energético más atractivo para la generación eléctrica en las costas de Costa Rica es el oleaje. La marea tiene poca amplitud y la velocidad de las corrientes es baja. También podría aprovecharse el gradiente térmico ya que Costa Rica se encuentra en una zona que se conoce como **domo térmico**, lo que provoca un gradiente térmico de 20 °C. Este valor se encuentra dentro del rango admisible para este tipo de aprovechamientos, pero sería más costoso que un proyecto de oleaje. Finalmente, en el **cuadro 2.1** se resumen los resultados obtenidos en el informe acerca del potencial teórico y técnico.

Cuadro 2.1: Potencial energético teórico y técnico en las costas de Costa Rica

Recurso	Potencial Teórico anual	Potencial Técnico anual
Oleaje	15,5 GW	2 GW
Mareas	2,2 MW	0,5 MW
Corrientes marinas	140,4 MW	32,2 MW

Donde el potencial teórico para cada costa es 1.1 GW para el Mar Caribe y 5.6 GW para el Océano Pacífico. Por otro lado, [Brito, 2013] determinó en su informe que el potencial técnico de producción anual de energía eléctrica en la Zona Económica Exclusiva (ZEE) es de 2,9 TWh y 14,8 TWh para el Mar Caribe y para Océano Pacífico, respectivamente. Se considera que la costa Pacífica tiene un mayor potencial para desarrollo de aprovechamientos energéticos debido a su extensión lineal y aguas más profundas. Cabe resaltar que el valor obtenido de energía teórica contenida es mayor a la producción de todas las energías renovables en el país.

Asimismo, en su tesis [Zumbado, 2021] indica, a través de un estudio batimétrico, que: el potencial promedio multianual por metro es de 9,6 kW/m, para la zona sur de la costa Pacífico Norte. En cuanto a energía promedio anual se tiene 3292 GWh en la zona sur de la costa Pacífico Norte, para profundidades entre los 20 m y 50 m y una extensión cercana a los 60 km. En las figuras **figuras 2.42, 2.7 y 2.8** se pueden consultar los datos para potencia y energía anteriormente descritos.

Puntos de control	P90	P50	Promedio	P10
Curva de 20 m Zona norte	3.3	6.2	6.7	10.4
Curva de 50 m Zona norte	4.4	8.4	9.2	14.3
Curva de 20 m Zona central	1.8	4.0	4.5	7.8
Curva de 50 m Zona central	2.9	6.1	6.8	11.6
Curva de 20 m Zona sur	3.8	7.8	9.2	16.2
Curva de 50 m Zona sur	4.1	8.6	10.0	17.8

Figura 2.6: Potencia promedio multianual (kW/m) para las curvas de 20 m y 50 m, según los percentiles 10, 50 y 90; y el promedio, en una extensión cercana a los 60 km. Fuente: [Zumbado, 2021]

Curva batimétrica de 20 m						
Meses	Zona norte		Zona central		Zona sur	
	Potencia [MW]	Energía [GWh]	Potencia [MW]	Energía [GWh]	Potencia [MW]	Energía [GWh]
Enero	163	122	129	96	231	172
Febrero	167	113	124	84	228	155
Marzo	191	142	139	104	277	206
Abril	201	144	145	104	308	222
Mayo	248	184	189	141	408	304
Junio	289	208	227	163	523	376
Julio	289	215	225	168	525	390
Agosto	265	197	201	150	474	353
Septiembre	279	201	220	158	482	347
Octubre	289	215	231	172	487	363
Noviembre	201	145	145	104	304	219
Diciembre	167	124	120	89	234	174
<b>Total</b>	-	2011	-	1534	-	3279

Figura 2.7: Energía total anual para la curva de 20 m según zona norte, central y sur. Fuente: [Zumbado, 2021]

Curva batimétrica de 50 m						
Meses	Zona norte		Zona central		Zona sur	
	Potencia [MW]	Energía [GWh]	Potencia [MW]	Energía [GWh]	Potencia [MW]	Energía [GWh]
Enero	270	201	207	154	232	172
Febrero	276	187	202	137	229	155
Marzo	318	237	232	172	278	207
Abril	334	241	245	176	308	222
Mayo	408	304	318	237	410	305
Junio	477	343	386	278	528	380
Julio	474	353	386	287	532	396
Agosto	434	323	347	258	478	356
Septiembre	462	332	372	268	490	353
Octubre	473	352	386	287	490	365
Noviembre	331	238	246	177	305	220
Diciembre	274	204	200	149	235	175
<b>Total</b>	-	3314	-	2580	-	3305

Figura 2.8: Energía total anual para la curva de 50 m según zona norte, central y sur. Fuente: [Zumbado, 2021]

### 2.3. Aprovechamientos energéticos

El proceso de conversión de la energía cinética del agua a energía eléctrica se desarrolla en tres etapas. En la primera etapa se da la conversión de energía del oleaje a energía neumática o en energía potencial. Para la segunda etapa conversión de la energía potencial o neumática en energía mecánica. La tercera y última etapa es cuando se da la conversión de la energía mecánica en energía eléctrica. La energía potencialmente extraíble de los océanos está contenida en cinco fenómenos: las mareas, las corrientes marinas, el gradiente térmico, gradiente salino y el oleaje. A continuación, se presenta la clasificación de los dispositivos de aprovechamiento energético según la manera en que captan la energía, su principio de funcionamiento y ejemplos de prototipos.

Los **sistemas tipo represa** son construidos en la línea de la costa con la idea de captar la energía de las mareas captando el agua para generar electricidad y luego devolverla al océano. Este es el sistema con mayor impacto ambiental. Un ejemplo: es la Central de Energía Mareomotriz ubicada en la Rance, Francia. Este proyecto se ilustra en **la figura 2.9**.



Figura 2.9: Imagen satelital de la Central Mareomotriz en La Rance, Francia. Fuente: Google Maps

Por otra parte, los **sistemas de turbinas** que se colocan en el fondo del mar en alta mar aprovechan la energía de las corrientes. En **la figura 2.10** se muestra el sistema implementado por Open Hydro en el Reino Unido, esta turbina fue el primer aprovechamiento de corrientes conectado a la red eléctrica del país.



Figura 2.10: Imagen de la turbina de la compañía Open Hydro instalada en costas del Reino Unido. Fuente: [EMEC, 2021]

Los **sistemas Pelamis** son una especie de lombriz metálica flotante que aprovecha el movimiento del oleaje en el mar profundo. Su forma y flexibilidad contemplan su resistencia a las condiciones marinas adversas de tormentas y ciclones, casi sin mantenimiento debido a su ubicación. El principio de funcionamiento busca obtener la conversión más eficiente por lo que convierte solo una parte de la energía disponible en las olas. En la **figura 2.11** se muestra el mecanismo descrito.

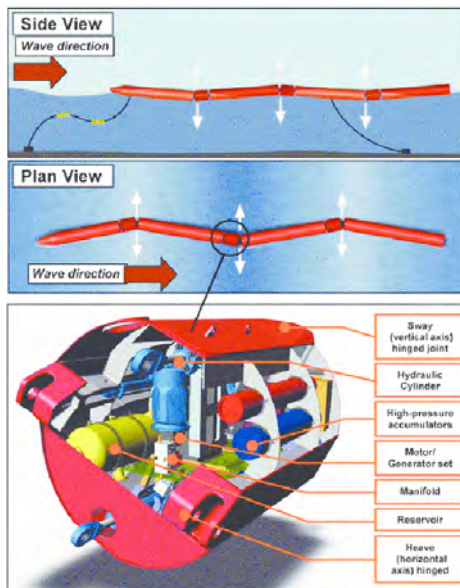


Figura 2.11: Esquema de funcionamiento del Sistema Pelamis. Fuente: [Garcia et al., 2016]



Luego, los **sistemas osciladores horizontales** Son mecanismos que tienen un movimiento alternativo alrededor de un eje horizontal y aprovechan la energía proveniente del movimiento horizontal del oleaje. Un ejemplo de estos sistemas se encuentra instalado en Reino Unido por la compañía Aqua Power, el cual fue instalado en la zona próxima a la costa. En la **figura 2.12** se muestra el mecanismo.

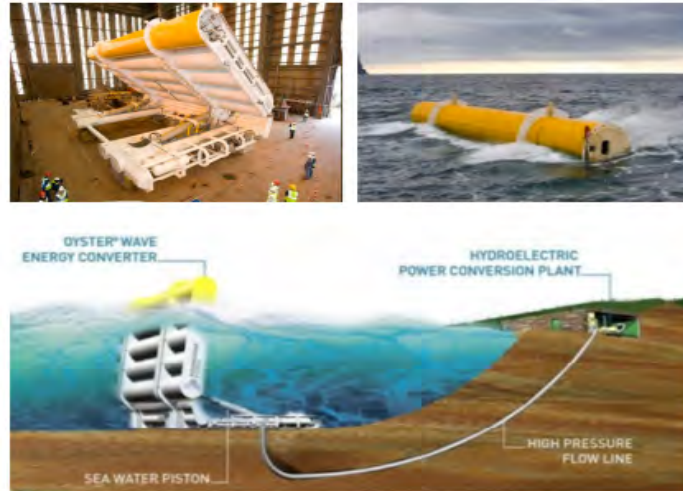


Figura 2.12: Proyecto Aqua Power, Reino Unido. Fuente: [Mouna Lagoun, 2010]

En las **columnas de agua oscilante** las olas presurizan el agua dentro de un contenedor parcialmente sumergido y estas a su vez comprimen el aire dentro. La energía es extraída del trabajo de compresión del aire, a través de una turbina de aire. Como en el sistema undimotriz ilustrado en la **Figura 2.13** ubicado al Sur de Escocia, en la isla Islay, instalado por la empresa Voith.

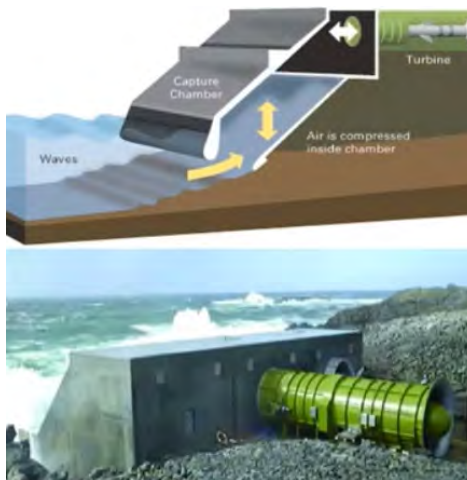


Figura 2.13: Proyecto en la isla Islay, Reino Unido. Fuente: [Haim, 2021]



El principio de **cuerpos flotantes u oscilantes** es extraer la energía del movimiento de las olas y la convierte en energía aprovechable. La compañía Enel Green Power de Chile instaló una boya de aprovechamiento energético para recopilación de información. En la **figura 2.14** se muestra el dispositivo de la empresa. Por otra parte, en la **figura 2.15** se muestra el prototipo en desarrollo [Undimotriz, 2021]. Ambos dispositivos pueden ser instalados en alta mar.

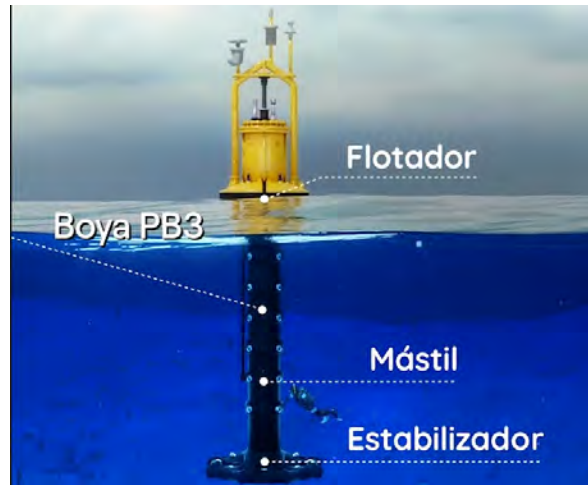


Figura 2.14: Dispositivo de Enel Green Power instalado en Chile. Fuente: [TradeNews, 2021]

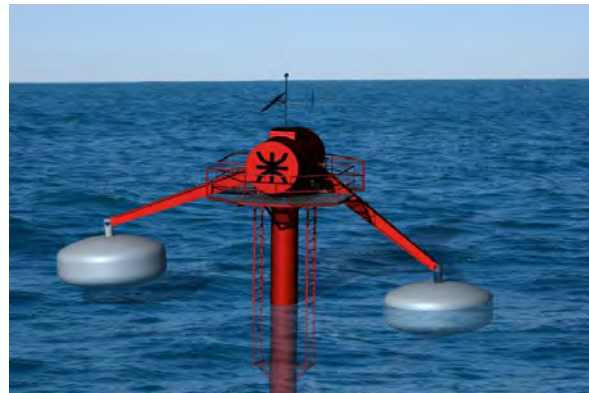


Figura 2.15: Animación del prototipo a instalar en Argentina por el grupo Undimotriz de la UTN. Fuente: [Undimotriz, 2021]

En los **sistemas de overtopping**, el agua que arrastran las olas es elevada a un depósito a una altura mayor a la superficie del mar, lo que hace que se acumule energía potencial, la energía es extraída por la diferencia de niveles. Un ejemplo de estos sistemas es un prototipo que estuvo instalado en Dinamarca por seis años en el periodo del 2003 al 2009, el mecanismo se llamó Red Dragon y se ilustra en la **figura 2.16**. Se proyectan futuras instalaciones en Gales y Portugal.



Figura 2.16: Dispositivo Red Dragon, en Dinamarca durante el periodo del 2003 al 2009. Fuente: [Haim, 2021]

## 2.4. Rompeolas o diques

Un rompeolas es una estructura vertical de protección para la costa. Su función es reflejar y disipar la energía del oleaje para mitigar sus efectos y crear una zona de calma con el fin de facilitar la actividad portuaria o bien proteger del transporte de sedimentos de la costa. Estas estructuras pueden estar cimentadas en el suelo marino o simplemente apoyadas. Generalmente son construidos con capas de materiales finos y materiales gruesos, los cuales van aumentando su tamaño desde el núcleo de la estructura hacia su exterior, las piezas más grandes se ubican en el manto principal. Un dique puede ser construido con rocas, escolleras o piezas de concreto de distintas formas. En **la figura 2.17** se muestra el esquema de un rompeolas.

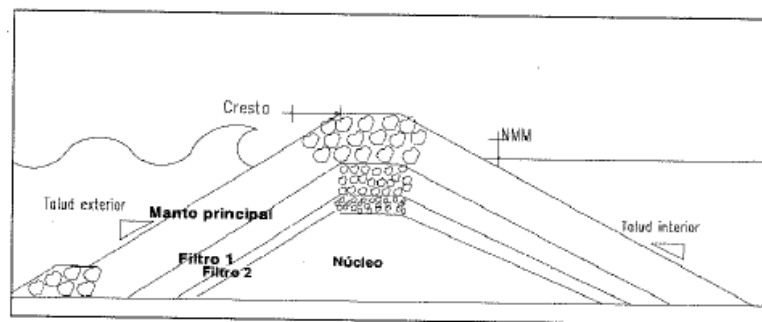


Figura 2.17: Diagrama de un rompeolas. Fuente [García, 2000]

Existen principalmente, tres tipos de diques: verticales, mixtos y de espaldón. El **dique vertical** es una estructura es una pared vertical o casi vertical formada de muros o bloques, como la que se observa en la **figura 2.18**. Los diques verticales pueden estar cimentados directamente en el lecho marino o sobre una escollera sumergida, pero la profundidad del agua es lo suficientemente grande para evitar que la ola rompa antes de llegar al dique. Un ejemplo de este tipo de rompeolas se muestra en la figura **2.19**, esta obra se encuentra ubicada en Chipre . Por otro lado, los **diques mixtos** son similares a los diques verticales, la diferencia, tal y como se ilustra en la **figura 2.20**, es que la ola puede romper antes o sobre el dique debido a la profundidad del fondo del mar o la geometría de las escolleras. Un ejemplo de este tipo de rompeolas se muestra en la figura **2.21**, esta obra se encuentra ubicada en el puerto Caldera de Puntarenas, Costa Rica. Por último, en el caso de los **diques con espaldón** la escollera emerge sobre el nivel del mar. En este caso la ola alcanzará la estructura mientras el agua se encuentra en el proceso de ascenso por el talud, esta estructura se ilustra en la **figura 2.22**. Un ejemplo de este tipo de rompeolas se muestra en la **figura 2.23**, esta obra se encuentra ubicada en el puerto Caldera de Puntarenas, Costa Rica.

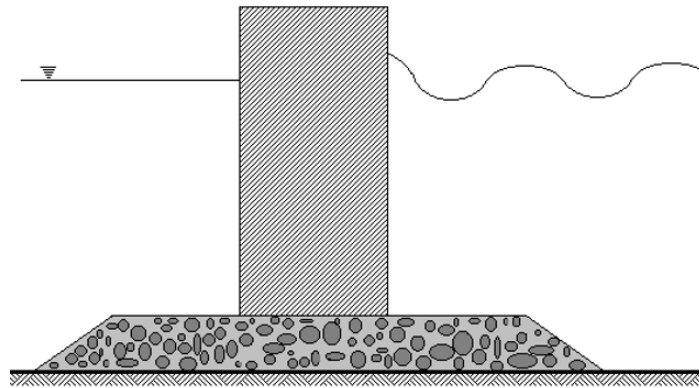


Figura 2.18: Dique vertical. Fuente [Govaere, 1997]

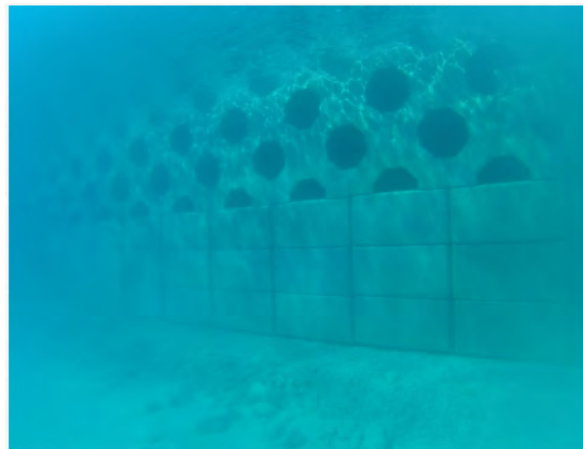


Figura 2.19: Dique vertical ubicado en Chipre. Fuente [Wesson, 2000]

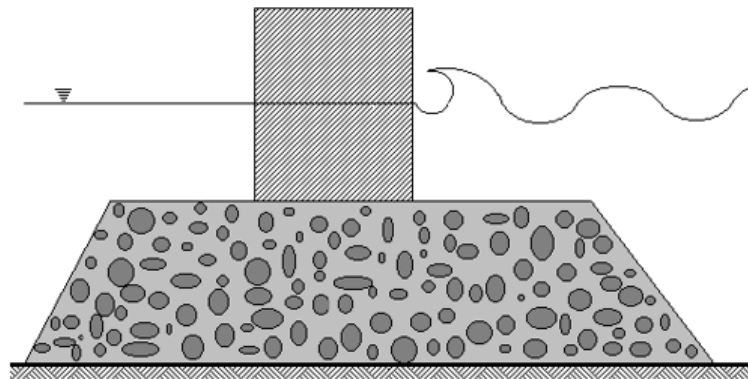


Figura 2.20: Dique Mixto. Fuente [Govaere, 1997]



Figura 2.21: Dique Mixto ubicado en Puerto Caldera, Puntarenas, Costa Rica. Fuente:[Rica, 2021]

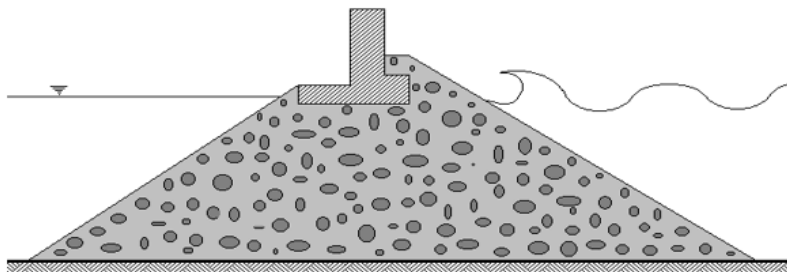


Figura 2.22: Dique con espaldón. Fuente [Govaere, 1997]



Figura 2.23: Dique con espaldón ubicado en el Puerto Tazacorte, Málaga, España. Fuente [Negro and et al., 2017]

El diseño de estas estructuras toma en cuenta varios elementos: la elevación de la cresta, la pendiente de los taludes laterales, el tipo, el tamaño y el peso de las piezas de la coraza, el tamaño y espesor de los filtros en la subcapa y los requerimientos del material del núcleo. Estos elementos son determinados por variables como: la funcionalidad, la estabilidad hidráulica, la disponibilidad de material, la facilidad de construcción y la estabilidad geotécnica. Con el fin de que la obra cumpla con los criterios anteriormente mencionados se debe elegir materiales que tengan alta durabilidad pese a estar total o parcialmente sumergidos en agua salada, un medio altamente corrosivo. Además, deben ser capaces de resistir fuertes impactos tanto durante la construcción o instalación de la obra, como durante su vida útil. Los materiales predilectos para esta aplicación son rocas y concreto. Las rocas, son el material más antiguo que se ha utilizado en construcción, siendo en el montaje de un rompeolas ideales ya que la variedad de tamaños permite una mejor interconexión. Sin embargo, se recomienda colocarlas con intención y no de manera aleatoria para propiciar una mejor conexión entre piezas y un mejor control de la relación de vacíos en el manto principal, para así minimizar las modificaciones graduales de diseño por el movimiento de las piezas. Por otro lado, el concreto es un material de alta resistencia a la compresión, pero baja resistencia a la tensión. Por lo que debe ser reforzado con un material dúctil, como el acero. Normalmente las estructuras están sometidas a ambos tipos de esfuerzo y un rompeolas no es la excepción. Las piezas por utilizar deben ser del mismo tamaño y peso, con la ventaja de que se pueden diseñar geometrías que permitan una conexión estable entre piezas lo que permite una mayor estabilidad del rompeolas. Sin embargo, las piezas pueden fallar por tensión y pueden desintegrarse por los sulfatos o las sales que se pueden llegar a cristalizar en los poros de la pieza. Por esta razón se debe utilizar un concreto que sea altamente resistente, de baja permeabilidad, buena compactación, con agregados impermeables y con fibra de refuerzo; además se debe prestar gran cuidado a la densidad y al curado durante su elaboración. [García, 2000]

#### 2.4.1. Estabilidad de un rompeolas

La estabilidad de los rompeolas se puede analizar desde dos criterios: la estabilidad estructural y la estabilidad hidrodinámica. La estabilidad estructural es la capacidad de las piezas para resistir sin romperse, las tensiones producto de su disposición, del oleaje y el medio granular. La estabilidad hidrodinámica se refiere a la capacidad que tienen las piezas de oponerse al movimiento del oleaje. Las estructuras de los rompeolas fallan de manera dúctil debido a la acción de las olas. Una falla dúctil es cuando el material o la estructura se deforma de manera gradual hasta que colapsa. Debido a su función se acepta cierto grado de daño o avería en la estructura, las principales causas de daño se pueden sintetizar en tres categorías: falla en el

manto principal por movimiento o pérdida de piezas, averías de origen geotectónico y errores de construcción. Con el fin de evaluar su estabilidad y grado de avería se presentan cuatro estados de falla los cuales se identifican por inspección visual: **El inicio de avería** se refiere al desplazamiento de determinado número de piezas del manto principal a una distancia mayor a un diámetro de la pieza. **Avería de Iribarren** se presenta cuando la extensión de los agujeros en la capa externa del manto principal permite que el flujo del oleaje interactúe directamente con la capa interna del manto principal. **Inicio de destrucción**, se manifiesta cuando son perceptibles agujeros en la capa interna del manto principal. **Destrucción**, se da por la extracción de una pieza del manto principal. Existen dos metodologías para determinar la estabilidad de un rompeolas el método de Hudson y el método de Losada et al.

**Metodología de Hudson** en este caso se obtiene la masa que debe tener cada pieza para que sea estable, a partir de la **ecuación 2.3**.

$$M_{SD} = \frac{\gamma_s H^3}{K_D (S_R - 1)^3 \cot \alpha} \quad (2.3)$$

Donde:  $M_{SD}$ : se refiere a la masa de las piezas;  $K_D$ : es un coeficiente de estabilidad;  $S_R$ : se refiere a la densidad relativa del material, en el caso de la roca es  $\rho_r/\rho_w - 1$ ;  $\gamma_s$ : se refiere peso específico del material de la pieza;  $\alpha$ : se refiere a la pendiente del rompeolas

**Metodología Losada et. al.** en este caso se calcula la función estabilidad directamente, a partir de la **ecuación 2.4**.

$$\psi = \frac{W_{\rho SD}}{\gamma_w H^3 R_r} \quad (2.4)$$

Donde:  $\psi$ : es la función estabilidad;  $W_{\rho SD}$ : se refiere al peso adimensional;  $K_D$ : es un coeficiente de estabilidad;  $S_R$ : se refiere a la densidad relativa del material;  $\gamma_s$ : se refiere peso específico del material de la pieza;  $H$ : se refiere a la altura de la ola

## 2.5. Teoría lineal

La teoría lineal permite determinar la celeridad, la cual es la velocidad de la onda, a partir de la altura, la profundidad y el periodo de la onda. Para utilizar la teoría lineal es necesario considerar las siguientes hipótesis:

- El fluido se considera un medio continuo, homogéneo, incompresible y no viscoso.
- Pese a que el oleaje es irregular debido a su naturales y a los posibles obstáculos que puede encontrar en su camino para esta teoría se asume que el oleaje es constante y regular, es decir que se supone que todas las olas son iguales.
- Se desprecian los efectos de tensión superficial.
- Se considera la presión en la superficie uniforme y constante.
- Se considera el flujo irrotacional.
- Se considera que la onda es del pequeña amplitud.

- Se considera que el oleaje es de frente largo.
- Se considera que el fondo es fijo, plano y horizontal.
- Se desprecian los efectos de Coriolis.

Todas estas condiciones permiten definir las ecuaciones **2.5** y **2.6** que permite describir el oleaje:

$$\nabla^2\Phi = \frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial z^2} = 0, \quad (2.5)$$

Donde  $x$ : se refiere a la dimensión horizontal paralela al movimiento de la onda;  $y$ : se refiere a la dimensión horizontal perpendicular al movimiento de la onda (los efectos que se produzcan acá son despreciable ya que se asume un movimiento en dos dimensiones);  $z$ : se refiere a la dimensión vertical;  $\Phi$ : se refiere a la función potencial, que está dada por la ecuación 2.6

$$\Phi = -\frac{Hg \cosh(k(h+z))}{2\omega \cosh(kh)} \sin(kx - \omega t), \quad (2.6)$$

Donde,  $g$ : se refiere a la constante de la gravedad;  $t$ : se refiere al tiempo;  $h$ : se refiere a la profundidad de la onda;  $H$ : se refiere a la amplitud total de valle a pico;  $\omega$ : se refiere a la velocidad angular de la onda.

A partir de esta ecuación se pueden describir otras propiedades del oleaje la ecuación de la dispersión, **ecuación 2.7**; la velocidad horizontal y vertical de la ola , **ecuaciones 2.9 y 2.10**, respectivamente; la aceleración horizontal y vertical de la ola , **ecuaciones 2.11 y 2.12**; y la presión del cuerpo de agua, **ecuación, 2.13**.

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right), \quad (2.7)$$

Donde,  $L$ : se refiere a la longitud de onda;  $T$ : se refiere al periodo;  $h$ : se refiere a la altura de ola.

A partir de la longitud de onda calculada en la **ecuación 2.7** conviene definir la variable  $k$ , tal y como se muestra en la **ecuación 2.8**:

$$k = \frac{2\pi}{L}, \quad (2.8)$$

$$u = \frac{\partial\Phi}{\partial x} = \frac{H g k \cosh[k(h+z)]}{2\omega \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t), \quad (2.9)$$

Donde,  $u$ : se refiere a la velocidad en la dirección "X";  $H$ : se refiere a la distancia de valle a cresta en la onda;  $z$ : se refiere a la profundidad de la ola;  $\omega$  se refiere a la velocidad angular de la onda;  $x$ : se refiere a la longitud de onda;  $t$ : se refiere al tiempo;  $h$ : se refiere a la altura respecto a la superficie;  $k$ : se refiere a un factor definido anteriormente.

$$w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{H g k \sinh[k(h+z)]}{2\omega \cosh(kh)} \sin(kx - \omega t). \quad (2.10)$$

Donde,  $w$ : se refiere a la velocidad en la dirección "Z";  $H$ : se refiere a la distancia de valle a cresta en la onda;  $z$ : se refiere a la profundidad de la ola;  $\omega$  se refiere a la velocidad angular de la onda;  $x$ : se refiere a la longitud de onda;  $t$ : se refiere al tiempo;  $h$ : se refiere a la altura respecto a la superficie;  $k$ : se refiere a un factor definido anteriormente.

Con respecto a las componentes de la velocidad  $u$  (componente  $x$ ) y  $w$  (componente  $z$ ) es importante indicar que cuando se tiene máxima velocidad vertical, se tiene cero velocidad horizontal y cuando se tiene máxima velocidad horizontal se tiene cero velocidad vertical, esto porque se encuentran desfasadas  $90^\circ$ .

$$a_x = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{H g k \cosh[k(h+z)]}{2 \cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) \quad (2.11)$$

Donde,  $a_x$ : se refiere a la aceleración en el eje  $X$ ;  $H$ : se refiere a la distancia de valle a cresta en la onda;  $z$ : se refiere a la profundidad de la ola;  $\omega$  se refiere a la velocidad angular de la onda;  $x$ : se refiere a la longitud de onda;  $t$ : se refiere al tiempo;  $h$ : se refiere a la altura respecto a la superficie;  $k$ : se refiere a un factor definido anteriormente.

$$a_z = \frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{H g k \sinh[k(h+z)]}{2 \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) \quad (2.12)$$

Donde,  $a_z$ : se refiere a la aceleración en el eje  $Z$ ;  $H$ : se refiere a la distancia de valle a cresta en la onda;  $z$ : se refiere a la profundidad de la ola;  $\omega$  se refiere a la velocidad angular de la onda;  $x$ : se refiere a la longitud de onda;  $t$ : se refiere al tiempo;  $h$ : se refiere a la altura respecto a la superficie;  $k$ : se refiere a un factor definido anteriormente.

Por otra parte, la ecuación de la presión **2.13** la compone un aporte hidrostático y una componente inercial:

$$p = -\rho g z + \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\rho g z + \rho g \eta K_p. \quad (2.13)$$

Donde,  $p$ : se refiere a la presión;  $\rho$ : se refiere a la densidad del fluido;  $z$ : se refiere a la profundidad de la ola;  $\eta$  se define en la **ecuación 2.14**;  $K_p$ : se define en la **ecuación 2.15**

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (2.14)$$

Donde,  $a_z$ : se refiere a la aceleración en el eje  $Z$ ;  $H$ : se refiere a la distancia de valle a cresta en la onda;  $\omega$ : se refiere a la velocidad angular de la onda;  $x$ : se refiere a la longitud de onda;  $t$ : se refiere al tiempo.

$$K_p = \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \quad (2.15)$$



Donde,  $z$ : se refiere a la profundidad de la ola;  $h$ : se refiere a la altura respecto a la superficie;  $k$ : se refiere a un factor definido anteriormente.

Las relaciones y ecuaciones mostradas previamente permiten obtener un perfil de velocidades. Normalmente se presenta un comportamiento como el que se observa en la **figura 2.24**, donde el cuerpo de agua va a tener mayor velocidad en la superficie y menor velocidad en el fondo.

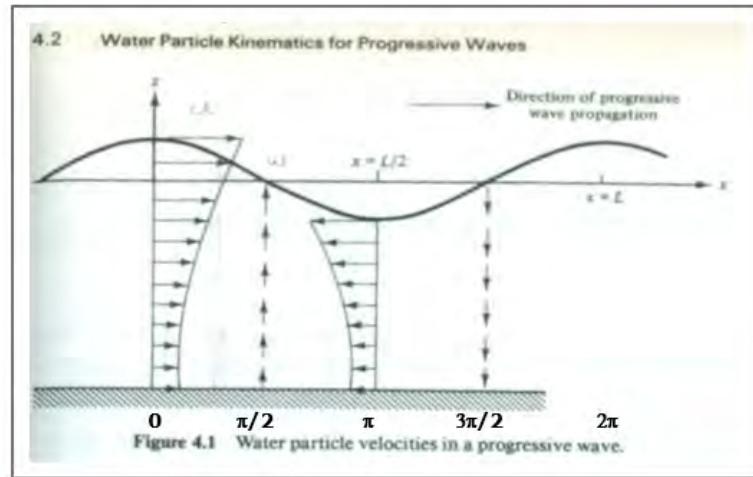


Figura 2.24: Perfil de velocidades de las ondas en el mar. Fuente: [Govaere, 1997]

## 2.6. Análisis estadístico del oleaje a corto plazo

Al trabajar con un fenómeno oscilatorio, como el oleaje es necesario aplicar distintas fórmulas estadísticas para determinar parámetros de interés. Para esto es necesario contar con una base de datos de oleaje para así determinar a través de la manipulación de la información las condiciones límite del diseño, es decir: alturas máximas y media de las olas, periodo máximo y periodo medio. Los estadísticos empleados con mayor frecuencia se resumen en la **cuadro 2.2**

Cuadro 2.2: Estadísticos del oleaje a corto plazo más utilizados

Altura máxima de ola	$H_{max} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i$
Altura media de ola	$H_{rms} = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2 \right]^{1/2}$
Altura cuadrática media de ola	$H_{1/2} = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{N/2} H_i$
Periodo máximo de ola	$T_{max} = T_1$ ordenados de menor a mayor según H
Periodo medio de ola	$T_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i$

Donde:  $N$ : es el número de olas registradas;  $H$  es la serie de alturas de ola registradas en orden descendiente;  $T$  es el periodo de cada ola registrada

## 2.7. Modelado hidráulico

El modelado hidráulico con experimentos físicos a escala es utilizado en la ingeniería para abordar problemas donde no hay métodos analíticos o métodos numéricos adecuados para el grado de precisión o de resolución requerido. En su libro, [Echávez, 1996] define que esto ocurre principalmente en tres situaciones: cuando afectan varios factores en el escurrimiento; por ejemplo, en los vórtices donde intervienen principalmente la viscosidad y la tensión superficial. En segundo lugar, cuando se tiene un escurrimiento tridimensional y en tercer lugar, cuando se tiene condiciones de frontera complicadas. El objetivo del modelado es estudiar el comportamiento del modelo para determinar fallas y posibles modificaciones a una menor escala lo cual representa menores costos que si se determinasen directamente con el prototipo. Un modelo es la representación simplificada de un sistema, proceso o fenómeno físico, utilizando elementos matemáticos, herramientas digitales o bien reproduciendo el sistema a escala reducida para obtener información sobre el comportamiento del sistema [Gutiérrez Serret, 2021]. Un prototipo es la situación, también simplificada, del sistema fenómeno o proceso real que se quiere modelar [Gutiérrez Serret, 2021]. El éxito en el modelado se alcanza al obtener similitud entre la respuesta del modelo y el prototipo, aún cuando no sean estrictamente semejantes entre sí.

Se pueden dividir los tipos de modelos en tres categorías que por lo general se complementan entre sí. Actualmente se desarrolla lo que se conoce como modelo híbrido, este es una combinación de los tipos de modelado para potenciar las capacidades que tiene cada método por aparte. En algunas ocasiones se utiliza un método para alimentar al otro y en otras situaciones se desarrollan conjuntamente. El **modelo matemático** es una las representación matemáticas de eventos reales, basada en las leyes y principios de la Física, usualmente se utilizan simplificaciones de estos modelos. El **modelo numérico** es cuando a través de herramientas computacionales se encuentra solución a sistemas de ecuaciones basados en modelos matemáticos. El **modelo físico** es la representación a escala de un evento, fenómeno o prototipo, para estudiar su comportamiento y funcionamiento de forma realista en un ambiente controlado. La escala es la proporción cuantificable entre el modelo y el prototipo. A continuación, se desarrollara más a profundidad la teoría detrás del modelado físico.

Es importante que los sistemas tengan ecuaciones que los describan independientemente del sistema de unidades que se utilice y de la escala que se maneje, para lograrlo se utiliza el análisis dimensional. Mediante este método se obtiene información de las variables que intervienen en un problema. Los fenómenos físicos son descritos por ecuaciones, las cuales están compuestas por variables, símbolos matemáticos y constantes. Cada variable tiene un valor numérico y una dimensión. La dimensión es una combinación de productos de las unidades de referencia. Las principales unidades de referencia son el tiempo, la masa y la longitud, aunque en ingeniería es común utilizar también: la fuerza, la longitud y el tiempo; o bien la energía, la velocidad y el tiempo; y en algunas ocasiones dependiendo de la naturaleza del problema conviene agregar la temperatura y la carga eléctrica. El único requisito para utilizar análisis dimensional es que las cantidades físicas a estudiar tengan significado cuantitativo. Por otro lado, las variables pueden ser dependientes, la que interesa determinar, o independientes que intervienen en el problema y es en función de las cuales interesa describir la variable dependiente. Dentro de las variables independientes están las que determinan la geometría del flujo, por ejemplo: la velocidad; y las que determinan las propiedades del fluido, por ejemplo, la densidad. Por último, las variables constantes se conocen como parámetros. La utilización de

ecuaciones en el análisis dimensional tiene límites o reglas, las cuales son: las dimensiones de los dos términos deben ser iguales, independientemente del sistema de unidades. Además, la ecuación es válida para cierto rango de variables. Por último, no se pueden hacer todas las operaciones matemáticas con la ecuación.

Para elaborar el análisis dimensional de una ecuación se debe seguir el siguiente procedimiento: en primer lugar, se deben listar todas las variables que intervienen en el problema y clasificarlas si son dependientes o independientes. En segundo lugar, se debe construir la matriz de exponentes, para la cual se escriben en un renglón todas las variables y en la columna las dimensiones que intervienen y se asigna a cada variable un número de acuerdo a su grado dimensional.

Luego, se procede a construir la ecuación con el análisis dimensional para encontrar una expresión adimensional, de preferencia un número adimensional ya conocido o estándar. Los resultados obtenidos de este análisis deben ser sencillos, correctos y naturales. Es importante que la variable dependiente aparezca en un solo producto adimensional y de preferencia con exponente unitario. Se aconseja que las variables por producto adimensional no sean más de cuatro, pero en la totalidad del análisis dimensional se deben incorporar todas las variables del sistema. Las propiedades del fluido deben aparecer una sola vez, exceptuando la densidad. Por último, si se describen variables geométricas se recomienda dividir las por la longitud específica del modelo para tener un producto adimensional. Este método puede resultar muy útil ya que reduce el número de variables pero, complica la expresión que las relaciona, además pueden aparecer variables sin interés para el problema, las variables pueden adoptar valores infinitos o se pueden crear relaciones entre variables independientes.

Como se mencionó anteriormente el objetivo del modelado es obtener una respuesta similar entre el prototipo y el modelo. Para ello es importante definir la semejanza entre ambos, la cual puede ser: geométrica, cinemática, térmica, química o dinámica. La **semejanza geométrica** se refiere a que las relaciones entre dimensiones homólogas del sistema modelo-prototipo son iguales, **ecuación 2.16**, esta relación es independiente del movimiento del sistema y las acciones sobre él [Gutiérrez Serret, 2021]. La escala va a estar determinada por el espacio disponible en el laboratorio, el tamaño del prototipo y la capacidad de los equipos. La semejanza geométrica quiere decir que existe una única escala para las dimensiones del modelo. Sin embargo, existen aplicaciones en las que conviene tener dos escalas, es decir tener un modelo distorsionado, **ecuación 2.17**. Un caso en el que conviene utilizar un modelo distorsionado es cuando la acción de la gravedad es parte del objeto de estudio, ya que el tiempo no se puede escalar y se deben buscar alternativas para contrarrestar ese efecto, como por ejemplo alterar las dimensiones del modelo para tener dos escalas. En un modelo distorsionado se debe cumplir la **desigualdad 2.18**.

$$\frac{l_P}{l_M} = \frac{h_P}{h_M} = L_e. \quad (2.16)$$

Donde,  $l_P$ : se refiere a la longitud horizontal en el prototipo;  $l_M$ : se refiere a la longitud horizontal en el modelo;  $h_P$ : se refiere a la altura en el prototipo;  $h_M$ : se refiere a la altura en el modelo; y  $L_e$ : es el factor de escala de longitud.

$$\frac{h_P}{h_M} = Y_e, \frac{l_P}{l_M} = X_e. \quad (2.17)$$

Donde,  $l_P$  se refiere a la longitud horizontal en el prototipo;  $l_M$  se refiere a la longitud horizontal en el modelo;  $h_P$  se refiere a la altura en el prototipo;  $h_M$  se refiere a la altura en el modelo;  $X_e$  es el factor de escala de longitud horizontal; y  $Y_e$  es el factor de escala de longitud vertical.

$$X_e > Y_e, \quad (2.18)$$

Donde  $X_e$  es el factor de escala de longitud horizontal; y  $Y_e$ : es el factor de escala de longitud vertical.

El cociente entre las escalas, **ecuación 2.19** se conoce como distorsión y se trata de mantener pequeña, menor a ocho. La conceptualización de un modelo distorsionado tiene las siguientes ventajas: se reduce el tamaño del modelo y los tiempos de ensayo, se exageran las pendientes y los tirantes por lo que se facilita su medición, se obtiene una mayor turbulencia y una mejor semejanza. Por otro lado, presenta las siguientes desventajas: se distorsiona la semejanza dinámica, el escurrimiento puede ser diferente en el modelo respecto al prototipo, existe una mayor posibilidad de error, en ocasiones la impresión del observador resulta desfavorable y no se reproducen bien los efectos en dos o tres dimensiones.

$$r = \frac{X_e}{Y_e} \quad (2.19)$$

Donde  $X_e$  es la escala de longitud horizontal;  $Y_e$  es la escala de longitud vertical; y  $r$  es la relación de semejanzas.

La **semejanza cinemática** se refiere a la similitud de los movimientos entre el modelo y el prototipo. Esto se describe en la **ecuación 2.20**. Esta ecuación unida a la semejanza geométrica determina que la trayectoria de las partículas homólogas entre el modelo y el prototipo será semejante.

$$\frac{v_{x,P}}{v_{x,M}} = \frac{v_{y,P}}{v_{y,M}} = \frac{v_{z,P}}{v_{z,M}} = V_e, \quad (2.20)$$

Donde  $v_{xP}$ ,  $v_{yP}$  y  $v_{zP}$  se refieren a las tres componentes de velocidad de flujo en el prototipo; y  $v_{xM}$ ,  $v_{yM}$  y  $v_{zM}$  se refieren a las tres componentes de la velocidad de flujo en el modelo. Por otra parte,  $v_e$ : es el factor de escala de velocidad.

La **semejanza térmica** es cuando los cocientes de la temperatura de dos puntos cualesquiera son iguales en el prototipo y el modelo. Esto se describe en la **ecuación 2.21**.

$$\frac{T_{1,P}}{T_{1,M}} = \frac{T_{2,P}}{T_{2,M}} = T_e \quad (2.21)$$

Donde,  $T_{1P}$ : se refiere a la temperatura en el punto 1 del prototipo;  $T_{2P}$ : se refiere a la temperatura en el punto 2 del prototipo;  $T_{1M}$ : se refiere a la temperatura en el punto 1 del modelo;  $T_{2M}$ : se refiere a la temperatura en el punto 2 del modelo;  $T_e$ : es el factor de escala

de temperatura.

La **semejanza química** es cuando la concentración de sustancia o de alguna propiedad de dos puntos cualesquiera son iguales en el prototipo y el modelo. Esto se describe en la **ecuación 2.22**.

$$\frac{X_{1,P}}{X_{1,M}} = \frac{X_{2,P}}{X_{2,M}} = X_e \quad (2.22)$$

Donde,  $X_{1P}$ : se refiere a la propiedad en el punto 1 del prototipo;  $X_{2P}$ : se refiere a la propiedad en el punto 2 del prototipo;  $X_{1M}$ : se refiere a la propiedad en el punto 1 del modelo;  $X_{2M}$ : se refiere a la propiedad en el punto 2 del modelo;  $X_e$ : es el factor de escala de la propiedad química.

La **semejanza dinámica**, es cuando existe una semejanza de masas y los polígonos de fuerzas del modelo y el prototipo son geoméricamente semejantes en todos los puntos. Esto se ilustra en la **ecuación 2.23**.

$$\frac{\sum F_P}{\sum F_M} = F_e, \quad (2.23)$$

Donde,  $F_P$  se refiere a las fuerzas que actúan en el prototipo;  $F_M$ : se refiere a fuerzas que actúan en el modelo; y  $F_e$  se refiere al factor de escala de fuerzas.

En este punto es necesario aclarar que no es posible obtener una semejanza dinámica completa entre el prototipo y el modelo, esto debido a la escala. Las ecuaciones y leyes del área de termo-fluidos siguen siendo válidas, sin embargo, debido a la escala, el comportamiento de sus propiedades varía. Por lo que para el modelado hidráulico se utilizan semejanzas dinámicas parciales enfocadas en las fuerzas predominantes, esto se conoce como **semejanza hidráulica**. Comúnmente, las fuerzas de peso y viscosidad son las que tienen mayor importancia en el modelado hidráulico, mientras que, la tensión superficial y las fuerzas elásticas son menos importantes. Dentro de la semejanza hidráulica existen varios tipos de semejanzas parciales, estas según la fuerza predominante que se requiere estudiar. Los tipos son: Semejanza de Froude, Semejanza de Reynolds, Semejanza de Cauchy, Semejanza de Weber.

La **Semejanza de Froude** es el criterio que se utiliza cuando la gravedad es la que predomina en el fenómeno de estudio, esto sucede principalmente en flujos con superficie libre. La condición de semejanza dinámica para este caso se reduce a la **ecuación 2.24**

$$\frac{F_{i,P}}{F_{i,M}} = \frac{F_{g,P}}{F_{g,M}}, \quad (2.24)$$

Donde  $F_{iP}$  son las fuerzas internas en el prototipo;  $F_{gP}$  son las fuerzas producto de la gravedad en el prototipo;  $F_{iM}$  son las fuerzas internas en el modelo; y  $F_{gM}$ : Son las fuerzas producto de la gravedad en el modelo.

Utilizando la definición del número de Froude, se puede escribir,

$$\left(\frac{V}{\sqrt{gL}}\right)_P = \left(\frac{V}{\sqrt{gL}}\right)_M \quad (2.25)$$

Donde  $V$  es la velocidad característica del tipo de ensayo;  $g$  es la aceleración de la gravedad; y  $L$  es la longitud característica del tipo de ensayo.

Además, la expresión de la **ecuación 2.26** corresponde al número de Froude, por lo que este criterio se satisface simplemente con mantener el mismo número de Froude para el prototipo y el modelo. Para este criterio los efectos de escala se observan en las fuerzas viscosas, la tensión superficial y las fuerzas elásticas.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (2.26)$$

Donde,  $V$ : se refiere a la velocidad característica del tipo de ensayo;  $g$ : se refiere a la aceleración de la gravedad;  $L$ : se refiere a la longitud característica del tipo de ensayo.

La **Semejanza de Reynolds** es el criterio que se utiliza cuando la viscosidad es la que predomina en el fenómeno de estudio, esto puede ocurrir en flujos sin superficie libre, flujos alejados de esta o sólidos sumergibles donde la fricción es considerable. La condición de semejanza dinámica en este caso se reduce a la **ecuación 2.27**

$$\frac{F_{i,P}}{F_{i,M}} = \frac{F_{\mu,P}}{F_{\mu,M}} \quad (2.27)$$

Donde,  $F_{i,P}$ : son las fuerzas internas en el prototipo;  $F_{g,P}$ : Son las fuerzas producto de la viscosidad en el prototipo;  $F_{i,M}$ : son las fuerzas internas en el modelo;  $F_{g,M}$ : Son las fuerzas producto de la viscosidad en el modelo.

o bien,

$$\left(\frac{LV}{\eta}\right)_P = \left(\frac{LV}{\eta}\right)_M \quad (2.28)$$

Donde,  $V$ : es la velocidad característica del tipo de ensayo;  $L$ : es la longitud característica del tipo de ensayo;  $\eta$ : es la viscosidad cinemática del fluido, la cual se calcula con la fórmula indicada en la **ecuación 2.29**.

$$\eta = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.29)$$

Donde,  $\eta$ : es la viscosidad cinemática del fluido;  $\mu$ : es la viscosidad dinámica del fluido;  $\rho$  es la densidad del fluido.

La expresión de la **ecuación 2.30** corresponde al número de Reynolds, por lo que este criterio se satisface simplemente con mantener el mismo número de Reynolds para el prototipo y el modelo.

$$Re = \frac{LV}{\eta} \quad (2.30)$$

Donde,  $\eta$ : es la viscosidad cinemática del fluido;  $\mu$ : es la viscosidad dinámica del fluido;  $\rho$  es la densidad del fluido.

La **Semejanza de Cauchy** es el criterio que se utiliza cuando las fuerzas elásticas predominan en el fenómeno de estudio, esto puede ocurrir en análisis de diques, buques o situaciones de compresibilidad del fluido. La condición de semejanza dinámica en este caso se reduce a la **ecuación 2.31**

$$\frac{F_{i,P}}{F_{i,M}} = \frac{F_{e,P}}{F_{e,M}} \quad (2.31)$$

Donde,  $F_{iP}$ : son las fuerzas internas en el prototipo;  $F_{gP}$ : Son las fuerzas elásticas en el prototipo;  $F_{iM}$ : son las fuerzas internas en el modelo;  $F_{gM}$ : Son las fuerzas elásticas en el modelo.

o bien,

$$\left(\frac{V^2 \rho}{E}\right)_P = \left(\frac{V^2}{E}\right)_M \quad (2.32)$$

Donde,  $V$ : es la velocidad característica del tipo de ensayo;  $\rho$ : es la densidad del fluido;  $E$ : es el módulo de elasticidad del fluido.

La expresión de la **ecuación 2.33** corresponde al número de Cauchy, por lo que este criterio se satisface simplemente con mantener el mismo número de Cauchy para el prototipo y el modelo. Para reducir los efectos de escala para este criterio los modelos tienden a ser de gran tamaño.

$$Ca = \frac{V^2 \rho}{E} \quad (2.33)$$

Donde,  $V$ : es la velocidad característica del tipo de ensayo;  $\rho$ : es la densidad del fluido;  $E$ : es el módulo de elasticidad del fluido.

La **Semejanza de Weber** es el criterio que se utiliza cuando las fuerzas de tensión superficial predominan en el fenómeno de estudio, esto puede ocurrir cuando se estudian flujos con pequeño espesor. La condición de semejanza dinámica en este caso se reduce a la **ecuación 2.34**

$$\frac{F_{i,P}}{F_{i,M}} = \frac{F_{\sigma,P}}{F_{\sigma,M}} \quad (2.34)$$

Donde,  $F_{iP}$ : son las fuerzas internas en el prototipo;  $F_{gP}$ : Son las fuerzas de tensión superficial en el prototipo;  $F_{iM}$ : son las fuerzas internas en el modelo;  $F_{gM}$ : Son las fuerzas de tensión superficial en el modelo.

o bien,

$$\left(\frac{\rho L^2 V^2}{\sigma L}\right)_P = \left(\frac{\rho L^2 V^2}{\sigma L}\right)_M \quad (2.35)$$

Donde,  $\rho$ : es la densidad del fluido;  $V$ : es la velocidad característica del tipo de ensayo;  $L$ : es la longitud característica del tipo de ensayo;  $\sigma$ : es el coeficiente de tensión superficial del fluido

La expresión de la **ecuación 2.36** corresponde al número de Weber, por lo que este criterio se satisface simplemente con mantener el mismo número de Weber para el prototipo

y el modelo. Para contrarrestar los efectos de escala se deben hacer calados para vencer la capilaridad del fluido.

$$W = \frac{V}{\sqrt{\frac{\sigma}{\rho L}}} \tag{2.36}$$

Donde,  $\rho$ : es la densidad del fluido;  $V$ : es la velocidad característica del tipo de ensayo;  $L$ : es la longitud característica del tipo de ensayo;  $\sigma$ : es el coeficiente de tensión superficial del fluido.

En la tabla de la figura 2.25, se muestran las relaciones de escala para cada criterio de semejanza.

MAGNITUD DERIVADA	DIMENSIÓN		CRITERIO DE SEMEJANZA			
	L-M-t	L-M-F*	FROUDE	REYNOL	CAUCH	WEBER
TIEMPO ( $(\lambda_t)$ )	T	(LM/F) <sup>1/3</sup>	$\lambda^{1/2}$	$\lambda^2$	$\lambda$	$\lambda^{3/2}$
MASA ( $(\lambda_M)$ )	M	M	$\lambda^3$	$\lambda^3$	$\lambda^3$	$\lambda^3$
VELOCIDAD	LT <sup>-1</sup>	(LF/M) <sup>1/3</sup>	$\lambda^{1/2}$	$\lambda^{-1}$	1	$\lambda^{-1/2}$
VELOC.	T <sup>-1</sup>	T <sup>-1</sup>	$\lambda^{-1/2}$	$\lambda^{-2}$	$\lambda^{-1}$	$\lambda^{-3/2}$
ACELERACIÓN	LT <sup>-2</sup>	LT <sup>-2</sup>	1	$\lambda^{-3}$	$\lambda^{-1}$	$\lambda^{-2}$
CAUDAL	L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup>	L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup>	$\lambda^{5/2}$	$\lambda$	$\lambda^3$	$\lambda^{-2}$
FUERZA	MLT <sup>-2</sup>	F	$\lambda^3$	1	$\lambda^2$	$\lambda$
PRESION	ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>	F/L <sup>2</sup>	$\lambda$	$\lambda^{-2}$	1	$\lambda^{-1}$
ENERGÍA	ML <sup>2</sup> T <sup>-2</sup>	LF	$\lambda^4$	$\lambda$	$\lambda^3$	$\lambda^2$

\* Se incluyen en esta columna las dimensiones de las magnitudes derivadas considerando la fuerza (F) como magnitud fundamental en vez del tiempo (t) como es lo habitual.

\*\* Escalas de los números de Reynolds, Cauchy y Weber:  $(R_e)_p = \lambda^{3/2} (R_e)_m$ ;  $(C_a)_p = \lambda^{1/2} (C_a)_m$ ;  $(W)_p = \lambda (W)_m$  en la semejanza de Froude.

Figura 2.25: Productos adimensionales independientes. Fuente: [Gutiérrez Serret, 2021]

Asimismo, para un correcto modelado es indispensable entender si se trata de un problema de superficie libre o de frontera rígida. Un modelo de superficie libre va a ser aquel en el que el flujo no sea dirigido por conductos, por ejemplo, el oleaje, canales abiertos y los distintos cuerpos de agua. En este caso las fuerzas más importantes son aquellas provocadas por la gravedad, por ejemplo, el peso del propio fluido sobre él mismo. En este caso como se mencionó anteriormente el número de Froude es predominante en el diseño del modelo. No es necesario conservar el número de Reynolds del prototipo en el modelo, basta con superar el número de Reynolds crítico del sistema para obtener una semejanza dinámica aceptable. Mientras que un modelo de frontera rígida es aquel en el cual el flujo se encuentra contenido dentro de conductos que dirigen su recorrido, tal es el caso de tuberías, ductos y canales cerrados. En este caso la geometría es muy importante ya que determina las características del flujo, el cual debe mantenerse turbulento. Nuevamente, el número de Reynolds no se debe igualar, es suficiente con pasar el valor crítico.

Por último, dentro de las clasificaciones anteriormente mencionadas se debe evaluar la participación de la rugosidad en el factor de estudio, ya que su intervención u omisión guiarán esta parte del modelado. Cuando la rugosidad no influye basta con aproximarse a ella utilizando un material con el acabado más adecuado, debe cumplir la relación entre el factor de escala de rugosidad y de longitud mostrada en la ecuación 2.37. Dado que  $L_e$  es mayor que la unidad  $n_e$  también lo será y por ende el modelo será más liso que el prototipo. Estos



problemas pueden ser: obras de toma, pilas, compuertas o donde el tamaño del modelo impide el desarrollo de la rugosidad.

$$n_e = L_e^{1/6} \quad (2.37)$$

Por otro lado, cuando la rugosidad influye se debe calibrar el modelo lo más cercano a las condiciones de la naturaleza, esto con el objetivo de obtener el mismo coeficiente de pérdidas en el modelo y el prototipo. Con este valor se simula correctamente la combinación entre rugosidad y viscosidad, no así cada una por aparte, sin embargo, los resultados obtenidos son aceptables. La rugosidad se considera principalmente en condiciones de flujo en transición o cuando el fluido se caracteriza como hidráulicamente rugoso. Existen tres formas de calcular el coeficiente de pérdidas puede ser con la fórmula de Chezy, **ecuación 2.38**, la fórmula de Manning, **ecuación 2.39** o bien la fórmula de Darcy Weisbach, **ecuación 2.40** junto con el diagrama de Moody.

Cuando se trata con flujo en canales abiertos de sección transversal uniforme con pendiente constante, con frecuencia se usa la **fórmula de Chezy**, que se puede expresar como:

$$Q = Ck_1A\sqrt{RS} \quad (2.38)$$

Donde,  $Q$  es el caudal o gasto volumétrico;  $C$  es el coeficiente de Chezy, con unidades de  $g^{1/2}$ ;  $k_1$  es un factor de conversión de unidades que vale 0.552 para el Sistema Internacional de unidades y es unitario para el Sistema Inglés;  $A$  es el área de la sección hidráulica;  $R$  es el radio hidráulico del conducto; y  $S$  es la pendiente del canal.

Otra alternativa para el mismo tipo de flujo es la **fórmula de Manning**, que se expresa a continuación:

$$Q = A \frac{k_2}{n} R^{2/3} \sqrt{S} \quad (2.39)$$

Donde,  $Q$ : es caudal o gasto;  $n$ : es el coeficiente de Manning;  $k_2$ : es 1 para el Sistema Internacional de unidades y 1,486 para el Sistema Inglés. Se calcula como  $g^{1/2}$ ;  $A$ : es el área de la sección hidráulica;  $R$ : es el radio hidráulico del conducto;  $S$ : la pendiente de inclinación del conducto.

### Fórmula de Darcy Weisbach

$$h_f = f \frac{LV^2}{2Dg} \quad (2.40)$$

Donde;  $h_f$ : representa las pérdidas de carga entre los dos puntos que distan  $L$ ;  $D$ : es el diámetro del conducto, se puede reemplazar por 4 veces el radio hidráulico;  $f$ : es el coeficiente de pérdidas, el cual se evalúa con el diagrama de Moody;  $V$ : es la velocidad;  $L$ : es la longitud del tramo en cuestión;  $g$ : es la gravedad.

## 2.8. Turbinas hidráulicas

Las turbinas son máquinas hidráulicas compuestas por álabes, un rotor y una carcaza. Se utilizan para aprovechar la energía cinética y potencial de un fluido y transformarla en energía mecánica. Conforme el flujo atraviesa el dispositivo, esta energía puede ser convertida posteriormente de energía mecánica a energía eléctrica. Las turbinas se clasifican en dos grupos: turbinas de desplazamiento positivo y turbinas dinámicas. **Las turbinas de desplazamiento positivo** son utilizadas como instrumentos de medición de gasto volumétrico, ya que no producen potencia. Un ejemplo es el disco nutante de la **figura 2.26**.

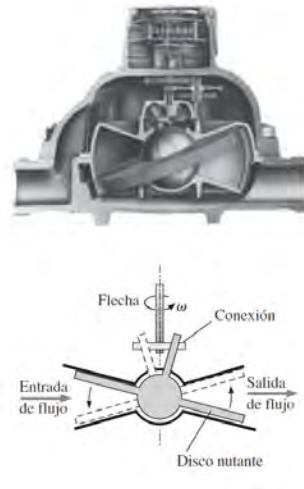


Figura 2.26: Disco Nutante. Fuente: [Cengel, 2006]

Por otro lado, **las turbinas dinámicas** pueden utilizarse como instrumento de medición, para producir potencia y en la generación de electricidad. Estas a su vez se clasifican en dos categorías: turbinas de reacción y turbinas de impulso. **Las turbinas de reacción**, cuentan con álabes directores fijos y ajustables en el distribuidor, las cuales dirigen el flujo hacia el rodete o rotor donde las aspas giratorias se encargan de extraer la energía del fluido. Dicho flujo entra a alta presión tangente a los álabes. Estas turbinas producen más potencia que las turbinas de impulso bajo iguales dimensiones y condiciones, ya que aprovechan tanto la energía cinética del cuerpo de agua como la energía potencial de la caída o de la diferencia de presiones. En esta categoría se encuentran dos tipos de turbinas: la turbina Kaplan y la Turbina Francis. **La turbina Kaplan** es una máquina de flujo axial de doble regulación ya que puede ajustar tanto el giro, como el ángulo de los álabes para ajustarse a las variaciones de caudal y los requerimientos de potencia, su esquema se muestra en la **figura 2.27**. Se utilizan en aprovechamientos donde la carga hidrostática, es decir la caída es baja y el gasto volumétrico o caudal es alto.

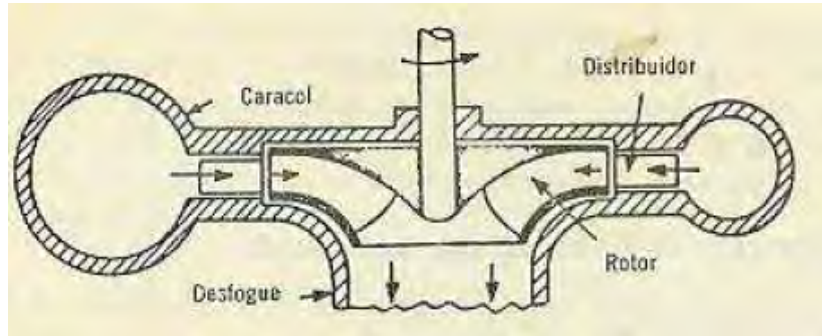


Figura 2.27: Esquema Turbina Kaplan. Fuente: [Mataix, 1984]

La turbina Francis se utilizan para caudales de entre 10 y 200  $m^3/s$  puede ser de dos tipos: **Francis pura o radial**, cuando el flujo entra en dirección totalmente radial al rotor, como se muestra en la **figura 2.28**. o bien **Francis Mixta** cuando el flujo entra a la turbina en dirección radial, pero en su recorrido se transforma en flujo axial, como se muestra en la **figura 2.29**. Si hay una mayor carga hidrostática se tiene mayor acción radial; si hay mayor caudal se tiene mayor acción axial. Comúnmente las turbinas Francis son sometidas a cargas axiales altas y presiones menores que las de una turbina Kaplan.

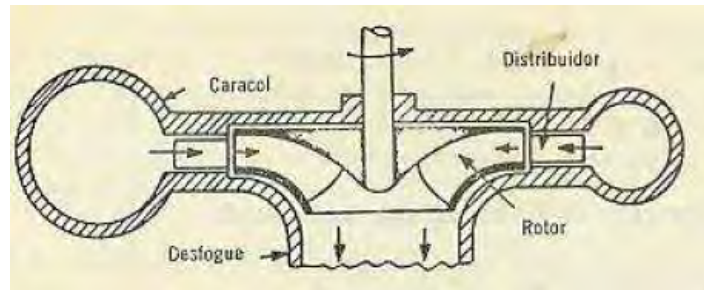


Figura 2.28: Esquema Turbina Francis Pura. Fuente: [Mataix, 1984]

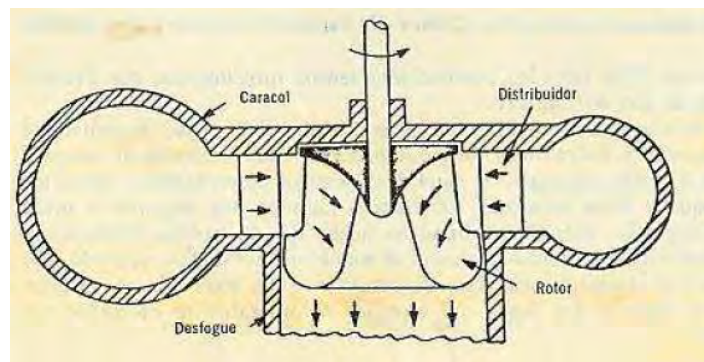


Figura 2.29: Esquema Turbina Francis Mixta. Fuente: [Mataix, 1984]

**Las turbinas de impulso o turbinas Pelton:** aprovechan únicamente la energía cinética del fluido ya que no hay cambio de presión y la reacción por ende es cero, su esquema se muestra en la **figura 2.30**. Estas turbinas pueden manejar una mayor carga hidrostática en volúmenes más pequeños. Los álabes de este tipo de máquina son en forma de cuchara o paleta y son los encargados de transferir la energía a la flecha de la turbina. Operan a una velocidad específica en un rango de 10 a 60 en el Sistema Internacional. Una turbina Pelton puede ser instalada en dos posiciones: **Eje horizontal**, lo cual permite instalar turbinas gemelas y la maquinaria es más accesible para mantenimiento; o **Eje Vertical**, esta configuración permite manejar mayores cargas, pero se dificulta su ensamblaje y mantenimiento.

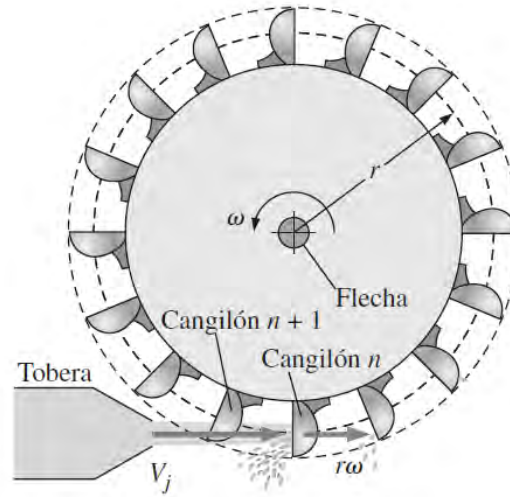


Figura 2.30: Esquema Turbina Pelton. Fuente: [Cengel, 2006]

Asimismo, existen las microturbinas, las cuales son utilizadas en aprovechamientos pequeños, están compuestas por menos componentes, no requieren del monitoreo humano constante y tienen menor impacto en el medio. Se pueden citar las siguientes: **Michell Banki** es una turbina de impulso, la entrada es radial y la energía es transferida al rotor en dos etapas, su esquema se ilustra en la **figura 2.31**. Esta máquina funciona para amplios caudales sin gran variación en su eficiencia y descarga a presión atmosférica devolviendo el agua a su curso.

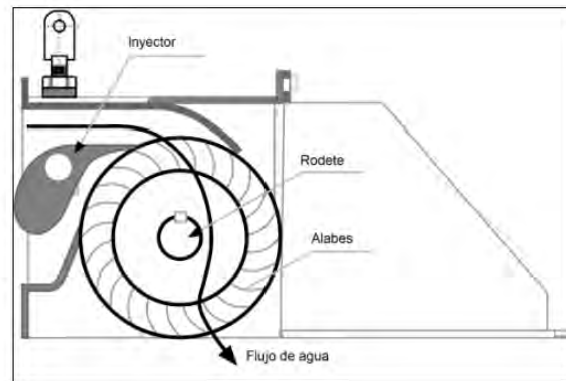


Figura 2.31: Esquema Turbina Michell Banki. Fuente: [Reyna and et al., 2018]

La **microturbina axial**, es una turbina de reacción de flujo axial, irreversible y de pocas palas. Tiene una gran capacidad para sobrecargas pese a sus reducidas dimensiones. Su esquema se muestra en la **figura 2.32**

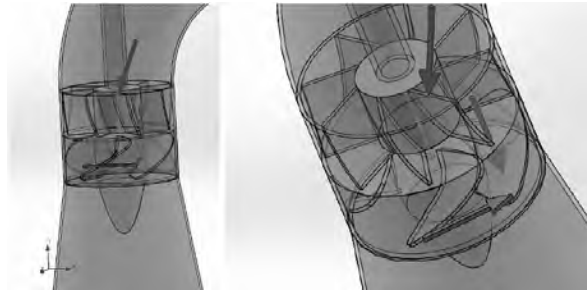


Figura 2.32: Esquema Micro turbina axial. Fuente: [Reyna and et al., 2018]

La **turbina Turgo**, es una turbina de impulso, de flujo libre y radial, tiene velocidades específicas mayores a las turbinas Pelton. Su esquema se muestra en la **figura 2.33**

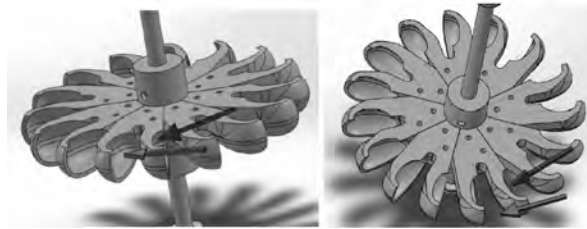


Figura 2.33: Esquema Turbina Turgo. Fuente: [Reyna and et al., 2018]

Por último, existen máquinas hidráulicas de doble función, las cuales pueden operar como bombas de desplazamiento positivo o como turbinas. Son más eficientes al operar como bombas y en conjunto manejan una eficiencia del 80 %.

Para seleccionar el tipo de turbina que mejor se adapte al proyecto se debe tomar en cuenta tanto criterios técnicos como económicos, en la parte técnica se debe considerar las siguientes variables: la velocidad específica, caudal, carga hidrostática, altura de caída y velocidad de giro. Comúnmente se determina la carga y el caudal, con estos valores se estima la velocidad específica, **ecuación 2.41**. La velocidad de giro se aproxima con los datos conocidos. Luego se calcula la potencia total disponible.

$$N_s = \frac{N\sqrt{P}}{H^{5/4}} \quad (2.41)$$

Donde:  $N_s$ : es la velocidad específica;  $N$ : es la velocidad de giro del rodete, medida en rad/s;  $Q$  es el caudal, medido en  $m^3/s$ ;  $H$ : es la caída, dada en metros;  $P$  es la potencia. Estas propiedades pueden medirse directamente para estimar la velocidad específica.

Cabe aclarar que existe una formulación adimensional, sin embargo, por las características del proyecto es más conveniente utilizar la ecuación planteada anteriormente. Según la **tabla 2.3** se puede determinar el tipo de turbina adecuada para la aplicación.

Cuadro 2.3: Clasificación de los tipos de turbinas según la velocidad específica. Fuente [Mataix, 1984]

Turbina	$N_s$
Pelton	$N_s < 32$
Francis	$32N_s < 450$
Kaplan	$N_s > 450$

La potencia se puede obtener a partir de la potencia hidráulica, **ecuación 2.42**

$$P_H = \rho Q H g \quad (2.42)$$

Donde:  $P_H$ : es la potencia hidráulica disponible, dada en  $W$ ;  $g$ : es la gravedad promedio,  $9,81 \text{ m/s}^2$ ;  $\rho$ : es la densidad del agua, dada en  $\text{kg/m}^3$ ;  $H$ : es la altura de la cabeza de agua.

Por último, es importante tener un control adecuado de la velocidad de la turbina ya que cualquier variación considerable tiene consecuencias significativas tanto en el desempeño como en la estabilidad del sistema. El correcto control se realiza con sensores y sistemas de regulación que ajustan el paso del flujo a los requerimientos del sistema. De igual forma es importante considerar el Golpe de Ariete y la Cavitación en los diseños. **El Golpe de ariete** es cuando por el cierre repentino de válvulas se da un aumento de presión que se extiende a lo largo de la tubería, comprimiendo el material. Por otro lado, la **Cavitación** es cuando la presión del líquido que viaja por la tubería desciende hasta la presión de vapor, por lo que parte del líquido se convierte en vapor que al pasar por la tubería produce ruido, vibraciones y erosión en superficies metálicas, todo lo anterior ocasiona daños en la tubería y disminución en la eficiencia del equipo.

## Capítulo 3

# Metodología

### 3.1. Etapa 1 Elaboración de la investigación teórica

Esta primera etapa se centró en la revisión bibliográfica para lograr comprender los fenómenos que transportan energía a través de los océanos, los factores y condiciones que los originan y los sistemas que han sido desarrollados para aprovechar esta energía en la generación eléctrica. Posteriormente, se conceptualizó el panorama eléctrico del país, así como las condiciones y características del oleaje que baña la costa Pacífica costarricense. Para recopilar esta información se consultaron libros sobre oleaje y modelado hidráulico. De igual manera, se estudiaron informes sobre la producción energética en Costa Rica y sobre el potencial energético en los océanos del país. Asimismo, se revisaron artículos científicos y tesis que abarcan temas como: oleaje, rompeolas, dispositivos de aprovechamiento energético en los océanos, modelado hidráulico, condiciones del oleaje costarricense. Además, se asistió de manera virtual a diversas conferencias sobre energía undimotriz, facilitadas por distintas organizaciones mundiales y se participó como oyente en el curso de Ingeniería Marítima de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica.

### 3.2. Etapa 2 Elaboración del modelo a escala y ejecución de pruebas.

El diseño del experimento inició con la definición de una escala adecuada el valor propuesto inicialmente, tomando en cuenta las dimensiones del canal de oleaje, fue 1 : 25. Una vez definida la escala se contrató a la empresa Piedras y lajas donde se fabricaron las piezas en concreto. Se eligió este material ya que mantiene su densidad y, además, las modificaciones se pueden adaptar fácilmente a la pieza utilizando herramientas convencionales como un taladro. A la escala inicial fue difícil su fabricación en concreto, ya que eran muy pequeñas y el material se fragmentaba. Se decidió que para esta segunda fase de fabricación de moldes se debía utilizar una escala mayor de 1 : 20, para así facilitar su fabricación en concreto. Ya que entre más grande la estructura se obtiene un resultado más próximo a la realidad. La diferencia de escalas se aprecia en la **figura 3.1** Una vez terminadas las piezas estas fueron trasladadas al laboratorio de IMARES. Donde se procedió a lijar las piezas para eliminar desperfectos producto de la colada, **figura 3.2**.



Figura 3.1: Dimensionado de la escala adecuada. A la izquierda escala 1 : 25 a la derecha escala 1 : 20

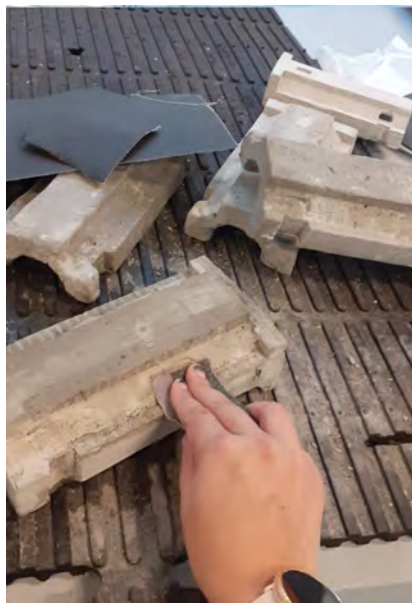


Figura 3.2: Proceso de lijado



Para llevar a cabo los ensayos se utilizó el equipo descrito en el **cuadro 3.1**. Previo al ensayo es necesario definir las condiciones de operación del canal. Estos parámetros son configurados en la computadora de control con base en el modelo, las dimensiones del canal, el nivel de agua dentro del canal y los requerimientos de las pruebas. Cabe aclarar que la altura del agua en el tanque debe ser siempre la misma, para así garantizar siempre igualdad de condiciones en las mediciones. Para este caso se tomaron en cuenta condiciones típicas de oleaje en la costa Pacífica de Costa Rica. Los parámetros definidos se indican en el **cuadro 3.2**. Por último, se establecieron los parámetros a medir en los ensayos, estos se muestran en el **cuadro 3.3**

Cuadro 3.1: Equipo utilizado en los ensayos de oleaje

Equipo	Detalle
Computadora de control	Con bloqueos de seguridad y paro de emergencia
Canal de pruebas	Dimensiones 10 m x 0,30 m x 0,50 m. Escala máxima 1 : 50 <b>figura 3.3</b>
Generador de oleaje	Con absorción activa
Software controlador del generador	Controlador VTI
Software de simulación de oleaje	AWA sys
Piezas del modelo	4 niveles de 3 piezas intercaladas
Sistema de recolección del agua saliente	Mangueras y botellas de 2 litros
Probeta	Para medir el volumen de agua recolectado
Bloques de concreto y secciones de hule	Para dar mayor soporte al modelo



Figura 3.3: Canal de oleaje utilizado en los ensayos

Cuadro 3.2: Condiciones de ensayo

Parámetro	Valor
Altura del agua en el canal	0,20 m
Periodo	12 s - 18 s
Altura de ola	0,6 m - 1,2 m

Cuadro 3.3: Parámetros a medir

Parámetro	Unidad de medición	Instrumento de medición
Altura de ola	metro	Software AWA Sys
Periodo	segundos	Software AWA Sys
Tiempo de ensayo efectivo	segundos	Cronómetro
Coefficiente de reflexión	% de energía reflejada	Software AWA Sys
Volumen recolectado	mililitros	Probeta

Otro requerimiento del proyecto fue diseñar un sistema para la recolección del volumen de agua. Durante el proceso se plantearon varias posibilidades. La primera fue recolectar con una bolsa plástica el agua que salía por la parte superior del rompeolas. Esto no fue práctico, no se logró recolectar el agua. Luego se planteó utilizar manguera de 2,5 cm de diámetro introducidas en un extremo dentro del modelo y en el otro conectada a una botella plástica. Estas mangueras, **figura 3.4** funcionaron bien, sin embargo, al ser tan delgada se deformó muy rápidamente. Por esta razón, se optó por buscar una manguera de 2,5 cm mayor diámetro y mayor flexibilidad. Se seleccionó una manguera en espiral facilitada por el taller de Ingeniería Mecánica de la UCR, **figura 3.5**. En un inicio se acopló a con una gasa plástica y se adhirió con silicón a la pieza de concreto. Sin embargo, la altura a vencer fue demasiada para la presión y el caudal saliente del rompeolas, por lo que se tuvo que cortar la manguera a 45° y adherirla con silicón a la pieza de concreto.



Figura 3.4: Proceso de modificación de las piezas



Figura 3.5: Aplicación de silicón para adherir las mangueras al modelo

Se realizaron cuatro modificaciones a las piezas con respecto a el tamaño y posición de los agujeros con ayuda de un esmeril, **figura 3.6** y un taladro, **figura 3.7**. Además, fueron incorporadas rampas en el nivel más profundo, **figura 3.8**. Estas rampas inicialmente se fabricaron en pasta para modelar, pero debido a su desgaste se reemplazaron por unas piezas metálicas, **figura 3.9**. Todo lo anterior se llevó a cabo con el fin de calzar adecuadamente las piezas y redirigir el flujo de agua de una manera más eficiente. Estas modificaciones se plantearon a medida que se iban realizando pruebas. El primer ensayo se realizó con la configuración original, de su observación se idearon las primeras modificaciones. Las cuales fueron incorporadas al grupo de piezas utilizadas en el segundo ensayo. Así sucesivamente se realizaron cuatro ensayos dentro del proceso de mejora continua y optimización del diseño. De cada ensayo se recolectaron los datos mencionados anteriormente y se analizaron con el fin de determinar la mejor configuración y su rango de funcionamiento según potencial energético. Una vez finalizado el proceso iterativo se hace un ensayo con oleaje irregular en el canal pequeño con las piezas de la mejor configuración en escala 1:20. Finalmente se realiza un ensayo de estabilidad para comprobar la doble funcionalidad del sistema. Este ensayo consistió en llevar al fallo el rompeolas. En la **figura 3.10** se muestra un diagrama de la configuración general de las piezas. Se diseñó el experimento con cuatro niveles de tres piezas cada uno. Las piezas deben ir intercaladas para que se forme el característico panel de abejas de la estructura. Por lo que en los niveles dos y cuatro la tercera pieza fue cortada por la mitad y con ella se calzaron las otras dos piezas en el lugar correcto. En la **figura 3.11** se muestra esta misma configuración general, en este caso con una fotografía las piezas reales dentro del canal de pruebas. La estructura a los lados fue contenida por las propias paredes del canal y

se agregaron hules a los extremos para fijar las piezas.



Figura 3.6: Esmeril



Figura 3.7: Taladro



Figura 3.8: Elaboración rampas en pasta para modelar



Figura 3.9: Elaboración rampas en metal

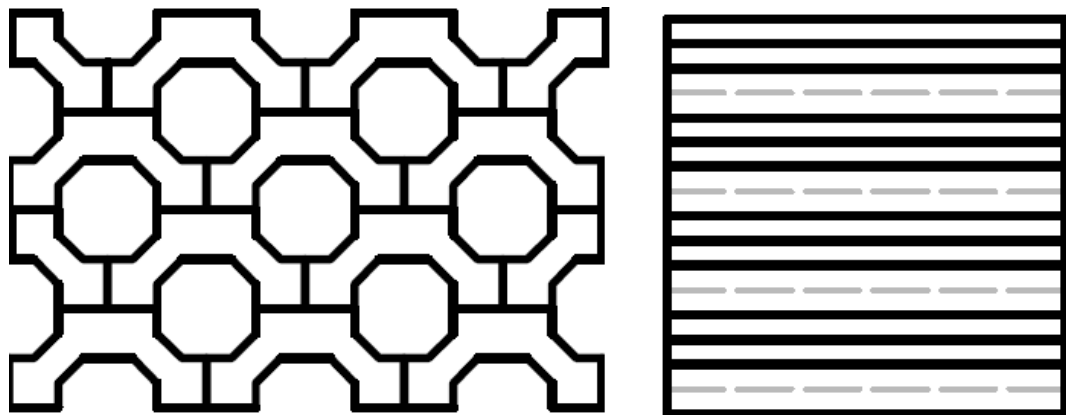


Figura 3.10: Diagrama configuración del modelo





Figura 3.11: Configuración modelo real

Paralelamente al trabajo con las piezas en escala 1 : 20, se trabajó en la elaboración de piezas en escala 1 : 10 para ser probadas con la modificación final en el canal grande del laboratorio. Estas piezas fueron elaboradas a partir de un molde de concreto suministrado por el señor Mauricio Wesson. El procedimiento a seguir, el cual se ilustra en las **figuras 3.12 y 3.13**, fue el siguiente:

1. Engrasar el molde con grasa lubricante multipropósito para trabajo pesado.
2. Cortar una malla metálica para agregarla al molde y darle mayor soporte a la mezcla. Esta malla debe calzar perfectamente en el molde tomando en cuenta que no se salga de las paredes ni que tape algún agujero.
3. Ensamblar el molde empernado con ayuda de una llave de tuercas y un taladro con cubos # 13 y # 14. Se debe tener extremo cuidado en lograr un buen ajuste, de manera tal que todas las piezas del molde queden en contacto para que la mezcla no se salga.
4. Preparar la mezcla de concreto. Para esto se necesitan los materiales y herramientas que se indican en el **cuadro 3.4**.

Cuadro 3.4: Materiales y herramientas para elaborar la mezcla

Herramienta	Material
Balde	Mezcla de concreto en polvo
Pala	Agua
Espátula	Fibra de vidrio
Taladro	
Varilla para mezclar concreto	
Extensión	



Figura 3.12: Proceso de ensamblaje y desensamblaje del molde



Figura 3.13: Proceso de elaboración de la mezcla

Debe tenerse presente que el saco de concreto no se puede humedecer, ya que pierde sus propiedades. Por lo que debe almacenarse elevado del piso y en bolsa plástica y durante la preparación de la mezcla se debe cuidar que el saco no se moje. La mezcla y el agua se van agregando simultáneamente de a poco hasta obtener una mezcla uniforme con una consistencia adecuada y hasta obtener la cantidad necesaria para rellenar el molde, en este caso se necesitaba aproximadamente 1/3 del balde por colada. Para mezclar los materiales se utiliza la pala y el taladro. La consistencia no debe ser ni muy líquida ni muy seca. Cuando la mezcla está lista se deposita en el molde con ayuda de una espátula y sacando el aire con una varilla o alzando el molde una pequeña altura y golpeándolo contra el suelo. El molde debe llenarse por completo y se deja secar por una semana. Pasado el tiempo se desmolda la pieza con ayuda del taladro y la llave de tuercas para quitar los pernos y con ayuda de espátulas, martillo y una herramienta de palanca se retira la pieza de la base. Una vez desmoldada la pieza se deja al aire libre. Al retirar la pieza se debe limpiar el molde y volverlo a engrasar antes de repetir el proceso. Hubo piezas que salieron defectuosas y por esta razón se tomó la decisión de incorporar fibra de vidrio a la mezcla, esta se incorporaba cuando se tenía la mitad del concreto requerido preparado. También se optó por prescindir de la malla luego de que se observó que más que un soporte estaba siendo un plano de falla para la pieza. Se elaboraron exitosamente 18 piezas con este procedimiento.

Estas piezas fueron modificadas para cumplir con los requerimientos del modelo del cuarto ensayo con ayuda del Departamento de Concreto del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME), **figuras 3.14 y 3.15**. Sin embargo, no fue posible realizar el ensayo con estas piezas debido a un problema de fugas que presenta el canal de oleaje, lo cual lo deja fuera de funcionamiento.



Figura 3.14: Máquina perforadora extractora de núcleos, LANAMME UCR





Figura 3.15: Máquina perforadora extractora de núcleos, LANAMME UCR

### 3.3. Etapa 3 Viabilidad del proyecto.

Esta sección corresponde a la etapa final del proyecto en la cual, a partir de los datos recopilados sobre el caudal recogido, se propone una configuración para la instalación de los dispositivos generadores o conversores de energía. En este caso se propone: ubicación, tipo y tamaño de las turbinas a utilizar. Para esto fue necesario convertir los datos obtenidos a escala 1 : 1 para poder utilizar las ecuaciones expuestas en el marco teórico y determinar un potencial energético del sistema. La potencia teórica fue determinada instantánea, en unidades de kW y kW/m. Siendo esta última una potencia unitaria, es decir potencia por metro de rompeolas. También se determinó la energía teórica que podría extraerse de la estructura en un año, en unidades de kWh/m. Los datos de potencia y energía fueron obtenidos en las unidades mencionadas ya que era necesaria una homogeneidad dimensional con los datos de investigaciones previas. Por último, se determinó la eficiencia del rompeolas doble propósito con base en los datos de potencial teórico determinados en investigaciones previas. Todos los cálculos fueron desarrollados con ayuda de hojas de cálculo electrónicas y las ecuaciones mencionadas en el marco teórico para potencia hidráulica y energía de las olas.

# Capítulo 4

## Resultados

### 4.1. Condiciones del oleaje en Costa Rica (costa del Pacífico)

Una vez definidas las características del oleaje de la costa Pacífica de Costa Rica que hacen viable el desarrollo de aprovechamientos undimotrices en la región, se procede a ilustrar, con ayuda de las **figuras 4.1 y 4.2**, la base de datos a utilizada en los ensayos de laboratorio. Dichos datos corresponden a la Campaña de Cabo Blanco de 2015 a 2021.

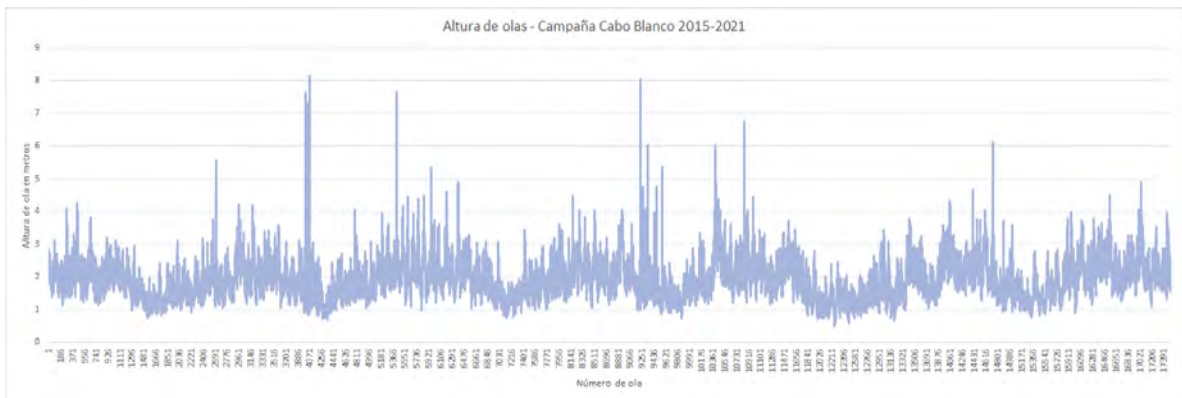


Figura 4.1: Gráfico de altura de ola vs número de ola. Campaña Cabo Blanco 2015 - 2021

Al observar las **figuras 4.1 y 4.2**, se pueden comprobar la caracterización realizada por [G.Govaere et al., 2020] antes mencionadas del oleaje de la Costa Pacífica de Costa Rica. En la figura **4.2** se confirma que las olas son de largo periodo, la mayoría de las olas tienen un periodo mayor a los 15 segundos. Además, en la **figura 4.1** se observa un patrón similar y estable, tanto anualmente como como entre años. Por último, se concluye que existe la presencia de varias tormentas a la vez debido a que la saturación de las gráficas muestra múltiples olas a la vez.

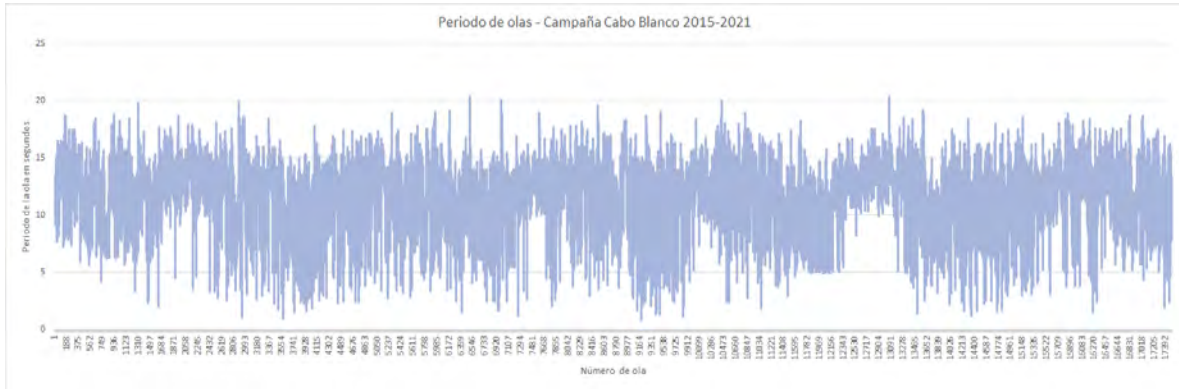


Figura 4.2: Gráfico de periodo de ola vs número de ola. Campaña Cabo Blanco 2015 - 2021

## 4.2. Evaluación de los ensayos

### 4.2.1. Descripción de los modelos y las modificaciones planteadas

Esta sección corresponde a la presentación de los datos recolectados a través de los ensayos de las distintas configuraciones de piezas del modelo. Se pusieron a prueba cuatro modelos con distintas modificaciones para evaluar su desempeño en cuanto a recolección de agua. Durante los ensayos se registró: la altura de la ola, el periodo, de la ola, el tiempo efectivo de ensayo, el coeficiente de reflexión y el volumen recolectado. El periodo y la altura de la ola fueron registrados para confirmar que las condiciones de oleaje simuladas en el canal fueran las requeridas. El tiempo efectivo de ensayo fue cronometrado para eliminar el ruido de las mediciones y garantizar condiciones de repetibilidad. EL coeficiente de reflexión y el volumen recolectado fueron los parámetros para evaluar el desempeño de la estructura. Los modelos evaluados fueron: la configuración original y tres optimizaciones del diseño, las cuales consistieron en reubicación y cambio de tamaño de las salida de agua. Una vez seleccionado el modelo de mejor desempeño en cuanto a captación de agua, se realizaron ensayos de oleaje irregular con ese modelo con el fin de exponer la estructura a condiciones más cercanas a la realidad y evaluar su potencial con base en el volumen de agua recolectado. Finalmente, con el modelo seleccionado previamente se realizó un ensayo de estabilidad donde el objetivo fue determinar el punto de falla del sistema. Se probó también cómo se comportaba el sistema agregando piezas más pesadas. Los datos obtenidos de estabilidad se compararon con datos teóricos de estabilidad para piezas prismáticas sólidas de concreto

En las **figura 4.3** se presenta el diagrama de la configuración para el primer ensayo. Para la elaboración de este modelo se perforaron los agujeros en las piezas tal y como fueron patentados. Este primer ensayo fue llevado a cabo con el fin de analizar el desempeño de la estructura y detectar posibles puntos de mejora para proponer las modificaciones a estudiar. En la **figura 4.4** se muestra una de las piezas utilizadas en el ensayo de la configuración original. En este primer ensayo fue evidente que los agujeros eran muy pequeños y esto impedía el flujo del agua. Además, tener tantos agujeros y tan distantes entre sí y sin ningún tipo de alineación tampoco colaboraba con el flujo del agua deseado. Por último, se planteó que debía propiciarse la subida del agua desde el nivel más profundo de alguna manera.

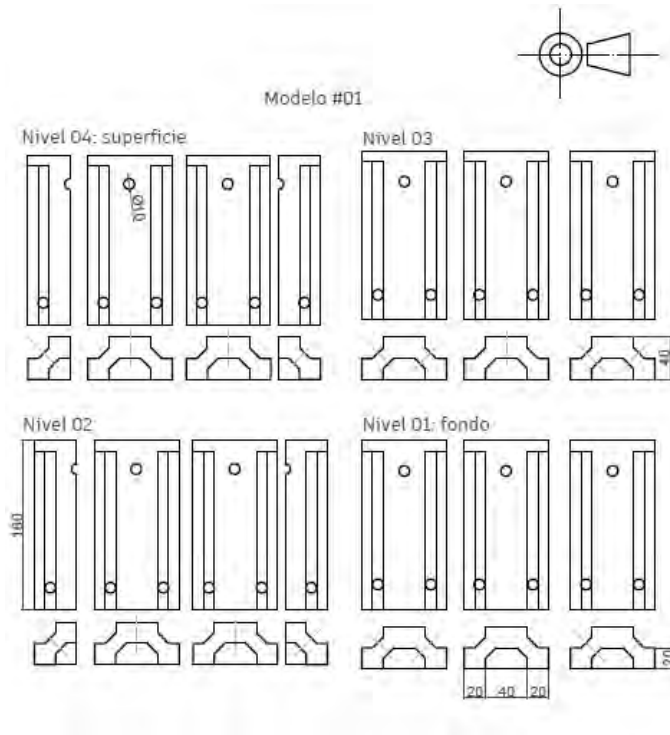


Figura 4.3: Piezas para ensayo 1: configuración original



Figura 4.4: Piezas para ensayo 1: configuración original

Para el segundo ensayo se incorporaron las primeras modificaciones a modelo, las cuales fueron: se duplicó el diámetro de los agujeros en la cara superior de la pieza, se duplicó el diámetro de las mangueras de recolección, se prescindió de los laterales y se utilizaron rampas en el fondo de la estructura para ayudar al flujo a subir hacia las piezas recolectoras. En un inicio las rampas fueron moldeadas con pasta para modelar. Sin embargo, pese a que fueron cubiertas con pintura para protegerlas estas se fragmentaron luego del primer ensayo en el que se utilizaron, por lo que fueron sustituidas por unas rampas elaboradas con perfil metálico. En las **figuras 4.5 y 4.6** se observan el diagrama del modelo 2 y una fotografía de las piezas finalizadas, respectivamente. En este ensayo se destacó que existía mucho golpeteo dentro de la estructura producto de que aún no se contaba con una adecuada alineación de las piezas para propiciar el flujo del agua hacia la salida. En lugar de subir, el agua golpeaba la estructura y se quedaba en el nivel por el que había entrado. Se decidió entonces buscar una manera de alinear todos los agujeros hacia las dos salidas de las piezas superficiales.

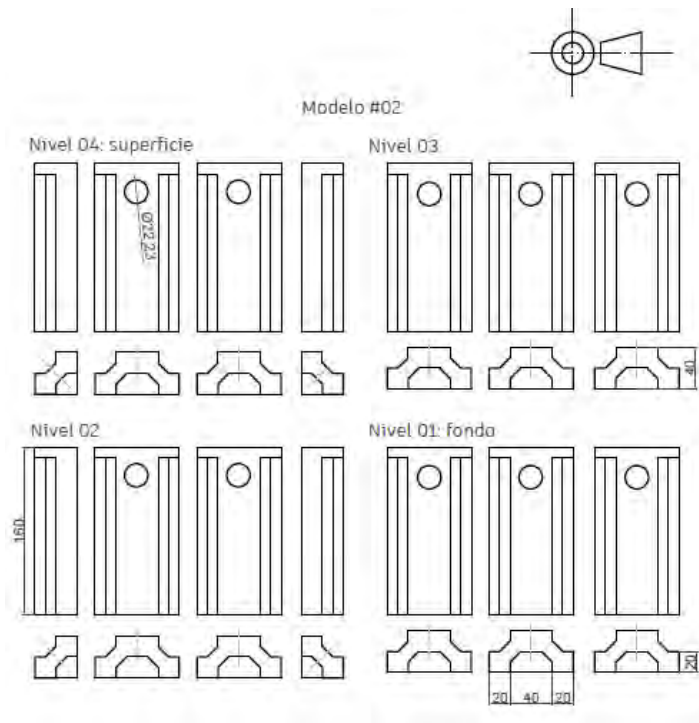


Figura 4.5: Diagrama piezas para ensayo 2



Figura 4.6: Piezas para ensayo 2

El modelo sometido al tercer ensayo consta de las modificaciones indicadas en el diagrama de la **figura 4.7**. Para este caso se mantuvo el diámetro del agujero central de las piezas propuesto para el segundo ensayo solamente en las piezas que se alinean directamente con las piezas superficiales. Las demás piezas fueron perforadas, con la misma broca, en las paredes laterales inclinadas para tratar de dirigir el flujo hacia los agujeros centrales. Según la ubicación de las piezas estas se perforaron en la pared de la izquierda, en la pared de la derecha o en ambas paredes. La intención fue crear una especie de *embudo* inverso hacia las dos salidas en las piezas superficiales. Esta configuración se muestra en la **figura 4.8**, como apoyo en la comprensión del arreglo. Se obtuvo mejoría en cuanto al golpeteo del agua dentro de la estructura y en cuanto al ascenso del fluido. Sin embargo, aún se apreciaba que se perdía mucha presión en el flujo del agua al forzarlo a salir por la cara superior de las piezas superficiales. Además, aún era posible disminuir en mayor medida ese golpeteo interno para aprovechar esa energía en la salida del rompeolas, preservar la integridad de la estructura y proporcionarle una mayor estabilidad.



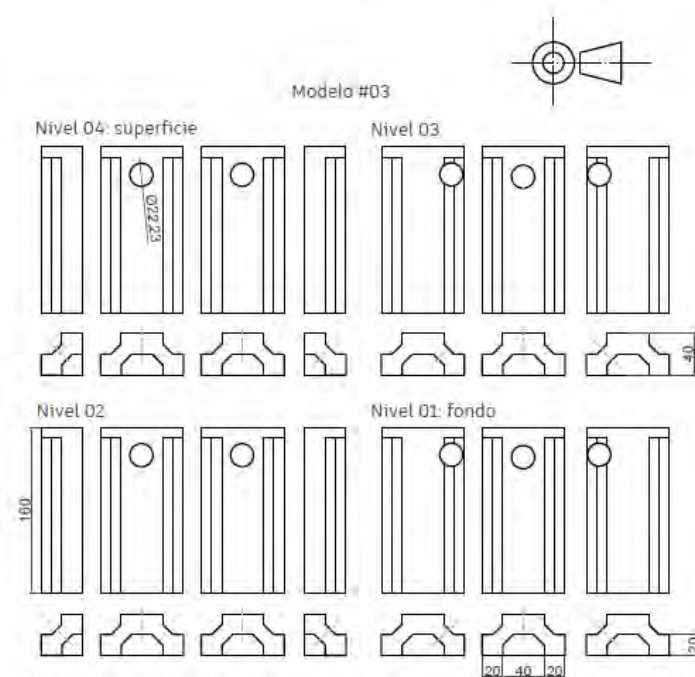


Figura 4.7: Diagrama piezas para ensayo 3



Figura 4.8: Piezas para ensayo 3

La última modificación, representada en la **figura 4.9**, consistió en mantenerlos 3 niveles sumergidos con la misma configuración del tercer ensayo y en el nivel superficial la salida del agua se trasladó a la parte posterior de las piezas para tratar de aumentar el caudal de salida y minimizar la pérdida de presión del flujo. En la **figura 4.10** muestran las piezas utilizadas para el cuarto ensayo. En esta ocasión se percibió una reducción significativa del ruido provocado por el agua al golpear las paredes internas de la estructura, así como el movimiento de las piezas producto del impacto del agua. Lo anterior debido a que el agua obtuvo una ruta de salida más directa, en la cual el flujo conservó su velocidad y presión en mayor medida. Se tuvo un flujo de mayor constancia y de mayor caudal. En la sección de anexos se pueden consultar nuevamente los planos de las piezas utilizadas en cada ensayo.

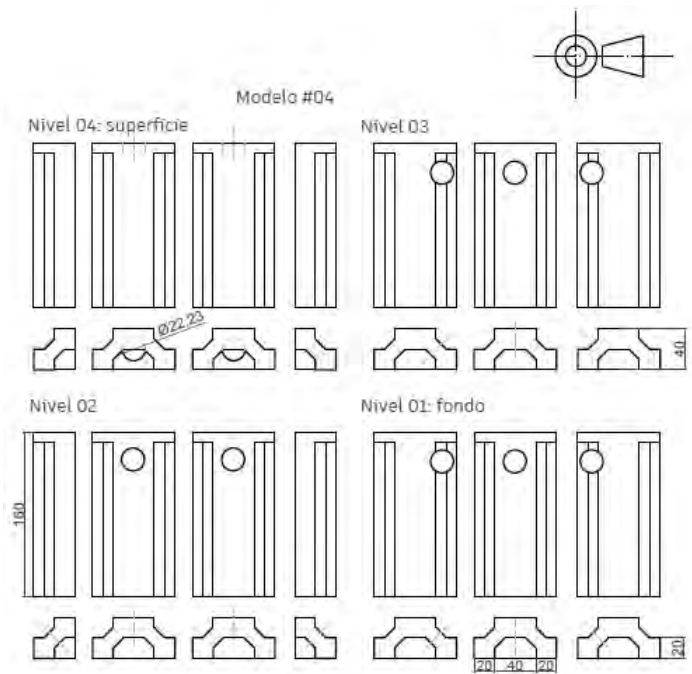


Figura 4.9: Diagrama piezas para ensayo 4



Figura 4.10: Piezas para ensayo 4



### 4.2.2. Análisis de la captación de agua

Como se mencionó anteriormente, el caudal recolectado en cada ensayo fue registrado con el fin de evaluar el potencial desempeño de cada modelo y elegir alguno de los modelos como el más apto para un proyecto doble propósito: protección costera y generación eléctrica. A continuación, en los cuadros 4.1 y 4.2 se presenta el volumen de agua recolectado en cada ensayo realizado con cada modificación y para cada periodo y altura establecidos previamente. En las modificaciones 1, 2 y 3 los agujeros se mantuvieron en la parte superior de la pieza. En estos casos no se obtuvo una cantidad significativa de agua hasta los ensayos con olas de 1 m de altura. La ola de 1 m representa condiciones típicas de oleaje para la costa del Pacífico de Costa Rica. En la configuración 4, el agujero para la salida del agua de la estructura fue ubicado en la parte trasera de la pieza en lugar de en la cara superior. Con esta última modificación se logró recoger agua desde el primer ensayo con altura de ola de 0,6 m y 12 s de periodo, estas condiciones representan condiciones de calma en el oleaje para la costa del Pacífico de Costa Rica. Se concluye entonces que esta última configuración es la más apta, entre las analizadas, para la captación de agua. En la figura 4.11 se aprecia la diferencia de captación de agua entre los diferentes modelos ensayados, se aprecia que el modelo 4 destaca como el mejor arreglo de piezas para la captación de agua por sobre los tres modelos restantes. Se eligió mostrar las curvas generadas para condiciones de altura de ola de 1 m ya que es uno de los estados típicos para la costa del Pacífico de Costa Rica y porque fue el primer estado en el que se logró recolectar agua de todos los modelos.

Cuadro 4.1: Registro de volumen de agua recolectado en cada ensayo alturas de ola 0,6 m y 0.8 m

Tiempo	Altura 0,6 m				Altura 0,8 m			
	Volumen recolectado en mL				Volumen recolectado en mL			
	Mod1	Mod2	Mod3	Mod4	Mod1	Mod2	Mod3	Mod4
12 s	0	0	1	700	2	20	3	1750
14 s	0	0	2	1040	24	40	44	1700
16 s	0	0	0	1052	0	38	0	1600
18 s	0	0	0	1000	5	150	20	1550

Cuadro 4.2: Registro de volumen de agua recolectado en cada ensayo alturas 1 m y 1,2 m

Tiempo	Altura 1,0 m				Altura 1,2 m			
	Volumen recolectado en mL				Volumen recolectado en mL			
	Mod1	Mod2	Mod3	Mod4	Mod1	Mod2	Mod3	Mod4
12 s	25	240	150	1800	200	590	550	1900
14 s	205	300	450	1700	445	500	750	1700
16 s	170	350	200	1650	500	690	700	1750
18 s	130	600	400	1600	350	900	1000	1800

Una vez seleccionada la configuración con mejor desempeño se procede a realizar el ensayo de oleaje irregular esto con el fin de analizar cómo se comporta el modelo ante condiciones reales. Esta prueba se realizó considerando un oleaje típico de condiciones del Océano Pacífico en Costa Rica, para así simular la base de datos real con la que se ha trabajado a lo largo de

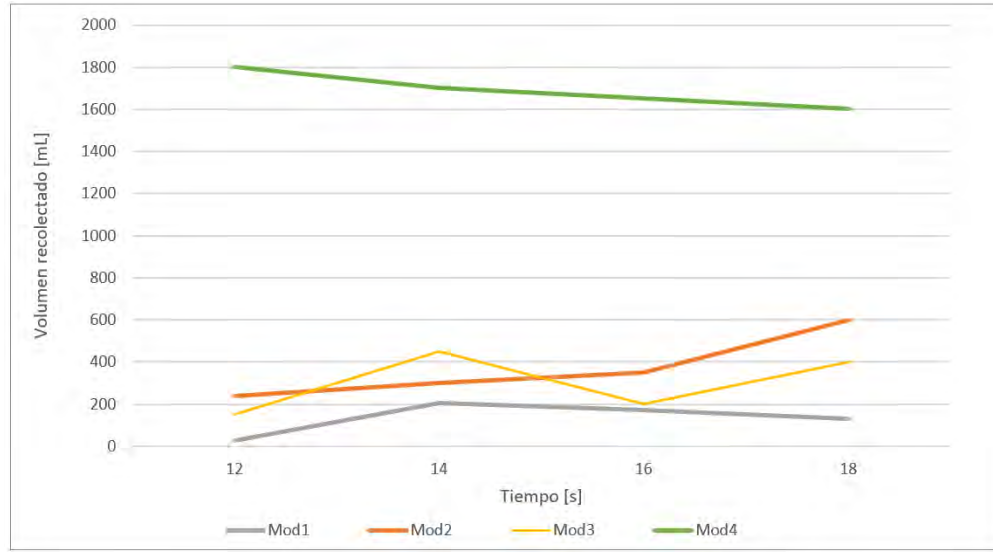


Figura 4.11: Volumen de agua recolectada para altura de ola de 1,0 m, oleaje regular, escala 1:20

esta investigación. En la **figura 4.12** se muestra el volumen que se logró recolectar a partir del ensayo de oleaje irregular, se obtuvo un promedio de 870 mL en cinco minutos de ensayo, con una ola base de 0.8 m y un periodo base de 14 s. El volumen máximo recolectado fue de 1100 mL bajo estas condiciones. Si se comparan los datos de volumen recolectado en los ensayos de oleaje regular, **cuadro 4.2**, y los obtenidos en este último ensayo con oleaje irregular, **figura 4.12**, se tiene un reducción de alrededor del 50 % en cuanto al agua recolectada. Esto es normal ya que al ser un oleaje irregular se obtienen olas de distinto tamaño y por ende distintas condiciones energéticas. Para analizar el potencial energético es necesario transformar el volumen recolectado a escala real.

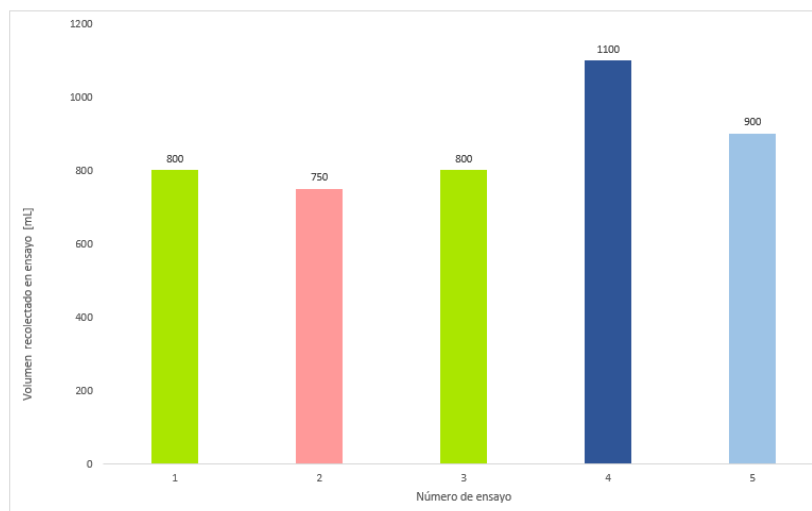


Figura 4.12: Volumen de agua recolectado en ensayo de oleaje irregular, escala 1:20

### 4.2.3. Determinación del potencial energético y eficiencia

Para determinar el potencial energético del sistema real es necesario transformar los datos recopilados en la sección anterior a escala 1 : 1. En las **figuras 4.13 y 4.14** se muestra el volumen real que podría ser recolectado por el modelo de la modificación seleccionada en escala 1 : 1 para oleaje regular en un tiempo efectivo de ensayo de dos minutos y oleaje irregular en un tiempo efectivo de ensayo de cinco minutos, respectivamente. Proporcionalmente se mantiene la reducción de energía en un 50 % en la condición de oleaje irregular respecto al mayor caudal recolectado en oleaje regular, el cual corresponde al ensayo de altura de ola de 1,2 m y periodo de 12 s.

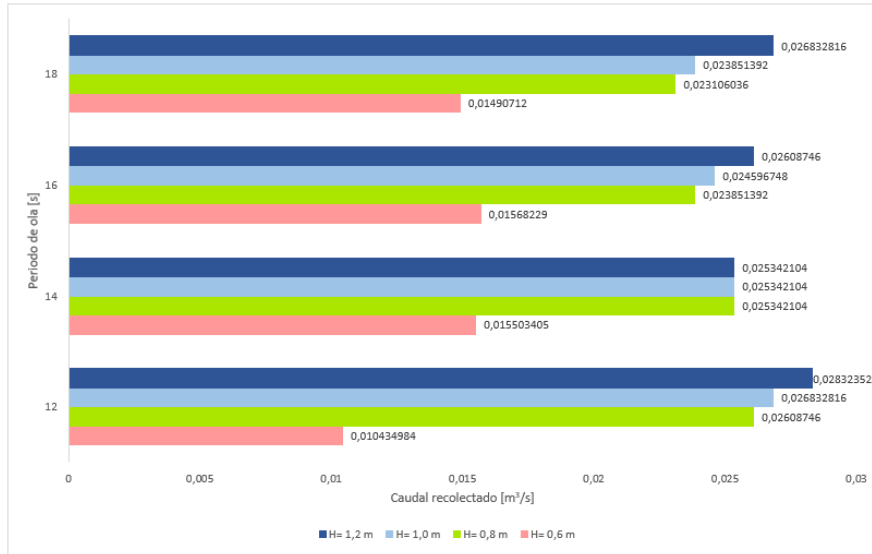


Figura 4.13: Caudal saliente de agua en ensayo de oleaje regular, escala 1:1

Como se mencionó en la sección de captación de agua, se tiene que el volumen promedio recolectado en el ensayo de oleaje irregular es de 870 mL. Si se divide este dato por los cinco minutos de ensayo se obtiene un caudal de 2,9 mL/s. Esto permite evaluar el potencial energético teórico del sistema en escala 1 : 1. Para esto se hace uso de las relaciones expuestas en la **figura 2.25** de la sección del marco teórico. Utilizando la relación para caudal en la **ecuación 4.1**, se tienen que se recolectan  $0,005188 m^3/s$  por cada seis metros de estructura, en un tiempo de 22 min, este tiempo corresponde a los cinco minutos del ensayo a escala. Este valor equivale a  $123,9 m^3/s$  al año.

$$Q_p = \lambda^{5/2} Q_m \quad (4.1)$$

Donde:  $Q_p$ : es el caudal real en escala 1 : 1, dado en  $m^3/s$ ;  $\lambda$ : es el factor de escala;  $Q_m$ : es el caudal recolectado en el ensayo en escala 1 : 20, dado en  $m^3/s$ .

Una vez conocido el caudal por año se utiliza la **ecuación 2.42** para determinar la potencia teórica con la que se cuenta, en este caso el resultado es de  $54,9 kWh/m$  por año de energía eléctrica. Es importante aclarar que estos valores pueden variar debido a las condiciones de oleaje y el caudal disponible. Si se llevara a cabo su construcción es necesario realizar estudios

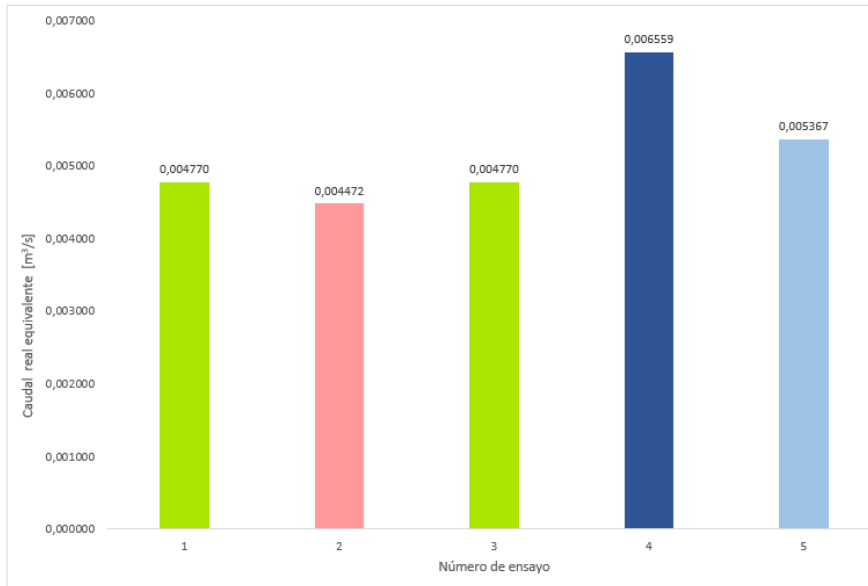


Figura 4.14: Caudal saliente de agua en ensayo de oleaje irregular, en escala 1:1

de potencial energético para las características del oleaje de la zona específica de instalación del proyecto. Adicionalmente, se compararon los datos de potencia, a partir de la energía en las olas, generados en esta investigación y los datos de potencia media determinados por [Zumbado, 2021]. Se analizarán únicamente los datos para la zona sur de la costa Pacífico Norte, ya que para este trabajo se utilizó una base de datos de Cabo Blanco. Con la **ecuación 2.42**, se determinó la potencia teórica generable a partir de la estructura. Considerando además una caída de agua de 2 m de altura, se obtuvo un valor de 101,7 kW. Sin embargo, ese dato es proporcional al modelo utilizado, es decir va a depender de la longitud de costa que abarque el rompeolas. Como se indicó en la sección de la construcción del modelo se utilizaron tres piezas por nivel de la estructura, lo que equivale en escala 1 : 1 a seis metros. Por lo que la potencia promedio para la estructura es de 0,01696 kW/m, esto quiere decir que por cada metro lineal de rompeolas se obtiene dicha potencia. Este valor equivale a un 0,1767 % de la potencia promedio multianual obtenida por Zumbado. Al convertir este valor de potencia a energía se obtienen 327 kWh. Si se considera nuevamente el ajuste por metro de rompeolas, se obtiene una energía de 54,49 kWh/m, esto quiere decir que por cada metro lineal de rompeolas es teóricamente posible generar 54,49 kWh de energía. Al comparar los promedio de los datos anuales generados por Zumbado, en las **figuras 2.7 y 2.8** se obtiene una eficiencia de menos del 1 % por metro de rompeolas, esto quiere decir que para que el proyecto doble propósito sea rentable debe abarcar gran longitud costera.

Es importante aclarar que los datos de potencial suministrados por [Zumbado, 2021] fueron obtenidos para a condiciones de altamar. La energía del oleaje disminuye conforme se acerca a la costa. Por lo que si se logrará obtener datos de potencial energético directamente en la costa y se hiciera una comparación entre estos y el potencial obtenido de la estructura del rompeolas se obtendría una eficiencia mayor. Se estima que a la costa llega aproximadamente el 25 % de la energía que se tiene en altamar. En este caso la eficiencia pasaría de 0,18 % a 0,7 %. Es decir, si se comparan los datos obtenidos en esta investigación con datos de potencial

más cercanos a la costa se podría concluir que el dispositivo es un 25% más eficiente de lo que se determinó con los datos existentes.

#### 4.2.4. Selección del tipo de conversor de energía

A partir de los resultados expuestos en la **figura 4.14** se obtiene un caudal promedio de 5 L/s de agua por cada seis metro de rompeolas. Con estos datos resulta posible proponer un arreglo de turbinas para generar electricidad. Tomando en cuenta un caudal promedio equivalente de  $0,005188 \text{ m}^3/\text{s}$  se determina que por la magnitud del caudal la turbina a utilizar debe ser de tipo de flujo axial como una turbina Francis Mixta o una microturbina de flujo axial, **figuras 2.29 y 2.32** respectivamente. Adicionalmente, con el cálculo de potencia se revalidó la selección del tipo de turbina mediante el cálculo de la velocidad específica, con la **ecuación 2.41** de la sección del marco teórico y se obtuvo un resultado de 352, lo cual, según la **figura 2.3** confirma la selección anterior. La velocidad de rotación de la turbina fue elegida como una variable de diseño donde según [EnergíaSolar., 2023] para una turbina Francis se encuentra entre 83 rpm y 1000 rpm. Dado que en este caso el caudal y la turbina son pequeños se elige como variable de diseño una velocidad de rotación de 83 rpm. Por otro lado, la turbina seleccionada debe ser amigable con la fauna marina, resistente al ambiente marino abrasivo, resistente a golpes de ramas y piedras y de poco mantenimiento ya que se va a encontrar bajo el nivel del suelo.

Para dirigir el agua hacia la turbina se propone almacenarla en un tanque abierto al ambiente, desde el cual el agua se desplace por gravedad hacia la turbina. Se optó por almacenar el agua para así poder contar con un flujo constante de agua. Contrario a lo que se obtendría si se conectaran las turbinas directamente a la descarga de las piezas. Con un tanque de almacenamiento incluso es posible aumentar el caudal entrante a las turbinas y de esta manera aumentar su eficiencia. Por otro lado, se contempló que el agua debe ser devuelta al océano al terminar el proceso de extracción energética. Se propone que esta descarga sea nuevamente por gravedad. Cabe destacar que no es necesario que el aprovechamiento esté en funcionamiento en su totalidad todo el tiempo. Según las condiciones de oleaje se puede tener en funcionamiento distinta cantidad de turbinas. Por ejemplo, si hay oleaje leve se tendrían menos turbinas en funcionamiento que si el oleaje es más fuerte. Incluso en condición de tormenta es necesario valorar si se debe suspender la generación de electricidad hasta que pase la tormenta para preservar la estructura. Esto se hace en las centrales eólicas cuando hay vientos de gran velocidad o en las represas hidroeléctricas cuando el embalse se desborda. En la **figura 4.15** se muestra el arreglo propuesto. Dependiendo de las condiciones de oleaje se podrán utilizar distinta cantidad de turbinas según la disponibilidad de caudal y la fuerza del oleaje. Incluso en condiciones de tormenta se podrá tener el sistema en funcionamiento. Esto debido a que el tanque en la parte posterior de la estructura les brindará un apoyo adicional en cuanto a la estabilidad. Mediante el uso de una válvula al inicio de la tubería de alimentación se logrará enviar el flujo constante óptimo para el funcionamiento de las turbinas.

#### 4.2.5. Análisis de la estabilidad del rompeolas

Para determinar el desempeño del cuarto modelo respecto a su función de protección costera se registró el coeficiente de reflexión en cada ensayo y además se realizó un ensayo de estabilidad a la estructura. El coeficiente de reflexión indica porcentualmente la cantidad de

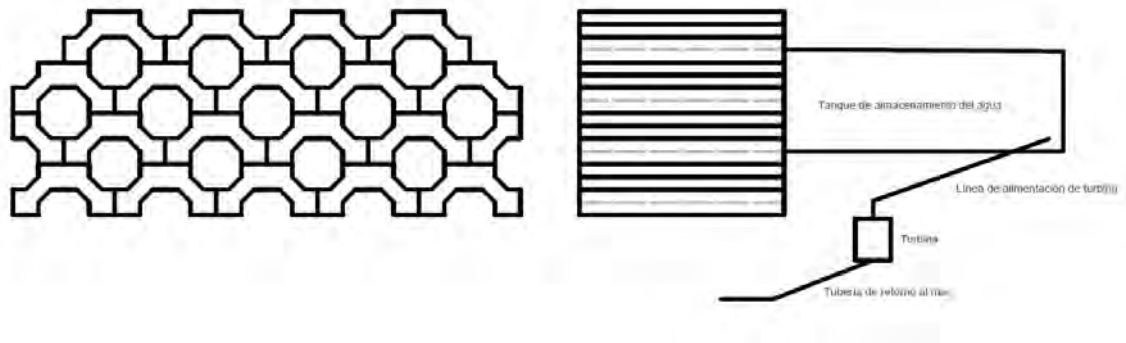


Figura 4.15: Esquema de propuesta para las turbinas

energía que es reflejada de vuelta al mar con cada impacto del oleaje contra la estructura. La energía absorbida por la estructura es inversamente proporcional al valor del coeficiente de reflexión. Por lo que en el diseño de rompeolas se busca obtener un coeficiente de reflexión bajo. En la **figura 4.16** se muestra el comportamiento del coeficiente de reflexión para cada modificación según periodo, para una altura de ola de 1m. Se reitera que se eligió mostrar las curvas generadas para condiciones de altura de ola de 1 m ya que es uno de los estados típicos para la costa del Pacífico de Costa Rica y porque fue el primer estado en el que se logró recolectar agua de todos los modelos. Se observa que la modificación categorizada anteriormente como la mejor opción para captación de agua presenta una gran disminución en el valor del coeficiente de reflexión. Esto debido a la gran cantidad de agua que atraviesa la estructura y es recolectada en lugar de ser reflejada de vuelta. Esta disminución del coeficiente de reflexión es un aspecto positivo ya que disminuye la cantidad de energía que es reflejada hacia el océano y que volvería a golpear la costa, disminuye el ruido producto del choque del agua con la estructura y teóricamente le brinda mayor estabilidad al sistema. Para comprobar la estabilidad del rompeolas resulta necesario un ensayo de fallo de la estructura.

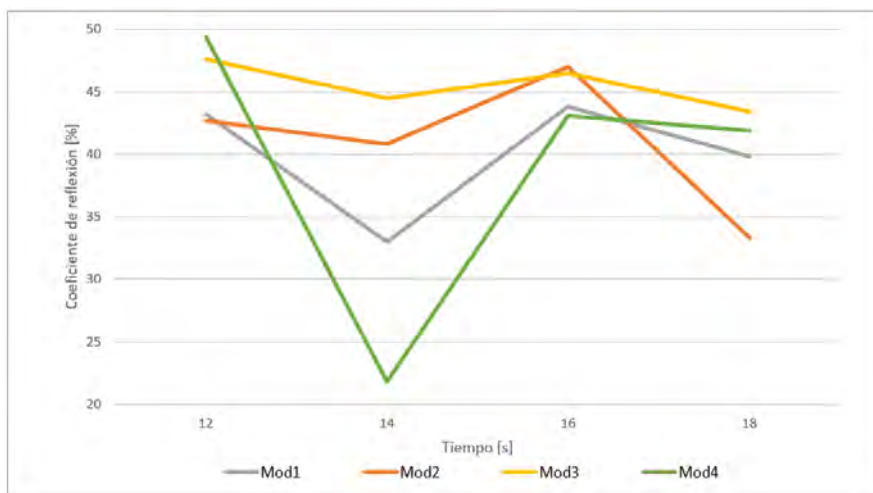


Figura 4.16: Coeficiente de reflexión para altura de ola de 1,0 m, oleaje regular, escala 1:20

Por último, se realizó el ensayo de falla del rompeolas para el primer modelo y para el cuarto modelo, en escala 1 : 20. Con el fin de comparar cómo influyen las modificaciones realizadas en la estabilidad del sistema. Para evaluar la estabilidad de la estructura se calculó, utilizando los datos en escala 1 : 1, el coeficiente de estabilidad a partir de la ecuación 2.3. Los resultados del ensayo de falla, **cuadro 4.3** demuestran que las modificaciones realizadas aumentan la estabilidad del sistema. Esto debido a que se maximiza el paso del agua. Lo que a su vez minimiza los golpes a la estructura y por ende aumenta su estabilidad. Para que la estructura soporte olas de tormenta es necesario agregar peso sobre la estructura, en las últimas tres filas del cuadro se puede apreciar que al duplicar la masa de la pieza la estructura soporta un oleaje de mayor magnitud. Por otro lado, en el **cuadro 4.4** se calculó el coeficiente de estabilidad para un bloque de concreto completo de las mismas dimensiones de las piezas analizadas anteriormente. De igual manera se comprueba que al tener mayor masa se tendrá una mayor estabilidad. Por ende, se concluye que dada la forma de las piezas están van a ser por naturaleza inestables y se debe aumentar el peso en ellas al doble para obtener una mayor estabilidad. Este ensayo se iba a realizar también a escala 1 : 10 con el fin de analizar la estabilidad del sistema a una mayor escala y de esta manera obtener un comportamiento más próximo a la realidad, sin embargo, esto no fue posible debido a que el canal para dicho ensayo se encuentra fuera de servicio por fugas.

Cuadro 4.3: Coeficiente de estabilidad  $K_D$  para modelo 4

Ensayo	h [m]	T [s]	Masa	$K_D$
Original	1	14	10400	0,0141
	1	16	10400	0,0141
	0,6	18	10400	0,0655
Modelo 4	1	14	10400	0,0220
	1	16	10400	0,0220
	1	18	10400	0,0220
Modelo 4 + una pieza	1,6	14	20800	0,8155
	1,4	16	20800	1,2173
	1,4	18	20800	1,2173

Cuadro 4.4: Coeficiente de estabilidad  $K_D$  considerando las piezas como bloques sólidos de concreto

Modelo	h [m]	T [s]	Masa	$K_D$
Original	1	14	19200	1,4368213
	1	16	19200	1,4368213
	0,6	18	19200	6,6519505
Modelo 4	1	14	19200	2,2377166
	1	16	19200	2,2377166
	1	18	19200	2,2377166
Modelo 4 + 1 pieza	1,6	14	38400	10,924758
	1,4	16	38400	16,30751
	1,4	18	38400	16,30751

## Capítulo 5

# Conclusiones y recomendaciones

### 5.1. Conclusiones

- La condiciones de oleaje del Pacífico de Costa Rica resultan muy favorecedoras para la estructura estudiada. Como se comentó en la sección de caracterización del oleaje, el oleaje presente en la costa Pacífica de Costa Rica presenta un perfil de velocidad prácticamente constante a lo largo de la columna de agua. Esto significa que existe gran cantidad de energía cinética aprovechable y con poca variación en la totalidad de la columna de agua y no solo en la parte superficial del océano como en otras ubicaciones. Dada la estructura del rompeolas se conforman una serie de cuevas a lo largo de toda la pared, las cuales hacen posible aprovechar la energía de toda la columna de agua.
- Mediante el análisis del coeficiente de reflexión para cada uno de los modelos ensayados, se concluye que el cuarto modelo permite canalizar mayor cantidad de agua, de esta manera es menos la energía reflejada hacia el océano. Por ende, tal como se determinó con los ensayos de estabilidad se propone una estructura con mayor estabilidad y más eficiente a nivel energético. Cabe aclarar que debido a la forma de las piezas la estructura tiende a ser inestable, ya que no se admite ningún tipo de movimiento en el rompeolas debido a su funcionamiento. Si una pieza se desplaza el agua ya no atravesaría la estructura de la misma manera. Si se consideran piezas del doble de la masa de las piezas del modelo original se tiene un aumento en la estabilidad. Sin embargo, este tipo de morfología nunca igualará la estabilidad de una estructura con bloques sólidos de concreto de las mismas dimensiones. Para tratar de aumentar la estabilidad del rompeolas se propone aumentar la densidad del concreto para tener piezas de al menos el doble de masa que las ensayadas. Adicionalmente se aconseja incorporar algún tipo de anclaje entre las piezas, este podría ser una especie de calza la frente de cada pieza.
- Pese a que el ensayo de oleaje irregular demostró que en condiciones reales existe una reducción del 50 % de la energía teórica aprovechable, en comparación a el ensayo de oleaje regular, se determinó que es posible obtener 54,49 kWh por año metro de rompeolas. Es importante destacar que esto dependerá de las condiciones de oleaje y de caudal disponible. Si se llevara a cabo su construcción es necesario realizar estudios de potencial energético para las características del oleaje de la zona específica de instalación del proyecto. Dado que para las condiciones de ensayo y con solo seis metros de rompeolas se obtuvo una eficiencia menor al 1 % se concluye que para que este proyecto



sea rentable la estructura debe abarcar gran longitud costera. Esto con el fin de tratar de aumentar el caudal saliente de las estructuras y por ende la energía extraíble y la eficiencia del rompeolas doble propósito. Por otro lado, luego del análisis de los modelos ensayados y los resultados obtenidos se plantearon dos posibles modificaciones adicionales para mejorar el desempeño del sistema. En primer lugar, se considera que inclinar hacia adelante la estructura podría facilitar el ingreso del agua. También, con el objetivo de buscar que el agua suba más fácilmente hacia las piezas superficiales se propone que en las piezas inferiores los agujeros sean en forma de canal y no circulares, ya que con el valor obtenido de eficiencia en los ensayos se considera que el agua saliente del rompeolas es más que todo superficial y que el agua del resto de la columna queda en mayor parte atrapada dentro de las paredes de las piezas.

- Es importante recalcar que la energía del oleaje disminuye conforme se acerca a la costa. Por lo que si se logrará obtener datos de potencial energético directamente en la costa y se hiciera una comparación entre estos y el potencial obtenido de la estructura del rompeolas se obtendría una eficiencia mayor. Se estima que con datos de potencial más cercanos a la costa el dispositivo demostraría ser un 25 % más eficiente de lo que se concluyó con los datos existentes.
- Se propuso una solución energética con turbinas de tipo axial a la cual el caudal ingrese por gravedad, con una caída de dos metros desde un tanque de almacenamiento a cielo abierto, en la parte posterior del rompeolas, y con un retorno del agua al mar también por gravedad. Además, se recomienda utilizar una turbina amigable con la fauna marina, la cual permite el tránsito seguro de especies, resistente al ambiente abrasivo de la costa y a golpes de ramas o piedra, y que requiera poco mantenimiento.
- En cuanto al impacto ambiental, el simple hecho de tratarse de un proyecto multipropósito reduce en sí el impacto ambiental de la obra. Ya que el área a intervenir para crear un aprovechamiento energético y una barrera protectora por separado sería mayor que el área a intervenir con una estructura con doble propósito. Además de un posible ahorro en costos de construcción. Otra característica positiva de la estructura es que puede servir de hábitat para organismos marinos que se adhieran a sus paredes. Además, con las modificaciones planteadas se presenta una disminución en el ruido del agua al romper contra la estructura.
- En cuanto a las investigaciones dentro del área de las energías marinas es importante despertar el interés de instituciones del sector energético del país como, por ejemplo: el Instituto Costarricense de Electricidad y las Cooperativas. Esto con el fin de que investigaciones similares trasciendan y no queden únicamente en el ámbito académico. Para así lograr aprovechar el gran potencial y privilegio con el que cuenta el país debido a su posición geográfica, sus condiciones oceánicas y el potencial energético con el que se cuenta según se mencionó y analizó en esta investigación.
- La energía undimotriz o energía de las olas es un recurso presente de forma permanente las 24 horas del día los 365 días del año lo cual la hace capaz de contribuir a la estabilidad y constancia de la matriz energética del país de una manera sostenible. El estudio de las tecnologías para aprovechar la energía marina en la generación de electricidad es una arista muy prometedora dentro de la mitigación del cambio climático y el prescindir

de los combustibles fósiles. Al rededor del planeta se debe seguir incursionando en este sector.

## 5.2. Recomendaciones

- Durante los ensayos fue posible reutilizar varias piezas por lo que si se requiere fabricar nuevas piezas se aconseja que sea una menor cantidad ya que de esa manera es posible ahorrar tiempo en la etapa de preparación del modelo.
- En lo que respecta a la preparación de la mezcla es importante contabilizar las proporciones de cada insumo y almacenarlos de manera correcta.
- Se recomienda realizar el ensayo de estabilidad a una mayor escala con el fin de obtener resultados mucho más cercanos a las condiciones reales
- Si es requerido diseñar completamente el arreglo de turbinas se debe analizar las condiciones específicas del área donde se pretenda construir la obra.
- En futuros análisis de este rompeolas se recomienda incorporar las recomendaciones descritas anteriormente con el fin de validar si existe o no un aumento de la eficiencia.

# Bibliografía

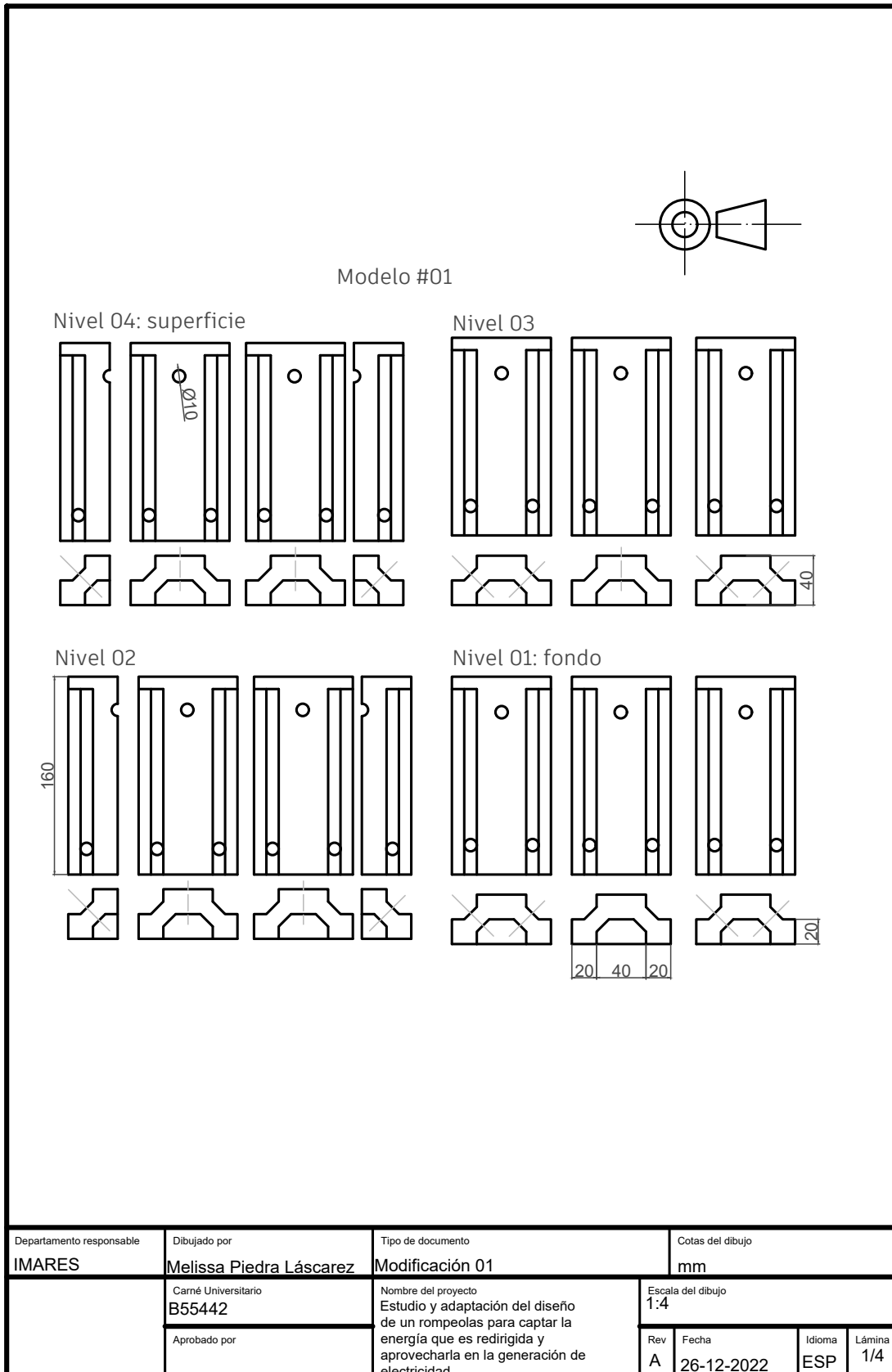
- [Arce et al., 2009] Arce, L., Mora, A., and Odio, M. (2009). *Diseño de un sistema mecánico para obtener energía de los mares en un rango de potencia teórica entre los 75 W y los 4 kW*. PhD thesis, Universidad de Costa Rica.
- [ASADES, 2021] ASADES (2021). Asades. Disponible en:<http://asades.org.ar/>.
- [Brito, 2013] Brito, A. (2013). Costa rica: Determinación del potencial de energía marina para generación eléctrica. san josé; costa rica. *Instituto Costarricense de Electricidad*.
- [CENCE, 2020] CENCE (2020). Informe anual 2019. *CENCE*.
- [CENCE, 2021] CENCE (2021). Informe anual 2020. *CENCE*.
- [CENCE, 2022] CENCE (2022). Informe anual 2021. *CENCE*.
- [Cengel, 2006] Cengel, Y. (2006). *Mecánica de fluidos*. McGraw Hill.
- [Corrales, 2019] Corrales, M. (2019). *Evaluación de las ecuaciones para el cálculo de run up y run down mediante modelado físico bajo las condiciones típicas de oleaje en el litoral Pacífico costarricense*. PhD thesis, Universidad de Costa Rica.
- [Echávez, 1996] Echávez, G. (1996). *Introducción a los modelos hidráulicos fondo fijo y a la ingeniería experimental/por Gabriel Echávez Aldape*. Universidad Autónoma de México.
- [EMEC, 2021] EMEC (2021). Página oficial del centro europeo de energía marina. Disponible en:<http://www.emec.org.uk/about-us/emec-history/>.
- [EnergíaSolar., 2023] EnergíaSolar. (2023). Turbina francis, funcionamiento, ventajas y desventajas. *Energía Solar*. Disponible en: <https://solar-energia.net/energias-renovables/energia-hidraulica/turbinas-hidraulicas/turbina-francis>.
- [García et al., 2016] Garcia, E., Correcher, A., Quiles Cucarella, E., and Morant, F. (2016). Recursos y sistemas energéticos renovables del entorno marino y sus requerimientos de control. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 13:141–161.
- [García, 2000] García, A. (2000). *Sobre el diseño geométrico y mecánico de diques rompeolas*. PhD thesis, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [G.Govaere et al., 2020] G.Govaere, G., Alfaro, H., and Corrales, M. (2020). Wave characteristics on the pacific coast of costa rica for energy production. *Instituto de Investigaciones en Ingeniería, Universidad de Costa Rica*.

- [Govaere, 1997] Govaere, G. (1997). *Acción del oleaje sobre estructuras marítimas no rebasables*. PhD thesis, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [Gutiérrez Serret, 2021] Gutiérrez Serret, R. M. (2021). Modelos físicos fundamentos y consideraciones generales. *Centro de estudios de puertos y obras públicas CEDEX*, 1.
- [Haim, 2021] Haim, A. (2021). Energías del mar: recursos energéticos, tecnología, impacto ambiental y situación en argentina.
- [IPCC, 2018] IPCC (2018). Calentamiento global de 1,5 °c. *IPCC*. Disponible en:[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCCSpecial-Report-1.5-SPM\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCCSpecial-Report-1.5-SPM_es.pdf).
- [Mataix, 1984] Mataix, C. (1984). *Turbomáquinas hidráulicas*. ICAI.
- [Mouna Lagoun, 2010] Mouna Lagoun, A. B. y. M. B. (2010). Ocean wave converters: State of the art and current status. *IEEE International Energy Conference*.
- [Naútica, 2023] Naútica, F. (2023). ¿qué son las mareas?. *Formación Náutica*.
- [Negro and et al., 2017] Negro, V. and et al. (2017). Espaldones en hormigón en masa y armado. el camino hacia la estética en las obras marítimas. *Revista de Obras Públicas, Alicante*.
- [REMAR, 2021] REMAR, C. (2021). Oportunidades en las redes eléctricas iberoamericanas de las energías del mar. *REMAR*.
- [Reyna and et al., 2018] Reyna, T. and et al. (2018). Microturbinas hidráulicas, diseño, adaptaciones para enseñanza y microgeneración. *XXVIII Congreso Latinoamericano de hidráulica*.
- [Rica, 2021] Rica, P. C. (2021). Nuevo rompeolas de caldera impactará positivamente competitividad del país. *Comunicados Presidencia de Costa Rica*.
- [Silva, 2005] Silva, R. (2005). *Análisis y descripción estadística del oleaje*. Instituto de Ingeniería UNAM.
- [SmithGroup, 2016] SmithGroup (2016). Development of ayia napa marina, cyprus marine works infrastructures, essential buildings dry stack and port facilities. *Smith Group JRR*.
- [TradeNews, 2021] TradeNews (2021). Disponible en:<https://www.youtube.com/watch?v=in1Nae4EVw0>.
- [Undimotriz, 2021] Undimotriz, U. (2021). Proyecto undimotriz. Disponible en:<https://undimotriz.frba.utn.edu.ar/>.
- [Wesson, 2000] Wesson, M. (2000). Sobre el diseño geométrico y mecánico de diques rompeolas. Technical report, SmithGroupJRR.
- [Zumbado, 2021] Zumbado, J. (2021). *Determinación del potencial teórico de energía undimotriz en la costa Pacífico norte de Costa Rica*. PhD thesis, Universidad de Costa Rica.

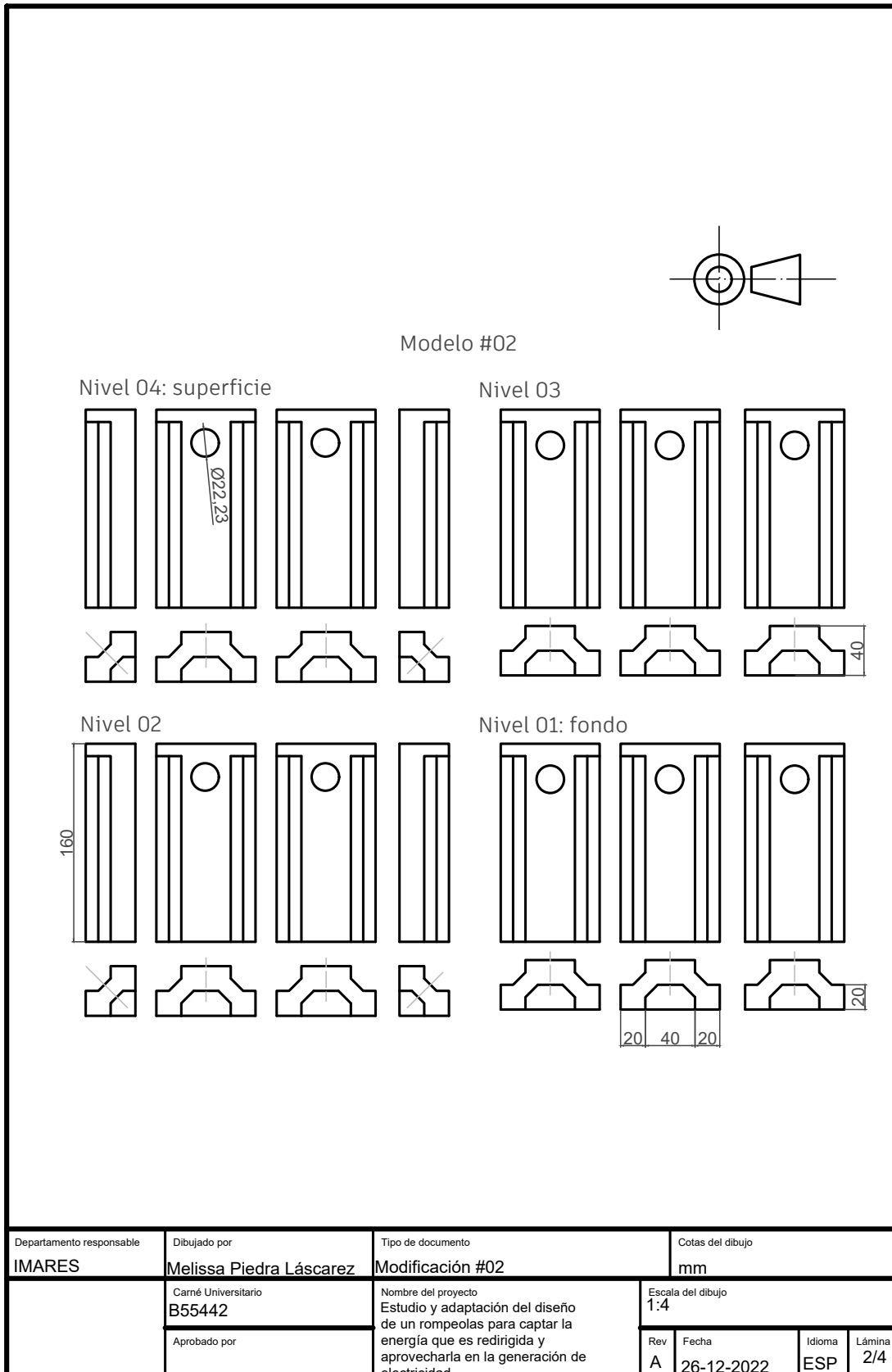
- [Zumbado et al., 2020] Zumbado, J., Alfaro, H., Govaere, G., and Corrales, M. (2020). Determinación del potencial teórico de energía undimotriz en la costa pacífico norte de costa rica. *Unidad de Ingeniería Marítima de Ríos y Estuarios, Universidad de Costa Rica*.

# Anexos

# Anexo A.1. Planos de las modificaciones realizadas

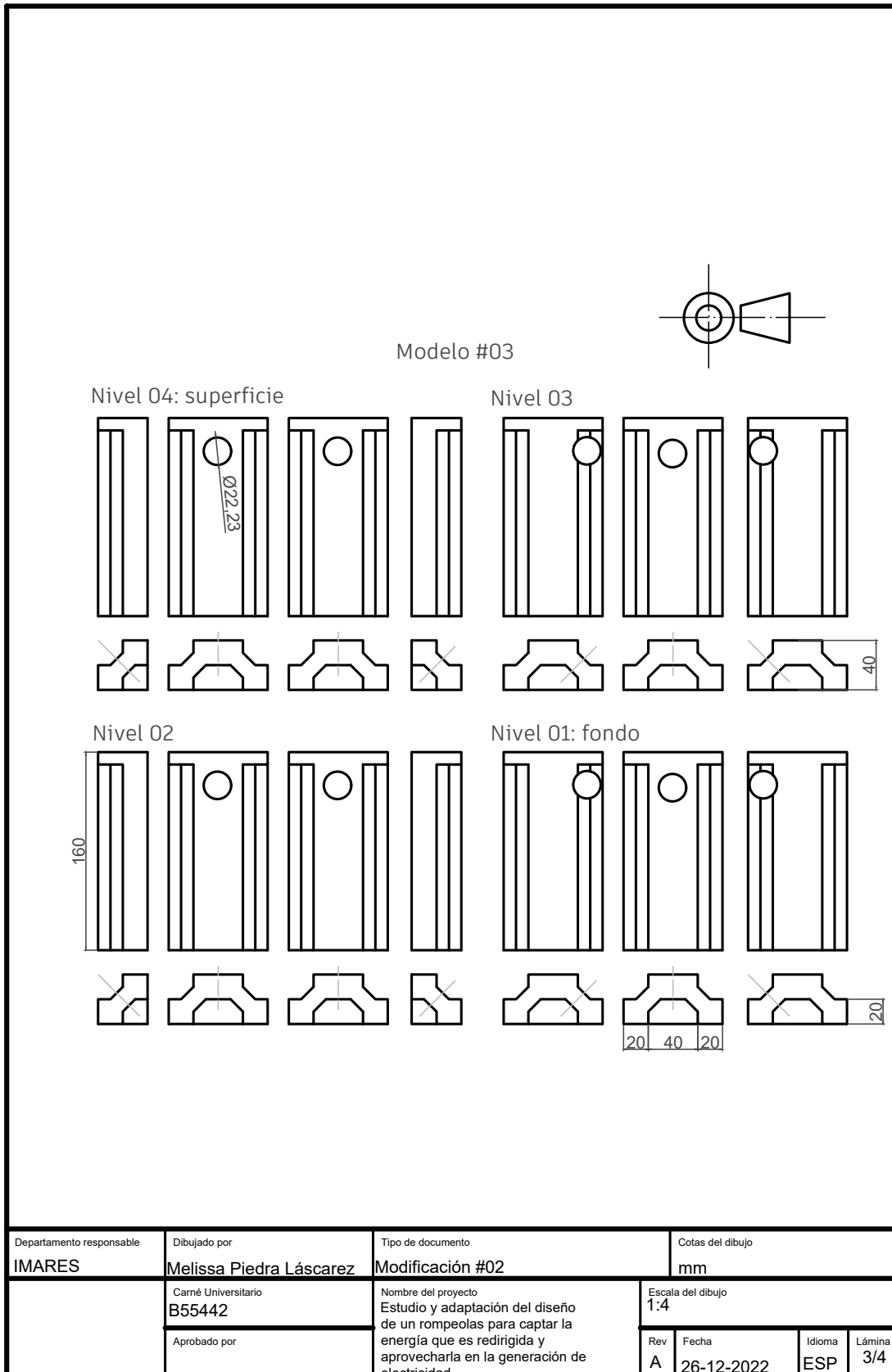


Anexo A.1. Planos de las modificaciones realizadas

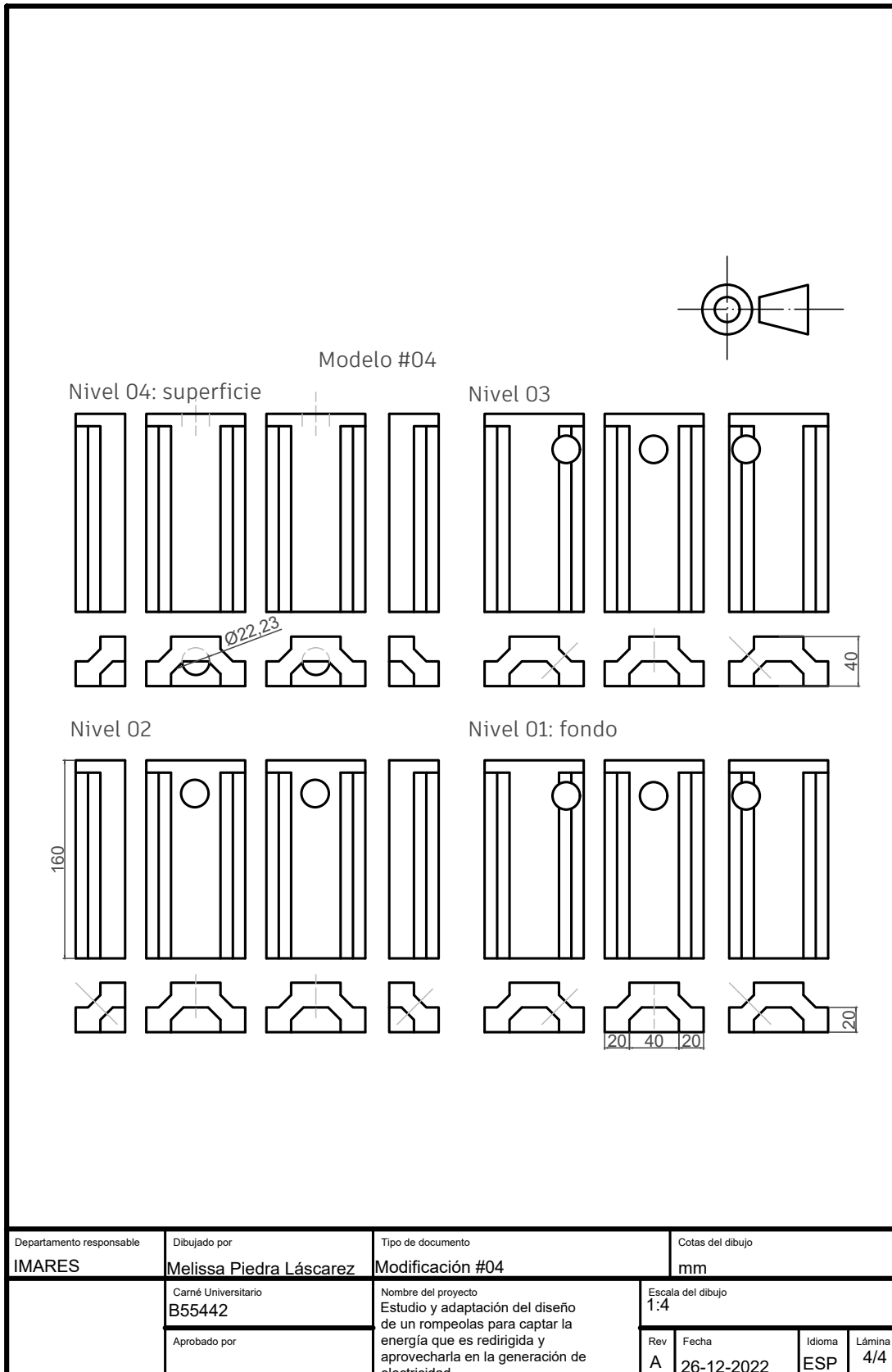




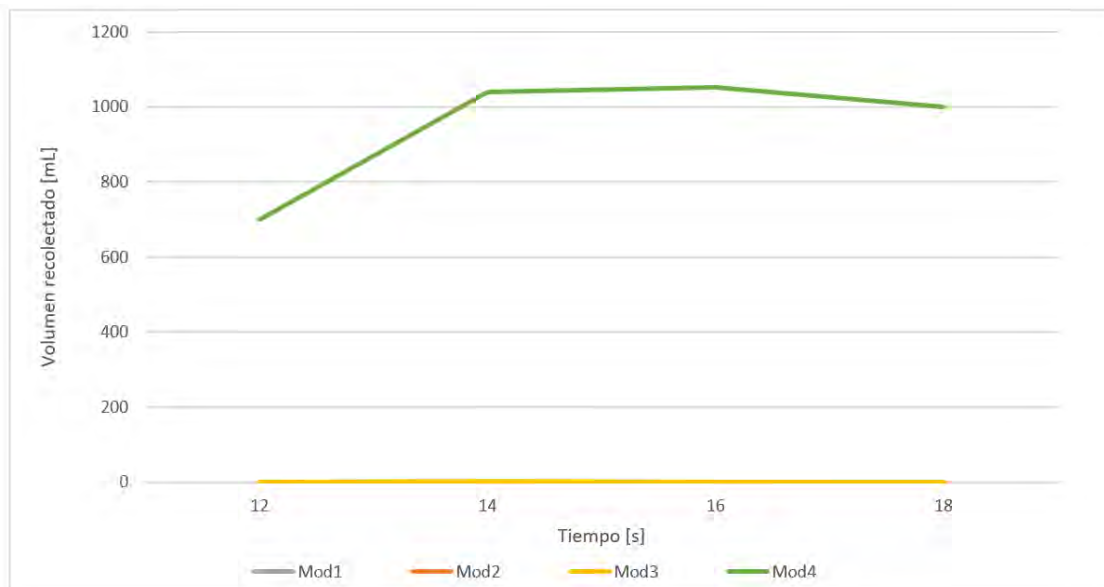
Anexo A.1. Planos de las modificaciones realizadas



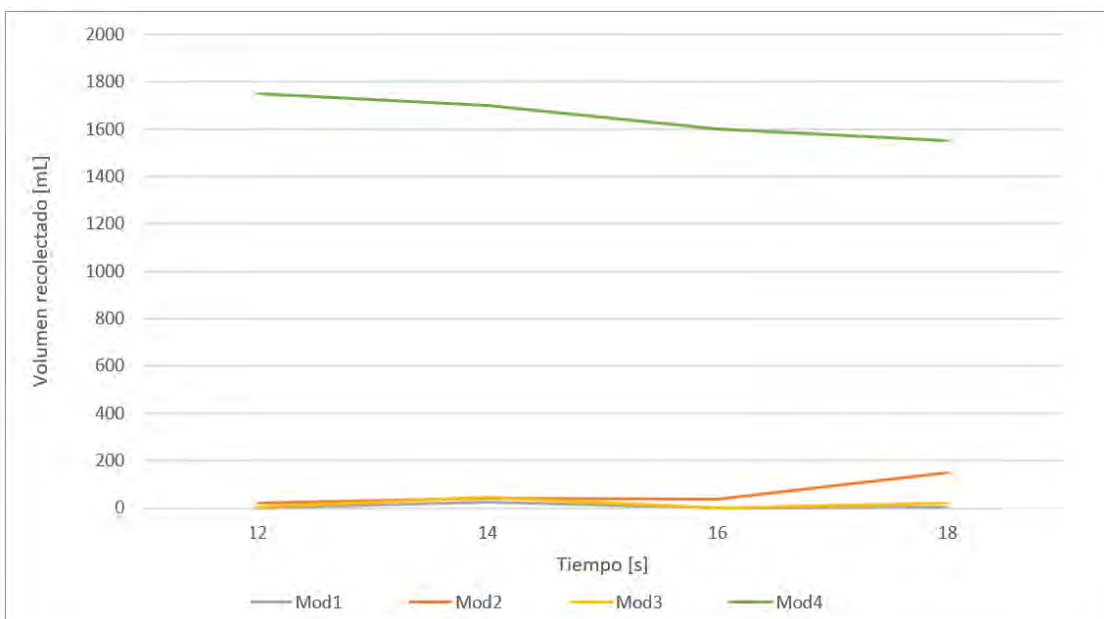
Anexo A.1. Planos de las modificaciones realizadas



## Anexo A.2: Gráficas de volumen recolectado

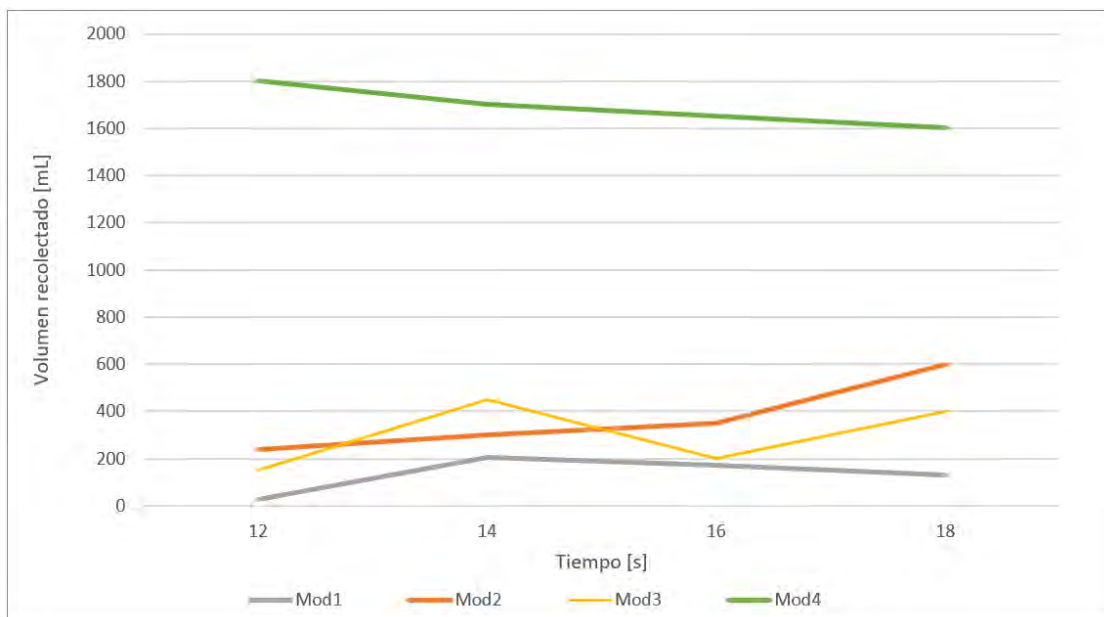


Volumen recolectado para altura de ola de 0,6 m, oleaje regular, escala 1:20

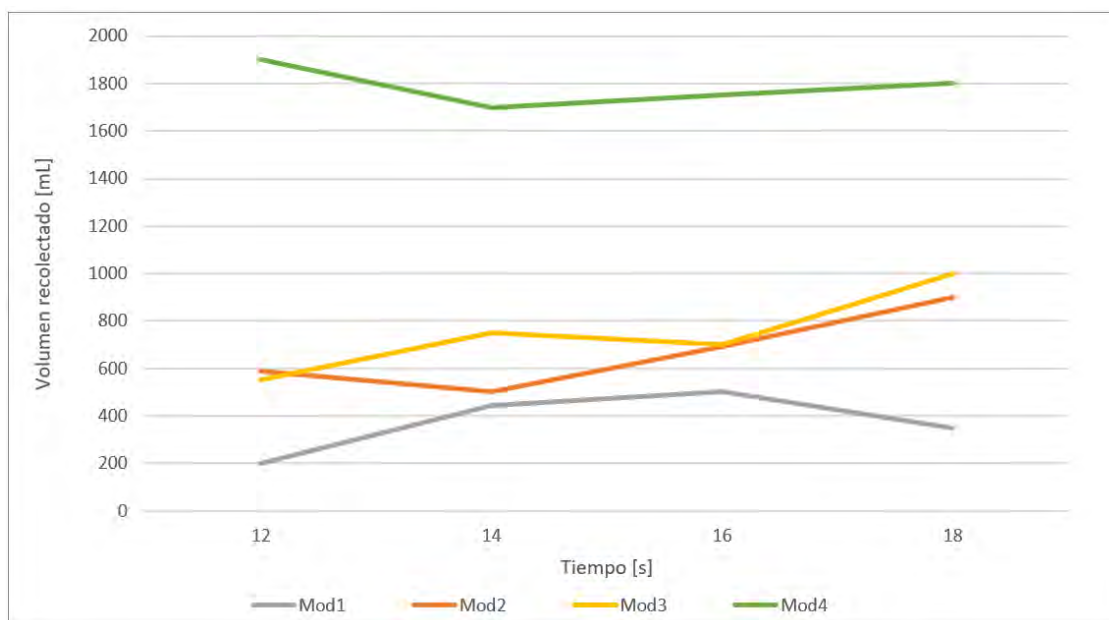


Volumen recolectado para altura de ola de 0,8 m, oleaje regular, escala 1:20

## Anexo A.2: Gráficas de volumen recolectado

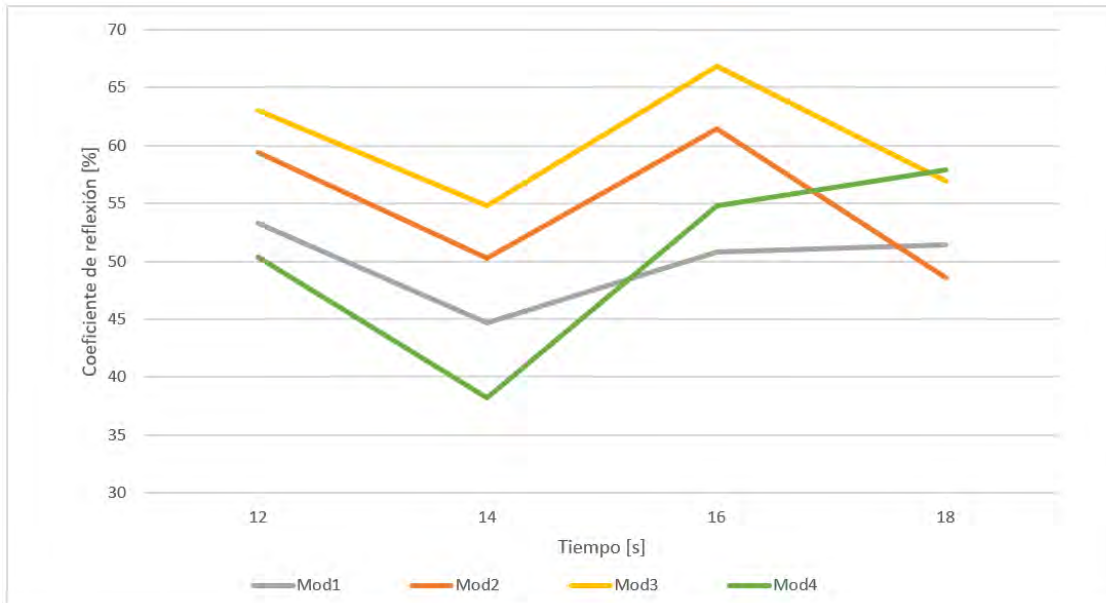


Volumen recolectado para altura de ola de 1,0 m, oleaje regular, escala 1:20

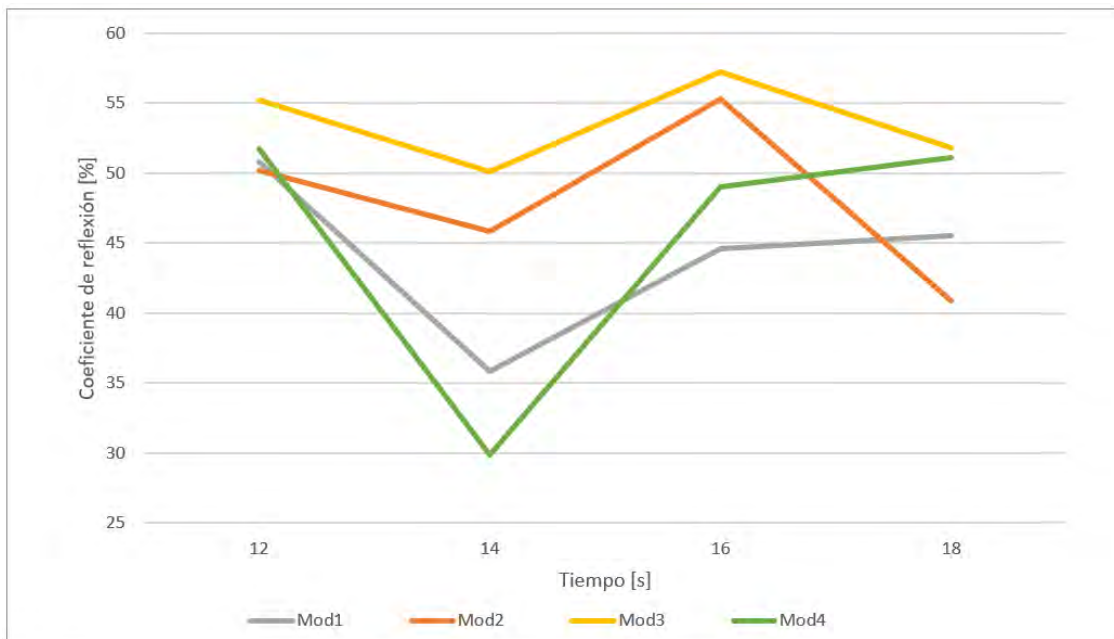


Volumen recolectado para altura de ola de 1,2 m, oleaje regular, escala 1:20

## Anexo A.3: Gráficas de coeficiente de reflexión

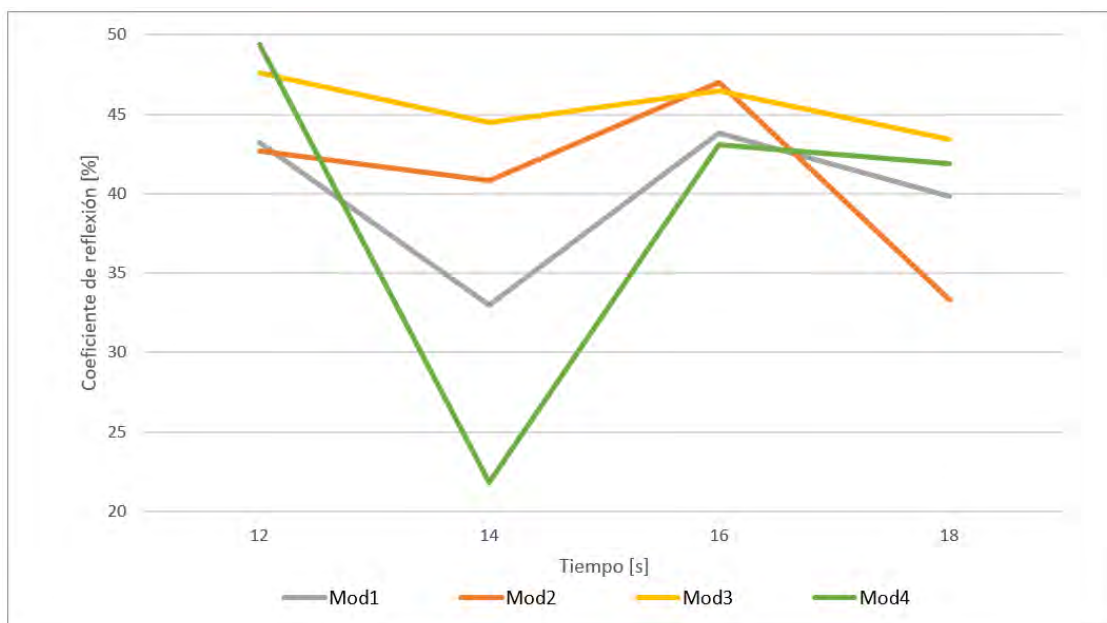


Coeficiente de reflexión para altura de ola de 0,6 m, oleaje regular, escala 1:20

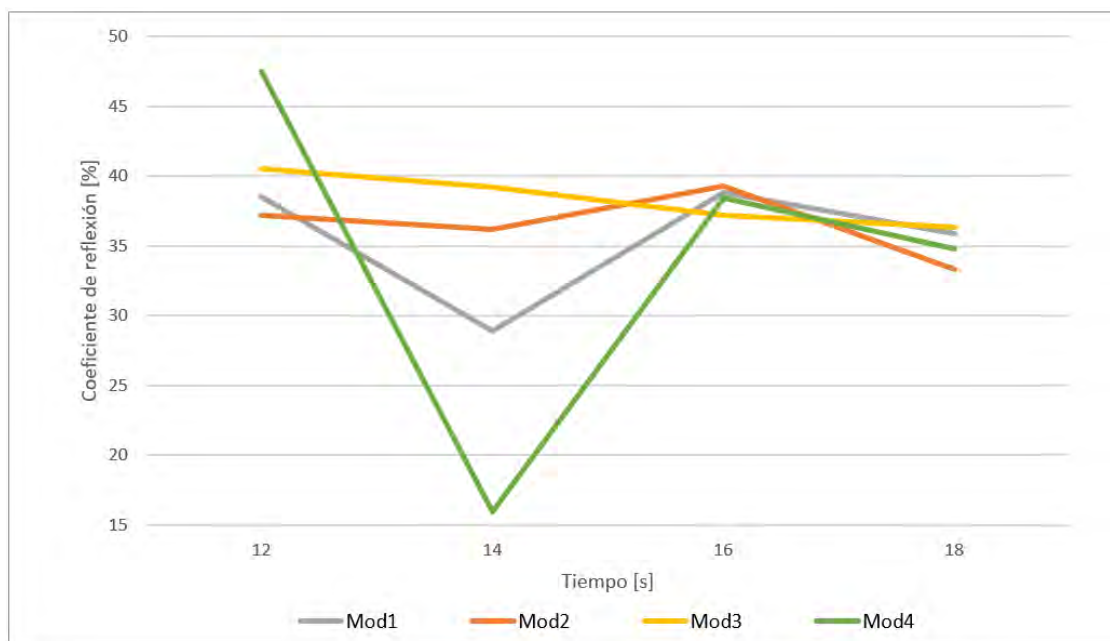


Coeficiente de reflexión para altura de ola de 0,8 m, oleaje regular, escala 1:20

## Anexo A.3: Gráficas de coeficiente de reflexión



Coeficiente de reflexión para altura de ola de 1,0 m, oleaje regular, escala 1:20



Coeficiente de reflexión para altura de ola de 1,2 m, oleaje regular, escala 1:20

### Anexo A.4: Memoria de cálculo para potencia

V [ml] 1:20	V [L] 1:20	V[m <sup>3</sup> ] 1:20	Vreal [L]	Vreal [m <sup>3</sup> ]	tefect [s]	t_1:1	Q_1:1 [L/s]	Q_1:1 [m <sup>3</sup> /s]
800	0,8	0,0008	6400	6,4	300	1341,6408	4,77027835	0,004770278
750	0,75	0,00075	6000	6	300	1341,6408	4,47213595	0,004472136
800	0,8	0,0008	6400	6,4	300	1341,6408	4,77027835	0,004770278
1100	1,1	0,0011	8800	8,8	300	1341,6408	6,55913273	0,006559133
900	0,9	0,0009	7200	7,2	300	1341,6408	5,36656315	0,005366563
870	0,87	0,00087	6960	6,96	300	1341,6408	5,18767771	0,005187678

Q	0,0051877 [m <sup>3</sup> /s]
P <sub>inst</sub>	101,78224 W
P <sub>unit</sub>	16,963706 W/m
Energía anual	326924,54 Wh año
Energía anual	326,92454 kWh año
Energía anual por metro	54,487424 kW h / m año
Eficiencia potencia	0,1767053

#### POTENCIA HIDRAULICA (P<sub>H</sub>):

\*Es la energía neta transmitida al fluido.

$$P_H = \rho \times Q \times g \times H$$

ó

$$P_H = \frac{Q \times H \times S}{75}$$

P<sub>H</sub> : P. Hidráulica ( HP )  
 Q : Caudal ( l/s )  
 H : Altura ( m )  
 S : Gravedad específica  
 ( 1 para agua limpia )

## Anexo A.5: Memoria de cálculo para estabilidad

Memoria de cálculo estabilidad

$$K_D = \frac{\gamma_s H^3}{(M * (S_r - 1)^3) \cot \alpha}$$

Variable	Magnitud	Unidad
M2	10400	kg
Largo	4	m
Alto	1	m
Ancho	2	m
Volumen	8	m <sup>3</sup>
$\rho_s$	1300	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_w$	1000	kg/m <sup>3</sup>
Sr	1,3	
cot a	1	
$\gamma_s$	12753	
H	1	m
	1	
	1	

Variable	Magnitud	Unidad
M2	10400	kg
Largo	4	m
Alto	1	m
Ancho	2	m
Volumen	8	m <sup>3</sup>
$\rho_s$	1300	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_w$	1000	kg/m <sup>3</sup>
Sr	1,3	
cot a	1	
$\gamma_s$	12753	
H	1	m
	1	
	1	



## Anexo A.5: Memoria de cálculo para estabilidad

Variable	Magnitud	Unidad
M2	20800	kg
Largo	4	m
Alto	1	m
Ancho	2	m
Volumen	8	m <sup>3</sup>
$\rho_s$	2600	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_w$	1000	kg/m <sup>3</sup>
Sr	2,6	
cot a	1	
$\gamma_s$	25506	
H	2	m
	1	
	1	

Variable	Magnitud	Unidad
M2	19200	kg
Largo	4	m
Alto	1	m
Ancho	2	m
Volumen	8	m <sup>3</sup>
$\rho_s$	2400	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_w$	1000	kg/m <sup>3</sup>
Sr	2,4	
cot a	1	
$\gamma_s$	23544	
H	1	m
	1	
	1	

## Anexo A.5: Memoria de cálculo para estabilidad

Variable	Magnitud	Unidad
M2	38400	kg
Largo	4	m
Alto	1	m
Ancho	2	m
Volumen	8	m <sup>3</sup>
$\rho_s$	4800	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_w$	1000	kg/m <sup>3</sup>
Sr	4,8	
cot a	1	
$\gamma_s$	47088	
H	1,6	m
	1,4	
	1,4	

Ensayo	h [m]	T [s]	Masa	K_D	Masa	K_D
Original	1	14	10400	0,0141	19200	1,43682132
	1	16	10400	0,0141	19200	1,43682132
	0,6	18	10400	0,0655	19200	6,65195053
M4	1	14	10400	0,0220	19200	2,23771662
	1	16	10400	0,0220	19200	2,23771662
	1	18	10400	0,0220	19200	2,23771662
M4 +1	1,6	14	20800	0,8155	38400	10,9247579
	1,4	16	20800	1,2173	38400	16,3075103
	1,4	18	20800	1,2173	38400	16,3075103

## Anexo A.6: formulario de servicios de LANAMME

UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICALABORATORIO NACIONAL  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

LanammeUCR

Formulario de servicios para unidades de la UCR y estudiantes  
de universidades estatales

Código: RC-478	Versión: 02	Página 1 de 1
----------------	-------------	---------------

Información General		
Nombre del solicitante: <a href="#">Melissa Piedra Láscarez</a>	Fecha: 12-01-2023	
Unidad o Escuela: <a href="#">Escuela de Ingeniería Mecánica</a>		
Nombre del profesor encargado del proyecto o Jefe de unidad Unidad: <a href="#">Georges Govaere Vicarioli</a>		
Correo para contacto: <a href="mailto:melissa.piedra@ucr.ac.cr">melissa.piedra@ucr.ac.cr</a>	Teléfono: 89821566	
Inicio programado: 13-01-2023	Duración estimada: 2 horas	
Número de propuesta (Cuando aplique):	Número de ST (uso interno):	
Tipo de Proyecto		
<input checked="" type="checkbox"/> Tesis de grado	<input type="checkbox"/> Tesis de posgrado	<input type="checkbox"/> Proyecto de investigación
<input type="checkbox"/> TCU	<input type="checkbox"/> Curso	<input type="checkbox"/> Otro
Detalles del proyecto		
Título: <a href="#">Estudio y adaptación del diseño de un rompeolas para captar la energía que es redirigida y aprovecharla</a>		
Objetivo: <a href="#">Modificar la geometría de un rompeolas modular para redirigir el flujo de manera que pueda aprovecharse</a>		
Justificación: <a href="#">Encontrar formas alternativas de aprovechar recursos renovables para la generación eléctrica estable con menor impacto ambiental.</a>		
Esquema experimental o descripción del servicio solicitado		
<p>Actualmente estoy desarrollando las pruebas finales de mi TFG y necesito hacer unos agujeros de 5 cm de diámetro en 18 piezas de concreto que conforman el modelo del rompeolas con el que estoy trabajando. (Adjunto fotografías con las respectivas dimensiones) En 6 piezas el agujero es en la pared posterior de la pieza y en las 12 restantes sería en la cara superior o en las paredes laterales inclinadas.</p>		

Firmado digitalmente por  
MELISSA PIEDRA  
LÁSCAREZ (FIRMA)  
Fecha: 2023.01.12 07:38:09  
-06'00'

Firma del solicitante

Firmado digitalmente por OSCAR VALERIO SALAS  
(FIRMA)  
Fecha: 2023.01.13 18:47:50 -06'00'VB del Jefe o Jefes de Laboratorio  
(donde se harían los ensayos)Firmado digitalmente por  
GUILLERMO ENRIQUE GONZÁLEZ  
BELTRAN (FIRMA)  
Fecha: 2023.01.16 08:07:25 -06'00'VB Coordinador General  
de LaboratoriosFirmado digitalmente por  
GUILLERMO ENRIQUE GONZÁLEZ  
BELTRAN (FIRMA)  
Fecha: 2023.01.16 08:08:28 -06'00'VB Director del  
LanammeUCR