

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

Diseño y construcción de un generador de olas para la evaluación
conceptual de dispositivos WEC

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Nombre de la titulación

Ingeniera Naval

Presentado por:

Rosa Carolina Guthemberg Jácome

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

Dedicatoria

Dedico este proyecto con profundo agradecimiento a quien ha sido mi inquebrantable fuente de apoyo, quien siempre confió en mí, supo cuidarme, atesorarme y motivarme a ser cada día alguien mejor. Para ti, mi querido Danny.

Agradecimientos

Agradezco con todas mis fuerzas a los medios que me hicieron llegar aquí, a las personas y su muy apreciado apoyo. Sin alguna de estas no seguiría en pie.

Mi más profundo agradecimiento al Dr. Rubén Paredes, mi increíble tutor, por su incalculable apoyo y orientación. Sin su guía constante y valiosos consejos, este logro no habría sido posible. También quiero dar las gracias al Dr. José Rolando Marín, MSc. Alejandro Chanabá, MSc. Jorge Faytong, Dr. Patrick Townsend, Ing. José María Rodríguez, Dr. Jhonny Domínguez, MSc. Isaac Mendoza, MSc. David Plaza, Ing. Paul Zambrano, Ing. Andrés Tóala, Ing. Daniela Morocho, Ing. Andrea Gaona, quienes generosamente compartieron su sabiduría y conocimientos conmigo a lo largo de estos años. Sus enseñanzas han sido invaluable en mi desarrollo personal y profesional.

Gracias queridos amigos, Doménica, Paola, Diego, Andreina, Joice, por su linda compañía y constante apoyo.

Declaración Expresa

Yo *Rosa Carolina Guthemberg Jacome* acuerdo y reconozco que la titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, información no divulgada y cualquier otro derecho o tipo de Propiedad Intelectual que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada durante el desarrollo de su trabajo de titulación, incluyendo cualquier derecho de participación de beneficios o de valor sobre titularidad de derechos, pertenecerán de forma total, perpetua, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin limitación de ningún tipo. Se deja además expresa constancia de que lo aquí establecido constituye un “previo acuerdo”, así como de ser posible bajo la normativa vigente de transferencia o cesión a favor de la ESPOL de todo derecho o porcentaje de titularidad que pueda existir.

Sin perjuicio de lo anterior la alumna firmante de la presente declaración recibe en este acto una licencia de uso gratuita e intransferible de plazo indefinido para el uso no comercial de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada durante el desarrollo de su trabajo de titulación, sin perjuicio de lo cual deberán contar con una autorización previa expresa de la ESPOL para difundir públicamente el contenido de la investigación, desarrollo tecnológico o invención.

Así también autorizo expresamente a que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra o invento, por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual.

Guayaquil, 22 de septiembre del 2023.

Rosa Carolina Guthemberg Jacome

Evaluadores

David A. Plaza, MSc

Profesor de la Materia

Rubén J. Paredes, PhD

Tutor del Proyecto

Resumen

El desarrollo tecnológico de los convertidores de energía undimotriz (WEC) se encuentra en constante avance, pero la falta de instalaciones marinas, tales como canales hidrodinámicos o cuencas oceanográficas en Ecuador es un desafío para validar modelos numéricos en la etapa conceptual de desarrollo. Para abordar esta limitación, se diseñó y construyó un generador de olas.

Este generador de olas fue diseñado para un tanque de 11.5 x 3.45 x 0.85 metros, compuesto por seis flaps accionados independientemente por un actuador lineal. El diseño permite generar olas regulares de hasta 25 cm de alto con un periodo de 0.3 a 2.5 segundos, con un motor de 8.5 N*m a 2400 rpm. Posteriormente, se construyó un prototipo de uno de los flaps del generador de olas accionado por un motor paso a paso híbrido Nema de 8.7 N*m a 300 rpm con un sistema de control basado en Arduino, cuyo costo final fue de 1,200 USD. Las pruebas iniciales demostraron limitaciones debido a las características del motor paso a paso, dando como resultado olas con una altura máxima de 1.2 cm y un periodo promedio de cresta de 2.56 s. Por lo cual, se recomienda el uso de un servomotor para garantizar que mantiene el torque constante dentro del rango operativo.

Finalmente, se realizó un estudio de costo – beneficio de la construcción de los seis flaps del generador de olas mejorados en el tanque anteriormente descrito. Los resultados arrojaron una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 18% y un Valor Actual Neto (VAN) de \$34,521.27, con una recuperación de la inversión inicial en un periodo de 5 años, demostrando la viabilidad económica del proyecto. Esta infraestructura no solo promoverá el desarrollo de una tecnología inexistente en la región, sino que también tendrá un impacto positivo en el ámbito académico y reducirá significativamente los costos de futuros proyectos de ingeniería oceánica.

Palabras Clave: Generador de olas, Múltiples flap, Actuador lineal, Husillo de bolas, Motor paso a paso.

Abstract

The technological development of wave energy converters (WEC) is constantly advancing, but the lack of marine facilities, such as hydrodynamic channels or oceanographic basins in Ecuador, poses a challenge for validating numerical models in the conceptual development stage. To address this limitation, a wave generator was designed and constructed.

This wave generator was designed for a tank measuring 11.5 x 3.45 x 0.85 meters, consisting of six flaps independently operated by a linear actuator. The design allows for the generation of regular waves up to 25 cm in height with a period ranging from 0.3 to 2.5 seconds, using an 8.5 Nm motor at 2400 rpm. Subsequently, a prototype of one of the wave generator flaps was built, powered by a hybrid Nema stepper motor with 8.7 Nm torque at 300 rpm, controlled by an Arduino-based system, with a final cost of \$1,200 USD. Initial tests revealed limitations due to the characteristics of the stepper motor, resulting in waves with a maximum height of 1.2 cm and an average crest period of 2.56 seconds. Therefore, it is recommended to use a servo motor to ensure constant torque within the operating range.

Finally, a cost-benefit study of constructing the six improved wave generator flaps in the previously described tank was conducted. The results showed an Internal Rate of Return (IRR) of 18% and a Net Present Value (NPV) of \$34,521.27, with a return on the initial investment within a period of 5 years, demonstrating the economic viability of the project. This infrastructure will not only promote the development of a technology that is non-existent in the region but will also have a positive impact on the academic field and significantly reduce the costs of future ocean engineering projects.

Keywords: *Wave generator, Multiple flaps, Linear actuator, Ball screw, Stepper motor*

Índice General

Resumen.....	6
Abstract.....	7
Índice General.....	8
Abreviaturas.....	11
Simbología.....	12
Índice de Figuras.....	13
Índice de Tablas.....	15
Capítulo 1.....	17
1. Introducción.....	18
1.1 Descripción del Problema.....	20
1.2 Justificación del Problema.....	21
1.3 Objetivos.....	21
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	21
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	21
1.4 Marco Teórico.....	22
1.4.1 <i>Desarrollo tecnológico de dispositivos convertidores de energía (WEC)</i>	22
1.4.2 <i>Pruebas experimentales requeridas para el desarrollo tecnológico de los WEC</i>	26
1.4.3 <i>Descripción estadística de los estados de mar</i>	28
1.4.4 <i>Características de oleaje de la zona factible para la instalación de WECs en las Islas Galápagos</i>	31
1.4.5 <i>Características físicas de las olas gravitacionales</i>	33
1.4.6 <i>Escala de Froude</i>	36
1.4.7 <i>Generador de olas</i>	37
5.5 kW24	
Capítulo 2.....	39
2. Metodología.....	40
2.1 Teoría del generador de olas.....	40
2.1.1 <i>Ecuaciones gobernantes bidimensionales</i>	40

2.1.2	<i>Teoría de generador de olas de primer orden</i>	42
2.1.3	<i>Generador de olas tipo flap y tipo pistón</i>	44
2.1.4	<i>Presión, fuerza y potencia de la pared móvil del generador de olas</i>	45
2.1.5	<i>Validación experimental</i>	50
2.1.6	<i>Factor de seguridad</i>	53
2.2	Diseño del Generador de Olas.....	54
2.2.1	<i>Selección del tipo de generador de olas</i>	55
2.2.2	<i>Variables de diseño</i>	55
2.2.3	<i>Diseño del generador de olas multi flap</i>	57
2.2.4	<i>Fuerza del actuador lineal</i>	58
2.2.5	<i>Dimensionamiento del husillo de bolas y motor</i>	65
Capítulo 3	68
3.	Resultados y Análisis.....	69
3.1	Características del generador de olas	69
3.2	Construcción del generador de olas	70
3.3	Sistema de control	71
3.3.1	<i>Calibración del sistema</i>	74
3.4	Resultados del generador de olas tipo flap.....	75
3.5	Velocidad límite del sistema.....	79
3.6	Costo beneficio de la construcción de los seis flaps del generador de olas mejorado 79	
Capítulo 4	82
4.	Conclusiones y Recomendaciones.....	83
4.1	Conclusiones	83
4.2	Recomendaciones	84
Referencias	86
4.3	Apéndice A.....	92
4.3.1	<i>Cálculo de las raíces de la relación de dispersión para los modos de ola estacionaria mediante Python</i>	92
4.4	Apéndice B.....	94

4.4.1	<i>Resultados obtenidos de la fuerza y potencia del generador de olas tipo pistón</i>	94
4.4.2	<i>Resultados obtenidos de la fuerza y potencia del generador de olas tipo flap</i>	95
4.5	Apéndice C	96
4.5.1	<i>Cálculo para determinar las características del husillo de bolas y torque requerido por el motor</i>	96
4.6	Apéndice D	98
4.6.1	<i>Código del sistema de control (Arduino)</i>	98
4.6.2	<i>Código para guardar valores registrados del motor paso a paso (Python)</i>	102
4.7	Apéndice E	105
4.7.1	<i>Resultados obtenidos de la ola creada</i>	105
4.8	Apéndice F	107
4.8.1	<i>Cantidad de pruebas en la etapa experimental de un dispositivo WEC</i>	107
4.8.2	<i>Desglose de los Costos del Generador de Olas mejorado</i>	108
4.8.3	<i>Desglose de los Costos</i>	108
4.8.4	<i>Costo de operación anual</i>	109
4.8.5	<i>Desglose de los costos de la obra civil</i>	110
4.8.6	<i>Flujo de caja</i>	112

Abreviaturas

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
TRL	Technology Readiness Level
TPL	Technology Performance Levels
WEC	Wave Energy Converter
ITTC	International Towing Tank Conference
LCOE	Levelized Cost of Energy
COE	Cost of Energy
CapEx	Capital Expenditure
OpEx	Operational Expenditure
ODS	Objetivo de Desarrollo Sostenible

Simbología

m	Metro
h	Hora
s	Segundo
W	Vatio
\emptyset	Diámetro
τ	Periodo promedio de cruce hacia positivo
H_s	Altura significativa
V_ω	Velocidad del viento
σ	Relación de dispersión
k	Número de ola
h	Profundidad del agua
C	Celeridad
H	Altura de la ola
T	Periodo de la ola
L	Longitud de la ola
S	Carrera
g	Aceleración gravitacional (9.81 m/s ²)
k_n	Constante de separación

Índice de Figuras

Figura 1.1. Niveles de madurez tecnológica (TRL).....	22
Figura 1.2. Niveles de rendimiento tecnológico (TPL)	25
Figura 1.3. Matriz de valor tecnológico de WECs.....	26
Figura 1.4. Histograma y distribución teórica de Rayleigh.....	29
Figura 1.5. Varios espectros de Bretschneider para olas con altura significativa de 5 metros	30
Figura 1.6. Condición de estados de mar 0 - 6.....	31
Figura 1.7. Características principales del oleaje de las Islas Galápagos.....	32
Figura 1.8. Potencial energético del área de estudio marino.....	33
Figura 1.9. Perfil de ola sinusoidal.....	33
Figura 1.10. Movimiento de partículas ondulatorias en aguas profundas y poco profundas	34
Figura 1.11. Variación de varios parámetros de ola en función del radio entre la profundidad del agua y longitud de la ola	36
Figura 2.1. Representación de la función de transferencia en un generador de olas tipo pistón	40
Figura 2.2. Bosquejo bidimensional de la definición del canal de onda.	41
Figura 2.3. Grafica de la ecuación implícita de la relación de dispersión para los modos de ola estacionaria.....	43
Figura 2.4. Relación de la altura de la ola y carrera de generadores de ola tipo flap y tipo pistón	45
Figura 2.5. Tanque de olas SiMarLab	50
Figura 2.6. Generador de olas tipo pistón – Altura de la ola VS el periodo de la ola.....	51
Figura 2.7. Laboratorio de Hidráulica (FIMCP)	52
Figura 2.8. Generador de olas tipo flap – Altura de la ola VS el periodo de la ola	53
Figura 2.9. Proceso de Diseño de Generadores de Olas: Pasos Clave	55
Figura 2.10. Laboratorio experimental 2 – Reservorio de acuicultura	56

Figura 2.11. <i>Diseño del generador de olas multi flaps</i>	57
Figura 2.12. <i>Esquema del generador de olas tipo flap (vista lateral)</i>	58
Figura 2.13. <i>Límites del sistema - carreras del actuador lineal</i>	59
Figura 2.14. <i>Altura de la ola</i>	60
Figura 2.15. <i>Variación de la fuerza en el periodo más intenso ($T=1.25s$) (agua en un lado)</i>	60
Figura 2.16. <i>Variación de la potencia en el periodo más intenso ($T=1.25s$) (agua en un lado)</i>	61
Figura 2.17. <i>Variación de la fuerza en el periodo más intenso ($T=1.25s$) (agua en ambos lados)</i>	61
Figura 2.18. <i>Variación de la potencia en el periodo más intenso ($T=1.25s$) (agua en ambos lados)</i>	62
Figura 2.19. <i>Diagrama de cuerpo libre del sistema</i>	63
Figura 2.20. <i>Fuerza requerida por el actuador lineal</i>	65
Figura 2.21. <i>Comparación de un motor paso a paso y un servo motor</i>	67
Figura 3.1. <i>Construcción e instalación del prototipo de generador de olas</i>	70
Figura 3.2. <i>Simulación de las conexiones</i>	72
Figura 3.3. <i>Diagrama electrónico</i>	72
Figura 3.4. <i>Funcionamiento del sistema de control</i>	73
Figura 3.5. <i>Sistema de control del prototipo de un módulo del generador de olas tipo flap</i> 73	
Figura 3.6. <i>Variación de la carrera y velocidad del actuador lineal en función del tiempo.</i> . 75	
Figura 3.7. <i>Prueba experimental del prototipo de generador de olas tipo flap</i>	76
Figura 3.8. <i>Características de la ola generada</i>	77
Figura 3.9. <i>Velocidad límite del sistema.</i>	79
Figura 3.10. <i>Resumen de datos financieros</i>	81
Figura 3.11. <i>Flujo de caja de la construcción de un canal hidrodinámico en el Ecuador</i>	81

Figura 4.1. <i>Fuerza por ancho de la pared móvil que ejerce el agua sobre la placa (generador de olas tipo pistón)</i>	94
Figura 4.2. <i>Potencia por ancho de la pared móvil que ejerce el agua sobre la placa (generador de olas tipo pistón)</i>	94
Figura 4.3. <i>Fuerza por ancho de la pared móvil que ejerce el agua sobre el flap (generador de olas tipo flap)</i>	95
Figura 4.4. <i>Potencia por ancho de la pared móvil que ejerce el agua sobre el flap (generador de olas tipo flap)</i>	95
Figura 4.5. <i>Parámetros estadísticos de la ola</i>	107

Índice de Tablas

Tabla 1.1. <i>Etapas del desarrollo tecnológico de dispositivos WEC</i>	22
Tabla 1.2. <i>Especificaciones de los dispositivos WEC más desarrollados</i>	24
Tabla 1.3. <i>Parámetros en los casos de prueba de dispositivos WEC</i>	27
Tabla 1.4. <i>Escala de Froude</i>	37
Tabla 1.5 <i>Clasificación de generadores de olas</i>	38
Tabla 2.1 <i>Presión, fuerza y potencia de la pared móvil del generador de olas tipo flap</i>	46
Tabla 2.2 <i>Presión, fuerza y potencia de la pared móvil del generador de olas tipo pistón</i> ...	48
Tabla 2.3 <i>Fuerza y potencia máxima teórica de los generadores de olas tipo pistón y tipo flap existentes en la ESPOLE</i>	54
Tabla 2.4 <i>Variables de diseño</i>	56
Tabla 2.5 <i>Variables del sistema</i>	64
Tabla 2.6 <i>Resumen de las características del husillo de bolas y motor requerido</i>	65
Tabla 3.1 <i>Resumen de las características del generador de olas</i>	69
Tabla 3.2 <i>Características del generador de olas tipo flap (prototipo)</i>	69
Tabla 3.3 <i>Costo total del generador de olas prototipo</i>	71
Tabla 3.4 <i>Calibración del sistema a distintas profundidades de agua</i>	74

Tabla 3.5 <i>Datos de entrada</i>	75
Tabla 3.6 <i>Parámetros estadísticos de la ola generada</i>	78
Tabla 3.7 <i>Costos de alquiler de un tanque hidrodinámico en diferentes países</i>	80
Tabla 4.1 <i>Variación de la altura de la ola creada en función del tiempo</i>	105
Tabla 4.2 <i>Calculo de máximos locales</i>	105
Tabla 4.3 <i>Datos obtenidos del espectro de la ola en función de la frecuencia</i>	106
Tabla 4.4 <i>Numero de campañas experimentales de un dispositivo WEC en una instalación marina</i>	107
Tabla 4.5 <i>Costos del generador & absorbedor de olas</i>	108
Tabla 4.6 <i>Salario del personal</i>	108
Tabla 4.7 <i>Mantenimiento del canal hidrodinámico</i>	109
Tabla 4.8 <i>Costos operativos (anual)</i>	109
Tabla 4.9 <i>Detalle de los costos de la obra civil de un canal hidrodinámico</i>	110
Tabla 4.10 <i>Flujo de caja de la construcción de un canal hidrodinámico en el Ecuador</i>	112

Capítulo 1

1. Introducción

La energía undimotriz tiene potencial de desarrollar una industria con gran rentabilidad económica a largo plazo [1]. Esto ha impulsado el desarrollo de distintos tipos de convertidores de energía de olas (WEC, por sus siglas en inglés) que buscan identificar mecanismos de captura eficientes y formas de almacenamiento rentables [1]. Actualmente, esta tecnología aún está en desarrollo y existen diferentes prototipos WEC en etapa pre-comercial, entre los cuales se destacan el Wave Dragon de 7 MW y 300 m x 170 m x 17.5 m, instalado en Dinamarca, con un costo nivelado de energía (LCOE, por sus siglas en inglés) de 316,90 €/MWh, seguido por el dispositivo Pelamis de 750 kW y 150 m x 3 m, instalado en Portugal, con un LCOE de 735,94 €/MWh y el prototipo AquaBuOY de 250 kW y 35 m x 6 m, instalado en Escocia, con un LCOE de 2967,85 €/MWh [2], [3]. Aunque el LCOE de la energía undimotriz es actualmente mayor que otras energías renovables, se espera que disminuya conforme madure la tecnología [4], similar a lo que ocurrió entre 2010 y 2021 con la energía solar fotovoltaica y eólica marina, las cuales experimentaron una disminución del 88% y un 60%, respectivamente [5]. Además, la producción de energía de dispositivos WEC varía en función del lugar de instalación, es decir, que estos dispositivos podrían no ser rentables en todas las localizaciones [6]. Por lo tanto, para implementar esta tecnología en Ecuador y asegurar su rentabilidad se requiere considerar las condiciones del estado de mar local.

El desarrollo de un dispositivo WEC hasta su comercialización implica cinco etapas de prueba y validación que pueden tomar de 3 a 11 años y requerir una inversión de hasta veinte millones de dólares americanos [7], [8]. Estas etapas pueden ser clasificadas en términos de Nivel de Preparación Tecnológica (TRL, por sus siglas en inglés) y están enfocadas en validar el concepto, diseño, sistema, prototipo y demostración del WEC [8]. Para lograrlo, se combinan modelos analíticos con pruebas experimentales utilizando modelos a pequeña (1:25-100), mediana (1:10-25) y gran escala (1:1-10) [8], [9], que requieren de plantas piloto y tanques de olas capaces de recrear las condiciones del mar local [10]. A medida que se validan los resultados y avanza el proceso de desarrollo, la complejidad

del modelo analítico aumenta progresivamente en cada etapa, ya que se incorporan nuevos componentes, como el sistema de amarre, anclaje y toma de fuerza [8]. Por consiguiente, es necesario garantizar la precisión de las pruebas experimentales siguiendo las recomendaciones desarrolladas por instituciones aceptadas por la comunidad científica [11]–[14]

En particular, la Conferencia Internacional de Tanques de Pruebas (ITTC, por sus siglas en inglés) es una organización que proporciona una serie de recomendaciones para pruebas experimentales de dispositivos WEC en las distintas etapas de desarrollo [12]. En estas pruebas, se establecen parámetros específicos como, el rango de las escalas del prototipo, las características de las olas y la combinación de los distintos componentes de los WEC considerados en cada una de las etapas [8]. Por esta razón, las dimensiones del tanque de pruebas y la capacidad del generador de olas limitan la etapa de desarrollo que puede ser alcanzada en dicha infraestructura [8], [15], [16]. Específicamente en América del Sur, existen tanques de pruebas en Chile y Brasil que han sido usados para la evaluación experimental de estos dispositivos, donde ha sido posible alcanzar la etapa de validación de diseño con canales hidrodinámicos unidireccionales de longitudes de hasta 220 m [17], [18], y cuencas oceánicas con áreas rectangulares de hasta (40 x 30) m² capaces de generar olas multidireccionales [19], [20]. En Ecuador, no es posible evaluar ninguna de las etapas de desarrollo tecnológico de dispositivos WEC de manera experimental, ya que los tanques de prueba disponibles tienen longitudes menores a 10 m y áreas transversales de hasta (0,5 x 0,4) m², con capacidad limitada de generación de olas [21], [22]. Por lo tanto, la construcción de un tanque de pruebas capaz de generar olas que se propaguen en una dirección permitirá completar la etapa de validación de concepto.

Para crear olas en un entorno controlado se emplea comúnmente un generador de olas de pared móvil. En estos sistemas, el período de oscilación de la pared móvil determina la longitud de la ola, mientras que la amplitud de oscilación regula su altura [23]. Estos generadores pueden ser de tipo pistón y/o placa basculante ("flap"). Los de tipo pistón son

adecuados para aguas poco profundas y se caracterizan por el movimiento horizontal de toda la pared [23]. Por otro lado, los generadores de olas tipo flap son más apropiados para aguas profundas debido a su baja inercia, en este caso, la placa está articulada al fondo del tanque y rota al ser accionada por un actuador acoplado en la parte superior del mismo [23]. El componente principal de estos generadores es el motor utilizado para desplazar la pared móvil, el cual es dimensionado en función de la inercia que tiene que vencer y el tipo de olas que requiere generar. Por ejemplo, el canal hidrodinámico unidireccional de Chile tiene un generador de ola híbrido tipo pistón/flap de absorción activa capaz de producir olas regulares e irregulares de hasta 0.4 m de altura y 3.5 s de periodo, la pared móvil tiene 3 m de ancho y 1.6 m de altura sumergida, la cual es accionada mecánicamente por un servomotor de 6 kW de potencia [18]; mientras que, la cuenca oceánica multidireccional de São Paulo, Brasil tiene 152 generadores de olas tipo flap de absorción activa capaces de producir en conjunto olas regulares e irregulares de hasta 0.25 m de altura y 2.5 s de periodo, cada flap tiene 0.36 m de ancho y 1.2 m de altura sumergida, y son accionados por un sistema mecánico independiente de un servomotor de 0.75 kW [19], [24]. Se evidencia que la potencia del motor está determinada por el área sumergida de la pared móvil y las características de la ola requerida.

1.1 Descripción del Problema

En Ecuador, varios grupos de investigadores trabajan en el desarrollo de dispositivos WEC para aprovechar el potencial energético de las Islas Galápagos [25], [26]. Sin embargo, el país no cuenta con la infraestructura necesaria para validar los diseños conceptuales en un entorno controlado, lo que limita el nivel TRL que podrían alcanzar. Esto se debe a que los dispositivos varían en tamaño de 18 m a 300 m [2], y los canales hidrodinámicos disponibles en el país tienen un área transversal limitada [21], [22]. Por tanto, es necesario diseñar y construir un tanque de pruebas para que esta tecnología se desarrolle en el Ecuador.

1.2 Justificación del Problema

El consumo energético de las Islas Galápagos alcanzó los 55.6 GWh en el año 2018, de los cuales, tan solo el 16% fue producido por plantas de energías renovables (solar y eólica) con un total de 8.9 GWh, cuya inversión superó los \$ 55 M [27], [28]. Por ello, la instalación de un parque undimotriz en sus costas permitiría aumentar el porcentaje de producción de energía renovable, reducir los costos de energía eléctrica, impulsar la economía local y promover el turismo sostenible. Además, el cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible de “Energía Asequible y No Contaminante” (ODS #7) e “Industria, Innovación e Infraestructura” (ODS #9), puede contribuir significativamente a la consecución de “Ciudades y Comunidades Sostenibles” (ODS #11). Finalmente, la ESPOL al contar con un tanque de pruebas para validar prototipos WEC a pequeña y mediana escala será pionera en el desarrollo de tecnología undimotriz en el Ecuador.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general*

El objetivo del presente proyecto es diseñar y construir un generador de olas regulares para la evaluación conceptual de dispositivos WEC.

1.3.2 *Objetivos específicos*

1. Diseñar un generador de olas eficiente para producir olas regulares en un tanque de 11.5 m x 3.45 m x 0.85 m.
2. Instalar un generador de olas unidireccional en el reservorio de acuicultura usando un mecanismo de bajo costo.
3. Implementar un sistema de control basado en Arduino para generar olas regulares.
4. Determinar el costo-beneficio de la construcción del generador de olas en un tanque de 11.5 m x 3.45 m x 0.85 m para la evaluación conceptual de dispositivos WEC.

1.4 Marco Teórico

1.4.1 Desarrollo tecnológico de dispositivos convertidores de energía (WEC)

La escala TRL es un sistema que permite determinar el grado de madurez de una tecnología con una escala numérica del 1 al 9, como se ilustra en la Figura 1.1 [29], [30]. Es posible clasificar el desarrollo tecnológico de los dispositivos WEC en 5 etapas descritas en términos de TRL, las cuales aumentan en complejidad a medida se avanza en el proceso de desarrollo (la descripción de los parámetros requeridos en cada etapa se detalla en la Tabla 1.1) [8].

Figura 1.1.

Niveles de madurez tecnológica (TRL)



Nota. Adaptado de “Anexo 1. Technology Readiness Levels – TRL”, por Vicerrectoría de Investigaciones y Posgrados de la Universidad de Caldas, 2022, p. 1. https://investigacionesyposgrados.ucaldas.edu.co/wp-content/uploads/Anexo-1_TRL.pdf

Tabla 1.1.

Etapas del desarrollo tecnológico de dispositivos WEC

Etapas	TRL	Escala	Tanque de pruebas*	Duración	Costo [\$,000]
Conceptual	1	1:25-100		1-3 semanas	1-5

	Etapa		TRL	Escala	Tanque de pruebas*	Duración	Costo [\$,000]
1	Validación de Concepto	Rendimiento	2		Canal hidrodinámico & Cuenca oceánica	1-3 semanas	25-75
		Optimización	3			1-3 semanas	25-50
2	Validación de Diseño		4-5	1:10-25	Cuenca oceánica	6-12 meses	50-250
3	Validación de Sistema		6-7	1:3-10	Planta piloto (sitio benigno**)	6-18 meses	1,000-2,500
4	Prototipo		8	1:1-2	Planta piloto (sitio expuesto)	12-36 meses	5,000-10,000
5	Demostración		9	1-1	Mar local	1-5 años	2,500-7,500

*El uso de las diversas instalaciones es crucial en el proceso de diseño de un WEC ya que permite probar y validar el rendimiento del dispositivo en diversas condiciones de oleaje.

** Lugar de aguas tranquilas, no hay olas ni corrientes significativas.

Nota. Adaptada de “Tank Testing of Wave Energy Conversion Systems”, por The European Marine Energy Centre Ltd. 2009; y “Analysis Procedure for Model Tests in Regular Waves”, por la ITTC. 2002.

Pese a los grandes avances tecnológicos de la última década, los WECs solo han alcanzado un TRL promedio de 6, lo que corresponde a la etapa 3 de desarrollo tecnológico, por ejemplo, el prototipo CETO alcanzó la etapa 4 según la Tabla 1.2 [31]. Además, dicho desarrollo es costoso, de alto riesgo y de larga duración. Por ello, varios autores han estudiado mejoras en el desempeño tecno económico de estos dispositivos, lo que ha dado

lugar a la matriz de nivel de rendimiento y preparación tecnológica como un medio para evaluar y comparar diferentes trayectorias de desarrollo [32], [33].

Tabla 1.2.

Especificaciones de los dispositivos WEC más desarrollados

País	Dispositivo	Dimensiones	Etapas	Escala	Potencia del prototipo
Reino Unido	Oyster	18m x 12m x 2m	4	1:1	170 kW
Finlandia	WaveRoller	3.5m x 4.5m x 6m	4	1:1	2 x 15 kW
Canadá	AquaBuOY*	35m x 6m	3	1:2	250 kW
Noruega	FOBOX3	36m x 36m x 25m	3	1:3	40 kW
Irlanda	OE Buoy	30m x 10m x 10m	3	1:4	20 kW
Australia	Oceanlinx	25m x 35m	4	1:1	500 kW
E.E.U.U.	OPT	20m x 7m	3	1:1.5	40 kW
Reino Unido	Pelamis*	150m x 3m	5	1:1	3 x 250 kW
Australia	CETO	21m x 7m	4	1:1	100 kW
Dinamarca	Wave Dragon	300m x 170m x 17.5m	3	1:4.5	20 x 400 kW
Dinamarca	WavePlane	22m x 22m	4	1:1	100 kW
Dinamarca	WaveStar	10m x 240m	3	1:10	5.5 kW

*No se encuentran en funcionamiento [34].

Nota. Adaptada de “State-of-the-Art Analysis”, por Waveplam. 2009. <https://www.calameo.com/read/0006774700d9f0205b2be> (consultado el 30 de mayo de 2023)

Es importante resaltar que, en la actualidad, no se dispone de una tecnología consolidada para la captación de energía de las olas, también conocida como energía undimotriz. Esto se debe a que el diseño y rentabilidad económica de cada dispositivo depende de las condiciones específicas del lugar de instalación [35].

El nivel de rendimiento de una tecnología (TPL) establece el grado de funcionamiento en términos de su capacidad económica, a diferencia del TRL que mide la madurez tecnológica en función de su capacidad para ser comercializada [33]. La escala TPL se clasifica en nueve niveles, como se ilustra en Figura 1.2. Para identificar el estado general de TPL de una tecnología de energía de olas (definido por Fitzgerald [36]), se aplica un método de puntuación mínima. Este enfoque ayuda a evaluar el desempeño tecno-económico de la tecnología undimotriz y proporciona una medida combinada del gasto de capital, el gasto operativo del ciclo de vida, la eficiencia de conversión de energía y la disponibilidad de la tecnología [33]. Los TPL también consideran aspectos de desempeño menos cuantificables, como la aceptabilidad y la seguridad [33].

Figura 1.2.

Niveles de rendimiento tecnológico (TPL)



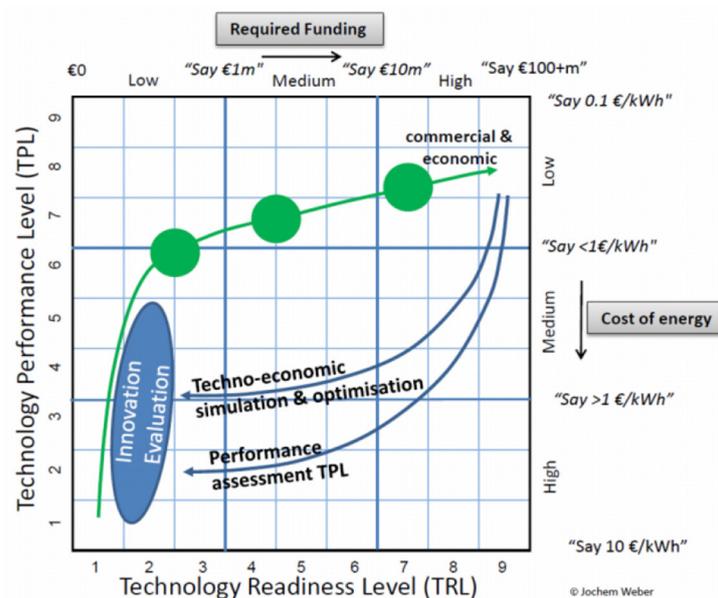
Nota. Adaptado de “WEC Technology Readiness and Performance Matrix – finding the best research technology development trajectory”, por J. Weber, 2012, p. 3.

La matriz TPL vs TRL presentada en la Figura 1.3 ilustra las herramientas necesarias para mejorar la trayectoria de desarrollo realista de la tecnología WEC propuesta por J. Weber. La trayectoria de desarrollo (representada por la curva verde) prioriza el aumento del rendimiento de la tecnología antes que el aumento de la preparación tecnológica. En otras palabras, antes de que se lleven a cabo costosas demostraciones de prototipos WEC, se identifica la configuración del sistema con el TPL más alto en un TRL alto. Esto se lleva a cabo para garantizar el mejor nivel de rendimiento posible antes de invertir en actividades costosas y riesgosas [33].

Por otro lado, las herramientas y los métodos clave necesarios para implementar un proceso de desarrollo mejorado para dispositivos WEC (representada por las curvas color azul), incluyen herramientas para evaluar el rendimiento de la tecnología y una métrica de cuantificación. Además, se identifican como importantes las herramientas integradas de simulación y optimización de sistemas tecno económicos, el desarrollo de tecnología inter conceptual y las técnicas de innovación [33].

Figura 1.3.

Matriz de valor tecnológico de WECs



Nota. La escala TRL está relacionada con el financiamiento necesario para el desarrollo, mientras que la TPL está inversamente relacionada con el costo de rendimiento energético logrado por la tecnología. Adaptado de “WEC Technology Readiness and Performance Matrix – finding the best research technology development trajectory”, por J. Weber, 2012, p. 8.

1.4.2 Pruebas experimentales requeridas para el desarrollo tecnológico de los WEC

La ITTC, en la publicación “Wave Energy Converter Model Test Experiments (7.5-02-07-03.7), brinda una guía de procedimientos recomendados para validar los dispositivos WEC. La guía resalta las diferentes instalaciones que se pueden utilizar en varias etapas del proceso de diseño, tal como se indica en la Tabla 1.1. Además, señala la importancia de la

escala del prototipo, ya que esta afecta la precisión y relevancia de los resultados de la prueba. Si la escala es demasiado pequeña, es posible que el modelo no represente con precisión el comportamiento del dispositivo a escala completa, mientras que, si la escala es demasiado grande, la prueba puede resultar poco práctica y muy costosa [8]. Por ello, la longitud del prototipo no debe ser superior a la profundidad del agua o a la mitad del ancho del tanque de pruebas y el área de la sección transversal del modelo no debe ser superior al 5% del área transversal del tanque de pruebas [16]. Los parámetros de los casos de pruebas se detallan en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3.

Parámetros en los casos de prueba de dispositivos WEC

Casos de Prueba	Altura de la ola [m]	Periodo de la ola [s]	Escala	Etapas	Componentes
Concepto	0.5-5 *	5-15 *	1:50-100	1	-
Calibración y validación del modelo numérico	0.5-6 * 1-5 **	6-12 * **	1:10-50	1-2	Dirección de la ola, simulador toma de fuerza
Optimización del rendimiento de captura de energía	1-5 **	6-12 **	1:10-25	2	Dirección de la ola, simulador toma de fuerza
Supervivencia	Olas Irregulares en condición extrema del mar local		1:10-100	1-2	Sistemas de casco, amarre y toma de fuerza
Validación de metodologías de	Olas Irregulares en condición operativas		1:10-25	2	Sistema de amarre, anclaje y toma de fuerza, metodologías

Casos de Prueba	Altura de la ola [m]	Periodo de la ola [s]	Escala	Etapas	Componentes
instalación y remolque					de instalación y remolque
Validación de producción de energía	Olas Irregulares en condición extrema del mar local		1:10:25	2	Simulador toma de fuerza de alta calidad
Ensayos de estado límite de fatiga	0.5 – 5 *	5 – 15 *	-	1-5	Opcional
Arreglos de WEC	Olas Irregulares en condición extrema del mar local		-	1-5	Opcional (pueden ser evaluado en modelos numéricos)

*Olas regulares.

** Olas irregulares.

Nota. Adaptada de “Analysis Procedure for Model Tests in Regular Waves”, por la ITTC, 2002.

1.4.3 Descripción estadística de los estados de mar

La naturaleza aleatoria de las olas puede ser aproximada mediante la función de densidad probabilística de Rayleigh (ver Figura 1.4), esto asumiendo que el proceso es estacionario y ergódico, ya que permite definir los parámetros estadísticos principales [37]. Un proceso estacionario se refiere al proceso en donde las propiedades estadísticas no cambian con el tiempo. Por otro lado, un proceso ergódico implica que una sola trayectoria del proceso dará una buena aproximación de las propiedades estadísticas del proceso en su conjunto. Y a partir de ellos, se puede determinar la función de la densidad espectral de la ola empleando la ecuación de Pierson-Moskowitz o Bretschneider (cuyo espectro se ve representado en la Figura 1.5) que dependen de las características del estado de mar descritas en la Figura 1.6 [16], [37].

$$S^+(\omega)_{\text{Pierson-Moskowitz}} = \frac{8.1 \times 10^{-3}}{\omega^5} g^2 e^{-0.74 \frac{g}{V\omega}} \quad (1.1)$$

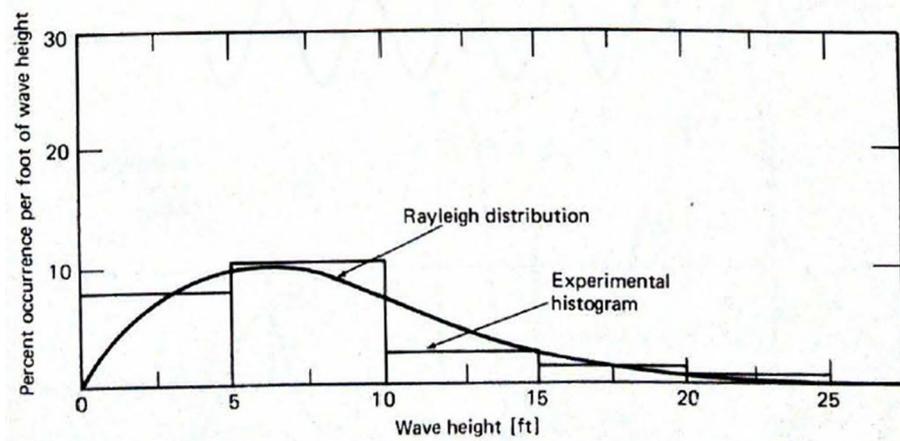
$$S^+(\omega)_{\text{Bretschneider}} = \frac{172.75 H_s^2}{\tau^4} e^{-\frac{691}{\tau^4} \omega^4} \quad (1.2)$$

Tal que:

- g : aceleración gravitacional
- ω : frecuencia
- H_s : altura significativa de la ola
- τ : periodo promedio de cruce hacia positivo [38].

Figura 1.4.

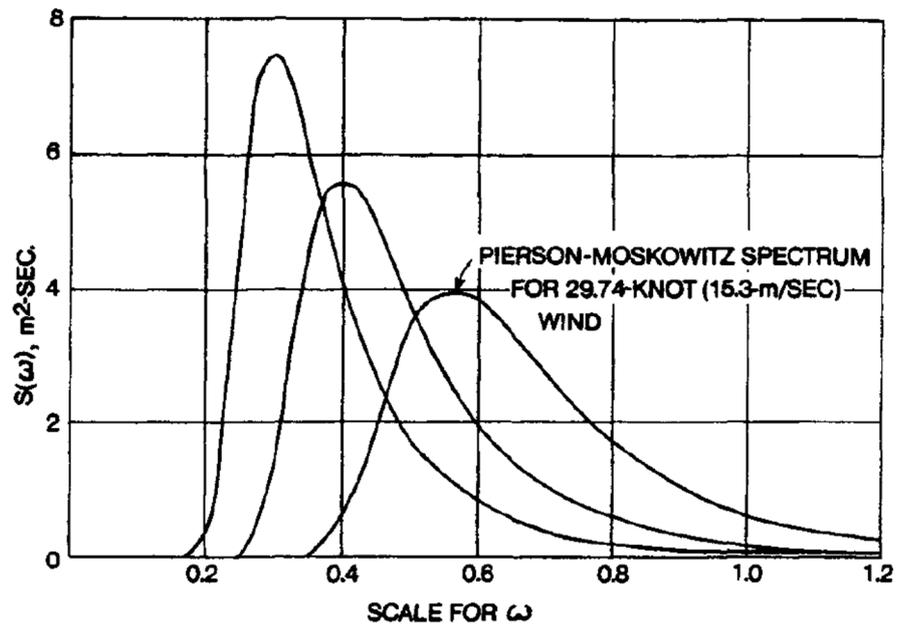
Histograma y distribución teórica de Rayleigh



Nota. Adaptado de “Dynamics of Marine Vehicles”, por Bhattacharyya R., 1978, p. 109.

Figura 1.5.

Varios espectros de Bretschneider para olas con altura significativa de 5 metros



Nota. La ITTC en 1998 recomendó el uso de la forma de espectro de Bretschneider para condiciones de ola promedio. Adaptado de "Principles of naval architecture. Volume II, Resistance, propulsion and vibration", por Lewis E., 1998, p. 36.

Figura 1.6.

Condición de estados de mar 0 - 6

Sea—General		Wind				Sea								
Sea State	Description	(Beaufort) Wind force	Description	Range (knots)	Wind Velocity (knots)	Wave Height			Significant Range Periods [sec]	Periods of maximum Energy of Spectra $T_{max} = T_r$	Average Period \bar{T}_r	Average Wave-length \bar{L}_w [ft unless otherwise indicated]	Minimum Fetch (nautical miles)	Minimum Duration [hr unless otherwise indicated]
						Average	Significant	Average of One-Tenth Highest						
	Sea like a mirror	U	Calm	1	0	0	0	0	—	—	—	—	—	—
0	Ripples with the appearance of scales are formed, but without foam crests.	1	Light airs	1–3	2	0.04	0.01	0.09	1.2	0.75	0.5	10 in	5	18 min
1	Small wavelets; short but pronounced crests have a glossy appearance, but do not break.	2	Light breeze	4–6	5	0.3	0.5	0.6	0.4–2.8	1.9	1.3	6.7 ft	8	39 min
	0.8					1.3	1.6	0.8–5.0	3.2	2.3	20	9.8	1.7	
	Large wavelets; crests begin to break. Foam of glossy appearance. Perhaps scattered with horses.	3	Gentle breeze	7–10	8.5	1.1	1.8	2.3	1.0–6.0	3.2	2.7	27	10	2.4
						1.6	2.6	3.3	1.0–7.0	4.5	3.2	40	18	3.8
2	Small waves, becoming larger; fairly frequent white horses.	4	Moderate breeze	11–16	12	2.1	3.3	4.2	1.4–7.6	5.1	3.6	52	24	4.8
14						2.3	3.6	4.6	1.5–7.8	5.3	3.8	59	28	5.2
3					16	2.9	4.7	6.0	2.0–8.8	6.0	4.3	71	40	6.6
4	Moderate waves, taking a more pronounced long form; many white horses are formed (chance of some spray).	5	Fresh breeze	17–21	18	3.7	5.9	7.5	2.5–10.0	6.8	4.8	90	55	8.3
						19	4.1	6.6	8.4	2.8–10.6	7.2	5.1	99	65
					20	4.6	7.3	9.3	3.0–11.1	7.5	5.4	111	75	10
5	Large waves begin to form; white crests are more extensive everywhere (probably some spray).	6	Strong breeze	22–27	22	5.5	8.8	11.2	3.4–12.2	8.3	5.9	134	100	12
						24	6.6	10.5	13.3	3.7–13.5	9.0	6.4	160	130
					24.5	6.8	10.9	13.8	3.8–13.6	9.2	6.6	164	140	15
6					26	7.7	12.3	15.6	4.0–14.5	9.8	7.0	188	180	17

Nota. Tomada de “Dynamics of Marine Vehicles”, por Rameswar Bhattacharyya, 1978, p. 104.

1.4.4 Características de oleaje de la zona factible para la instalación de WECs en las Islas Galápagos

En estudios preliminares se ha determinado la zona en la que se prevé la instalación de una matriz de dispositivos WEC, para ello, se ha considerado la ruta de las embarcaciones, batimetría, geotecnia y hábitat animal [25]. Finalmente, la caracterización del mar es la siguiente:

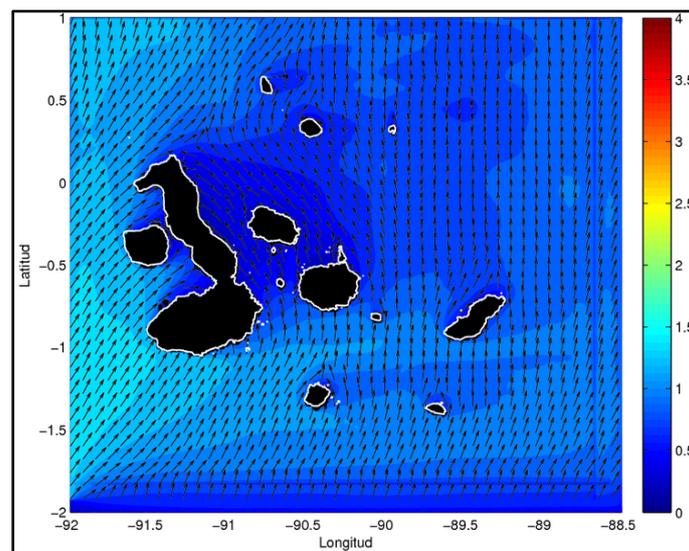
- Altura significativa de la ola: 0.75 - 2 metros
- Periodo de la ola: 12 - 15 segundos
- Porcentaje de ocurrencia: 14%

Por otra parte, de acuerdo con el último informe dado por INOCAR del 18 hasta el 19 de septiembre de 2023, donde describe las condiciones de oleaje de la zona “borde costero

insular” (ver Figura 1.7), la altura media de la ola es de 0.5 a 1.70 m con un periodo de ola de 13 a 16 [39]. Por último, cabe destacar que el potencial energético promedio del mar ecuatorial es de 14 KW/m y el valor máximo se encuentra al sur de las Islas Galápagos. La variación de este potencial se puede apreciar en la Figura 1.8,

Figura 1.7.

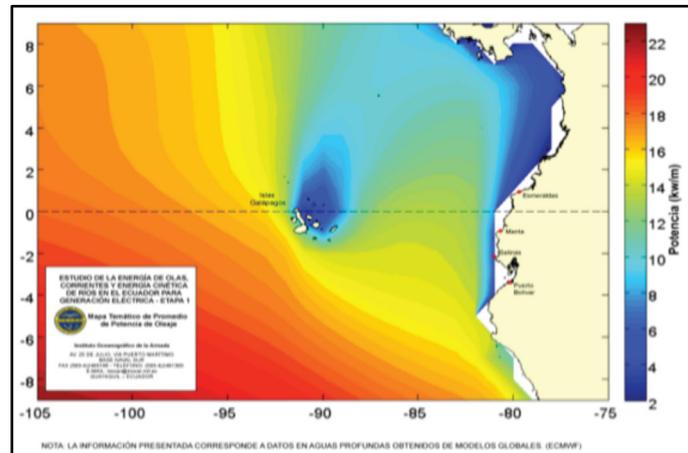
Características principales del oleaje de las Islas Galápagos



Nota. La grafica presenta la altura significativa del oleaje (metros) y dirección. Tomadas de “Sistema de Observación y Alerta Temprana, Modelo Operacional SWAN - Sistema de Boyas Virtuales”, por SAT & INOCAR, 19 de septiembre de 2023.

Figura 1.8.

Potencial energético del área de estudio marino



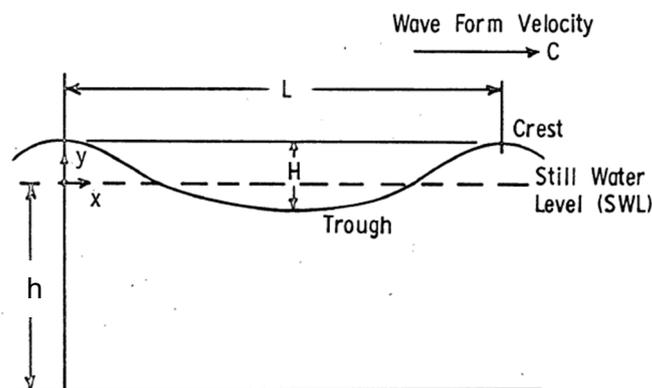
Nota. Tomada de “Estudio de la energía de las olas, corrientes y energía cinética de ríos en el Ecuador”, por Instituto Nacional de Preinversión (INP), 2013.

1.4.5 Características físicas de las olas gravitacionales

Las ondas gravitacionales se caracterizan por diversos parámetros, entre los cuales se encuentran la longitud de onda (L), la altura (H), y la velocidad de propagación de la onda, también conocida como celeridad. Estos parámetros se ilustran gráficamente en la Figura 1.9.

Figura 1.9.

Perfil de ola sinusoidal

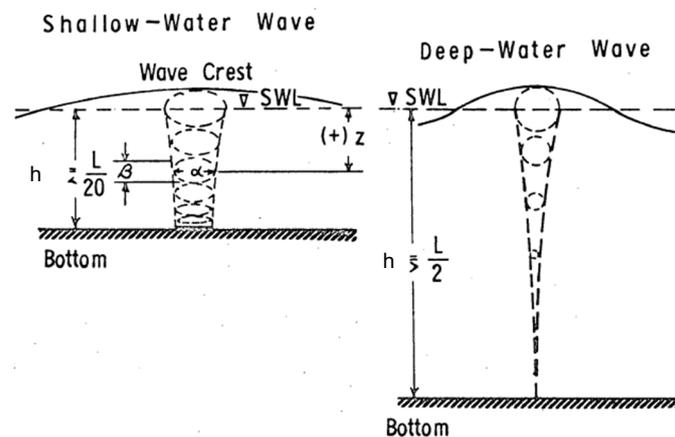


Nota. Tomada de “Theory and design of a wave generator for a short flume”, por Eric Reginald Chapell, 1969, p. 25.

La relación entre la longitud de ola y la profundidad del agua en la que se propaga (L/h) permite distinguir las olas en aguas poco profundas ($L/h < 20$) con las olas en aguas profundas ($L/h > 2$), tal como se ilustra en la Figura 1.10. Además, se puede apreciar el movimiento circular de las partículas del agua, cuyo diámetro se reduce a medida que aumenta la profundidad, si el fondo se encuentra cerca de la superficie del agua, con relación a la longitud de ola, el movimiento de las partículas de agua se ve afectado por el movimiento vertical de dichas partículas [23].

Figura 1.10.

Movimiento de partículas ondulatorias en aguas profundas y poco profundas



Nota. Tomada de “Theory and design of a wave generator for a short flume”, por Eric Reginal Chapell, 1969, p. 25.

Por otro lado, la velocidad o celeridad de una ola considera la gravedad y la tensión superficial del agua [40], la ecuación se define a continuación:

$$C = \sqrt{\left(\frac{gL}{2\pi} + \frac{2\pi\sigma}{\rho L}\right) \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)} \quad (1.3)$$

Tal que:

- g : aceleración gravitacional
- σ : relación de dispersión
- h : profundidad del agua

- ρ : densidad del fluido

Puesto que, en las gravitacionales se desprecian los efectos de la tensión superficial del agua [40], [41], la ecuación se reduce a:

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)} \quad (1.4)$$

La cual puede ser aplicada para olas de “transición” donde el radio (L/h) se encuentra entre 2 y 20. Por otro lado, la ecuación de la celeridad en “aguas profundas” con radios (L/h) menores a 2 es:

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}} \quad (1.5)$$

Donde la relación $2\pi/L$ se define como el *número de ola* (k), el cual junto con el parámetro de frecuencia obtenemos la *relación de dispersión* (σ) [42]. Tal que:

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh); \begin{cases} \text{aguas profundas, } \tanh(kh) \approx 1 \\ \text{aguas poco profundas, } \tanh(kh) \approx kh \end{cases} \quad (1.6)$$

Entonces, la ecuación de celeridad para aguas profundas se reescribe de la siguiente manera:

$$C = \sqrt{\frac{g}{k}} \quad (1.7)$$

Por otro lado, la celeridad en aguas “poco profundas” donde el radio (L/h) es mayor a 20, la ecuación se reduce a:

$$C = \sqrt{gh} \quad (1.8)$$

Finalmente, la relación de la longitud, periodo y celeridad de una ola se define por la siguiente ecuación:

$$L = CT \quad (1.9)$$

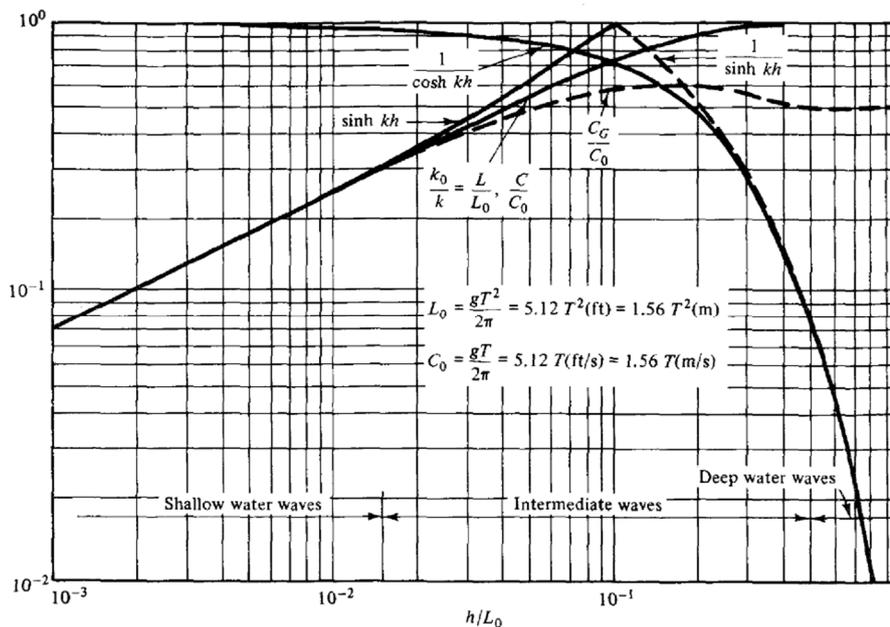
Además, el perfil de ola sinusoidal viene dado por la siguiente ecuación:

$$y = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{L}(x - ct)\right) \quad (1.10)$$

Finalmente, como se puede apreciar en la Figura 1.11, la celeridad aumenta conforme disminuye la longitud de la ola.

Figura 1.11.

Variación de varios parámetros de ola en función del radio entre la profundidad del agua y longitud de la ola



Nota. Tomada de "Water wave mechanics for engineers and scientists", por R. G. Dean, R. A Dalrymple, 1991, p. 60.

1.4.6 Escala de Froude

En este proyecto, se hace necesario abordar la escala de Froude, considerando las limitaciones en las dimensiones del tanque en el que se llevará a cabo la instalación del generador de olas. Las principales cantidades de interés en este contexto son la altura, longitud y periodo de las olas. Por tanto, si las características del tipo de ola que se quiere producir no coinciden con las olas generadas, se deberá aplicar la escala descrita en la Tabla 1.4. Como podemos apreciar, la altura y longitud de ola no son escalables, a diferencia del periodo de ola.

Tabla 1.4.

Escala de Froude

Parámetro	Escala
Altura y longitud de la ola	S
Periodo de la ola	$S^{0.5}$

* S es la escala geométrica.

Nota. Tomada de “Guidance for the experimental tank testing of wave energy converters”, por Payne, G., 2008, p. 7.

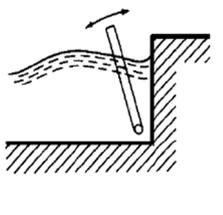
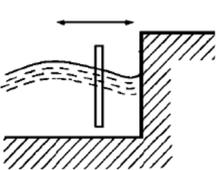
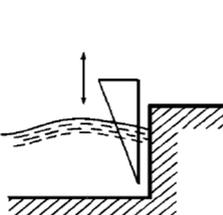
1.4.7 Generador de olas

Un generador de olas induce movimiento ondulatorio de las partículas del agua, lo que permite simular las condiciones del océano en un entorno controlado. Además, su requisito de potencia puede ser determinado a partir de la teoría de olas lineales [43].

Existe una amplia variedad de generadores de olas que se clasifican en: pared móvil, cuña y neumáticos (Tabla 1.5). Entre estos, los generadores de olas de pared móvil son los más comunes. Los generadores de olas tipo flap son ideales para aguas profundas debido a su baja inercia, mientras que los de tipo pistón son más adecuados para aguas poco profundas. Por su parte, los generadores de olas tipo cuña son eficaces para generar olas de alta frecuencia, por último, los generadores de olas tipo neumático son apropiados para frecuencias inferiores a 1 Hz [44].

Tabla 1.5

Clasificación de generadores de olas

	Tipo de Generador de Olas	Diagrama
Pared móvil	<p>Tipo placa basculante (“Flap”): la placa está articulada al fondo del tanque y rota al ser accionada por un actuador.</p>	
	<p>Tipo pistón: se caracterizan por el movimiento horizontal de toda la pared.</p>	
	<p>Tipo cuña (“Plunger”): se caracteriza por el movimiento oscilatorio vertical de la cuña y su alta inercia.</p>	
	<p>Tipo neumático: la ola se genera por a variación de la presión de aire dentro de la cámara parcialmente sumergida.</p>	 <p>Variação da pressão do ar</p>

Nota. Adaptado de “Projeto, Implantação e análise de um gerador de ondas”, por Carlos Freire de Souza, Helio Morishita, 2010, p. 2.

Capítulo 2

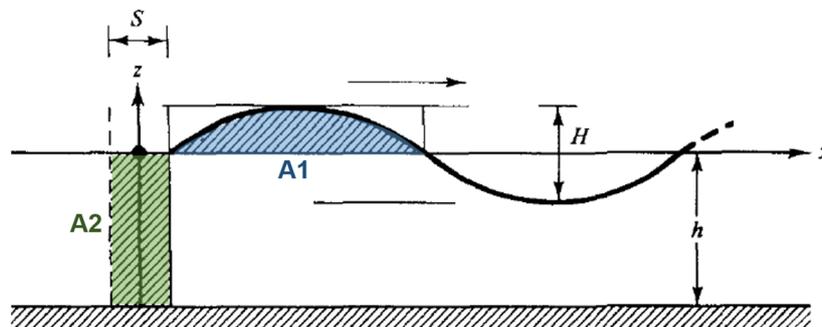
2. Metodología

2.1 Teoría del generador de olas

La teoría de generación de olas se fundamenta en el estudio de ecuaciones de ondas no lineales, que plantean el desafío del problema de valor límite no lineal. La resolución de estas ecuaciones se lleva a cabo mediante el uso de series de expansión. En este contexto, la teoría de primer orden se destaca al transformar el problema de valor límite no lineal en un problema homogéneo [45]. Además, se basa de la función de transferencia para los generadores de olas tipo flap y tipo pistón. Esta función de transferencia establece una relación directa entre la altura de la ola y la distancia recorrida por la pared móvil (carrera), tal como se ilustra en la Figura 2.1. Esto es debido a que el volumen de agua desplazado por el movimiento de la pared móvil equivale al volumen de agua que genera la formación de la ola, es decir, A_1 es igual a A_2 [43], [46].

Figura 2.1.

Representación de la función de transferencia en un generador de olas tipo pistón



Nota. Tomada de “Water wave mechanics for engineers and scientists”, por R. G. Dean, R. A Dalrymple, 1991, p. 171.

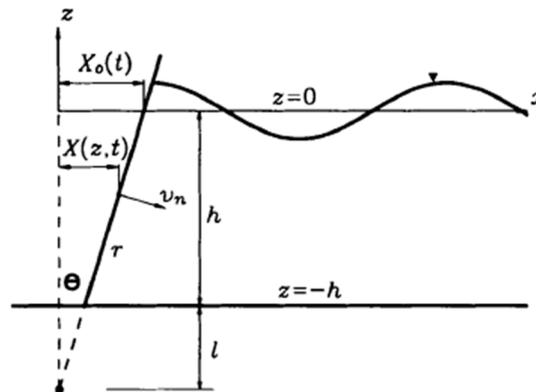
2.1.1 Ecuaciones gobernantes bidimensionales

La Figura 2.2 representa el sistema sobre el cual se llevará a cabo el análisis. Este sistema se caracteriza por ser un canal de olas bidimensional de doble fondo, en el cual, la pared móvil experimenta un movimiento combinado de rotación y traslación. Además, el

sistema de coordenadas es bidimensional, el desplazamiento se realiza en el eje positivo de las ordenadas y la profundidad del agua se encuentra representado por (h) [46].

Figura 2.2.

Bosquejo bidimensional de la definición del canal de onda.



Nota. Tomada de “Physical models and laboratory techniques in coastal engineering”, por Hughes S, 1993, p. 335.

Para formular la teoría lineal de las olas, se asume que el movimiento del fluido es irrotacional e incompresible, es decir, existe un potencial de velocidad definido con el teorema de Stokes que satisface la ecuación de continuidad, lo que da lugar a la ecuación de la Laplace.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \tag{2.1}$$

Las condiciones de contorno apropiadas son las siguientes:

1. Condición de límite inferior para fondo horizontal (z = -h):

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \tag{2.2}$$

2. Condición cinemática de superficie libre (z = 0):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + g \frac{\partial \phi \partial \eta}{\partial x \partial x} - \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \tag{2.3}$$

3. Condición dinámica de superficie libre (z = 0):

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] + g \eta = 0 \tag{2.4}$$

4. Condición de contorno de la pared móvil ($x = 0$):

Se asume que la pared móvil es plana, solida e impermeable, tal que:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \left(1 + \frac{z}{h+l}\right) \frac{\partial X_o(t)}{\partial t}, \begin{cases} \text{generador de olas tipo flap} , l = 0 \\ \text{generador de olas tipo pistón}, l = \alpha \end{cases} \quad (2.5)$$

Utilizando técnicas de perturbación estándar tenemos como resultado un conjunto de ecuaciones de primer orden (las variables son representadas por el subíndice "1") con suposiciones sobre el potencial de velocidad, la superficie libre, el ángulo de onda y la posición horizontal de la pared móvil [46]. Los cuales, se resumen a continuación:

1. Ecuación de la Laplace (en el dominio del fluido):

$$\frac{\partial^2 \phi_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_1}{\partial z^2} = 0 \quad (2.6)$$

2. Condición de límite inferior para fondo horizontal ($z = -h$):

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial z} = 0 \quad (2.7)$$

3. Condición cinemática y dinámica de superficie libre ($z = 0$):

$$\frac{\partial^2 \phi_1}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi_1}{\partial z} = 0 \quad (2.8)$$

4. Condición de contorno de la pared móvil ($x = 0$):

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial x} = f(z) \frac{\partial X_{o1}}{\partial t} \quad (2.9)$$

$$f(z) = \left(1 + \frac{z}{h+l}\right), \begin{cases} \text{generador de olas tipo flap} , l = 0 \\ \text{generador de olas tipo pistón}, l = \alpha \end{cases} \quad (2.10)$$

2.1.2 Teoría de generador de olas de primer orden

El problema del generador de olas de primer orden se especifica con las ecuaciones mencionadas en el apartado anterior. Las cuales, se obtienen suponiendo que el potencial de velocidad es representado por la siguiente ecuación:

$$\phi_1(x, z, t) = X(x)Y(y)T(t) \quad (2.11)$$

Bajo dicha suposición es posible dividir la ecuación de Laplace en ecuaciones diferenciables ordinarias que puedan resolverse utilizando soluciones conocidas. Tal que, la

función potencial analizada incluye todas las posibles soluciones que dependen del valor de la constante de separación (k_n) [46].

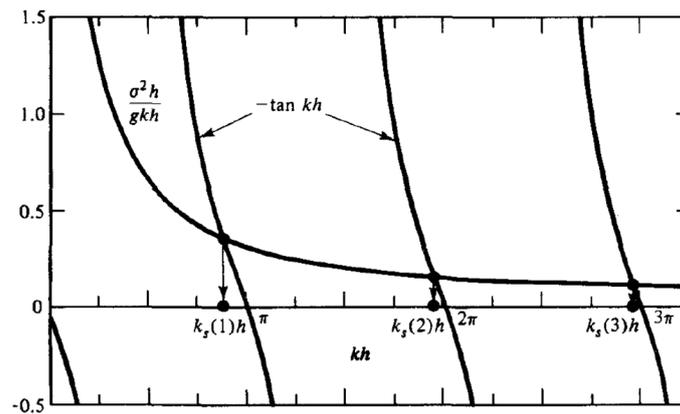
$$\phi_1(x, z, t) = \phi_{k_1} + \phi_{k_2} + \phi_{k_3} \quad (2.12)$$

Además, si ϕ_{k_1} , ϕ_{k_2} y ϕ_{k_3} son reemplazados en las condiciones de contorno, obtenemos que, ϕ_{k_1} es la suma de dos olas consecutivas que se propagan en direcciones opuestas. Por otra parte, ϕ_{k_2} es el componente de la velocidad horizontal, el cual es constante y debido a que es perpendicular a la dirección de propagación de la ola, ϕ_{k_2} es despreciable. Por último, para una relación de dispersión específica, se identifica una solución única para la variable k_1 mientras que existen infinitas soluciones para la variable k_3 . En este sentido, es esencial sumar al menos las tres primeras soluciones para k_3 , las cuales se ven representadas gráficamente como puntos de intersección en la Figura 2.3.

$$\sigma^2 = gk_1 \tanh(k_1 h) = -gk_3 \tan(k_3 h) \quad (2.13)$$

Figura 2.3.

Grafica de la ecuación implícita de la relación de dispersión para los modos de ola estacionaria



Nota. Tomada de "Water wave mechanics for engineers and scientists", por R. G. Dean, R. A Dalrymple, 1991, p. 175.

Por tanto, el potencial de velocidad combinado se reescribe de la siguiente manera:

$$\phi_1(x, z, t) = A \cosh[k_1(h+z)] \sin(k_1 x - \sigma t) + \cos(\sigma t) \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-k_{3n} x} \cos[k_{3n}(z+h)] \quad (2.14)$$

Para determinar las constantes A y C_n sustituimos la condición de contorno de la pared móvil en ϕ_1 y evaluamos en x=0 bajo la suposición de que la pared móvil tiene el siguiente movimiento sinusoidal:

$$X_{01} = \frac{S}{2} \sin(\sigma t) \quad (2.15)$$

Tal que S, es la carrera de la pared móvil cuando Z=0.

Sustituyendo las expresiones, obtenemos lo siguiente:

$$A = \frac{\sigma S}{2k_1} \frac{\int_{-h}^0 f(z) \cosh[k_1(h+z)] dz}{\int_{-h}^0 f(z) \cosh^2[k_1(h+z)] dz} \quad (2.16)$$

$$C_n = \frac{\sigma S}{2k_{3n}} \frac{\int_{-h}^0 f(z) \cosh[k_{3n}(h+z)] dz}{\int_{-h}^0 f(z) \cosh^2[k_{3n}(h+z)] dz} \quad (2.17)$$

Finalmente, la elevación de la superficie del agua en el tanque de olas es descrita por la solución de onda progresiva y en términos de la altura de la ola, obteniendo como resultado la función de transferencia:

$$H = \frac{2\sigma A}{g} \cosh(k_1 h) \quad (2.18)$$

2.1.3 Generador de olas tipo flap y tipo pistón

La teoría para generadores de olas fue propuesta por Galvin (1964), donde indica que el volumen de la cresta de la ola es igual al volumen desplazado durante una carrera completa, siendo la carrera (S) constante respecto a una profundidad determinada (h) [43].

Resolviendo la ecuación 2.10, los coeficientes A y C_n, se reescriben de la siguiente manera:

$$A = \frac{2\sigma S}{k(\sinh 2kh + 2kh)} \left[\sinh kh + \frac{1 - \cosh kh}{k(h+l)} \right] \quad (2.19)$$

$$C_n = - \frac{2\sigma S}{k_n(\sin 2k_n h + 2k_n h)} \left[\sin kh + \frac{\cos k_n h - 1}{k_n(h+l)} \right] \quad (2.20)$$

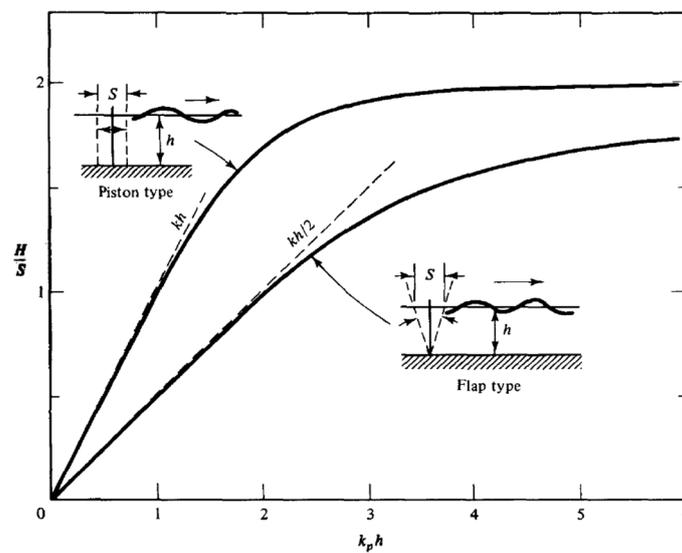
Finalmente, sustituyendo la ecuación 2.19 en 2.18 y empleando la relación de dispersión descrita en la ecuación 2.13 (el algoritmo para determinar las raíces se encuentra en el Apéndice A), tenemos:

$$\frac{H}{S} = \frac{4 \sinh kh}{\sinh 2kh + 2kh} \left[\sinh kh + \frac{1 - \cosh kh}{k(h+l)} \right], \begin{cases} \text{generador de olas tipo flap, } l = 0 \\ \text{generador de olas tipo pistón, } l = \alpha \end{cases} \quad (2.21)$$

La ecuación 2.21 simplificada se representa en la Figura 2.4.

Figura 2.4.

Relación de la altura de la ola y carrera de generadores de ola tipo flap y tipo pistón



Nota. Tomada de "Water wave mechanics for engineers and scientists", por R. G. Dean, R. A Dalrymple, 1991, p. 172.

2.1.4 Presión, fuerza y potencia de la pared móvil del generador de olas

Bajo la suposición de que hay agua en un solo lado de la pared móvil o en ambos lados, podemos obtener las siguientes expresiones de primer orden para la distribución de presión, fuerza y potencia que actúa por unidad de ancho de la pared móvil, como se detalla en Tabla 2.1 & Tabla 2.2 [46].

Tabla 2.1

Presión, fuerza y potencia de la pared móvil del generador de olas tipo flap

Descripción	Formula	Agua en un solo lado de la pared móvil	Agua en ambos lados de la pared móvil
Presión	$p(x, z, t) = -\rho \frac{\delta \phi_1}{\delta t} - \rho g z \quad (2.22)$	$p_o(z, t) = [\rho \sigma A \cosh k(h+z)] \cos \sigma t + [\rho \sigma \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos k_n(h+z)] \sin \sigma t - \rho g z \quad (2.23)$	$p_{oo}(z, t) = 2[\rho \sigma A \cosh k(h+z)] \cos \sigma t + 2[\rho \sigma \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos k_n(h+z)] \sin \sigma t \quad (2.24)$
Fuerza	$F_{T_o}(t) = \int_{-h}^0 p_o(z, t) dz \quad (2.25)$	$F_{T_o}(t) = \left(\frac{\rho \sigma A \sinh kh}{k} \right) \cos \sigma t + \left(\rho \sigma \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{k_n} \sin k_n h \right) \sin \sigma t - \frac{\rho g h^2}{2} \quad (2.26)$	$F_{T_{oo}}(t) = 2 \left(\frac{\rho \sigma A \sinh kh}{k} \right) \cos \sigma t + 2 \left(\rho \sigma \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{k_n} \sin k_n h \right) \sin \sigma t \quad (2.27)$
Fuerza total máxima	$F_{T_o}(t) = F_R \cos \sigma t + F_I \sin \sigma - \frac{\rho g h^2}{2} \quad (2.28)$	$F_{T_o(\max)} = \sqrt{F_R^2 + F_I^2} - \frac{\rho g h^2}{2} \quad (2.29)$	$F_{T_{oo}(\max)} = 2 \sqrt{F_R^2 + F_I^2} \quad (2.30)$

Descripción	Formula	Agua en un solo lado de la pared móvil	Agua en ambos lados de la pared móvil
Potencia	$P_o(t) = \int_{-h}^0 p_o(z,t) u_o(z,t) dz$ (2.31)	$P_o(t) = \left(\frac{\rho\sigma^2 SA}{2k}\right) \left[\sinh kh + \frac{1-\cosh kh}{kh} \right] \cos^2 \sigma t +$	$P_{oo}(t) = 2 \left(\frac{\rho\sigma^2 SA}{2k}\right) \left[\sinh kh + \frac{1-\cosh kh}{kh} \right] \cos^2 \sigma t +$
		$\left(\frac{\rho\sigma^2 S}{2}\right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{k_n} \left[\sin kh + \frac{\cos k_n h - 1}{k_n h} \right] \sin \sigma t \cos \sigma t +$ $\left(\frac{\rho g \sigma S}{2}\right) \left[\frac{h^2}{2} - \frac{h^3}{3h} \right] \cos \sigma t$ (2.32)	$2 \left(\frac{\rho\sigma^2 S}{2}\right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{k_n} \left[\sin kh + \frac{\cos k_n h - 1}{k_n h} \right] \sin \sigma t \cos \sigma t$ (2.33)
Potencia total máxima	$P_o(t) = P_R \cos^2 \sigma t$ $+ P_I \sin \sigma t \cos \sigma t$ $+ P_S \cos \sigma t$ (2.34)		$P_{oo(\max)} = P_R + \sqrt{P_R^2 + P_I^2}$ (2.35)

Nota. Adaptado de "Physical models and laboratory techniques in coastal engineering", por Steven Hughes, 1993, p. 343-350.

Tabla 2.2

Presión, fuerza y potencia de la pared móvil del generador de olas tipo pistón

Descripción	Formula	Agua en un solo lado de la pared móvil	Agua en ambos lados de la pared móvil
Presión	$p(x, z, t) = -\rho \frac{\delta\phi_1}{\delta t} - \rho g z$ <p style="text-align: right;">(2.36)</p>	$p_o(z, t) = [\rho\sigma A \cosh k(h+z)] \cos \sigma t +$ $[\rho\sigma \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos k_n(h+z)] \sin \sigma t - \rho g z$ <p style="text-align: right;">(2.37)</p>	$p_{oo}(z, t) = 2[\rho\sigma A \cosh k(h+z)] \cos \sigma t +$ $2[\rho\sigma \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos k_n(h+z)] \sin \sigma t$ <p style="text-align: right;">(2.38)</p>
Fuerza	$F_{T_o}(t) = \int_{-h}^0 p_o(z, t) dz$ <p style="text-align: right;">(2.39)</p>	$F_{T_o}(t) = \left(\frac{\rho\sigma A \sinh kh}{k} \right) \cos \sigma t +$ $\left(\rho\sigma \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{k_n} \sin k_n h \right) \sin \sigma t - \frac{\rho g h^2}{2}$ <p style="text-align: right;">(2.40)</p>	$F_{T_{oo}}(t) = 2 \left(\frac{\rho\sigma A \sinh kh}{k} \right) \cos \sigma t +$ $2 \left(\rho\sigma \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{k_n} \sin k_n h \right) \sin \sigma t$ <p style="text-align: right;">(2.41)</p>
Fuerza total máxima	$F_{T_o}(t) = F_R \cos \sigma t$ $+ F_I \sin \sigma$ $- \frac{\rho g h^2}{2}$ <p style="text-align: right;">(2.42)</p>	$F_{T_o(\max)} = \sqrt{F_R^2 + F_I^2} - \frac{\rho g h^2}{2}$ <p style="text-align: right;">(2.43)</p>	$F_{T_{oo}(\max)} = 2\sqrt{F_R^2 + F_I^2}$ <p style="text-align: right;">(2.44)</p>

Descripción	Formula	Agua en un solo lado de la pared móvil	Agua en ambos lados de la pared móvil
	$P_o(t) =$	$P_o(t) = \left(\frac{\rho\sigma^2 SA}{2k}\right) [\sinh kh] \cos^2 \sigma t +$	$P_{oo}(t) = 2 \left(\frac{\rho\sigma^2 SA}{2k}\right) [\sinh kh] \cos^2 \sigma t +$
Potencia	$\int_{-h}^0 p_o(z, t) u_o(z, t) dz$ (2.45)	$\left(\frac{\rho\sigma^2 S}{2}\right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{k_n} [\sin kh] \sin \sigma t \cos \sigma t +$ $\left(\frac{\rho g \sigma S}{2}\right) \left[\frac{h^2}{2}\right] \cos \sigma t$ (2.46)	$2 \left(\frac{\rho\sigma^2 S}{2}\right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{k_n} [\sin kh] \sin \sigma t \cos \sigma t$ (2.47)
Potencia total máxima	$P_o(t) = P_R \cos^2 \sigma t$ $+ P_I \sin \sigma t \cos \sigma t$ $+ P_S \cos \sigma t$ (2.48)		$P_{oo(\max)} = P_R + \sqrt{P_R^2 + P_I^2}$ (2.49)

Nota. Adaptado de "Physical models and laboratory techniques in coastal engineering", por Steven Hughes, 1993, p. 343-350.

2.1.5 Validación experimental

Las ecuaciones presentadas en la sección 2.1 corresponden a la teoría de generadores de olas de primer orden. Con el objetivo de validar estas ecuaciones, se llevan a cabo pruebas experimentales en los tanques de olas existentes en la ESPOL.

2.1.5.1 Generador de olas tipo pistón

El generador de olas tipo pistón se encuentra en las instalaciones del laboratorio “SiMarLab” de la Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar (FIMCM) (ver Figura 2.5), tiene las siguientes características:

- Geometría del tanque: 8.0 m x 0.5 m x 0.6 m
- Geometría de la pared móvil: 0.46 m x 0.6 m x 0.006 m
- Profundidad del agua (h): 0.2 m
- Accionamiento: vibrador VR5800 con una fuerza senoidal de 500 lb pico a pico.

Figura 2.5.

Tanque de olas SiMarLab



Nota. El generador de olas es de tipo pistón, el cual es accionado por el vibrador.

En cuanto a los datos de entrada, se registraron los siguientes valores:

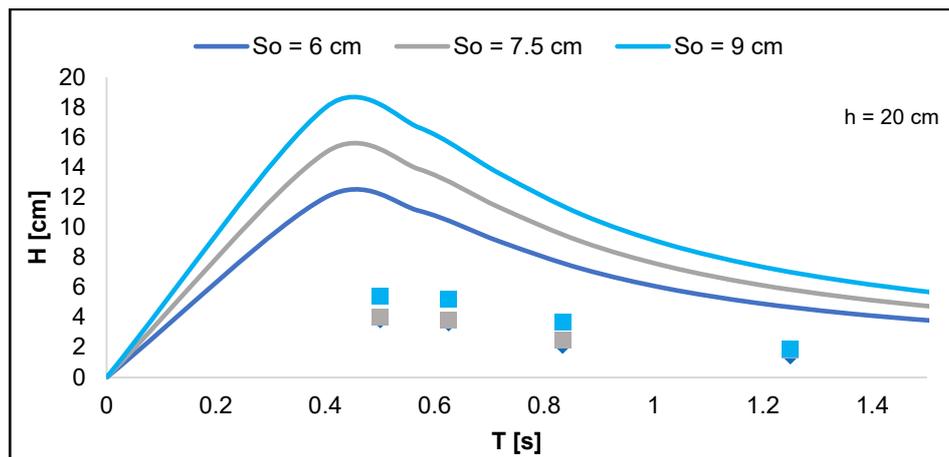
- Periodo de la ola: 2.00 Hz, 1.6 Hz, 1.2 Hz, 0.80 Hz

- Carrera del vibrador que opera el sistema: Inicialmente, se dispuso de 10 mm, 12.5 mm y 15 mm. Mediante el uso de un brazo multiplicador con un factor de ampliación de 6, se obtuvo una carrera efectiva de 6 cm, 7.5 cm y 9 cm.

En la Figura 2.6 se aprecia una notoria disparidad entre los valores teóricos y los resultados experimentales con respecto a la altura de la ola con relación al periodo de la ola. Es importante resaltar que, a pesar de esta discrepancia, la tendencia general sigue siendo coherente. Sin embargo, es fundamental mencionar que esta diferencia se atribuye a la falta de alineación y a la insuficiente lubricación del brazo multiplicador en el generador de olas.

Figura 2.6.

Generador de olas tipo pistón – Altura de la ola VS el periodo de la ola



Nota. Los valores teóricos se representan mediante una curva continua, mientras que los resultados experimentales se muestran como puntos dispersos.

2.1.5.2 Generador de olas tipo flap

El generador de olas tipo flap se encuentra en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) y tiene las siguientes características:

- Geometría del tanque: 9.0 m x 0.45 m x 0.6 m
- Geometría de la pared móvil: 0.29 m x 0.7 m x 0.003 m
- Profundidad del agua: 0.235 m

- Accionamiento: Motor eléctrico de 0.55 kW

Figura 2.7.

Laboratorio de Hidráulica (FIMCP)



Nota. El generador de olas es de tipo flap, el cual es accionado un sistema de biela manivela mediante un motor eléctrico. Tomada de “Laboratorios”, ESPOL, <https://www.fimcm.espol.edu.ec/es/oceanografia/laboratorios>, 2023.

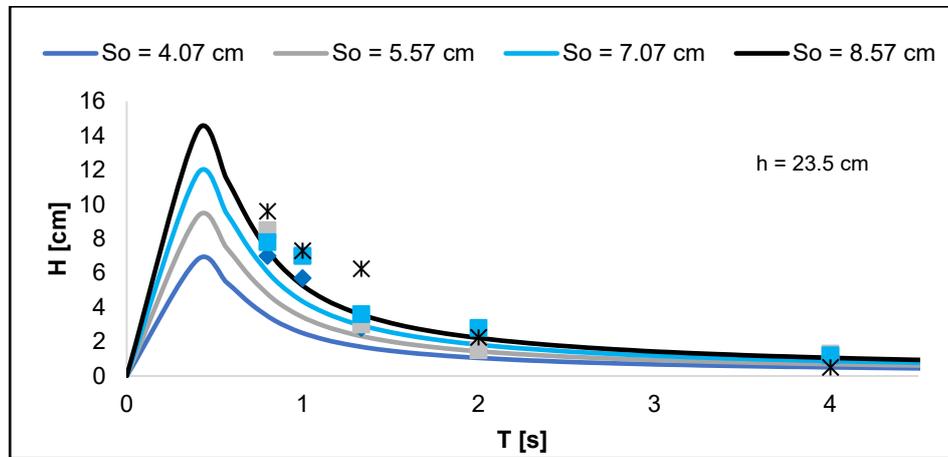
En cuanto a los datos de entrada, se registraron los siguientes valores:

- Periodo de la ola: 1.25 Hz, 1.00 Hz, 0.75 Hz, 0.50 Hz, 0.25 Hz
- Se registraron las siguientes longitudes de carrera de la manivela: 9.5 cm, 13.0 cm, 16.5 cm y 20 cm. Dado que la altura del flap es de 70 cm, las correspondientes alturas al nivel del agua son: 4.07 cm, 5.57 cm, 7.07 cm y 8.57 cm.

En última instancia, en la Figura 2.8 se aprecia una notable aproximación entre los valores teóricos y experimentales. Esto se debe a que el sistema presenta menor rozamiento de las piezas mecánicas, y por ello, la fuerza que actúa sobre el sistema es constante, contrario a lo que sucede con el generador de olas tipo pistón.

Figura 2.8.

Generador de olas tipo flap – Altura de la ola VS el periodo de la ola



Nota. Los valores teóricos se representan mediante una curva continua, mientras que los resultados experimentales se muestran como puntos dispersos.

2.1.6 Factor de seguridad

El factor de seguridad para determinar la fuerza requerida del sistema es un indicador importante que refleja la relación entre la fuerza máxima obtenida teóricamente y la fuerza máxima del sistema. Este factor proporciona información valiosa sobre la robustez y la confiabilidad del sistema.

En la Tabla 2.3, se presentan un resumen de las estimaciones teóricas de la fuerza y potencia para las condiciones de máxima carrera y máximo periodo de ola en los generadores de olas tipo pistón y tipo flap disponibles en la ESPOL. Para ello, se emplearon las ecuaciones descritas en la tabla Tabla 2.1 y Tabla 2.2. La variación de la fuerza y potencia que ejerce el agua sobre el flap se encuentra en el Apéndice B

A pesar de las notables diferencias en los factores de seguridad de ambos sistemas, se opta por seleccionar el valor cercano al factor de seguridad calculado de acuerdo con el tipo de generador de olas que se vaya a diseñar. Esta decisión se toma con el propósito de obtener un enfoque más equilibrado y representativo al considerar ambas tecnologías de generadores de olas.

Tabla 2.3

Fuerza y potencia máxima teórica de los generadores de olas tipo pistón y tipo flap existentes en la ESPOL

Tipo de generador de olas	Pistón	Flap
Profundidad del agua máxima [cm]	40	40
Ancho de la pared móvil [cm]	46.5	29
Periodo máximo [s]	0.4	0.4
Máxima carrera [cm]	15.24	8.57
Fuerza requerida [N]	1395.93	345.81
Potencia requerida [HP]	2.24	0.11
Fuerza limite (vibrador) [N]	2224.11	-
Potencia limite (motor eléctrico) [HP]	-	0.74
Factor de seguridad	2	7

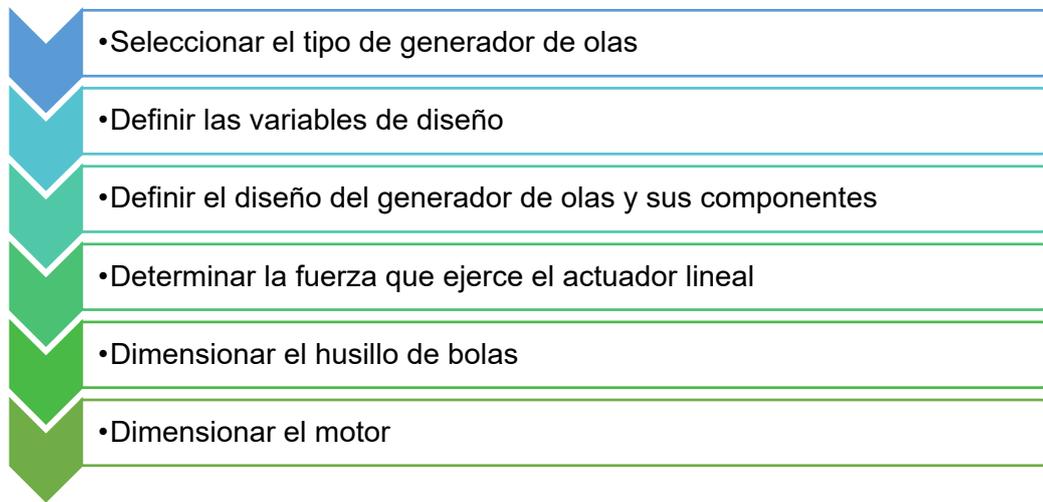
Nota. Los cálculos presentados se basan en las fórmulas y la metodología detalladas en la sección 2.1 del documento.

2.2 Diseño del Generador de Olas

El diseño de un generador implica una serie de pasos, los cuales se encuentran resumidos en la Figura 2.9.

Figura 2.9.

Proceso de Diseño de Generadores de Olas: Pasos Clave



Fuente. Autor

2.2.1 Selección del tipo de generador de olas

La elección del generador de olas multi flap en lugar del tipo pistón se basa en su capacidad para generar una ola equivalente con una menor demanda de potencia, así como en su diseño constructivo más sencillo y compacto.

2.2.2 Variables de diseño

Para determinar las variables de diseño del generador de olas, es fundamental tener en cuenta las siguientes consideraciones:

1. La longitud de ola máxima (L_{\max}) debe ser, como mínimo, igual a la mitad de la longitud del tanque (L_{tanque}) [46]
2. La altura máxima de ola (H_{\max}) debe ser, como mínimo, igual a la mitad de la profundidad del agua (h) en el tanque [46].
3. Se recomienda que el ángulo de inclinación máximo de la pared móvil no supere los 12 grados [47].
4. El límite de ruptura de la ola es $\frac{H}{L} < \frac{1}{7}$. Si superamos esta relación, no tendremos una onda de forma regular y probablemente se rompa [47].

Figura 2.10.

Laboratorio experimental 2 – Reservorio de acuicultura



Fuente. Autor

En el tanque ilustrado en la Figura 2.10, con dimensiones de 11.5 m de largo, 3.45 m de ancho y 0.85 m de alto, se realizará la instalación del generador de olas, cuyas variables de diseño se detallan en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4

Variables de diseño

Tipo de Generador de Olas	Multi Flap
Número de Flaps	6
Área transversal del Flap	54 cm x 100 cm
Profundidad máxima del agua	55 cm
Altura máxima de la ola	25 cm
Periodo de la ola	0.3 s – 2.5 s
Tipo de ola	Regular

Fuente. Autor

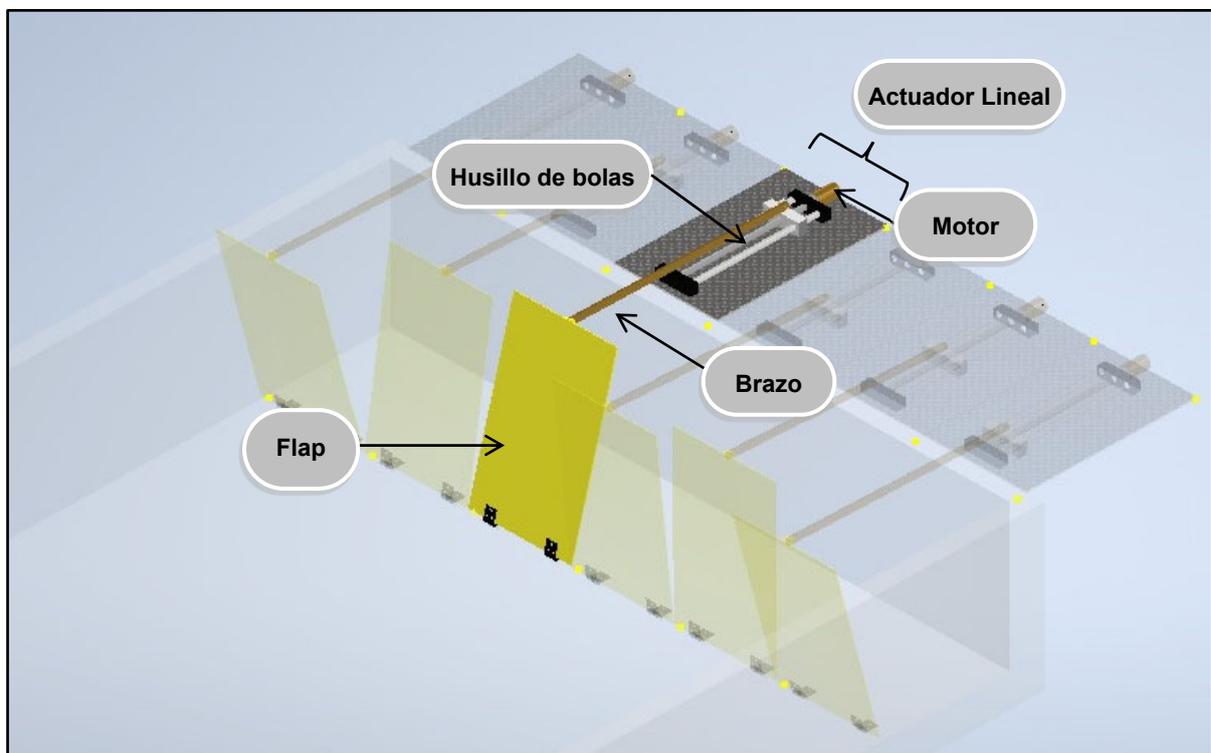
2.2.3 Diseño del generador de olas multi flap

El generador de olas multi flap requiere emplear un sistema de control que permita al usuario ingresar los valores de carrera de la pared móvil y periodo de la ola teórico para producir condiciones de ola específicas. Por ello, se descarta la posibilidad de emplear un sistema neumático o electrónico, y se plantea la utilización de un sistema accionado por un motor paso a paso o un servo motor. Ambos tipos de motores ofrecen un control preciso sobre la posición, el sentido de giro y la velocidad del sistema.

Para convertir el movimiento rotativo del motor en movimiento lineal, se opta por un actuador lineal basado en un husillo de bolas. El diagrama final que representa esta configuración se encuentra en la Figura 2.11.

Figura 2.11.

Diseño del generador de olas multi flaps



Nota. Software empleado: Inventor

2.2.4 Fuerza del actuador lineal

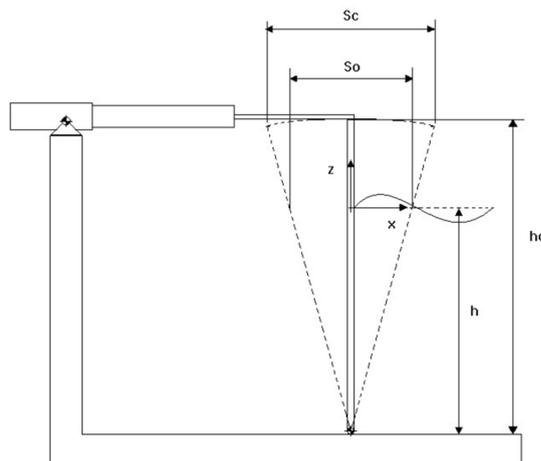
La fuerza necesaria para operar el actuador lineal incluye diversos componentes, tales como la fuerza ejercida por el agua sobre el flap, la masa total del sistema, las fuerzas inerciales y la fuerza de boyantes. Cada uno de estos factores contribuye de manera significativa a la determinación de la fuerza requerida para el funcionamiento adecuado del actuador lineal.

En primer lugar, se calcula la fuerza que el agua ejerce sobre el flap. Para ello, se emplea la teoría de generadores de olas tipo flap de primer orden, cuya formulación se encuentra detallada en la sección 2.1.

Antes de proceder con el cálculo de la fuerza, es importante determinar la carrera máxima del sistema considerando las variables de diseño descritas en la Tabla 2.4 y las diferentes carreras que dependen del diseño del generador de olas, su representación grafica se ilustra en la Figura 2.12.

Figura 2.12.

Esquema del generador de olas tipo flap (vista lateral)



Nota. Tomada de “Design of a wavemaker for the water tank at the Politecnico di Torino (Doctoral dissertation, Politecnico di Torino)”, por Beneduce, M. 2018.

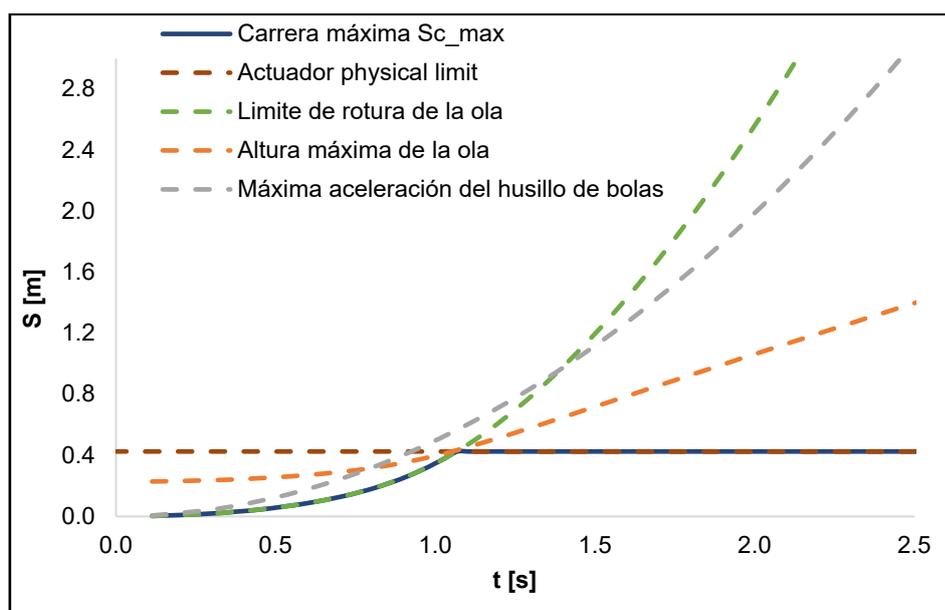
Posteriormente, se establecen los límites del sistema en términos de la carrera del actuador lineal. Estos límites se ilustran y comparan en la Figura 2.13. Se observa que la carrera

máxima del actuador lineal es 42.5 cm. Por otro lado, se aprecia que cuando el período es igual o mayor a 1.25 segundos, la carrera permanece constante debido a que el aumento de este valor se ve interrumpido por el límite físico del propio actuador. Además, considerando la carrera máxima del actuador lineal, se tiene una altura de ola máxima de 24.4 cm a 1.25 segundos, como se muestra en la Figura 2.14.

Con base en lo mencionado, se concluye que el período más intenso ocurre cuando $T = 1.25$ segundos, lo que coincide con el momento en que la fuerza que ejerce el agua sobre el flap alcanza su valor máximo.

Figura 2.13.

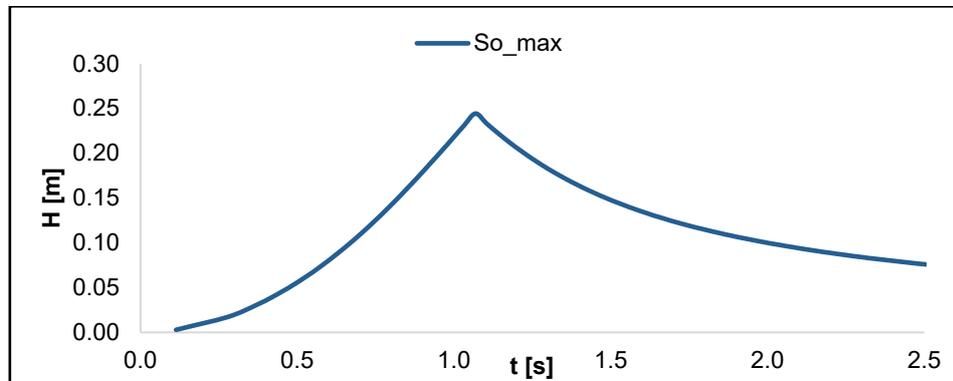
Límites del sistema - carreras del actuador lineal



Nota. Formulación empleada de “Physical models and laboratory techniques in coastal engineering”, por Hughes S, 1993. & “Design of a wavemaker for the water tank at the Politecnico di Torino (Doctoral dissertation, Politecnico di Torino)”, por Beneduce, M. 2018.

Figura 2.14.

Altura de la ola

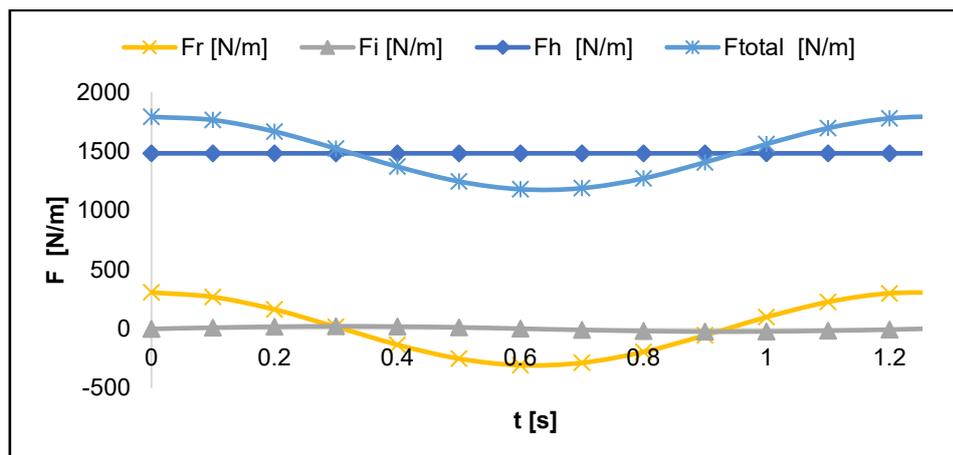


Nota. Formulación empleada de “Physical models and laboratory techniques in coastal engineering”, por Hughes S,1993.

Por tanto, considerando las ecuaciones descritas en la Tabla 2.1, y suponiendo que hay agua en un solo lado del flap, la variación de la fuerza en función del tiempo se presenta en la Figura 2.15, y la potencia en función del tiempo en la Figura 2.16.

Figura 2.15.

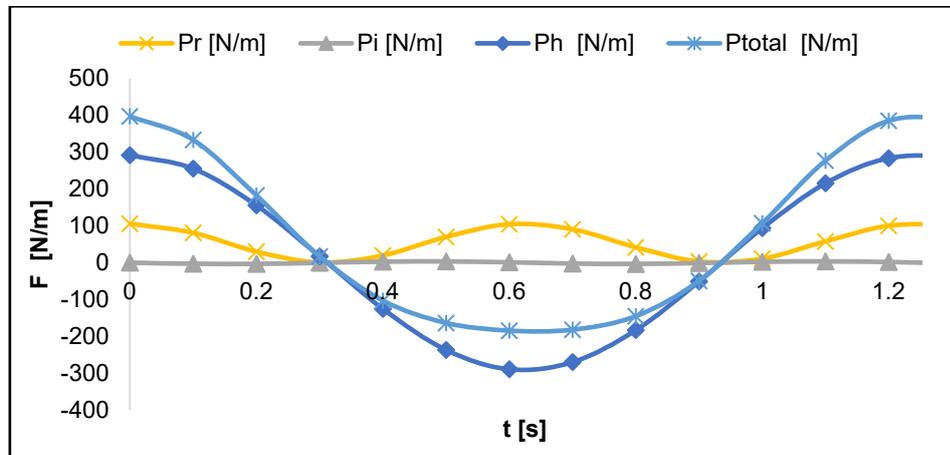
Variación de la fuerza en el periodo más intenso ($T=1.25s$) (agua en un lado)



Nota. Formulación empleada de “Physical models and laboratory techniques in coastal engineering”, por Hughes S,1993.

Figura 2.16.

Variación de la potencia en el periodo más intenso ($T=1.25s$) (agua en un lado)

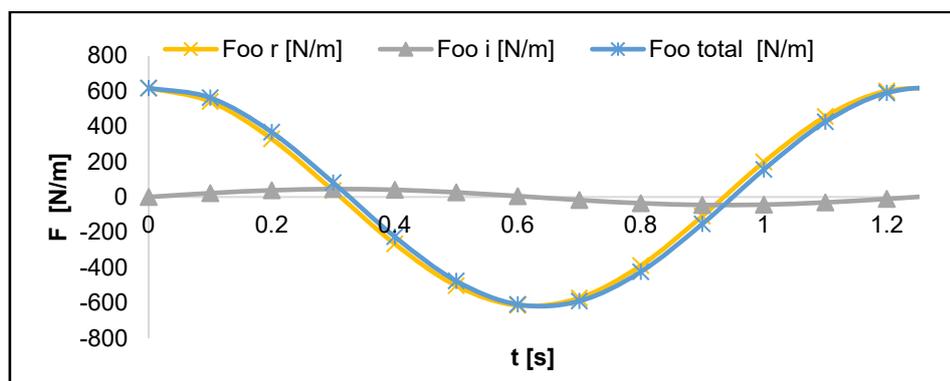


Nota. Formulación empleada de “Physical models and laboratory techniques in coastal engineering”, por Hughes S,1993.

Por otro lado, suponiendo que hay agua en ambos lados del flap, la variación de la fuerza en función del tiempo se presenta en la Figura 2.17, y la potencia en función del tiempo en la Figura 2.18.

Figura 2.17.

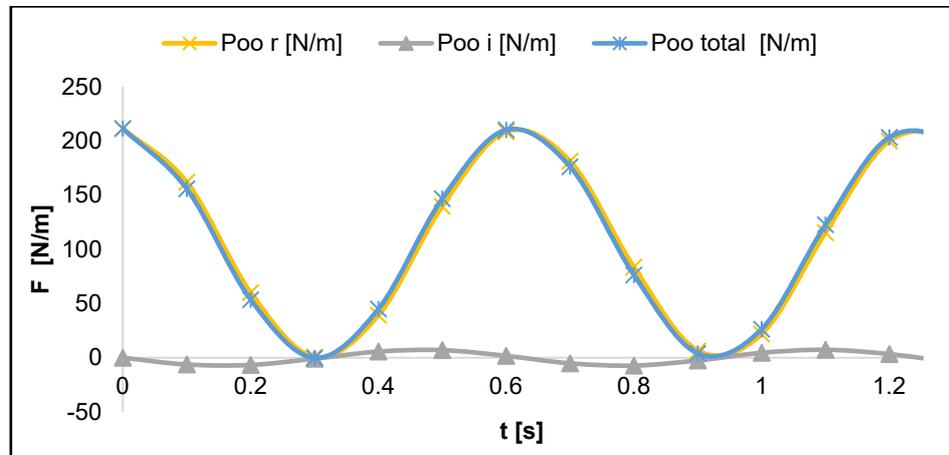
Variación de la fuerza en el periodo más intenso ($T=1.25s$) (agua en ambos lados)



Nota. Foo representa la fuerza que ejerce el agua sobre ambos lados del flap. Formulación empleada de “Physical models and laboratory techniques in coastal engineering”, por Hughes S,1993.

Figura 2.18.

Variación de la potencia en el periodo más intenso ($T=1.25s$) (agua en ambos lados)



Nota. Poo representa la potencia que ejerce el agua sobre ambos lados del flap. Formulación empleada de “Physical models and laboratory techniques in coastal engineering”, por Hughes S,1993.

Finalmente, se determina la fuerza requerida por el actuador lineal (F_{ATT}) teniendo en cuenta todas las fuerzas que actúan a lo largo de un ciclo de trabajo [47]. El diagrama de cuerpo libre del sistema se encuentra ilustrado en la Figura 2.19, y el movimiento de la pared móvil se describe con las siguientes ecuaciones:

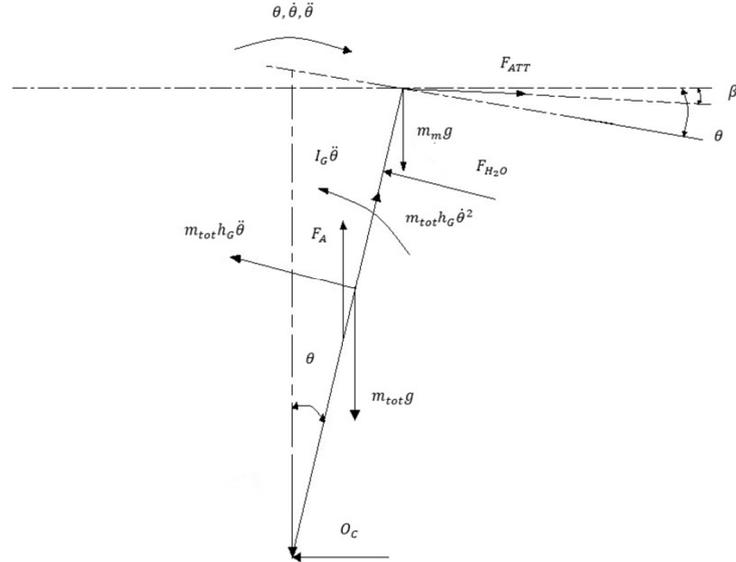
$$\theta = \theta_{max} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (2.50)$$

$$\dot{\theta} = \theta_{max} \frac{2\pi}{T} \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (2.51)$$

$$\ddot{\theta} = -\theta_{max} \frac{4\pi^2}{T^2} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (2.52)$$

Figura 2.19.

Diagrama de cuerpo libre del sistema



Nota. Tomada de “Design of a wavemaker for the water tank at the Politecnico di Torino (Doctoral dissertation, Politecnico di Torino)”, por Beneduce, M. 2018.

Al realizar sumatoria de momentos en el punto O_c , donde el giro en sentido horario se define como la dirección positiva, tenemos la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 &F_{ATT} \cos(\theta - \beta) h_{flap} + m_m g \sin \theta h_{flap} - F_{H_2O} h_{max} - I_G \ddot{\theta} - m_{tot} h_G \ddot{\theta} h_G + m_{tot} g \sin \theta h_G \\
 &\quad - F_A \sin \theta h_{G'} = 0
 \end{aligned}
 \tag{ 2.53 }$$

Puesto que β es un valor pequeño, se considera despreciable, por tanto:

$$F_{ATT} = \frac{1}{\cos \theta h_{flap}} \left(F_{H_2O} h_{max} - \frac{m_m g}{2} \sin \theta h_{flap} + I_G \ddot{\theta} + m_{tot} h_G \ddot{\theta} h_G - m_{tot} g \sin \theta h_G + F_A \sin \theta h_{G'} \right)
 \tag{ 2.54 }$$

Los valores de las variables para determinar la fuerza que requiere el actuador lineal (F_{ATT}) se encuentran detallados en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5*Variables del sistema*

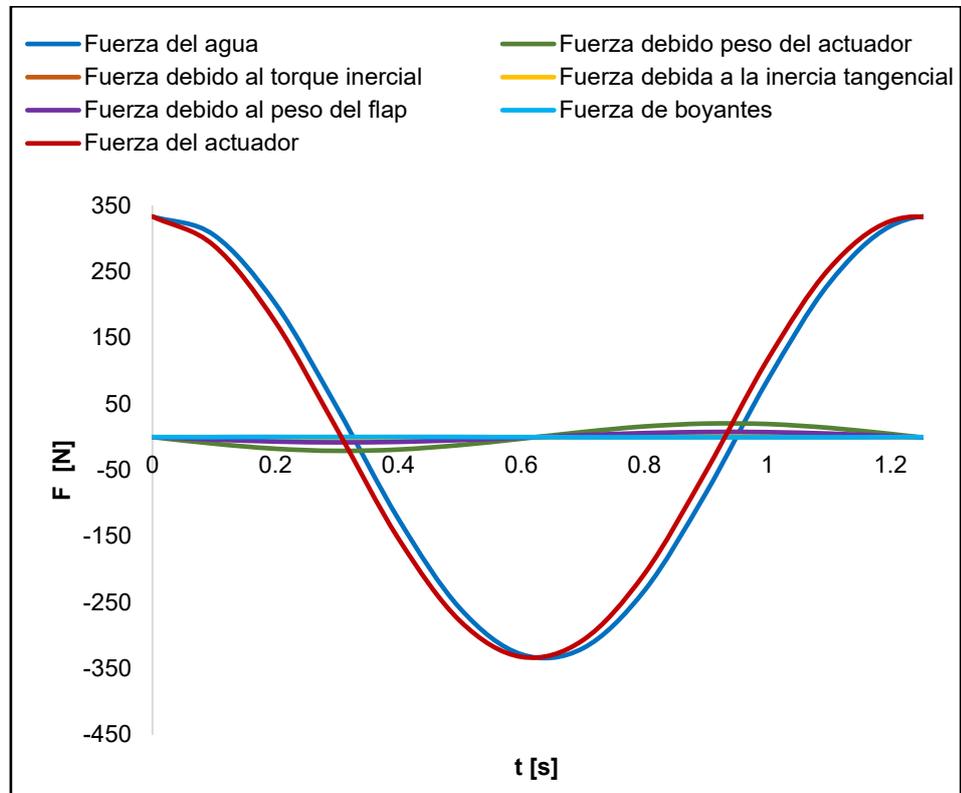
Variable	Valor
hmax	1.00
h [m]	0.55
H max [m]	0.12
h_Vmin_sum [m3]	0.43
t [m]	3.00E-03
Bflap [m]	0.54
h flap [m]	1.00
Vflap [m3]	1.62E-03
Vmin_sumergido [m3]	6.93E-04
Densidad acero [kg/m3]	7850
mflap [kg]	12.72
msteel [kg]	5.00
mtotal [kg]	17.72
h'g [m]	0.21
Θ max [rad]	0.21
T [s]	1.25
Masa del actuador (mm) [kg]	10.00
lg [m4]	1.44E-02
Fuerza de boyantes (F_A) [N]	6.80

Fuente. Autor

La variación en la fuerza necesaria para operar el actuador lineal a lo largo del tiempo se presenta gráficamente en la Figura 2.20, donde se observa que la fuerza máxima alcanza un valor de 333.40 N. Al considerar un factor de seguridad de 6, valor que se asemeja al factor de seguridad obtenido previamente para generadores de olas tipo flap, como se detalla en la Tabla 2.3, se puede concluir que la fuerza externa actuante sobre el actuador lineal es de 2000 N.

Figura 2.20.

Fuerza requerida por el actuador lineal



Nota. Formulación empleada de “Design of a wavemaker for the water tank at the Politecnico di Torino (Doctoral dissertation, Politecnico di Torino)”, por Beneduce, M. 2018.

2.2.5 Dimensionamiento del husillo de bolas y motor

Empleando la formulación presentada en el Apéndice C [48], se obtiene las características del husillo de bolas y motor requerido, las cuales se resumen en la Tabla 2.6,

Tabla 2.6

Resumen de las características del husillo de bolas y motor requerido

Actuador Lineal	
Fuerza externa [N]	2000
Angulo del mecanismo [°]	0
Masa total de cargas y placa [kg]	10

Especificaciones del Husillo de Bolas	
Diámetro [mm]	25
Longitud [mm]	500
Paso [mm]	10
Eficiencia [%]	90
Dimensionamiento del motor	
Torque requerido [N m]	8.56
Velocidad requerida [rpm]	2400

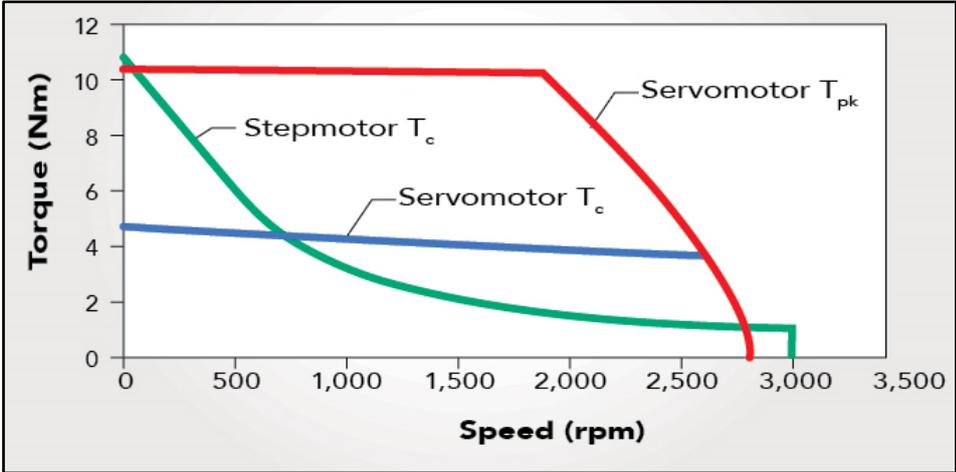
Nota. Formulación empleada de “Husillos de bolas THK catálogo general”, por THK, 2022.

La Figura 2.21 ilustra la variación del torque en función de la velocidad para un motor paso a paso y un servo motor. Se destaca la notoria diferencia en el comportamiento de estos dos tipos de motores a medida que las revoluciones por minuto (RPM) aumentan. Mientras el servo motor mantiene un torque constante independientemente del aumento en las RPM, el motor paso a paso experimenta una significativa disminución en su torque conforme se incrementa la velocidad de rotación. Dado que esta característica es esencial para el sistema en cuestión, la elección de un servo motor se considera la óptima.

No obstante, es importante tener en cuenta que el costo de un servo motor es aproximadamente cinco veces mayor que el de un motor paso a paso. Debido a consideraciones presupuestarias en la construcción de este prototipo, hemos optado por seleccionar un motor paso a paso Nema 37 de 8.7 Nm. El costo total de este motor, incluyendo la fuente de alimentación y el controlador, asciende a \$240.80.

Figura 2.21.

Comparación de un motor paso a paso y un servo motor



Nota. Tomada de “Why and when to use a gearbox with a stepper motor”, por Collins, D. Motioncontrolltips.com, 2019.

Capítulo 3

3. Resultados y Análisis

3.1 Características del generador de olas

Las características de diseño del generador de olas se describen en la Tabla 3.1. Sin embargo, debido al limitado presupuesto, las características del prototipo de flap con su respectivo sistema de accionamiento se detallan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.1

Resumen de las características del generador de olas

Tipo de Generador de Olas	Multi Flap
Número de Flaps	6
Área transversal del Flap	54 cm x 100 cm
Profundidad máxima del agua	55 cm
Altura máxima de la ola	24.4 cm
Periodo de la ola	0.3 s – 2.5 s
Tipo de ola	Regular e Irregular
Carrera máxima	42.5 cm
Torque requerido del motor	8.56 N m
Velocidad requerida del motor	2400 rpm

Fuente. Autor

Tabla 3.2

Características del generador de olas tipo flap (prototipo)

Número de Flaps	1
Área transversal del Flap	54 cm x 100 cm
Profundidad máxima del agua	55 cm
Carrera máxima	42.5 cm
Motor paso a paso Nema 34	8.7 N m

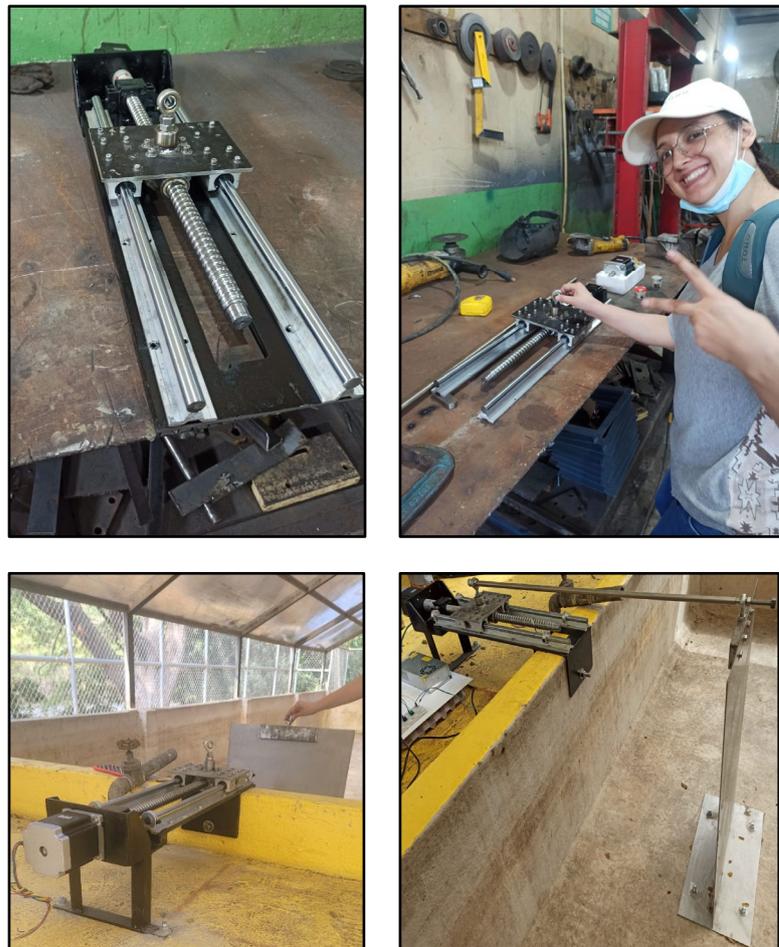
Fuente. Autor

3.2 Construcción del generador de olas

La construcción del actuador lineal, así como el mecanizado de varias piezas, incluyendo la junta del motor, las bisagras, la placa que sujeta los rieles con el husillo de bolas y, finalmente, el brazo que conecta el actuador lineal se llevó a cabo en el taller industrial MacDey, situado en El Fortín BI 4 Mz 1410 SI 19, Guayaquil. La evidencia fotográfica que documenta el proceso de construcción e instalación se muestra en la Figura 3.1. El costo total de este prototipo es de \$ 1,185.08, el desglose de costos se detalla en la Tabla 3.3.

Figura 3.1.

Construcción e instalación del prototipo de generador de olas



Fuente. Autor

Tabla 3.3*Costo total del generador de olas prototipo*

Detalle	Costo
Electrónica	\$ 161.75
Motor + Fuente + Driver	\$ 240.80
Actuador Lineal	\$ 292.41
Mecanizado de piezas + Material	\$ 489.82
Total	\$ 1,185.08

Fuente. Autor

3.3 Sistema de control

El sistema de control se fundamentó en la implementación de Arduino, mediante el desarrollo de código en los entornos de Arduino y Python. Los códigos utilizados se encuentran detallados en el Apéndice D.

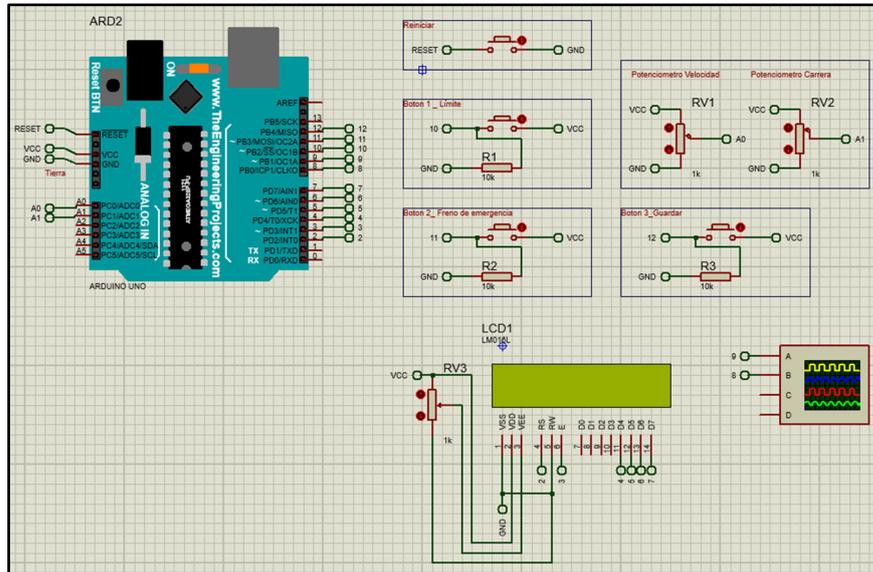
La configuración electrónica se ejecutó tras validar las simulaciones mediante el uso de software como Proteus 8 Professional y Arduino IDE (consultar Figura 3.2). Además, el diagrama electrónico fue realizado en el programa Tinkercad que se encuentra disponible en línea (ver Figura 3.3).

El funcionamiento del sistema se rige por seis pasos, los cuales se describen en detalle en la Figura 3.4.

Finalmente, en la Figura 3.5 se puede apreciar el prototipo de un módulo del generador de olas tipo flap junto con sus componentes electrónicos que conforman el sistema de control.

Figura 3.2.

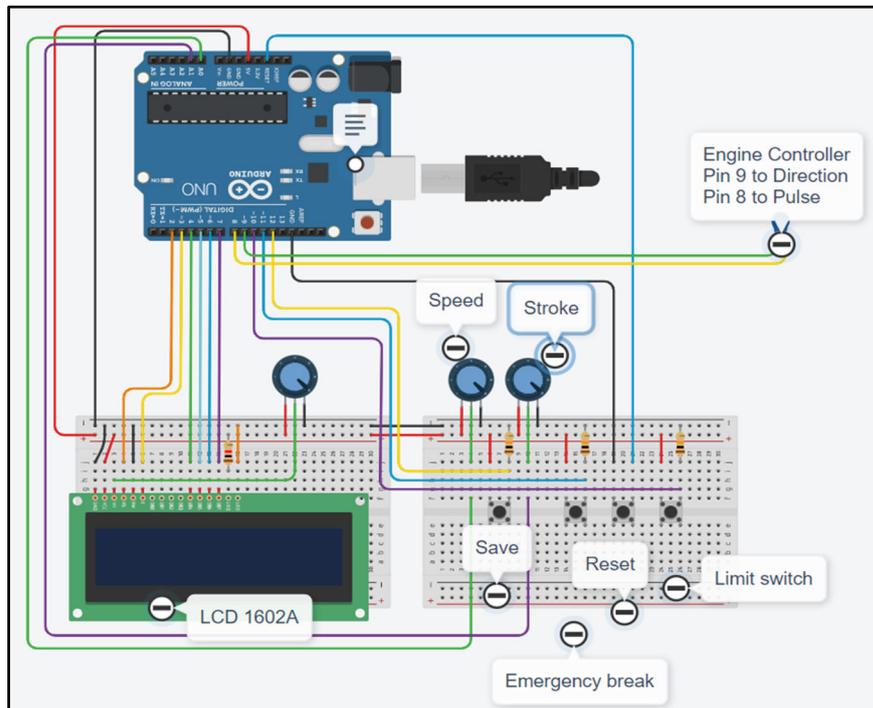
Simulación de las conexiones



Fuente. Autor, Softwares: Proteus 8 Professional; Arduino ID.

Figura 3.3.

Diagrama electrónico



Fuente: Autor, Softwares: Tinker card.

Figura 3.4.

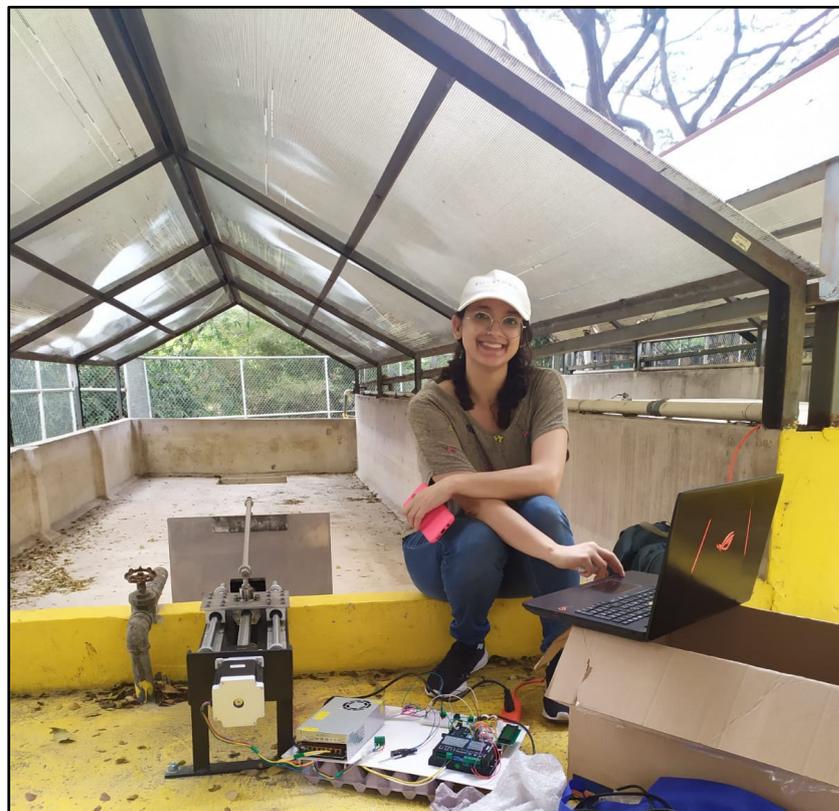
Funcionamiento del sistema de control



Fuente. Autor.

Figura 3.5.

Sistema de control del prototipo de un módulo del generador de olas tipo flap



Fuente. Autor.

3.3.1 Calibración del sistema

El controlador del motor está diseñado para enviar 400 pulsos por vuelta y cada pulso representa 1.8° de giro, adicionalmente, el husillo de bolas desplaza 10 mm por vuelta.

. Los valores de entrada de carrera y velocidad en el sistema se encuentran en unidades de pulsos y pulsos/s, respectivamente. En la Tabla 3.4 se describe la calibración del sistema que fue realizada en seco y posteriormente con profundidades de agua de 30, 40 y 55 cm.

Tabla 3.4

Calibración del sistema a distintas profundidades de agua

Carrera		Velocidad							
		h = 0 cm		h = 30 cm		h = 40 cm		h = 55 cm	
Pasos	cm	pasos/s	RPM	pasos/s	RPM	pasos/s	RPM	pasos/s	RPM
10000	25	1950	292.5	1800	270	1700	255	1400	210
9000	22.5	1965	294.75	1810	271.5	1710	256.5	1410	211.5
8000	20	1980	297	1820	273	1720	258	1420	213
7000	17.5	1995	299.25	1830	274.5	1730	259.5	1430	214.5
6000	15	2010	301.5	1840	276	1740	261	1440	216
5000	12.5	2025	303.75	1850	277.5	1750	262.5	1450	217.5
4000	10	2040	306	1860	279	1760	264	1460	219
3000	7.5	2055	308.25	1870	280.5	1770	265.5	1470	220.5
2000	5	2070	310.5	1880	282	1780	267	1480	222
1000	2.5	2085	312.75	1890	283.5	1790	268.5	1490	223.5
500	1.25	2100	315	1900	285	1800	270	1500	225

Nota. La profundidad del agua se encuentra representada por “h”, además, La aceleración del sistema fue de 5000 pulsos/s², es decir 12.5 cm/s. Fuente. Autor

3.4 Resultados del generador de olas tipo flap

El accionamiento del sistema es realizado por un motor paso a paso, el torque de estos motores disminuye considerablemente a medida aumentan las revoluciones por minuto, por ello, se evalúa la velocidad máxima a la que puede ser accionado el sistema, la cual es cuando la carrera de la pared móvil es mínima. Los datos de entrada del sistema se describen en la Tabla 3.5, como lo indican los valores máximos presentado en la Figura 3.6.

Tabla 3.5

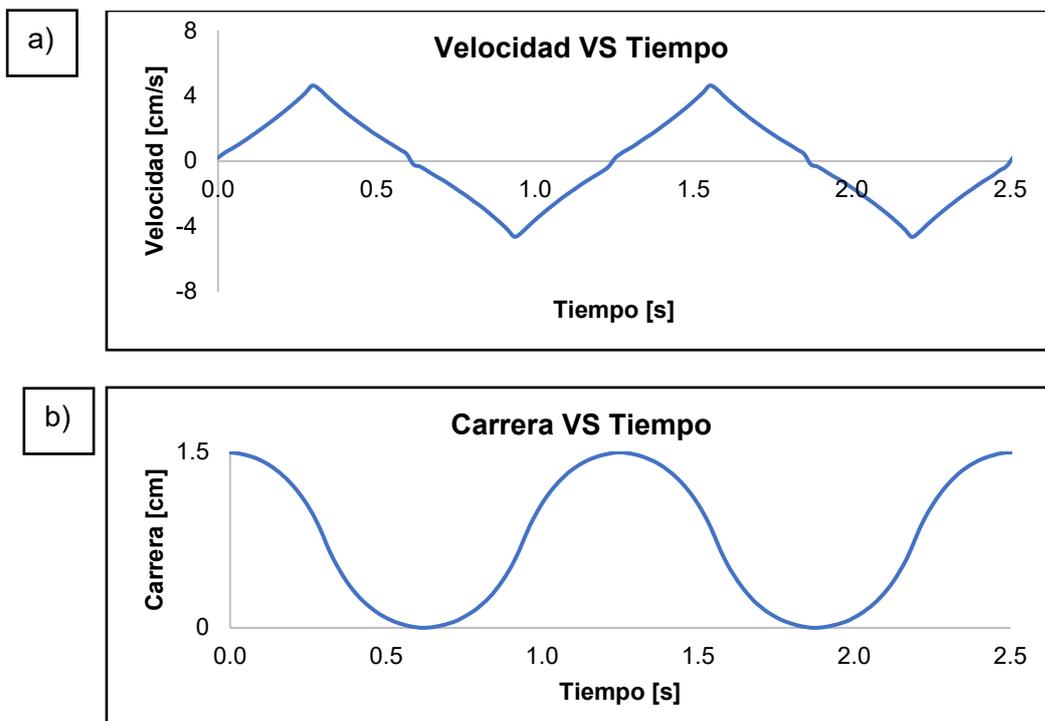
Datos de entrada

Parámetro	Valor
Carrera	1.5 cm
Velocidad	4.6 cm/s

Fuente. Autor

Figura 3.6.

Variación de la carrera y velocidad del actuador lineal en función del tiempo.



Fuente. Autor.

La grafica a) de la Figura 3.6, describe la velocidad del actuador lineal, una curva más representativa sería que el motor llegue a la máxima velocidad (la cual es seteada al activar el sistema de control) y se mantenga constante, debido a que el movimiento del motor es brusco al cambiar de dirección, es importante que el motor se desacelere y vuelva acelerarse. Cabe mencionar que, al usar carreras pequeñas y altas aceleraciones, es muy probable que el motor no tenga el tiempo suficiente para llegar a la velocidad máxima. En caso suceda esto, no será posible obtener el tipo de ola deseado. Por otro lado, en la gráfica b) de la Figura 3.6, se puede apreciar una trayectoria sinusoidal en función del tiempo. La variación de la carrera mantiene la misma tendencia al aumentar o disminuir de velocidad y carrera, lo que varía es la amplitud.

Finalmente, los datos de la ola fueron recopilados y transmitidos por una boya metoceanica llamada "Spotter". La prueba se llevó a cabo en 21.77 minutos a una profundidad de agua de 30 cm (ver Figura 3.7).

Figura 3.7.

Prueba experimental del prototipo de generador de olas tipo flap



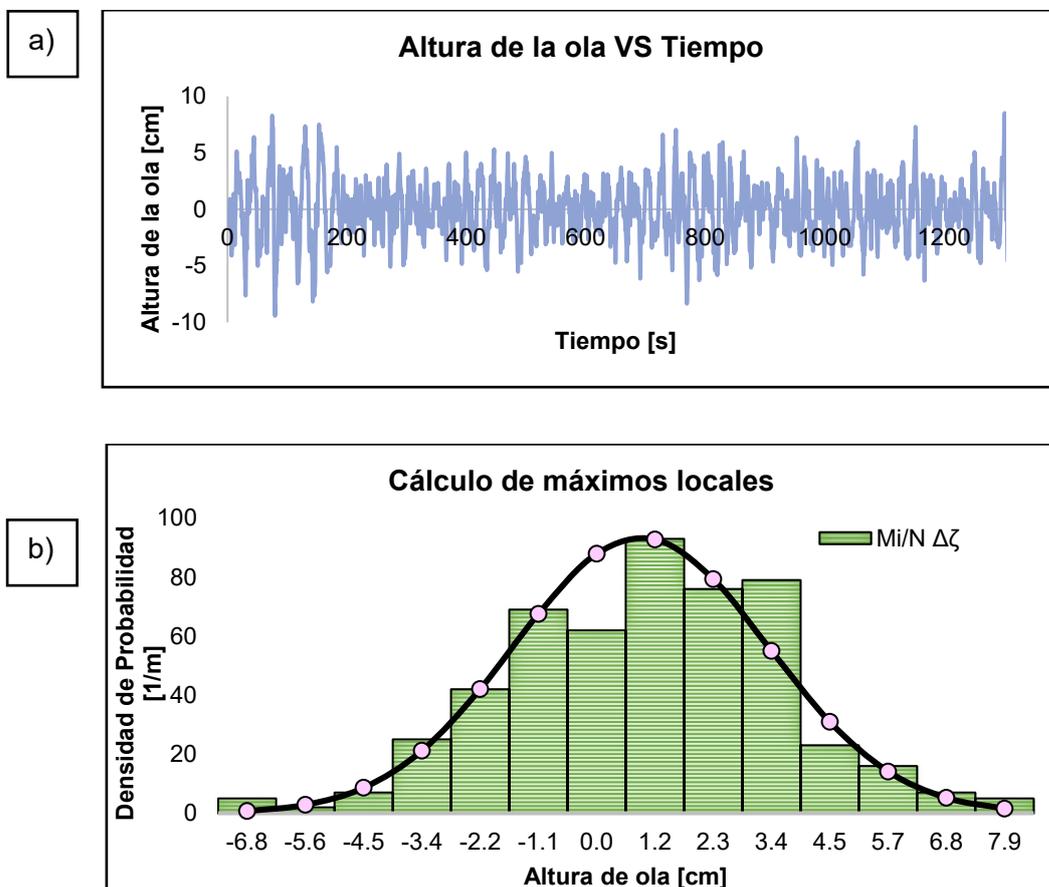
Fuente. Autor.

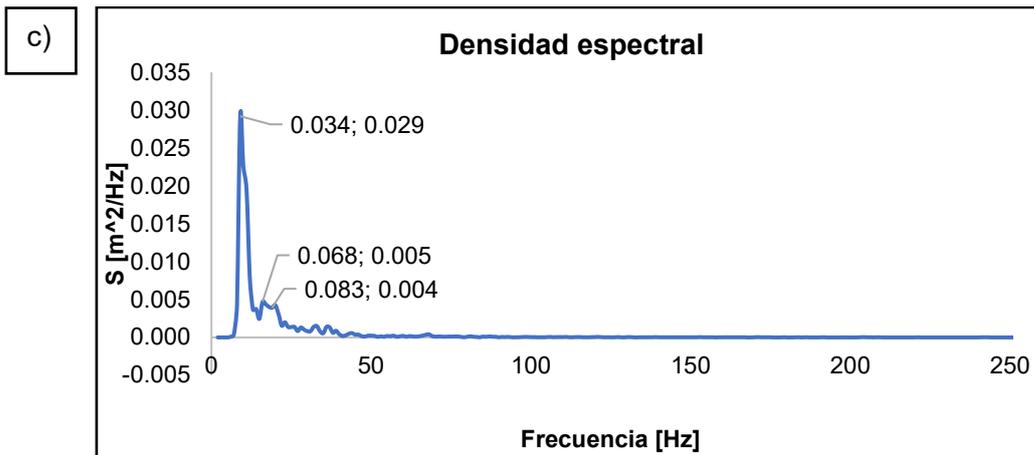
El prototipo de generador de olas tipo flap accionado por un motor paso a paso generó olas cuyas características se encuentran representadas gráficamente en la Figura 3.8, cuyos datos se encuentran en el Apéndice E.

La ilustración a), nos permite visualizar la superficie de la ola en distintos instantes de tiempo, cuyo perfil nos indica que se trata de olas irregulares. Por otro lado, la ilustración b), compara la distribución de máximos locales con la distribución de Rayleigh, como podemos apreciar, los valores reales convergen con los valores pronosticados, siendo el valor promedio de altura de la ola igual a 1.2 cm, con una cantidad de máximos locales es de 551. Por último, la ilustración c) muestra la función de densidad espectral, la cual nos permite visualizar la distribución de energía contenida en los armónicos que componen el tipo de ola aleatoria. La mayor energía se observa en las frecuencias de 0.034 Hz, 0.068 Hz y 0.083 Hz.

Figura 3.8.

Características de la ola generada





Nota. Formulación obtenida de obtenidas de “Notas de clase de Ship’s Dynamics”, por José R. Marín L. 2022

La Tabla 3.6 detalla los momentos de densidad espectral, valores que nos permiten determinar la frecuencia promedio, periodo promedio, entre otros parámetros. El valor promedio entre cresta es iguala 2.56s. Además, puesto que eps o épsilon se acerca a uno se evidencia que se trata de un espectro de banda ancha y los máximos locales tienen a la distribución Gaussiana, cuya media es igual a cero [38].

Tabla 3.6

Parámetros estadísticos de la ola generada

Parámetro estadístico	Valor	Unidad
m0	7.33E-04	m ²
m2	1.28E-05	m ² Hz ²
m4	4.57E-06	m ² Hz ⁴
eps	9.75E-01	
sig**2	6.37E-04	m ²
Periodo medio de cruce	7.78E+00	s
Periodo medio entre cresta	2.56E+00	s

Nota: Software empleado: Analizador_Señales_timeregistanalV28072021.

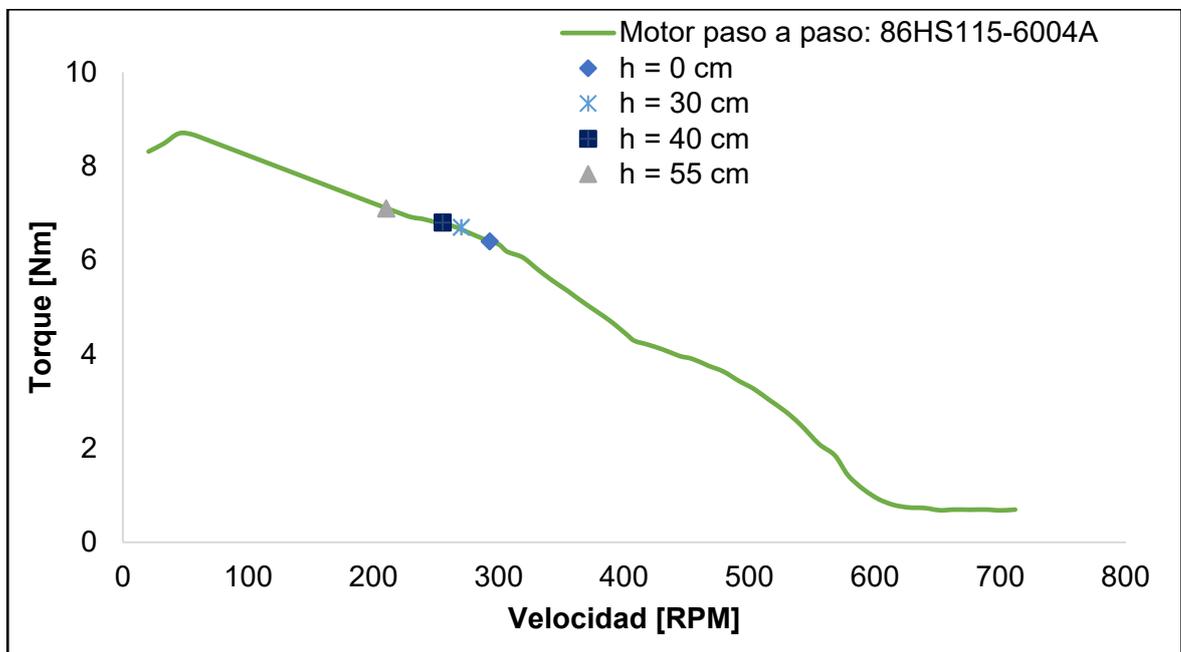
3.5 Velocidad límite del sistema

Se realizaron numerosas pruebas para determinar la velocidad límite del sistema a diferentes profundidades de agua. Este proceso consistió en

En la Figura 3.9, se puede comprobar que el motor se encuentra correctamente dimensionado.

Figura 3.9.

Velocidad límite del sistema.



Nota. Curva del motor NEMA 34, obtenida de “STEPPER MOTOR: <https://gemsmotor.com/nema-34-stepper-motor>”.

3.6 Costo beneficio de la construcción de los seis flaps del generador de olas mejorado

Actualmente, si se desea desarrollar la tecnología WEC en el Ecuador es necesario alquilar un canal hidronómico fuera del país. La Tabla 3.7 detalla los costos de alquiler por campaña experimental, cuyo costo de alquiler mínimo oscila los \$150,000 - \$275,000, sin incluir los costos de viáticos de investigadores ecuatorianos. Por ello, si se construye un canal hidrodinámico en el Ecuador y se considera un mínimo de 3 campañas experimentales al año,

se tendría un ingreso anual de \$60,000, dicho valor nos permitiría cubrir los costos, gastos y una inversión inicial de \$ 105,771.63 con una tasa interna de retorno (TIR) del 18% en un periodo de recuperación de 5 años (ver Figura 3.10 & Figura 3.11).

En el Apéndice FApéndice se desglosa el detalle de los costos considerados para cada ítem.

Tabla 3.7

Costos de alquiler de un tanque hidrodinámico en diferentes países

Alquiler: Canal hidrodinámico		Costo de pruebas experimentales de dispositivos WEC	
Detalle	Costo/Campaña Experimental	Mínimo	Máximo
Davison Laboratory - Stevens Institute of Technology (USA)	\$25,000	\$150,000	\$275,000
Stadt Towing Tank AS (Noruega)	\$80,000	\$480,000	\$880,000
Hamburgische Schiffbau Versuchsanstalt GmbH (HSVA Alemania)	\$121,290	\$727,740	\$1,334,190
Canal de Experiencias Hidrodinámicas: El Pardo (España)	\$40,000	\$240,000	\$440,000

Nota. Obtenido de “Cotizaciones ESPOL”.

Figura 3.10.

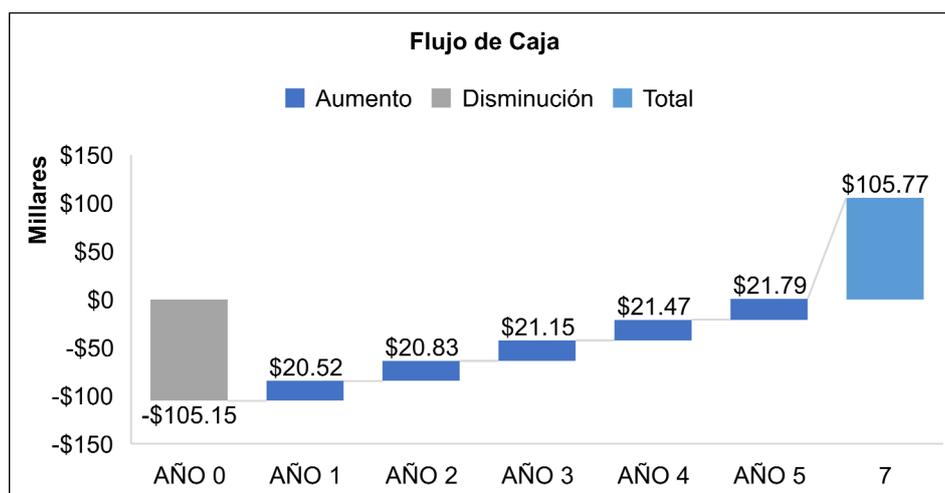
Resumen de datos financieros

Inversión
•\$ 73,834.59 en Obra civil
•\$ 15,655.93 en Generadores de Olas
•\$ 15,655.93 en Absorbedores de Olas
Costos
•\$ 36,214.53 en Personal
•\$ 1,066.08 en Mantenimiento
Gastos
•\$ 2,200 en Agua + Luz
Ingresos
•\$ 60,000 anuales
% Incremental de Ingresos
•2.5 %
% Incremental de Costos y Gastos
•3 %

Fuente. Autor.

Figura 3.11.

Flujo de caja de la construcción de un canal hidrodinámico en el Ecuador.



VAN
\$34,521.27



TIR
18%



Periodo de
recuperación
5 años

Fuente. Autor.

Capítulo 4

4. Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Conclusiones

En este proyecto se ha diseñado un generador de olas tipo flap formado por 6 módulos o flaps, cada uno accionado por un actuador lineal compuesto por un husillo de bolas al que está acoplado un motor. Este diseño permite generar olas regulares de hasta 24.4 cm de alto en un rango de periodo de 0.3 s a 2.5. Además, el requerimiento del motor es de 8.56 N m @2400 rpm, tal que, el torque debe ser constante a medida que aumentan las revoluciones por minuto, por lo que el motor óptimo para este sistema es un servo motor.

Por otra parte, se ha construido un prototipo de bajo costo de un módulo del generador de olas tipo flap previamente diseñado. La fabricación de este prototipo se realizó en el Taller Industrial MACDEY, donde se llevaron a cabo procesos de mecanizado para crear diversas piezas clave, tales como la junta del motor, la base del actuador lineal, el brazo, las bisagras y los acoples de agarre del actuador lineal y el flap. Para accionar este sistema, se optó por emplear un motor paso a paso híbrido Nema de 8.7 N m, este enfoque permitió cumplir con el presupuesto otorgado por PNUD, el costo total del prototipo fue de \$1,185.08. Por último, la instalación del sistema se realizó en el Laboratorio Experimental II.

La configuración de un motor paso a paso ha posibilitado la implementación de un sistema de control basado en Arduino. La codificación se realizó en los entornos de programación de Arduino y Python. Esto ha permitido crear un programa que le da al usuario la capacidad de ingresar la velocidad y carrera del sistema para definir el tipo de ola deseada.

Las pruebas realizadas con el prototipo se vieron limitadas por las características del motor paso a paso, ya que, al aumentar la velocidad del sistema, el torque se reduce considerablemente. Por ello, se optó por evaluar el tipo de ola creada considerando la velocidad máxima del sistema y carrera mínima (4.6 cm/s y 1.5 cm, respectivamente), obteniendo las siguientes características de ola: altura máxima 1.2 cm, periodo medio de cruce 7.78 s, periodo medio entre cresta 2.56 s.

Por último, se realizó un estudio financiero de la viabilidad del proyecto de construcción de los seis flaps del generador de olas mejorado, diseñado específicamente para el Laboratorio Experimental II. Este estudio abarcó los costos necesarios para la obra civil, destinada a cerrar la infraestructura que actualmente se encuentra a la intemperie. El propósito de esta inversión es proporcionar un entorno adecuado para la evaluación conceptual de dispositivos WEC. Teniendo en cuenta un ingreso anual estimado de \$60,000 y una inversión inicial de \$105,771.63, se obtiene un valor neto (VAN) positivo de \$34,521.27. Además, la tasa interna de retorno (TIR) se sitúa en un 18%, y se espera recuperar la inversión inicial en un periodo de 5 años. En consecuencia, estos resultados indican de manera concluyente que el proyecto es económicamente viable.

Finalmente, la construcción de un canal hidrodinámico permitirá la evaluación conceptual de dispositivos WEC, lo que representa un avance tecnológico sin precedentes en la región. Este proyecto tiene un impacto notable en el ámbito académico al proporcionar oportunidades de investigación en un entorno propicio para la realización de valiosos experimentos. Además, su implementación reduce de manera significativa los costos asociados con futuros proyectos de ingeniería marítima.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda el uso de servomotores con una capacidad de 10 Nm para cada flap. Esta elección se basa en la necesidad de proporcionar suficiente torque para el movimiento de los flaps, garantizando un control robusto y preciso.
- Se sugiere la implementación de un sistema de control basado en PLC (Controlador Lógico Programable) para el generador de olas multi flap. Este enfoque ofrece una plataforma versátil y confiable para gestionar la operación de los servomotores y garantizar la sincronización precisa de los flaps, lo que resulta en un control efectivo y seguro del sistema en su conjunto.

- Se recomienda implementar un sistema de control de seguridad que incluya sensores de límite y protocolos de emergencia. Esto garantiza la seguridad de los operadores y la protección del equipo en caso de situaciones inesperadas.
- Se recomienda un programa de mantenimiento preventivo regular para asegurar el funcionamiento óptimo de los servomotores y del sistema en su conjunto. Esto incluye la revisión periódica de los componentes y su lubricación adecuada.

Referencias

- [1] L. de Oliveira, I. F. S. dos Santos, N. L. Schmidt, G. L. Tiago Filho, R. G. R. Camacho, y R. M. Barros, “Economic feasibility study of ocean wave electricity generation in Brazil”, *Renew Energy*, vol. 178, pp. 1279–1290, nov. 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.07.009.
- [2] Waveplam, “State of the Art Analysis”, 2009. <https://www.calameo.com/read/0006774700d9f0205b2be> (consultado el 30 de mayo de 2023).
- [3] L. Castro-Santos, D. Silva, A. R. Bento, N. Salvação, y C. G. Soares, “Economic feasibility of wave energy farms in Portugal”, *Energies (Basel)*, vol. 11, núm. 11, nov. 2018, doi: 10.3390/en11113149.
- [4] International Renewable Energy Agency (IRENA), “Wave energy technology brief”, 2014. [En línea]. Disponible en: www.irena.org
- [5] I. Renewable Energy Agency, *Renewable power generation costs in 2021*. 2022. [En línea]. Disponible en: www.irena.org
- [6] A. de Andres, R. Guanche, C. Vidal, y I. J. Losada, “Adaptability of a generic wave energy converter to different climate conditions”, *Renew Energy*, vol. 78, pp. 322–333, jun. 2015, doi: 10.1016/j.renene.2015.01.020.
- [7] The European Marine Energy Centre Ltd, “Tank Testing of Wave Energy Conversion Systems”, 2009.
- [8] ITTC Quality System Manual Recommended Procedures and Guidelines, “Wave Energy Converter Model Test Experiments”, 2021.
- [9] C. Windt *et al.*, “Validation of a CFD-based numerical wave tank model for the power production assessment of the wavestar ocean wave energy converter”, *Renew Energy*, vol. 146, pp. 2499–2516, feb. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.08.059.

- [10] J. Orphin, P. Schmitt, J. R. Nader, y I. Penesis, “Experimental investigation into laboratory effects of an OWC wave energy converter”, *Renew Energy*, vol. 186, pp. 250–263, mar. 2022, doi: 10.1016/j.renene.2021.12.092.
- [11] ITTC Quality System Manual Recommended Procedures and Guidelines, “Analysis Procedure for Model Tests in Regular Waves”, 2002.
- [12] ITTC Quality System Manual Recommended Procedures and Guidelines, “Uncertainty Analysis for a Wave Energy Converter”, 2017.
- [13] ITTC Quality System Manual Recommended Procedures and Guidelines, “Uncertainty Analysis, Instrument Calibration”, 2017.
- [14] ITTC Quality System Manual Recommended Procedures and Guidelines, “Laboratory Modelling of Multidirectional Irregular Wave Spectra”, 2017.
- [15] G. Bacellil, S. J. Spencer², D. C. Patterson¹, y R. G. Coel, “Wave tank and bench-top control testing of a wave energy converter”, 2019.
- [16] E. V. Lewis y Society of Naval Architects and Marine Engineers (U.S.), *Principles of naval architecture. Volume II, Resistance, propulsion and vibration*. 1998.
- [17] ITTC, “Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A.”, 2016. <https://itc.info/media/5614/ipt-towing-tank.pdf> (consultado el 30 de mayo de 2023).
- [18] ITTC, “Institute of Naval Architecture and Ocean Engineering, Universidad Austral de Chile”, 2021. https://itc.info/media/9519/ceh-uach-2021_itc.pdf (consultado el 30 de mayo de 2023).
- [19] ITTC, “Numerical Offshore Tank (TPN) – University of São Paulo”, 2017. <https://itc.info/media/8218/generation-and-active-absorption-wave-tank.pdf> (consultado el 30 de mayo de 2023).
- [20] ITTC, “LabOceano, Brazilian Ocean Technology Laboratory”, 2022. <https://itc.info/media/10186/facilities-oceanbasin.pdf> (consultado el 30 de mayo de 2023).

- [21] Gunt HAMBURG, “HM 162 Canal de ensayo 309x450mm”.
<https://www.gunt.de/es/productos/hidraulica-para-ingenieros-civiles/ingenieria-hidraulica/flujo-en-canales-abiertos/canal-de-ensayo-309x450mm/070.16200/hm162/glct-1:pa-150:ca-179:pr-675> (consultado el 30 de mayo de 2023).
- [22] S. Castillo Feijoó, “Diseño y construcción de un tanque de olas para el laboratorio de Ing. Naval”, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil - Ecuador, 2018.
- [23] E. Reginal Chapell, “Theory and design of a wave generator for a short flume”, The University of British Columbia, 1969.
- [24] P. Cardozo De Mello, M. L. Carneiro, E. A. Tannuri, y K. Nishimoto, “USP active absorption wave basin: from conception to commissioning.”, 2010.
- [25] P. Zambrano, “Estudio de factibilidad para la implementación de un convertidor de energía de olas (WEC) tipo punto absorbedor en la isla Isabela de las Galápagos”, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil - Ecuador, 2022.
- [26] M. J. Chimbo Campuzano y R. R. Rodríguez Santos, “Aprovechamiento de la energía undimotriz en el Ecuador”, *Ingenius*, núm. 17, p. 23, dic. 2016, doi: 10.17163/ings.n17.2017.03.
- [27] Ministerio de Energía y Minas, “Más de USD 55 millones se han invertido en proyectos de energía renovable, a través de la iniciativa Cero Combustibles Fósiles en Galápagos”, 2019. <https://www.recursosyenergia.gob.ec/mas-de-usd-55-millones-se-han-invertido-en-proyectos-de-energia-renovable-a-traves-de-la-iniciativa-cero-combustibles-fosiles-en-galapagos/> (consultado el 31 de mayo de 2023).
- [28] Instituto de Investigación Geológico y Energético, “Balance Energético de la Provincia de Galápagos 2018”, 2018. Consultado: el 31 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.geoenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/05/balance_energetico_de_galapagos_2018.pdf

- [29] NASA, “Technology Readiness Level”, 2012. https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/technology_readiness_level (consultado el 5 de junio de 2023).
- [30] A. Pecher y J. P. Kofoed, “Handbook of Ocean Wave Energy, Springer Open”, *Springer Open*, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-39889-1_11.
- [31] Davide. Magagna, Andreas. Uihlein, y European Commission. Joint Research Centre. Institute for Energy and Transport., *2014 JRC ocean energy status report: technology, market and economic aspects of ocean energy in Europe*. Publications Office, 2015.
- [32] J. Weber, R. Costello, J. Ringwood, J. W. #1, B. Teillant, y T. Soulard, “Integrated WEC System Optimisation – Achieving Balanced Technology Development and Economical Lifecycle Performance”, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/260974421>
- [33] J. Weber, “WEC Technology Readiness and Performance Matrix-finding the best research technology development trajectory”, 2012. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/233810908>
- [34] M. A. Bhuiyan, P. Hu, V. Khare, Y. Hamaguchi, B. K. Thakur, y M. K. Rahman, “Economic feasibility of marine renewable energy: Review”, *Frontiers in Marine Science*, vol. 9. Frontiers Media S.A., el 31 de octubre de 2022. doi: 10.3389/fmars.2022.988513.
- [35] B. Guo, T. Wang, S. Jin, S. Duan, K. Yang, y Y. Zhao, “A Review of Point Absorber Wave Energy Converters”, *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 10, núm. 10. MDPI, el 1 de octubre de 2022. doi: 10.3390/jmse10101534.
- [36] J. Fitzgerald, “Technology Readiness Level Definitions. Private communication”, 2011.
- [37] J. R. Marín, Facultad de ingeniería Marítima y Ciencias del Mar, y ESPOL, *Ship’s Dynamics*. Guayaquil, 2022.
- [38] José R. Marín L, *Notas de clase: Ship’s Dynamics*. 2022.

- [39] INOCAR, “Condiciones de oleaje en la costa ecuatoriana desde el 16 hasta el 19 de septiembre de 2023”, septiembre de 2023.
<https://www.inocar.mil.ec/web/index.php/boletines/oleaje-y-aguaje/1913-condiciones-de-oleaje-en-la-costa-ecuadoriana-desde-el-16-hasta-el-19-de-septiembre-de-2023>
(consultado el 19 de septiembre de 2023).
- [40] S. H. Lamb, “Hidrodynamics”, New York, 1932.
- [41] J. Daily y S. Stephan, “Characteristics of the Solitary Wave”, *American Society of civil Engineers*, vol. 118, pp. 573–587, 1953.
- [42] J. N. Newman, “Marine Hydrodynamics”, 2018.
- [43] R. G. Dean y R. A. Dalrymple, “Water wave mechanics for engineers and scientists (Vol. 2)”, 1991.
- [44] C. Freire de Souza y H. Morishita, “Projeto, implantação e análise de um gerador de ondas”, Paulo - Brasil, 2010.
- [45] H. chen Zhang, S. xue Liu, J. xuan Li, y L. Wang, “Establishment of Numerical Wave Flume Based on the Second-Order Wave-Maker Theory”, *China Ocean Engineering*, vol. 33, núm. 2, pp. 160–171, abr. 2019, doi: 10.1007/s13344-019-0016-6.
- [46] S. A. Hughes, *Physical models and laboratory techniques in coastal engineering*. World Scientific, 1993.
- [47] G. Bracco y M. Beneduce, “Design of a wavemaker for the water tank at the Politecnico di Torino”, 2018.
- [48] THK, “Husillos de bolas THK catálogo general”, 2022.

Apéndices

4.3 Apéndice A

4.3.1 Cálculo de las raíces de la relación de dispersión para los modos de ola estacionaria mediante Python

```
# Abrir el archivo "a.txt" en modo lectura
# El archivo "a.txt" contiene los valores de  $\sigma^{2h/gkh}$ 
archivo = open("a.txt")

# Leer todas las líneas del archivo en una lista
lineas = archivo.readlines()

# Cerrar el archivo después de la lectura
archivo.close()

# Crear una lista vacía para almacenar los valores de "a"
valores_a = []

# Iterar sobre las líneas leídas del archivo
for linea in lineas:
    # Eliminar espacios en blanco y caracteres de nueva línea
    linea = linea.strip()

    # Verificar si la línea no está vacía
    if linea != "":
        # Convertir el valor a punto flotante y agregarlo a la lista
        valores_a.append(float(linea))

# Importar las bibliotecas necesarias
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Definir las funciones

def funcion1(x, a):
    """Calcula la función 1 para un valor dado de "a".

    Args:
        x (numpy.ndarray): Valores de entrada.
        a (float): Valor de "a" para la función.

    Returns:
        numpy.ndarray: Valores calculados de la función 1.
    """
    return a / x

def funcion2(x):
```

```

"""Calcula la función 2.

Args:
    x (numpy.ndarray): Valores de entrada.

Returns:
    numpy.ndarray: Valores calculados de la función 2.
"""
return -1 * np.tan(x)

# Iterar sobre los valores de "a"
for a in valores_a:
    # Crear un arreglo de valores para el eje x
    x = np.linspace(0, 10, 100000)

    # Calcular los valores de las funciones para cada punto en x
    y1 = funcion1(x, a)
    y2 = funcion2(x)

    # Encontrar las intersecciones
    intersecciones = np.where(np.isclose(y1, y2, atol=0.0001))

    # Imprimir las intersecciones
    print("Intersecciones con a = {}".format(a))

    if len(intersecciones[0]) != 0:
        print("(x,f1,f2)\n")
        for j in intersecciones[0]:
            print("{:.4f}, {:.4f}, {:.4f}\n".format(x[j], y1[j], y2[j]))
    else:
        print("No hay intersecciones.\n")

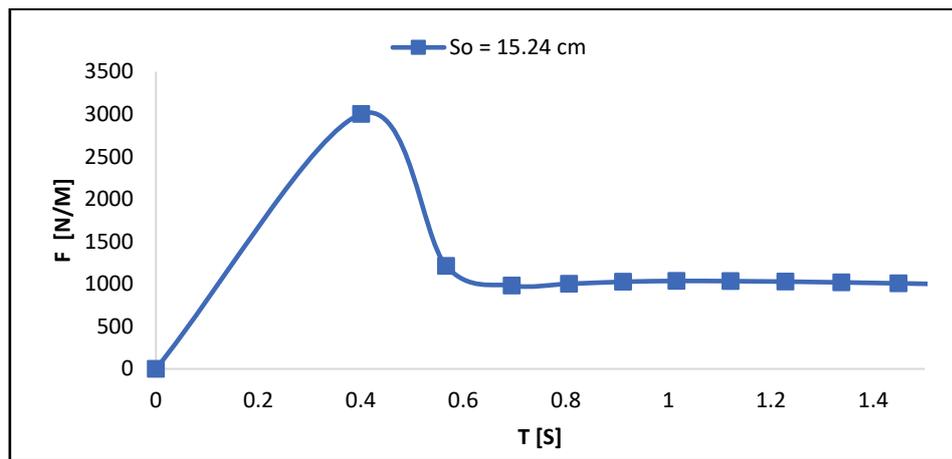
```

4.4 Apéndice B

4.4.1 Resultados obtenidos de la fuerza y potencia del generador de olas tipo pistón

Figura 4.1.

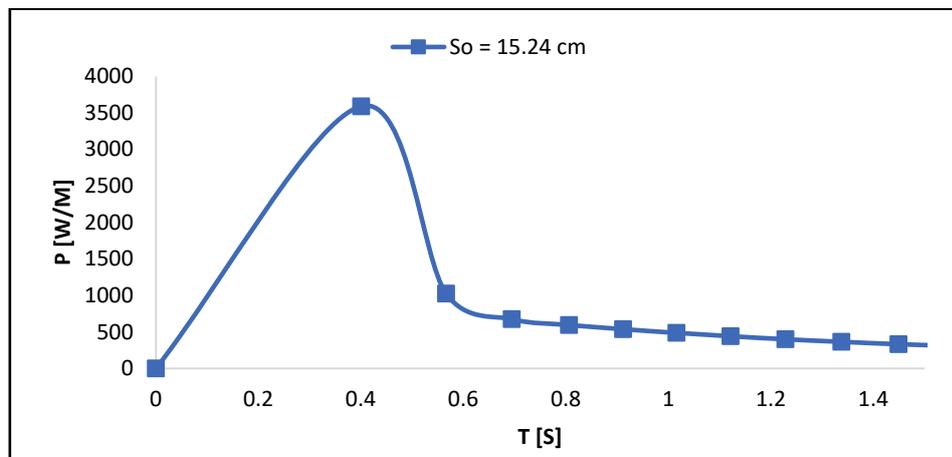
Fuerza por ancho de la pared móvil que ejerce el agua sobre la placa (generador de olas tipo pistón)



Fuente. Autor.

Figura 4.2.

Potencia por ancho de la pared móvil que ejerce el agua sobre la placa (generador de olas tipo pistón)

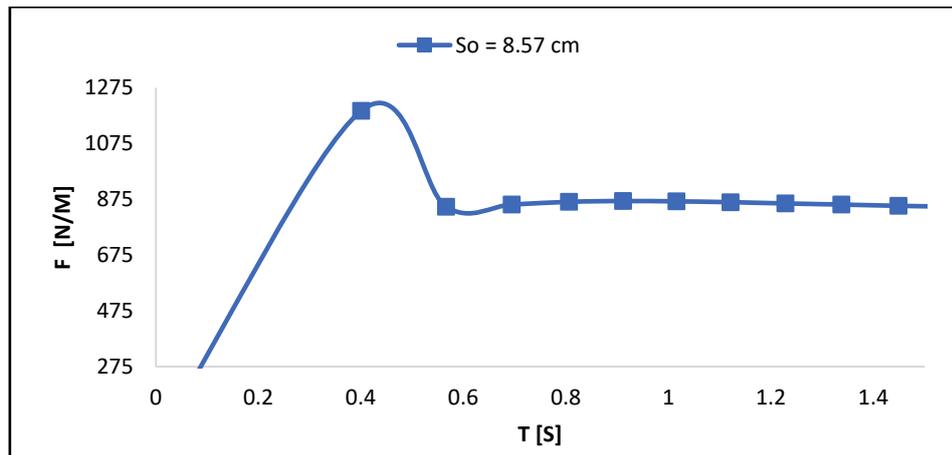


Fuente. Autor.

4.4.2 Resultados obtenidos de la fuerza y potencia del generador de olas tipo flap

Figura 4.3.

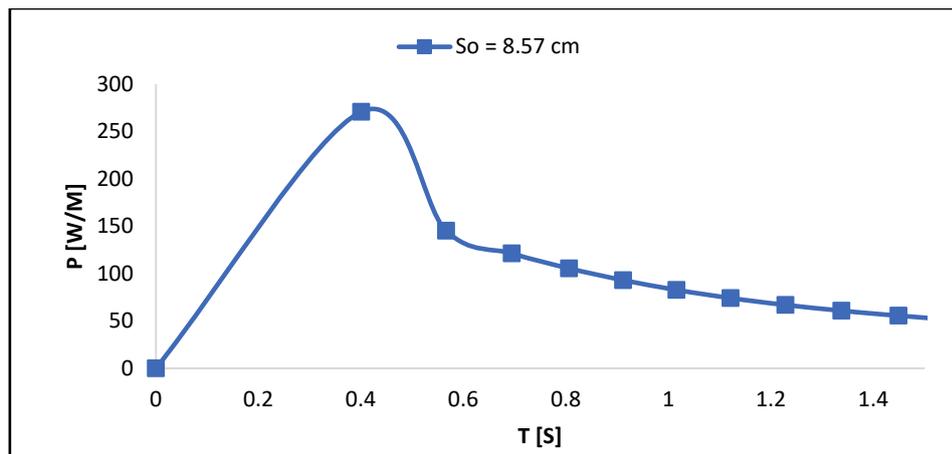
Fuerza por ancho de la pared móvil que ejerce el agua sobre el flap (generador de olas tipo flap)



Fuente. Autor.

Figura 4.4.

Potencia por ancho de la pared móvil que ejerce el agua sobre el flap (generador de olas tipo flap)



Fuente. Autor.

4.5 Apéndice C

4.5.1 Cálculo para determinar las características del husillo de bolas y torque requerido por el motor

Carga

Masa total de las cargas y la mesa $m = 10$ [kg]

Coefficiente de fricción (acero) $\mu = 0.5$

Especificaciones de husillo de bolas

Diámetro $D_B = 25$ [mm]

Longitud total $L_B = 500$ [mm]

Paso $P_B = 10$ [mm/rev]

Eficiencia $\eta = 90$ [%]

Material (acero) $\rho = 7900$ [kg/m³]

Fuerza externa

$F_A = 2000$ [N]

Posición del mecanismo

Ángulo del mecanismo $\alpha = 0$ [°]

Condiciones de operación

Velocidad de operación $V_1 = 400$ [mm/s]

Aceleración $t_1 = 0.15$ [s]

Precisión de Detención

Precisión de Detención $\Delta l = 1.5$ [mm]

Carga inercial

$$J_W = m \times \left(\frac{P_B \times 10^{-3}}{2\pi} \right)^2 = 2.5330e-5 \quad [\text{kg}\cdot\text{m}^2]$$

$$J_S = \frac{\pi}{32} \rho L_B \times 10^{-3} (D_B \times 10^{-3})^4 = 1.5148e-4 \quad [\text{kg}\cdot\text{m}^2]$$

$$J_L = J_W + J_S = 1.7681e-4 \quad [\text{kg}\cdot\text{m}^2]$$

Velocidad requerida

$$V_m = V_1 \left(\frac{60}{P_B} \right) = 2400 \quad [\text{r}/\text{min}]$$

Torque requerido

$$T = (T_a + T_L)(\text{Safety Factor}) = 4.2822 (\text{Safety Factor}) = 8.564 \quad [\text{N}\cdot\text{m}]$$

Aceleración del torque

$$T_a = J_L \frac{V_m}{9.55 \times t_1} = 0.2962 \quad [\text{N}\cdot\text{m}]$$

Carga del torque

$$F = F_A + (m \times 9.8)(\sin\alpha + \mu\cos\alpha) = 2049 \quad [\text{N}]$$

$$T_L = \left(\frac{F \times P_B \times 10^{-3}}{2\pi} \times 1.1 + T_B \right) \frac{1}{\eta} \times 0.01 = 3.986 \quad [\text{N}\cdot\text{m}]$$

Precisión de parada requerida

$$\Delta\theta = \Delta l \left(\frac{360^\circ}{P_B} \right) = 54 \quad [\text{deg}]$$

4.6 Apéndice D

4.6.1 Código del sistema de control (Arduino)

```
#include <AccelStepper.h>
#include <LiquidCrystal.h>

// Configuración del LCD
const int rs = 2, en = 3, d4 = 4, d5 = 5, d6 = 6, d7 = 7;
LiquidCrystal lcd(rs, en, d4, d5, d6, d7);

// Definición de pines
int driverDir = 9;
int driverPul = 8;
int potvel = A0;
int potamp = A1;
int botoncasa = 10;
int botonfrenado = 11;
int botonmenu = 12;

// Variables para almacenar valores de velocidad, amplitud y posición
float speed = 0;
float velfin = 0;
float amp = 0;
float ampfin = 0;
int pos = 0;

// Definición del número de pasos por milímetro
const float pasospormilimetro = 40.0; // Ajusta según las especificaciones de tu
actuator

// Inicialización del motor paso a paso
AccelStepper stepper(1, driverPul, driverDir);

// Variables para leer valores de los potenciómetros
int potvalorvel = 0;
int potvaloramp = 0;

// Estado de los botones
int limit = 0;
int estadobotonfrenado = 0;
int estadobotoncasa = 0;
int estadobotonmenu = 0;

// Variables para cálculos
float rpm = 0;
float v = 0;
float nsteps = 0;
```

```

float a = 0;
float oldspeed = 0.0;
int lag = 1;
int last = 0;
float oldpos = 0.0;

void setup() {
  // Configuración de pines de botones y LCD
  pinMode(botonfrenado, INPUT);
  pinMode(botoncasa, INPUT);
  pinMode(botonmenu, INPUT);

  // Inicialización del LCD
  lcd.begin(16, 2);
  lcd.setCursor(3, 0);
  lcd.print("INICIANDO");
  lcd.setCursor(3, 1);
  lcd.print("PROGRAMA...");
  delay(2000);
  menu();
  lcd.clear();
  Home();
  delay(5000);
  lcd.clear();
  lcd.print("Pos:          ");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("v          a ");

  // Configuración inicial del motor
  stepper.setMaxSpeed(speed);
  stepper.setAcceleration(500);
  stepper.moveTo(amp / 2);

  // Configuración del Timer1 para el movimiento cíclico
  // ...

  // Inicialización de la comunicación serial
  Serial.begin(2000000);
  Serial.println("Steps          a(steps/s^2)          v(steps/
s)");
  Serial.println("-----\n");
  Serial.println("-----\n");

  sei(); // Habilitar interrupciones globales
}

void loop() {
  Pantalla();
  posicion();
}

```

```

    freno();
    valuesprint();
}

void valuesprint() {
    nsteps = pos;
    v = stepper.speed();
    a = stepper.acceleration();

    oldpos = pos;
    oldspeed = v;
    last = millis();

    // Impresión de valores
    Serial.print(String(nsteps) + "\t\t");
    Serial.print(String(a, 2) + "\t\t\t");
    Serial.println(String(v));
}

// Función de interrupción del Timer1
ISR(TIMER1_COMPA_vect) {
    stepper.setAcceleration(5000);
    if (stepper.distanceToGo() == 0) {
        stepper.moveTo(-stepper.currentPosition());
    }
    stepper.run();
}

void freno() {
    estadobotonfrenado = digitalRead(botonfrenado);
    while (estadobotonfrenado == HIGH) {
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("  FRENO DE    ");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("  EMERGENCIA  ");
        stepper.stop();
        stepper.disableOutputs();
    }
}

void menu() {
    estadobotonmenu = digitalRead(botonmenu);
    lcd.clear();
    while (estadobotonmenu == LOW) {
        potvalorvel = analogRead(potvel);
        speed = map(potvalorvel, 0, 1023, 100, 1000);
        potvaloramp = analogRead(potamp);
        amp = map(potvaloramp, 0, 1023, 400, 9000);
        lcd.setCursor(0, 0);
    }
}

```

```

    lcd.print("Vel=" + String(speed, 0) + "Pasos/s");
    lcd.print("
                ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Amp=" + String(amp, 0) + "Pasos");
    lcd.print("
                ");
    estadobotonmenu = digitalRead(botonmenu);
}
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("VALORESGUARDADOS");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(String(speed, 0) + "mm/s " + String(amp, 0) + "mm");
delay(4000);
}

void Home() {
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Moviendo hacia");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Posicion inicial");
    estadobotoncasa = digitalRead(botoncasa);
    stepper.setMaxSpeed(800);
    stepper.setAcceleration(500);
    stepper.moveTo(-10000);
    while (estadobotoncasa == LOW) {
        if (stepper.distanceToGo() != 0);
        stepper.run();
        freno();
        estadobotoncasa = digitalRead(botoncasa);
    }

    stepper.setAcceleration(500);
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(3, 0);
    lcd.print("CENTRANDO");
    lcd.setCursor(5, 1);
    lcd.print("FLAP");
    stepper.setCurrentPosition(0);
    stepper.stop();
    stepper.moveTo(5000);
    while (stepper.distanceToGo() > 0) {
        stepper.run();
        freno();
    }
    delay(2000);
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(5, 0);
    lcd.print("FLAP");
    lcd.setCursor(3, 1);

```

```

    lcd.print("CENTRADO");
    stepper.setCurrentPosition(0);
    stepper.stop();
}

void posicion() {
    if (stepper.distanceToGo() > 0) {
        pos = stepper.distanceToGo();
    } else {
        pos = amp + (stepper.distanceToGo());
    }
}

void Pantalla() {
    lcd.setCursor(4, 0);
    lcd.print(pos);
    lcd.print("    ");
    lcd.setCursor(11, 1);
    lcd.print(String(amp, 0) + "mm");
    lcd.print("mm");
    lcd.setCursor(1, 1);
    lcd.print(speed, 0);
    lcd.print("mm/s");
    lcd.setCursor(12, 0);
    lcd.print("ok");
}

```

4.6.2 Código para guardar valores registrados del motor paso a paso (Python)

Este código se utiliza para capturar datos desde un puerto serial, formatearlos y guardarlos en un archivo Excel.

```

import serial
import xlwt
from datetime import datetime

class SerialToExcel:

    def __init__(self, port, speed):
        # Inicializa la clase con el puerto serial y la velocidad especificada.
        self.port = port
        self.speed = speed

        # Crea un nuevo libro de Excel y agrega una hoja llamada "Data from
        Serial".
        self.wb = xlwt.Workbook()
        self.ws = self.wb.add_sheet("Data from Serial", cell_overwrite_ok=True)

```

```

# Escribe un encabezado en la hoja.
self.ws.write(0, 0, "Data from Serial")

# Inicializa la lista de columnas con una columna llamada "Date Time".
self.columns = ["Date Time"]

# Inicializa el número de registros a 100.
self.number = 100

def setColumns(self, col):
    # Permite agregar columnas personalizadas a la lista de columnas.
    self.columns.extend(col)

def setRecordsNumber(self, number):
    # Permite establecer el número de registros a leer desde el puerto
serial.
    self.number = number

def readPort(self):
    # Abre el puerto serial con la configuración especificada.
    ser = serial.Serial(self.port, self.speed, timeout=1)
    c = 0

    # Escribe los nombres de las columnas en la fila 1 de la hoja de Excel.
    for col in self.columns:
        self.ws.write(1, c, col)
        c = c + 1

    self.fila = 2 # Inicializa el número de fila en 2.

    i = 0
    while i < self.number:
        line = str(ser.readline()) # Lee una línea desde el puerto serial.
        if len(line) > 0:
            now = datetime.now()
            date_time = now.strftime("%m/%d/%Y, %H:%M:%S") # Obtiene la
fecha y hora actual.
            print(date_time, line)

            # Divide la línea en columnas separadas por comas.
            if line.find(","):
                c = 1
                self.ws.write(self.fila, 0, date_time) # Escribe la fecha y
hora en la columna 0.
                columnas = line.split(",")
                for col in columnas:
                    self.ws.write(self.fila, c, col) # Escribe los datos en
las columnas correspondientes.

```

```

        c = c + 1

        i = i + 1
        self.fila = self.fila + 1

def writeFile(self, archivo):
    # Guarda el archivo de Excel con el nombre especificado.
    self.wb.save(archivo)

```

El código presentado trabaja en conjunto con el siguiente código, el cual crea una instancia de la clase SerialToExcel, configura las columnas personalizadas y el número de registros a leer desde el puerto serial, y luego lee los datos del puerto serial y los guarda en un archivo Excel con el nombre "Resultado.xls".

```

# Importa la clase SerialToExcel desde el archivo serialToExcel.py
from serialToExcel import SerialToExcel

# Crea una instancia de SerialToExcel con la configuración del puerto COM3 a
2,000,000 baudios.
serialToExcel = SerialToExcel("COM3", 2000000)

# Define una lista de nombres de columnas personalizadas.
columnas = ["Steps", "a(steps/s^2)", "v(steps/s)"]

# Configura las columnas personalizadas en la instancia serialToExcel.
serialToExcel.setColumns(["Steps", "a(steps/s^2)", "v(steps/s)"])

# Establece el número de registros a leer desde el puerto serial en 3000.
serialToExcel.setRecordsNumber(3000)

# Lee datos desde el puerto serial.
serialToExcel.readPort()

# Guarda los datos en un archivo Excel llamado "Resultado.xls".
serialToExcel.writeFile("Resultado.xls")

```

4.7 Apéndice E

4.7.1 Resultados obtenidos de la ola creada

Tabla 4.1

Variación de la altura de la ola creada en función del tiempo

t (s)	H(m)
0.0	-0.0926932
0.4	-0.61925
0.8	-1.15498
1.2	-0.905422
1.6	-0.371218
2.0	-1.44705
2.4	-1.33677
2.8	-0.943431
3.2	-0.169697
3.6	0.785425
	.
	.
	.

Fuente. Autor.

Tabla 4.2

Calculo de máximos locales

Max V.	0.08530
Min. V.	0.00065
Range	0.08465
$\Delta\zeta$	0.00846
Mean value μ [m]	0.02554
Mean square μ [m²]	0.00096
Std. Desv. σ	0.01767
Variance σ^2 [m²]	0.00031

Intervals	f(t)	Class Mark	Mi	P [1/m]		Mi C.M. /N	Mi C.M. ² /N	Rayleigh
				Mi/N	Mi/N Δζ			
0	0.00	0.00						
1	0.01	0.00	27.000	0.189	22.305	0.001	0.000	15.045
2	0.02	0.01	27.000	0.189	22.305	0.003	0.000	32.132
3	0.03	0.02	29.000	0.203	23.957	0.004	0.000	32.608
4	0.03	0.03	24.000	0.168	19.827	0.005	0.000	22.344
5	0.04	0.04	14.000	0.098	11.566	0.004	0.000	11.221
6	0.05	0.05	12.000	0.084	9.913	0.004	0.000	4.265
7	0.06	0.06	3.000	0.021	2.478	0.001	0.000	1.248
8	0.07	0.06	1.000	0.007	0.826	0.000	0.000	0.283
9	0.08	0.07	3.000	0.021	2.478	0.002	0.000	0.050
10	0.09	0.08	3.000	0.021	2.478	0.002	0.000	0.007
		N	143.000		SUM	0.026	0.001	

Fuente. Autor.

Tabla 4.3

Datos obtenidos del espectro de la ola en función de la frecuencia

Frecuencia [Hz]	S [m ² /Hz]
0.000	9.37E-07
0.005	2.65E-06
0.010	3.05E-06
0.015	4.22E-06
0.020	7.94E-05
0.024	3.42E-04
0.029	4.29E-03
0.034	2.92E-02
0.039	2.26E-02
0.044	1.96E-02
.	.
.	.
.	.

Nota: Software empleado: Analizador_Señales_timeregistanalV28072021.

Figura 4.5.

Parámetros estadísticos de la ola

```

m0 (from spectrum)           : 0.7333E-03 un^2
m2 (from spectrum)           : 0.1278E-04 un^2 Hz^2
m4 (from spectrum)           : 0.4571E-05 un^2 Hz^4
eps (from mo, m2, m4)       : 0.9753E+00
sig**2 (from time register)  : 0.6367E-03 un^2
Mean upcrossing period (time reg.): 0.7779E+01 sec
Mean betw.crest period (time reg.): 0.2555E+01 sec

Number of maxima              : 511 #
Number of negative maxima     : 184 #
Number of minima              : 510 #
Number of positive minima     : 177 #

Proportion of negative maxima : 0.3601E+02 %
eps (from rpm)                : 0.9600E+00
Mean value of local maxima    : 0.9983E-02 un
Mean value of local minima    : -.9432E-02 un
Value to be exceed. with 50%prob. : 0.3035E+00 un
Value to be exceed. with 10%prob. : 0.1492E+01 un

```

Nota: Software empleado: Analizador_Señales_timeregistanalV28072021.

4.8 Apéndice F

4.8.1 Cantidad de pruebas en la etapa experimental de un dispositivo WEC

Tabla 4.4

Numero de campañas experimentales de un dispositivo WEC en una instalación marina

Etapa de desarrollo tecnológico	MÍNIMO		MÁXIMO	
	Nº Pruebas	Nº Campaña Experimental	Nº Pruebas	Nº Campaña Experimental
Etapa 1: Concepto	50	1	500	3
Etapa 1: Rendimiento	250	2	500	3
Etapa 1: Optimización	250	2	500	3
Etapa 2: Validación del diseño	100	3	250	5

Fuente. Autor.

4.8.2 Desglose de los Costos del Generador de Olas mejorado

Tabla 4.5

Costos del generador & absorbedor de olas

Detalle	Costo
Electrónica	\$ 161.75
Motor + Controlador	\$ 1,265.04
Actuador Lineal	\$ 292.71
Mecanizado de piezas + Material	\$ 489.82
Sistema de seguridad (sensores)	\$ 400.00
Total	\$ 2,609.32

Fuente. Autor.

4.8.3 Desglose de los Costos

Tabla 4.6

Salario del personal

Detalle	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total	
Técnico de experimentación	1	\$1,200.00	\$1,392.87	
Conserje + Limpieza	1	\$600.00	\$696.43	
Asistente administrativo	1	\$800.00	\$928.58	Anual
TOTAL		\$2,600.00	\$3,017.88	\$36,214.56

Fuente. Autor.

Tabla 4.7*Mantenimiento del canal hidrodinámico*

Mantenimiento mensual				
Detalle	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total	
Pastillas por filtro	12	\$1.00	\$84.00	
Sulfato aluminio	3	\$0.72	\$0.95	
Sulfato de cobre	1	\$4.02	\$1.77	
Cloro granulado	2	\$2.41	\$2.12	Anual
TOTAL		\$8.15	\$88.84	\$1,066.08

*Fuente. Autor.***4.8.4 Costo de operación anual****Tabla 4.8***Costos operativos (anual)*

Detalle	Valor
Personal	\$36,214.56
Mantenimiento	\$1,066.08
Luz + Agua (Gastos)	\$2,200.00
TOTAL	\$39,480.64

Fuente. Autor.

4.8.5 Desglose de los costos de la obra civil

Tabla 4.9

Detalle de los costos de la obra civil de un canal hidrodinámico

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	MATERIALES	MANO DE OBRA	EQUIPO	COSTO DIRECTO	COSTO TOTAL
AUXILIARES						
PARA HORMIGONES						
* AUX: HORMIGÓN SIMPLE F'C=90 KG/CM2	m3	61.21	0.00	0.00	\$61.21	\$37,276.89
OBRAS PRELIMINARES						
BODEGAS Y OFICINAS VARIOS USOS	m2	14.14	4.10	0.30	\$18.54	\$222.48
LIMPIEZA MANUAL DEL TERRENO	m2	0.00	1.36	0.32	\$1.68	\$1,023.12
ESTRUCTURA						
HORMIGÓN						
HORMIGÓN ARMADO GRADA F'C=210 KG/CM2 , ESCALÓN DE 30X18X120 CM	m	100.93	42.35	19.26	\$162.54	\$4,713.66
ACERO						
ACERO DE REFUERZO FY= 4200 KG/CM2 8-12 MM CON ALAMBRE GALV. N°18	kg	1.34	0.45	0.18	\$1.97	\$3,045.00
ENCOFRADOS DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES						
MADERA						
ENCOFRADO CIRCULAR CON MEDIA DUELA DE EUCALIPTO (1 USO)	m2	21.92	6.84	3.29	\$32.05	\$6,506.15
RECUBRIMIENTOS						
RECUBRIMIENTOS EN PISOS						
BALDOSA DE GRANITO FONDO GRIS	m2	48.31	6.10	6.00	\$60.41	\$12,263.23
RECUBRIMIENTOS EN PAREDES						
EMPASTE EXTERIOR	m2	1.88	2.03	0.28	\$4.19	\$850.57
EMPASTE INTERIOR	m2	0.63	1.63	0.22	\$2.48	\$503.44
PINTURA ESMALTE / REJAS DE HIERRO CON EQUIPO: COMPRESOR DE AIRE	m2	2.01	2.96	1.50	\$6.47	\$1,313.41

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	MATERIALES	MANO DE OBRA	EQUIPO	COSTO DIRECTO	COSTO TOTAL
PINTURA PARA CERÁMICA DE BAÑOS	m2	5.82	2.87	0.27	\$8.96	\$1,818.88
CARPINTERÍA						
CARPINTERÍA METÁLICA / VIDRIOS						
VENTANA CORREDIZA DE ALUMINIO NATURAL Y VIDRIO FLOTADO 6 MM	m2	48.04	8.13	4.88	\$61.05	\$122.10
INSTALACIONES HIDROSANITARIAS						
INSTALACIONES DE AGUA POTABLE EDIFICACIÓN						
LLAVE DE MANGUERA CONTROL DIAM. 1/2"	u	11.63	19.35	4.50	\$35.48	\$709.60
LLAVE DE PASO 1/2"	u	7.57	17.20	4.00	\$28.77	\$575.40
TUBERÍA ACERO INOXIDABLE D = 12 MM	m	13.73	1.28	0.15	\$15.16	\$303.20
INSTALACIONES SANITARIAS AGUAS SERVIDAS						
CANAL RECOLECTOR DE AGUAS LLUVIAS 4"	m	6.66	1.22	0.22	\$8.10	\$234.90
PUNTO DE DESAGÜE DE PVC 110 MM, INC. ACCESORIOS	pto	36.08	16.26	2.00	\$54.34	\$1,575.86
APARATOS SANITARIOS						
ACCESORIOS DE BAÑO (TOALLERO, PAPELERA, GANCHO)	jgo	16.92	6.45	1.50	\$24.87	\$24.87
INODORO BLANCO LÍNEA ECONÓMICA	u	77.68	24.63	3.03	\$105.34	\$105.34
LAVAMANOS CON PEDESTAL (NO INC. GRIFERÍA)	u	54.82	18.94	2.33	\$76.09	\$76.09
INSTALACIONES ELÉCTRICAS						
ILUMINACIÓN Y FUERZA						
ACOMETIDA ELECTRICA 110 V	m	3.59	3.17	0.39	\$7.15	\$207.35
ACOMETIDA ELECTRICA 220 V	m	4.56	4.31	0.53	\$9.40	\$272.60
SISTEMA CONTRA INCENDIOS EQUIPOS						
ESTACIÓN MANUAL DOBLE ACCIÓN	u	28.00	4.03	1.00	\$33.03	\$33.03
AGUA POTABLE						
TUBERÍA PVC E/C 25 MM 1.6 MPA	m	1.61	0.33	0.04	\$1.98	\$57.42
					TOTAL	\$73,834.59

Nota. Los costos por unidad fueron obtenidos de la Cámara de la Industria de la Construcción (CAMICON), 2022.

4.8.6 Flujo de caja

Tabla 4.10

Flujo de caja de la construcción de un canal hidrodinámico en el Ecuador.

	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	
INGRESOS		\$60,000.00	\$61,500.00	\$63,037.50	\$64,613.44	\$66,228.77	
COSTOS		\$37,280.64	\$38,399.06	\$39,551.03	\$40,737.56	\$41,959.69	
GASTOS		\$2,200.00	\$2,266.00	\$2,333.98	\$2,404.00	\$2,476.12	
variación		\$20,519.36	\$20,834.94	\$21,152.49	\$21,471.88	\$21,792.97	
INV. INICIAL	\$-105,146.45						TOTAL
SALDOS	\$-105,146.45	\$20,519.36	\$20,834.94	\$21,152.49	\$21,471.88	\$21,792.97	\$105,771.63

Fuente. Autor.

