



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

**Generación de energía eléctrica mediante el
aprovechamiento de la energía del mar**

presentada por

Ing. Salvador Elí Durán Morales

Como requisito para la obtención del grado de

**Maestro en Ciencias en Ingeniería
Electrónica**

Director de tesis

Dra. Susana Estefany De León Aldaco

Codirector de tesis

Dr. Jesús Aguayo Alquicira

Cuernavaca, Morelos, México. Febrero 2026

Aceptación del documento de tesis



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico
Departamento de Ingeniería Electrónica

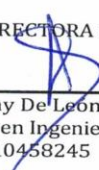
Cuernavaca, Mor; 16/diciembre/2025
Oficio No. DIE/220/2025

Asunto: Aceptación de documentos.

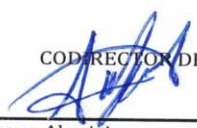
DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **C. SALVADOR ELI DURAN MORALES**, con número de control **M24CE021** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado **"GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL MAR"**, y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTORA DE TESIS


Dra. Susana Estefany De León Aldaco
Doctora en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 10458245

CODIRECTOR DE TESIS


Dr. Jesús Aguayo Alquicira
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 4706315

REVISOR 1


Dr. Enrique Quintero Marmol Márquez
Doctor en Ciencias en Ingeniería Química
Cédula profesional 10259407

REVISOR 2


M.C. Alfredo González Ortega
Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 5695647

C.p. Mtra. Verónica Sotelo Boyas. Jefa del Departamento de Servicios Escolares
Estudiante
JGM/kmqh



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 2224,
e-mail: die@cenidet.tecnm.mx

cenidet
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico



Autorización de impresión de tesis



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico
Subdirección Académica

Cuernavaca Mor, **17/diciembre/2025**

Oficio No. SAC/297/2025

Asunto: Autorización de impresión de tesis

SALVADOR ELI DURAN MORALES
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL MAR"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

"Conocimiento y Tecnología al Servicio de México"

CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



c.c.p. Departamento de Ingeniería Electrónica
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 4104,
e-mail: acad_cenidet@tecnm.mx tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico



Resumen

En los últimos años, la creciente demanda de energía eléctrica y los efectos del cambio climático han impulsado la búsqueda de fuentes de energía renovables más limpias y sostenibles. Entre ellas, la energía del mar se ha consolidado como una alternativa prometedora, al combinar alta disponibilidad y buena predictibilidad. Sin embargo, los sistemas de energía mareomotriz se enfrentan a diversos desafíos, principalmente las variaciones en los niveles de agua de los embalses, las pérdidas por turbulencia y fricción, y la falta de continuidad en la generación de energía.

En este trabajo, se desarrolló un sistema de energía mareomotriz a pequeña escala para analizar el comportamiento del flujo y la energía generada por el movimiento del agua. Para ello, se diseñó y construyó un modelo experimental utilizando un depósito acrílico de 5 litros con una altura total de 1 metro, simulando el funcionamiento controlado de una central eléctrica real. Se implementó una etapa básica de electrónica de potencia para convertir la energía hidráulica en energía eléctrica, y los resultados obtenidos se compararon mediante simulaciones y ensayos experimentales. Los datos mostraron una buena concordancia entre el modelo matemático y el modelo experimental, con errores mínimos en voltaje y corriente.

Posteriormente, se introdujo un esquema de control que combina los métodos MPPT (Perturbación y Observación), PI y PWM, logrando la estabilización de la potencia eléctrica y extendiendo el tiempo de generación. Este control permite un uso más eficiente del recurso hidráulico, demostrando que un diseño sencillo puede mantener una producción estable.

En general, este proyecto confirma la viabilidad de generar energía limpia aprovechando tanto el movimiento del agua, y establece una sólida base experimental para el desarrollo de futuros sistemas híbridos para la generación sostenible.

Abstract

In recent years, the growing demand for electricity and the effects of climate change have driven the search for cleaner and more sustainable renewable energy sources. Among these, ocean energy has established itself as a promising alternative, combining high availability and good predictability. However, tidal energy systems face several challenges, primarily variations in reservoir water levels, losses due to turbulence and friction, and a lack of continuity in energy generation.

In this work, a small-scale tidal energy system was developed to analyze the flow behavior and the energy generated by water movement. To this end, an experimental model was designed and built using a 5-liter acrylic tank with a total height of 1 meter, simulating the controlled operation of a real power plant. A basic power electronics stage was implemented to convert hydraulic energy into electrical energy, and the results obtained were compared through simulations and experimental tests. The data showed good agreement between the mathematical model and the experimental model, with minimal errors in voltage and current.

Subsequently, a control scheme was introduced that combines MPPT (Perturbation and Observation), PI, and PWM methods, achieving electrical power stabilization and extending generation time. This control allows for more efficient use of the hydroelectric resource, demonstrating that a simple design can maintain stable production.

Overall, this project confirms the feasibility of generating clean energy by harnessing both water movement, and establishes a solid experimental foundation for the development of future hybrid systems for sustainable power generation.

Dedicatoria

A mi familia, por ser mi refugio y mi motivación. Gracias por cada palabra de aliento, por cada momento en que creyeron en mí cuando yo dudaba de mí misma. Su amor y apoyo constante han sido la base que me impulsa y la fuerza que me ha permitido llegar hasta aquí.

A mi pareja, por estar ahí para mí en las buenas y en las malas. Gracias por tu paciencia, por tu compañía silenciosa cuando mis pensamientos se cansaban y por recordarme con tu amor que todo esfuerzo tiene sentido.

A mis amigos, cuyas bromas, conversaciones y compañía hicieron el camino más fácil. Gracias por estar ahí, por escucharme, por motivarme y por recordarme que ningún logro se construye solo.

A mis asesores y revisores, cuya guía, observaciones y paciencia me ayudaron a crecer académica y personalmente. Sus contribuciones no solo mejoraron este trabajo, sino que también ampliaron mi forma de pensar y afrontar los desafíos.

Y a todas las personas que estuvieron presentes de una forma u otra en este proceso. Cada gesto, cada consejo y cada palabra se convirtieron en algo más de lo que imaginan.

Este trabajo también es para quienes alguna vez sintieron que no podían seguir adelante. Hoy puedo decir que la fuerza no llega sola: nace dentro de ti cuando decides levantarte y seguir adelante. Nada de esto sería posible sin la decisión diaria de seguir adelante, incluso con miedo, cansancio o dudas.

A todos ustedes, gracias. Este logro también es suyo.

Agradecimientos

Dicen que los sueños nos salvan, que son la chispa que nos recuerda quiénes somos, incluso en los momentos más oscuros. Esta tesis no nació únicamente del estudio, sino también de la fe, la esperanza y las lecciones aprendidas de las múltiples caídas, los intentos y la determinación de no rendirse.

Estoy profundamente agradecido al Instituto Tecnológico Nacional de México (TecNM), al CENIDET y al SECIHTI por brindarme el espacio, los recursos y la beca que hicieron posible este trabajo.

A mi comité de revisión, mi sincero agradecimiento por su dedicación y orientación. Al Dr. Jesús Aguayo Alquicira, mi codirector, por su constante guía, su confianza y su claridad en momentos de duda. A la Dra. Susana Estefany De León Aldaco, mi directora, por su paciencia, dedicación y la pasión que compartió conmigo. A los revisores M.C. Alfredo González Ortega y Dr. Enrique Quintero Mármol, gracias por sus valiosas observaciones y contribuciones que fortalecieron este trabajo. De cada uno de ellos aprendo que la ciencia no solo se basa en el conocimiento, sino también en la humanidad, la inspiración y el compromiso.

A mi familia, mi verdadero pilar. A mi madre, Gabriela Morales Gutiérrez, por enseñarme que la constancia vence al cansancio, que la vida siempre nos da otra oportunidad si tenemos el valor de intentarlo una vez más. A mi padre, Marino Durán Alvarado, por mostrarme que la fortaleza y el trabajo duro son más que virtudes, son el reflejo del amor que uno pone en todo lo que hace. Gracias a ambos por enseñarme que caer no es fracasar, sino una oportunidad para levantarse con más fuerza, y que incluso en los días más difíciles, la fe y el esfuerzo siempre encuentran la manera de abrirse camino.

A mis amigos por su sincero apoyo, risas y palabras de aliento. Especialmente Alan Yabin Hernández Ruiz, Oswaldo Aparicio Rodríguez y José Erik Lozano Martínez.

Y a ti, Abigail López Hernández, gracias por acompañarme en este camino lleno de desafíos. Creíste en mí cuando yo no podía hacerlo, y con cada paso incierto, tu sonrisa, tu paciencia y tu amor fueron el faro que me impulsó a seguir adelante. No fue solo tu compañía, sino tu fe en mí lo que me recordó una y otra vez que, incluso en la tormenta más oscura, siempre hay una razón para continuar.

Porque al final, como en las historias que nos inspiran, ya sea un héroe aprendiendo a volar, alguien que se levanta del suelo o alguien que lucha solo para no perderlo todo, comprendí que el verdadero poder no reside en ganar, sino en nunca rendirse. Y que, aunque la noche sea más oscura antes del amanecer, siempre hay luz para quien decide seguir caminando.

Finalmente, quisiera expresar mi más profundo agradecimiento al Dr. Luis Gerardo Vela Valdés, mi primer asesor. Aunque falleció antes de completar este trabajo, su guía y sus primeras enseñanzas siguen presentes en cada paso de este proyecto. Gracias por iniciar este camino.

Contenido

Aceptación del documento de tesis	2
Autorización de impresión de tesis.....	3
Resumen	4
Abstract.....	5
Dedicatoria	6
Agradecimientos.....	7
Acrónimos.....	11
Lista de figuras	12
Lista de tablas.....	13
Capítulo 1: Introducción.....	15
1. Antecedentes	16
1.1.1 Energía mareomotriz y su relevancia.....	16
1.1.2 Modelos experimentales y simulaciones a pequeña escala.....	16
1.1.3 Modelado matemático y experimental combinado.....	18
1.1.4 Comparación pruebas en campo vs laboratorio.....	19
1.2 Planteamiento del problema.	19
1.3 Propuesta de solución.....	21
1.4 Objetivos	22
1.4.1 Objetivo General.....	22
1.4.1 Objetivos específicos.	22
1.5 Justificación.....	22
1.6 Alcance y limitaciones.....	23
Capítulo 2: Fundamentos teóricos.	27
2.1 Energía mareomotriz.....	27
2.2 Ciclos de operación en centrales mareomotrices.....	29
2.3 Limitaciones del sitio y Eficiencia real.	31
2.4 Limitaciones del recurso y costos.	32
2.5 Impacto en el entorno.	34
2.6 Modelado matemático de un sistema mareomotriz.....	35
2.7 Estrategias de control (PI, MPPT, PWM).	39
2.7.1 Control PI.....	39
2.7.2 MPPT en turbinas mareomotrices.	41

2.7.3 PWM como modulador de potencia.	43
2.8 Estado del arte.	46
2.9 Resultados estado del arte.....	48
2.10 Modelo matemático del sistema propuesto.	49
2.11 Aplicación del modelo a la maqueta.	51
2.12 Estrategias de control implementadas.	53
2.12.1 Control PI.....	53
2.12.2 Algoritmo MPPT (Perturb and Observe).	54
2.12.3 Modulación PWM.	54
2.13 Conclusión del capítulo.....	55
Capítulo 3: Resultados en simulación.....	58
3.1 Introducción.	58
3.2 Dimensiones del sistema modelado.	58
3.3 Resultados de la simulación	60
3.4 Interpretación general	62
3.5 conclusión de la simulación.	63
Capítulo 4: Desarrollo experimental del Prototipo.	65
4.1 Selección del perfil del embalse y materiales del prototipo.	65
4.2 Diseño y dimensionamiento de la maqueta.....	67
4.3 Construcción del prototipo físico.	70
4.4 Sistema eléctrico y medición de datos del prototipo.	72
4.5 Pruebas experimentales del prototipo.....	73
4.6 Fenómenos observados en la práctica.	75
4.7 Resultados de los experimentos.	76
4.8 Conclusión experimental.	79
Capítulo 5: Comparación en simulación de la parte experimental.....	81
5.1 Comparación entre simulación y pruebas reales.....	81
5.2 Comparación de simulación vs Pruebas experimentales.....	81
5.2.1 Interpretación general de las curvas comparativas.	84
5.3 Cálculo de error RMS.....	85
5.4 Conclusiones de la comparación entre simulación y pruebas experimentales.	87
Capítulo: 6 Simulación con controladores.....	89
6.1 introducción.	89

6.2 Integración del esquema de control.....	90
6.3 Parámetros utilizados en la simulación.	91
6.4 Resultados de la simulación con controladores.....	91
6.5 Conclusiones del uso de controladores.	94
Capítulo: 7 Conclusiones	96
7.1 Discusión de resultados.....	96
7.2 Conclusión general.	96
7.3 Trabajos futuros.	97
Bibliografía	99
Anexos.....	104
1.1 Código de simulación sin control.....	104
2.2 Código simulación con controladores.....	107
Apéndices	111

Acrónimos

Acrónimo	Significado
CFD	Computational Fluid Dynamics (Dinámica de Fluidos Computacional)
TSR	Tip Speed Ratio (Relación de Velocidad de Punta)
MPPT	Maximum Power Point Tracking (Seguimiento del Punto de Máxima Potencia)
PI	Controlador Proporcional–Integral
PWM	Pulse Width Modulation (Modulación por Ancho de Pulso)
PMDC	Permanent Magnet Direct Current (Motor de Corriente Directa con Imán Permanente)
CO ₂	Dióxido de carbono
BEM	Blade Element Momentum (Teoría de Momento y Elementos de Aspa)
LCOE	Levelized Cost of Electricity (Costo Nivelado de la Electricidad).
0D	Modelo cero dimensional
CD	Coeficiente de descarga
Cd	Coeficiente de descarga
A(h)	Área efectiva en función de la altura
FOPI	Fractional-Order Proportional-Integral
DFIG	Doubly-Fed Induction Generator (Generador de inducción de doble alimentación)
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator (Generador síncrono de imanes permanentes)
SVR	Support Vector Regression (Regresión de vectores de soporte)
DC	Direct Current (Corriente continua)
DDPMSG	Doubly-fed Permanent Magnet Synchronous Generator (Generador síncrono de imanes permanentes de doble alimentación)
MATLAB	MATrix LABoratory (Entorno de programación y simulación numérica)
Phid	Potencia hidráulica disponible (Hydraulic power)
PeI	Potencia eléctrica (Electrical power)
Q	Caudal (Flow rate)
η	Eficiencia del sistema (Efficiency)
τ	Constante de tiempo (Time constant)
h	Altura del agua (Water height)
Dtubo	Diámetro de la tubería (Pipe diameter)
Ltotal	Longitud total del sistema hidráulico (Total hydraulic length)
V(t)	Voltaje instantáneo (Voltage as a function of time)
v_turbina	Velocidad de la turbina

P _{out}	Potencia entregada a la carga
R _{carga}	Resistencia de la carga
RMS	Root Mean Square (Raíz Cuadrada Media)
P&O	Perturb and Observe (Perturbar y Observar)
Δ Duty	Cambio en el ciclo de trabajo de PWM (Duty Cycle)
DC–DC	Convertidor de corriente continua a corriente continua (DC–DC Converter)

Lista de figuras

Figura 1 Modelos 3D sólidos de turbinas de corrientes de marea de eje horizontal [8].	17
Figura 2 Modelo 3D del recipiente de prueba [10].	18
Figura 3 Modelo a pequeña escala de la turbina de corriente marina contrarrotante [11].	18
Figura 4 Turbina instalada en el Laboratorio de Hidrodinámica Kelvin [13].	19
Figura 5 Diagrama de bloques nivel de agua mínimo.	19
Figura 6 Diagrama de bloques nivel de agua máximo.	20
Figura 7 Diagrama de bloques implementación del sistema.	21
Figura 8 Variación mensual de la marea con una curva regular semidiurna [23].	28
Figura 9 Ciclo de simple efecto; embalse único [25].	29
Figura 10 Embalse con turbinas de doble efecto [25].	30
Figura 11 Esquema de ciclos múltiples Belidor para las Islas Chausey [25].	30
Figura 12 Principales emplazamientos potenciales para centrales mareomotrices [23]. ...	31
Figura 13 Altura del agua vs. tiempo.	60
Figura 14 Caudal vs. tiempo.	60
Figura 15 Potencia hidráulica vs tiempo.	61
Figura 16 Potencia eléctrica vs. tiempo.	61
Figura 17 Voltaje vs. tiempo.	62
Figura 18 Corriente vs. tiempo.	62
Figura 19 Diagrama de la maqueta.	67
Figura 20 Deposito superior e inferior.	68
Figura 21 Sistema hidráulico.	69
Figura 22 Fugas observadas durante las pruebas del sistema hidráulico.	70
Figura 23 Construcción del embalse superior e inferior.	70
Figura 24 Instalación del sistema de tubería y turbina.	71
Figura 25 Instrumentación utilizada.	72
Figura 26 Diagrama de bloques simplificado del sistema.	72
Figura 27 Sistema completo.	74
Figura 28 Observación mecánica de la turbina.	75
Figura 29 Registro de mediciones.	75
Figura 30 Voltaje vs tiempo.	82
Figura 31 Corriente vs. tiempo.	83
Figura 32 Potencia eléctrica vs tiempo.	84
Figura 33 Caudal, presión y turbina.	89
Figura 34 MPPT+PI+PWM.	89
Figura 35 Altura del agua vs tiempo.	92

Figura 36 Caudal vs tiempo.....	92
Figura 37 Potencia hidráulica vs tiempo.....	92
Figura 38 Potencia eléctrica vs tiempo.....	93
Figura 39 Voltaje vs tiempo.....	93
Figura 40 PWM.....	93

Lista de tablas

Tabla 1 Estado del arte.....	47
Tabla 2 Comparación de materiales para el embalse de la maqueta.....	66
Tabla 3 Componentes y materiales de la maqueta.....	67
Tabla 4 Señales en la simulación.....	73
Tabla 5 Prueba 1. Voltaje y corriente medidos durante las pruebas experimentales ($R = 1$ k Ω).	77
Tabla 6 Prueba 2. Voltaje y corriente medidos durante las pruebas experimentales ($R = 1$ k Ω).	77
Tabla 7 Prueba 3. Voltaje y corriente medidos durante las pruebas experimentales ($R = 1$ k Ω).	78
Tabla 8 (RMS) entre simulación y experimento.....	86
Tabla 9 Parámetros de implementación del esquema de control en la simulación.	91

Capítulo 1

Introducción

Capítulo 1: Introducción.

Durante las últimas décadas, el mundo en general enfrenta desafíos ante la creciente demanda de energía eléctrica y angustia por el cambio climático, esto ha aproximado la atención hacia el uso e implementación de energías renovables. La energía mareomotriz, es una fuente de energía que comparada con otras fuentes renovables ofrece importantes beneficios en el futuro mercado energético debido a su alta disponibilidad y excelente previsibilidad [1] [2].

Una de las principales formas de generar electricidad, es mediante presas de marea. Estas estructuras se construyen en desembocaduras de ríos o bahías donde las mareas superan los cinco metros de altura. Su funcionamiento se basa en capturar y mantener temporalmente el agua durante la marea alta y liberándola durante la marea baja, moviendo turbinas que producen energía [1].

El rendimiento de una central mareomotriz depende de varios factores, como la cantidad de agua que fluye a través de las turbinas y la ubicación de la presa. Mencionando que un número escaso de turbinas generará poca energía, mientras que demasiadas pueden bloquear el flujo del agua, por lo que es de suma importancia encontrar un equilibrio adecuado [3].

Por otro lado, el cambio climático ha provocado variaciones notables en los patrones de lluvia y en la disponibilidad de agua en distintas regiones del mundo. Esto representa un desafío importante para la generación hidroeléctrica, ya que depende directamente de los recursos hídricos. Además, estas alteraciones no solo afectan la producción de energía, sino también otros usos fundamentales del agua, como la agricultura y el consumo humano [4] [5].

En consecuencia, los cambios en los niveles de agua en los embalses impactan directamente en la producción hidroeléctrica. Estas variaciones hacen que los sistemas sean más vulnerables, especialmente en zonas donde el agua es un recurso limitado. La falta de estabilidad en la disponibilidad hídrica complica el mantenimiento de una producción energética constante [4].

Este trabajo de tesis se centra en analizar el comportamiento de un sistema mareomotriz a pequeña escala. Donde se estudia cómo varía el funcionamiento del sistema, ya que en los embalses pueden presentarse cambios inesperados que afectan su rendimiento. A lo largo del estudio se evalúa también la capacidad del sistema para generar electricidad aprovechando el movimiento natural de las mareas.

1. Antecedentes

1.1.1 Energía mareomotriz y su relevancia.

En [6] Se analiza la energía mareomotriz como una alternativa sostenible a los combustibles fósiles. Se explican los principios físicos de la energía mareomotriz y las principales tecnologías utilizadas, como presas y turbinas.

Actualmente, gran parte de nuestra electricidad proviene de combustibles fósiles, recursos que, además de ser limitados, generan importantes impactos ambientales, como el aumento de las emisiones de CO₂ y el calentamiento global. Por este motivo, las energías renovables han cobrado gran importancia en los últimos años como alternativas más limpias, seguras y fiables.

A diferencia de otras fuentes de energía renovables como la solar y la eólica, la energía mareomotriz tiene la ventaja de ser predecible, ya que sigue ciclos naturales fáciles de calcular. Si bien su instalación requiere una inversión considerable a largo plazo, puede ser competitiva y ofrecer diversos beneficios, como la protección contra inundaciones y el apoyo a las actividades costeras. Aunque existen desafíos ambientales, sobre todo en lo que respecta al uso de represas, la energía mareomotriz se considera una alternativa para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y avanzar hacia un modelo energético más limpio y sostenible.

Por otro lado en [7] estima que la energía oceánica genera hasta 20.000 TWh anuales, suficiente para cubrir la demanda mundial de electricidad. Además, la energía mareomotriz podría aportar hasta 3.000 GW, principalmente en países con extensas costas como China, el Reino Unido, Estados Unidos y Canadá. Su excepcional densidad energética es cuatro veces mayor que la de la energía eólica y 300 veces mayor que la de la energía solar esta la convierte en una opción muy atractiva, tanto desde el punto de vista técnico como económico.

1.1.2 Modelos experimentales y simulaciones a pequeña escala.

De igual forma en [8] analiza, mediante simulaciones CFD, cómo el número de palas (2, 3 y 4) afecta al rendimiento de turbinas mareomotrices de pequeña escala. Los resultados mostraron que la turbina de cuatro palas generó la mayor potencia, alcanzando una relación de velocidad de punta (TSR) óptima cercana a 5.

Estos hallazgos son importantes porque demuestran que el diseño geométrico influye significativamente en la eficiencia de la turbina. Si bien un mayor número de palas puede aumentar considerablemente la producción de energía, también incrementa los costos de fabricación y las fuerzas de arrastre. Por lo tanto, numerosos estudios coinciden en que las turbinas de tres álabes representan un buen equilibrio entre rendimiento, estabilidad y viabilidad económica.

La combinación de ensayos físicos a escala y modelos CFD ha permitido comprender mejor el comportamiento real de las turbinas, prediciendo no solo la

potencia generada, sino también las cargas estructurales y los patrones de flujo alrededor del rotor. Esto ha facilitado la optimización del diseño antes de los ensayos a gran escala, reduciendo los riesgos técnicos y financieros en proyectos futuros.

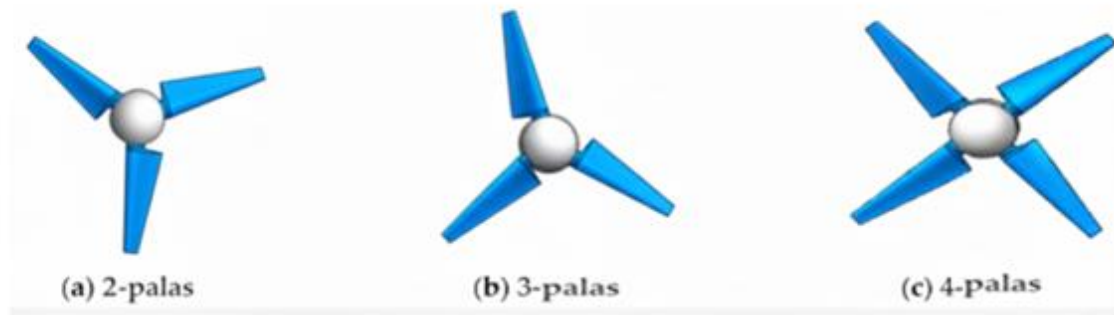


Figura 1 Modelos 3D sólidos de turbinas de corrientes de marea de eje horizontal [8].

Por otro lado en [9] presentaron pruebas experimentales de tres turbinas mareomotrices a escala 1/15 en una disposición compacta con poco espacio entre ellas; en tiempo real, se midieron la potencia generada, la velocidad de rotación y las cargas sobre la estructura.

Se observó que una menor separación aumentaba la potencia de la turbina trasera entre un 5.7 % y un 10.4 %, con un incremento del empuje de entre un 4.8 % y un 7.3 %. Esto se debe a que las turbinas delanteras aceleran el flujo hacia atrás, lo que mejora la recuperación de energía.

Posteriormente en [10] destaca la importancia de contar con instalaciones adecuadas, como canales o tanques de prueba, que respeten la escala geométrica, y que garanticen parámetros específicos como el ancho y la profundidad para la evaluación de los arreglos de turbinas. Para superar las limitaciones de los tanques tradicionales, se propone realizar pruebas en lagos u océanos, utilizando un buque que transporte las turbinas a distancias variables, lo que permite medir el rendimiento y la carga.

Gracias a las simulaciones CFD y las leyes de escala, se definieron el tamaño de la turbina, la velocidad del buque y la ubicación óptima de las unidades. Los resultados muestran que la resistencia del casco es mínima en comparación con la resistencia de la turbina y que los datos obtenidos pueden utilizarse a escala real, lo que ayuda a optimizar el espaciado entre unidades y la densidad de potencia.

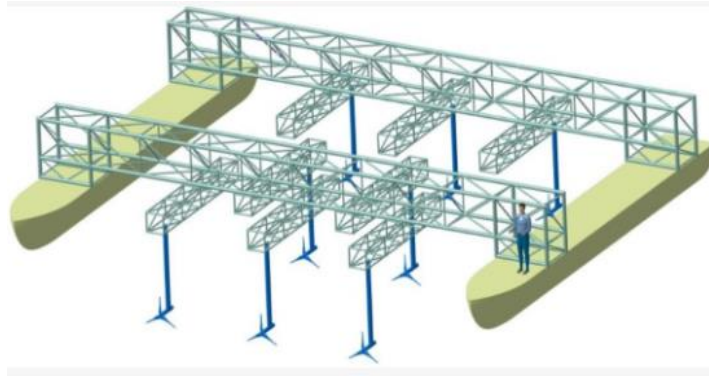


Figura 2 Modelo 3D del recipiente de prueba [10].

Así mismo en [11] trabajó en un modelo de turbina marina de rotor dual contrarrotante con un acoplamiento magnético en el buje. Este diseño magnético reduce significativamente las pérdidas de par en comparación con los acoplamientos tradicionales, mejorando así la eficiencia energética del sistema. Los resultados avalan su viabilidad y sirven de base para el desarrollo de prototipos a escala real.

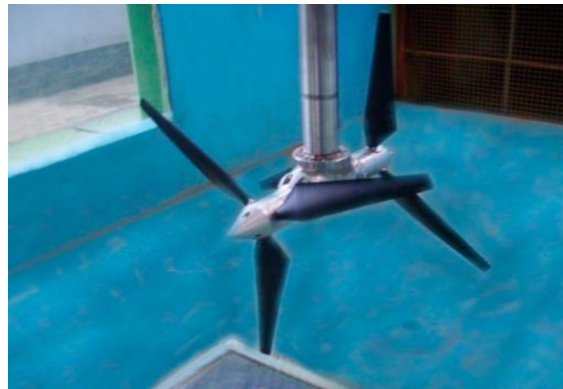


Figura 3 Modelo a pequeña escala de la turbina de corriente marina contrarrotante [11].

1.1.3 Modelado matemático y experimental combinado.

Por otra parte en [12] se desarrolló y probó una turbina submarina de eje horizontal a pequeña escala para corrientes oceánicas, combinando un modelo matemático con simulaciones BEM y ensayos experimentales en una maqueta. La turbina, equipada con un generador PMDC, permitió correlacionar la potencia con la velocidad de rotación. Los resultados se compararon con predicciones teóricas, lo que permitió una evaluación precisa del rendimiento de la turbina y sentó una base sólida para mejorar futuros diseños de dispositivos de energía hidrocinética fiables y eficientes.

1.1.4 Comparación pruebas en campo vs laboratorio.

Finalmente en [13] se comparó el rendimiento de turbinas mareomotrices probadas en el mar, utilizando barcas autopropulsadas en corrientes de marea, con el de las mismas pruebas realizadas en tanques de laboratorio. Se analizaron factores clave como los sensores de velocidad, las técnicas de medición y el procesamiento de datos, lo que reveló diferencias significativas entre ambos métodos. A pesar de estas diferencias, se constató que las pruebas de campo, con un procesamiento de datos adecuado y las correcciones pertinentes, pueden proporcionar resultados fiables, similares a los obtenidos en el laboratorio.

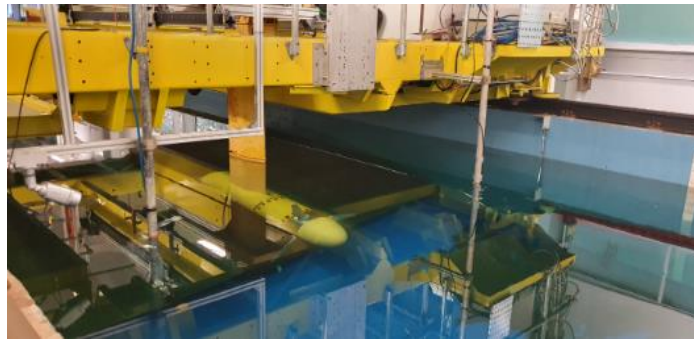


Figura 4 Turbina instalada en el Laboratorio de Hidrodinámica Kelvin [13].

1.2 Planteamiento del problema.

Uno de los principales retos en los sistemas mareomotrices es controlar la variabilidad del nivel de agua en el embalse. Esta variabilidad se refiere a los cambios en la altura y volumen del agua junto con sus fluctuaciones a lo largo del tiempo, la cual afecta directamente la cantidad de energía que se puede generar.

Dentro de este contexto, cuando el nivel de agua es bajo, hay menos presión y volumen para alimentar las turbinas, lo que reduce la producción de energía.



Figura 5 Diagrama de bloques nivel de agua mínimo.

Por otro lado, cuando el nivel del agua es alto, aunque se puede producir más energía, hay riesgo de desbordamientos y pérdida de eficiencia en la gestión del recurso.

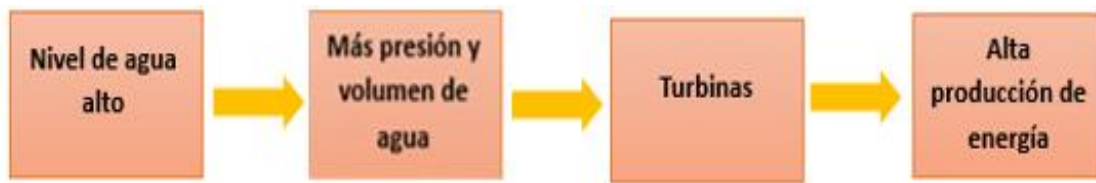


Figura 6 Diagrama de bloques nivel de agua máximo.

La generación de energía mareomotriz no es continua, ya que está sujeta a las variaciones naturales del movimiento del mar. Esta condición plantea la necesidad de desarrollar estudios y modelos a pequeña escala que permitan analizar y comprender mejor estas fluctuaciones, con el fin de optimizar el desempeño de los sistemas y garantizar un aprovechamiento más eficiente y estable del recurso energético.

Varios estudios han explorado los retos de la energía mareomotriz. En [14] señala que esta energía no siempre está disponible de manera constante, ya que depende del lugar y de las variaciones en los ciclos de marea. Por lo que, los sistemas actuales deben diseñarse para adaptarse a estas fluctuaciones.

En esta misma línea en [15] se explica que las presas de marea funcionan como represas dinámicas, pero su eficiencia depende mucho de cómo se gestione el embalse. En otras palabras, un mal manejo puede reducir la producción de energía o, en el peor de los casos, provocar inundaciones o pérdidas del recurso.

De igual forma en [16] destaca la importancia de la modelación numérica de los flujos para anticipar cómo varía el rendimiento y el comportamiento de las turbinas con respecto a los distintos niveles de agua. Por otro lado en [17] en un caso aplicado al estuario del Severn (Reino Unido), demostraron que los desbordamientos por una mala gestión del embalse no solo afectan la eficiencia energética, sino que también incrementa el riesgo de inundaciones y los impactos ambientales.

Por su parte en [18] se muestra que los prototipos a pequeña escala permiten estudiar estas variaciones en condiciones controladas. Esto significa que antes de construir un proyecto grande, podemos ver cómo cambia la potencia, el torque y la velocidad de las turbinas según el nivel del agua, lo que resulta fundamental para tomar decisiones acertadas.

También es importante considerar los fenómenos externos. En [19] sugiere que las presas de marea pueden diseñarse como estructuras adaptativas, capaces de ajustar el nivel del embalse incluso ante tormentas o mareas inusuales. Esto reduce riesgos y facilita una gestión más eficiente. Además en [20] muestra que cambios como el aumento del nivel del mar o la alteración de los canales de acceso afectan directamente la velocidad de las corrientes, afectando de esta forma la capacidad de generación de energía.

1.3 Propuesta de solución

Para abordar este desafío, se propone construir una maqueta de un sistema mareomotriz. Este modelo permitirá observar directamente cómo varía el sistema al aprovechar la energía de las mareas (Figura 7). Proporcionando mediciones reales que servirán de referencia para la comparación y validación de modelos numéricos.

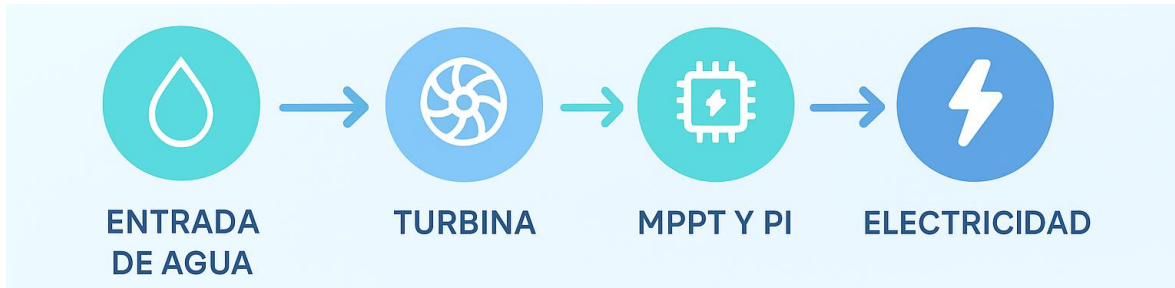


Figura 7 Diagrama de bloques implementación del sistema.

Además, se desarrollarán dos simulaciones:

1. Simulación sin control:

Recrea el funcionamiento del sistema en condiciones similares a las del modelo, es decir, con flujo libre. Esta simulación permitirá comparar directamente el comportamiento con datos experimentales de la maqueta y verificar la precisión con la que el modelo matemático representa la realidad.

2. Simulación con controladores:

Esta versión integra un controlador PI, responsable de estabilizar el sistema y un algoritmo MPPT, cuyo objetivo es maximizar la potencia generada mediante PWM. Esta simulación permite analizar cómo se mejoran la estabilidad, el rendimiento y la eficiencia del sistema al utilizar técnicas de control que no se implementan físicamente en el modelo a escala.

Por lo que:

1.- Diseño y armado de la estructura.

Se construyó una maqueta de un sistema mareomotriz a escala para demostrar de forma clara y sencilla cómo se puede generar energía a partir del movimiento del agua. La maqueta consta de dos depósitos de acrílico: uno superior para almacenar el agua y otro inferior para recibirla. Ambos depósitos están sostenidos por una estructura metálica que mantiene todo firme, estable y alineado para que el flujo de agua llegue correctamente a la turbina.

2.- Flujo de agua y control del caudal.

El agua fluye desde el depósito superior a través de una tubería de PVC, donde una válvula controla el caudal. Al abrirse la válvula, el agua cae sobre la turbina,

haciéndola girar y generando electricidad. Este sistema recrea, a pequeña escala, el funcionamiento de una central mareomotriz y permite observar claramente la conversión del movimiento del agua en energía eléctrica.

3.- Simulación de control y optimización.

Además, se realizaron dos simulaciones para analizar el comportamiento del sistema. La primera se ejecutó sin control para observar directamente el agotamiento natural del embalse y la potencia generada. La segunda simulación implementó un controlador PI y un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), lo que permitió un funcionamiento más estable de la turbina y una mejor utilización de la energía disponible. Estas simulaciones permitieron comparar ambos escenarios y demostraron cómo el uso de controladores puede mejorar significativamente la eficiencia y la estabilidad del sistema.

4.- Observación y análisis del comportamiento.

El modelo permite observar cómo responde el sistema a diferentes niveles de caudal, facilitando la comprensión de su comportamiento dinámico. Esto lo convierte en una herramienta útil para el análisis experimental y la planificación de posibles mejoras en prototipos de energía mareomotriz a gran escala.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General.

Evaluar el desempeño de un sistema mareomotriz a escala para producir electricidad utilizando la energía de las mareas.

1.4.1 Objetivos específicos.

- 1.-Seleccionar perfil del embalse.
- 2.-Realización del diseño y dimensionamiento de la maqueta.
- 3.-Selección de la etapa de electrónica de potencia.
- 4.-Selección del esquema de control.

1.5 Justificación

Este proyecto surge de la necesidad de comprender mejor y aprovechar las fuentes de energía renovables. La energía mareomotriz, aunque aún poco explotada a gran escala, posee un gran potencial gracias a la regularidad y la excelente predictibilidad de las mareas. Sin embargo, las variaciones en el flujo de las mareas y las condiciones locales hacen que sea crucial estudiar cómo generar electricidad utilizando este recurso renovable.

La construcción de una maqueta a escala de un sistema mareomotriz nos permite observar su funcionamiento, desde el movimiento del agua hasta la generación de

electricidad mediante la rotación de la turbina. Esta experiencia práctica nos ayuda a comprender diversos conceptos teóricos y nos permite probar estrategias de control y optimización, como los algoritmos MPPT y los controladores PI, herramientas importantes para maximizar la energía disponible en sistemas reales.

Hoy en día, uno de los mayores retos es garantizar que la energía que utilizamos en todo el mundo sea limpia y sostenible. Con proyectos a pequeña escala, como este modelo, podemos observar el comportamiento del recurso y su estabilidad en el sistema. Esto servirá de base para futuras instalaciones a gran escala que se conectarán a la red, garantizando un suministro estable y fiable y reduciendo significativamente las emisiones de dióxido de carbono.

En pocas palabras, este trabajo es importante porque no solo ayuda a comprender de mejor manera la energía mareomotriz, sino que también ofrece bases prácticas para diseñar e implementar soluciones de ingeniería que respondan a la necesidad de contar con energía limpia, confiable y sostenible

1.6 Alcance y limitaciones

Durante el desarrollo de este proyecto, se identificaron varias limitaciones y aspectos importantes que conviene destacar. Estos no representan fallos, sino aspectos propios al trabajo con modelos y simulaciones en un entorno controlado. Los puntos principales se describen a continuación:

1. Escala reducida de la maqueta.

El prototipo se construyó a pequeña escala, con un depósito de 5 litros y una altura de 1 metro de altura. Esto permitió realizar pruebas seguras y manejables, pero también generó diferencias con respecto al comportamiento de un sistema real. A esta escala reducida, fenómenos como la turbulencia, las pérdidas de presión en las uniones y la fricción del agua en las tuberías son más perceptibles y afectan la eficiencia con mayor rapidez. Por este motivo, los resultados sirven como demostración del principio de funcionamiento, más que como una representación precisa del comportamiento real de un sistema de energía mareomotriz.

2. Condiciones experimentales simplificadas.

Las pruebas se realizaron en un entorno controlado, lo que permitió un control más predecible de los niveles de agua y del vaciado. Sin embargo, no se tuvieron en cuenta factores naturales como las olas, el viento y las variaciones meteorológicas que afectan directamente a un sistema mareomotriz. Esto significa que el modelo refleja un escenario ideal y no las condiciones cambiantes y exigentes a las que se enfrentaría un sistema real.

3. Limitaciones en la simulación hidráulica.

La simulación consideró las pérdidas por fricción y resistencia de la turbina, pero no incluyó fenómenos más complejos como fugas, turbulencia o vibraciones estructurales. Estos efectos, aunque pequeños, pueden modificar el caudal y la potencia generada. No obstante, el modelo resultó útil para comprender la dinámica general y comparar los resultados simulados con los resultados experimentales del modelo a escala.

4. Etapa de electrónica de potencia.

La electrónica del sistema se diseñó con un enfoque básico y funcional para el prototipo. Esto permitió validar el principio de generación y el comportamiento de la carga, pero no se incluyeron dispositivos más avanzados, como convertidores DC-DC de alta eficiencia o estrategias de gestión de energía. Si bien se logró el objetivo de alimentar una carga de baja potencia, el diseño no está pensado para aplicaciones que requieran mayor complejidad o integración con la red eléctrica.

5. Esquema de control.

Se implementaron algoritmos de control como MPPT (seguimiento del punto de máxima potencia), PI (controlador proporcional-integral) y PWM (modulación por ancho de pulsos), pero solo mediante simulación. Esto permitió visualizar cómo se puede estabilizar y optimizar la generación de energía. Sin embargo, la implementación de estos controles en un sistema físico implicaría desafíos adicionales, como el manejo del ruido eléctrico, tiempos de respuesta más lentos y variaciones bruscas en el flujo de agua, aspectos que no se consideraron en este trabajo.

6. Comparación entre simulación y maqueta.

Los resultados de la simulación mostraron una buena concordancia con las mediciones realizadas en el modelo físico. Las diferencias observadas fueron aceptables dentro de los rangos permitidos, lo que confirma que el modelo teórico representa con precisión el comportamiento del sistema experimental. En general, tanto la simulación como las pruebas prácticas mostraron un rendimiento consistente y validaron el principio de conversión de energía propuesto en este proyecto.

7. Alcance energético limitado.

El proyecto se planteó exclusivamente como un sistema a pequeña escala, por lo que el objetivo no era generar grandes cantidades de energía, sino demostrar el principio de funcionamiento de un sistema de energía mareomotriz y analizar su rendimiento en condiciones controladas. Esto significa que los resultados obtenidos sirven principalmente como referencia académica y experimental, pero aún no representan un diseño listo para aplicaciones a gran escala en el mundo real.

8. Alcance del Trabajo.

A pesar de las limitaciones mencionadas, el proyecto logró su objetivo principal: demostrar, mediante simulación y la práctica, el principio de generación de electricidad aprovechando la energía del mar. La maqueta permitió la validación experimental del proceso de conversión de la energía potencial del agua en energía eléctrica, así como el análisis del impacto de los controladores MPPT, PI y PWM en la optimización del sistema.

El desarrollo de la simulación y del prototipo físico proporcionó una sólida base conceptual y técnica sobre la cual se pueden construir versiones más avanzadas del sistema, con mayor realismo, sensores, electrónica de potencia eficiente y control en tiempo real.

En resumen, este trabajo demostró, mediante simulación y aplicación práctica, el proceso de conversión de energía mareomotriz en electricidad, e identificó sus limitaciones y potencial en el mundo real. Los resultados sirven como referencia académica y punto de partida para versiones más avanzadas del sistema, con el objetivo de mejorar la eficiencia y el control en aplicaciones de mayor escala.

Capítulo 2

Fundamentos

teóricos

Capítulo 2: Fundamentos teóricos.

Se le denomina energía marina u oceánica a todo aquella que es transportada por las mareas, corrientes, olas, salinidad o diferencias de temperatura, por lo que cualquier movimiento procedente del mar es energía cinética y potencial.

Los océanos originan dos tipos principales de energía: mecánica y térmica.

La energía mecánica se produce de acuerdo a la rotación de la tierra creando viento en la superficie del océano formando las olas, la gravedad lunar genera mareas y corrientes costeras por la atracción gravitatoria. La energía térmica, por su parte, se obtiene cuando el sol calienta la superficie marina mientras que las profundidades permanecen frías, permitiendo que la diferencia de temperatura se convierta en otro tipo de energía.

Otra manera en la que se puede clasificar la energía marina es con los métodos de conversión, existiendo de esta manera cinco tipos de energía marina.

- a) Energía de las corrientes. Es aprovechada la energía cinética de las corrientes para generar electricidad.
- b) Energía osmótica. Se obtiene a partir de las diferencias de salinidad entre los flujos de agua dulce en el agua de mar.
- c) Energía térmica. Aprovecha las diferencias de temperatura entre la superficie y las profundidades para obtener energía.
- d) Energía de las olas. Se captura el transporte de energía de las olas con dispositivos que flotan o están sujetos al fondo marino.
- e) Energía de mares o mareomotriz. Usa la energía potencial de la diferencia de altura entre la marea baja y la marea alta [21].

2.1 Energía mareomotriz.

La energía mareomotriz es la provista por el movimiento de grandes masas de agua producida por las mareas, es una fuente renovable previsible por su periodicidad diaria y su amplitud según la posición del sol y la luna, el potencial de la energía mareomotriz está en ríos, puertos o desembocaduras de los ríos [22].

En [23] menciona que la energía mareomotriz se basa en el ciclo regular de ascenso y descenso del nivel del mar, generado por las fuerzas gravitacionales del sol y la luna. Si bien este fenómeno es astronómico, diversas variables terrestres influyen en su manifestación, como la distribución de océanos y tierras, la topografía costera y marina, y los fenómenos atmosféricos, que pueden modificar significativamente la intensidad de las mareas. Por lo tanto, aunque las mareas tienen su origen en el cosmos, su expresión en la Tierra está determinada por una compleja interacción entre las fuerzas celestes y las propiedades terrestres.

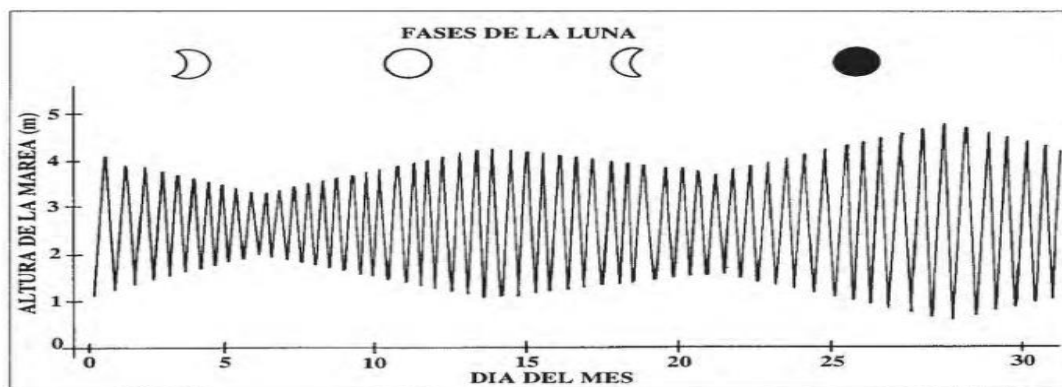


Figura 8 Variación mensual de la marea con una curva regular semidiurna [23].

La utilización de la energía de las mareas o energía mareomotriz, se aprovecha separando un estuario del mar libre mediante un dique, aprovechando la diferencia entre el nivel del mar y la del estuario, Esta técnica se conoce desde la antigüedad y se utilizaba para accionar molinos primitivos de marea en el antiguo Egipto [23].

La idea de aprovechar la energía mareomotriz no es nueva. Los molinos de mareas ya se utilizaban en el siglo VI para convertir el movimiento del agua en energía mecánica útil. Sin embargo, la conversión eficiente de la energía potencial mareomotriz en electricidad no se logró hasta mediados del siglo XX. Los primeros avances prácticos en la construcción de centrales mareomotrices se produjeron en la década de 1960, en particular la central de La Rance en Francia, inaugurada en 1966, y la central ubicada en la bahía de Kislaya, en la antigua Unión Soviética, en 1968 [23] [24].

Para que una central de energía mareomotriz funcione, necesita principalmente retener agua en un área artificial durante la marea alta y liberarla durante la marea baja. Al igual que en las centrales hidroeléctricas, el agua pasa a través de turbinas para producir electricidad [23]. Según [1] existen dos métodos principales para aprovechar la energía: los sistemas de margen mareal (presas o diques) que capturan el agua durante la pleamar y la liberan durante la bajamar, y los sistemas de corriente mareal (turbinas sumergidas) que aprovechan el flujo del agua en canales o estrechos. Ambos tipos ofrecen ventajas como una alta densidad energética y un funcionamiento predecible, pero también presentan importantes desafíos técnicos.

Finalmente en [25] se menciona que los modelos operativos de las centrales mareomotrices demuestran claramente la viabilidad económica de esta fuente de energía a nivel mundial. Su funcionamiento se basa en el almacenamiento y control del flujo de agua para activar turbinas que convierten la energía potencial de las mareas en electricidad.

2.2 Ciclos de operación en centrales mareomotrices

Una central mareomotriz puede funcionar de diversas maneras. Se pueden utilizar ciclos simples o múltiples (con un solo embalse o varios con presas intermedias), así como sistemas con uno o dos factores de potencia (llenado y/o vaciado). Estos sistemas también se pueden combinar con tecnologías de almacenamiento de agua de mar por bombeo [23].

Ciclo simple o de efecto único.

La forma más básica de operar una central mareomotriz es mediante un sistema de efecto simple y ciclo único, que se lleva a cabo en una única toma de agua donde se ubican las turbinas. El agua fluye en una sola dirección, desde este punto hacia el mar. Durante la pleamar, la toma de agua se cierra, creando una diferencia en el nivel del agua cuando la marea baja. En ese momento, la turbina comienza a funcionar hasta que el nivel del agua se iguala nuevamente con la siguiente marea. En estos ciclos de turbina de efecto simple, la producción durante la bajamar se logra llenando el embalse con las compuertas abiertas y luego vaciándolo a través de las turbinas [23] [25].

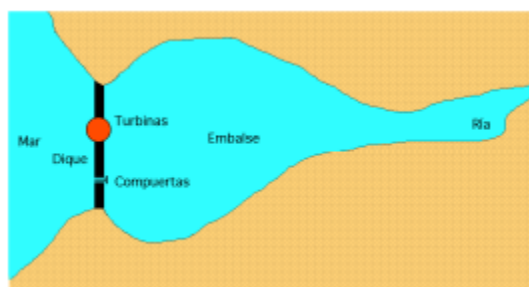


Figura 9 Ciclo de simple efecto; embalse único [25].

Ciclo de doble efecto.

En los ciclos de turbinas de doble efecto, la energía se genera tanto durante la marea alta como durante la baja, por lo que las turbinas deben funcionar eficientemente con el flujo de agua en ambas direcciones, tanto al llenarse como al vaciarse el embalse. Para ello, se pueden utilizar dos tipos de turbinas reversibles o no reversibles estas últimas son más complejas y costosas debido a la necesidad de un sistema especializado de canales y compuertas [25].

Aunque la energía generada es menor que en los ciclos de simple efecto, debido a que la diferencia de altura entre la cuenca y el mar es menor y el flujo y las turbinas no se pueden optimizar tanto, la eficiencia de la planta es mayor. Esto le permite obtener aproximadamente un 18 % más de energía que los sistemas de simple efecto. La planta suele estar en funcionamiento entre 6 y 7 horas por marea, lo que representa entre 12 y 14 horas de generación diaria, con periodos de espera de 2 a 3 horas entre mareas [25].



Figura 10 Embalse con turbinas de doble efecto [25].

Ciclos de bombeo.

Estos sistemas aprovechan tanto la energía mareomotriz como la energía del bombeo, lo que permite que las turbinas puedan funcionar también como bombas. Esta doble función mejora la eficiencia del sistema, permite un uso más racional y rentable de los recursos, y puede aumentar la generación de energía en aproximadamente un 10 %. Sin embargo, las turbinas son equipos costosos y requieren dispositivos de arranque para las bombas, ya que en determinadas situaciones no pueden iniciar el funcionamiento por sí solas, como se ha observado en el embalse de La Rance [25].

Ciclos múltiples.

Estos utilizan varios embalses, lo que permite una producción de energía más continua durante todo el día. Sin embargo, su construcción es demasiado costosa, lo que los hace inviables [25].

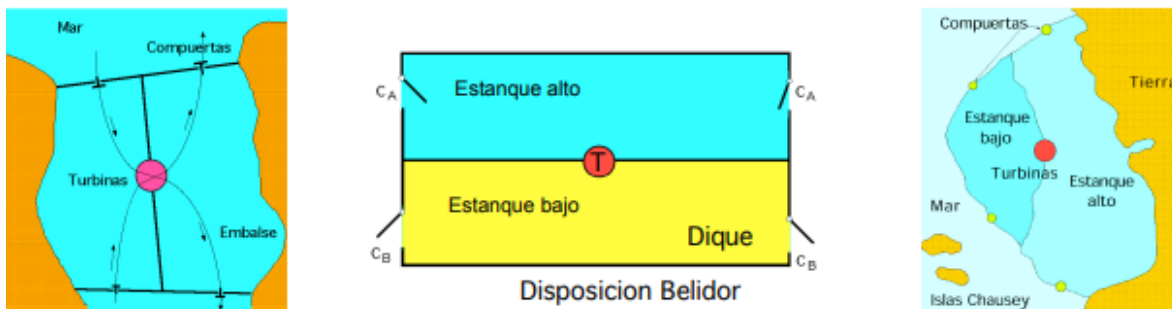


Figura 11 Esquema de ciclos múltiples Belidor para las Islas Chausey [25].

En resumen, la energía mareomotriz representa una fuente de energía renovable predecible y fiable que aprovecha eficazmente los movimientos naturales de las mareas. Si bien su implementación requiere importantes inversiones iniciales y soluciones técnicas complejas, los avances en la tecnología de turbinas y los ciclos operativos demuestran que es posible generar electricidad de forma sostenible y continua. Esto convierte a la energía mareomotriz en una alternativa atractiva para

complementar otras fuentes de energía renovables y contribuir a un suministro energético más limpio y estable.

2.3 Limitaciones del sitio y Eficiencia real.

Según [26] un aspecto clave de la eficiencia de las centrales mareomotrices es que no todas las ubicaciones costeras son adecuadas. Por ejemplo, para que una unidad de corriente de marea genere energía de forma económicamente viable, debe contar con una velocidad de corriente suficientemente alta, un canal o estrechamiento costero que concentre el flujo y la profundidad suficiente para instalar la turbina sin perturbar el lecho o la superficie marina. De este modo se entiende que la extracción de energía de una corriente genera efectos como la reducción de la velocidad del agua (debido al bloqueo de la turbina) y una disminución del nivel del agua (altura) en el canal, lo que reduce la eficiencia general.

Asimismo, [23] señala que, debido a limitaciones técnicas es poco probable que la eficiencia de las centrales mareomotrices supere el 25%. Esto significa que el potencial explotable de esta fuente de energía es significativamente menor que el disponible, ya que sólo hay un número limitado de lugares en el mundo donde las condiciones de marea son adecuadas para su explotación. Se necesitan circunstancias muy especiales de acumulación de agua, amplitud de marea mínima en bahías o estuarios donde la fricción crea suficiente pendiente como para permitir que el agua pase a través de las turbinas por gravedad.



Figura 12 Principales emplazamientos potenciales para centrales mareomotrices [23].

En esta misma línea en [27] destaca que, si bien el potencial teórico de la energía mareomotriz es enorme, en la práctica solo se puede aprovechar una pequeña fracción. Por ejemplo, en un estudio, en un hipotético un parque de turbinas logró extraer apenas el 1.07 % de la energía total presente en el sistema. Esto demuestra

que, incluso en zonas con fuertes corrientes, las pérdidas de energía, las interacciones entre las turbinas y las restricciones de flujo reducen significativamente la eficiencia real. En resumen: no toda la energía del océano se puede convertir en electricidad utilizable.

En términos de eficiencia, los sistemas de energía mareomotriz presentan pérdidas significativas, incluso en ubicaciones óptimas. Por ejemplo, una unidad experimental alcanzó una eficiencia máxima de aproximadamente el 13.54 % con respecto a la energía cinética disponible de la corriente. Esto indica que, si bien la tecnología existe, gran parte de la energía del agua no se convierte en electricidad utilizable. Mediante la optimización de las palas, se han logrado mejoras de eficiencia de entre el 7 % y el 11 %, lo que indica que el potencial de mejora adicional es limitado en muchos casos [28] [29].

Además de las limitaciones relacionadas con la ubicación y los recursos, factores técnicos como la colocación de las turbinas y la profundidad del canal pueden reducir aún más la eficiencia de las centrales mareomotrices.

Por lo que la eficiencia de las centrales mareomotrices depende no solo de la tecnología empleada, sino también de la ubicación de las turbinas. Si se extrae demasiada energía instalando un gran número de turbinas o bloqueando gran parte del flujo de agua, se altera el flujo natural, reduciendo el volumen y, por lo tanto, la energía total disponible. Si las turbinas se colocan demasiado cerca unas de otras, se crean zonas de turbulencia y recirculación, lo que reduce aún más la eficiencia general del sistema [30].

Por otro lado en [31] menciona que algunas tecnologías presentan limitaciones operativas en aguas poco profundas, ya que el nivel del agua determina el tamaño de las turbinas y el rendimiento hidráulico que se puede alcanzar. Esto limita su instalación a lugares donde la marea tiene la altura y el volumen de agua suficientes para permitir un funcionamiento estable y eficiente.

Actualmente se sabe que la eficiencia de las centrales mareomotrices depende tanto de las condiciones naturales del emplazamiento como de factores técnicos, como la disposición de las turbinas y la profundidad del canal. Si bien la energía mareomotriz tiene un gran potencial, en la práctica solo una fracción se puede convertir en electricidad utilizable, por lo que un diseño cuidadoso y una selección adecuada del emplazamiento resultan cruciales para maximizar la eficiencia y minimizar las pérdidas.

2.4 Limitaciones del recurso y costos.

Como se mencionó anteriormente, el número de lugares idóneos para aprovechar la energía mareomotriz es limitado. Además de esta limitación geográfica, uno de los mayores desafíos para estos proyectos es su elevado costo. Si bien las mareas son predecibles, no todas las costas ofrecen las condiciones necesarias para

construir un embalse rentable. En [32] señala que Además de depender de características costeras y oceánicas muy específicas, estos proyectos requieren una inversión considerable y se enfrentan a importantes riesgos ambientales. Por lo tanto, los elevados costes iniciales, junto con las limitaciones geográficas y técnicas, reducen significativamente la viabilidad y la escala potencial de este tipo de instalaciones.

Además de las limitaciones en la disponibilidad de sitios adecuados para la instalación de embalses mareomotrices, el costo representa otra barrera importante. Según [33] el coste nivelado de la electricidad (LCOE) estimado era de aproximadamente 150 £/MWh, mientras que el coste total para los consumidores durante su vida útil sería de 25.78 £/MWh. Estas cifras demuestran que, si bien es técnicamente factible, la electricidad generada por este tipo de embalse resulta cara en comparación con otras tecnologías renovables más consolidadas. De hecho, el gobierno británico rechazó el proyecto, argumentando que: (no ofrecía una buena relación calidad-precio), y subrayó que los elevados costes constituyen un obstáculo importante para la viabilidad económica de los proyectos de energía mareomotriz.

En esta misma línea según [34] Aunque se trata de una tecnología técnicamente viable, sus costes son elevados en comparación con otras fuentes de energía renovables más consolidadas. se estima que el coste nivelado de la electricidad (LCOE) en el Reino Unido se sitúe entre 156 £/MWh y 220 £/MWh en 2025, según el escenario analizado.

Además, lograr reducciones de costes significativas requiere un importante apoyo del mercado mediante incentivos. El alcance de este apoyo depende de la curva de aprendizaje de la tecnología; es decir, de cuánto disminuyen los costes a medida que aumenta la experiencia con su desarrollo. Una curva de aprendizaje más pronunciada (por ejemplo, del 15 %) en comparación con una más lenta (del 12.5 % o del 10 %) puede multiplicar la inversión necesaria para alcanzar los objetivos de costes.

Estos factores, junto con el número limitado de emplazamientos adecuados para turbinas y embalses mareomotrices, demuestran que la viabilidad económica de la energía mareomotriz sigue siendo un gran desafío para su implementación a gran escala.

Por otra parte en [35] se presenta un método para estimar los costos del ciclo de vida de las centrales mareomotrices, indicando que dichos costos incluyen fases como diseño, producción, instalación, operación, mantenimiento y desmantelamiento. Este enfoque demuestra que la viabilidad económica del proyecto, más allá de los recursos físicos, depende en gran medida de los costes y gastos indirectos a lo largo de su vida útil.

En general, las limitaciones geográficas y los elevados costes financieros siguen siendo los principales obstáculos para el despliegue a gran escala de la energía mareomotriz.

2.5 Impacto en el entorno.

El uso de embalses mareomotrices permite el aprovechamiento eficiente de la energía mareomotriz, si bien también genera cambios en el entorno costero. Estas estructuras pueden alterar el flujo natural del agua, afectar los ecosistemas marinos y modificar algunas actividades humanas en la zona circundante. Por lo tanto, es importante evaluar los beneficios energéticos junto con los posibles impactos ambientales y sociales antes de su construcción.

En este sentido, en [36] señala que los embalses de marea pueden alterar significativamente la hidrodinámica local, modificando así los niveles de agua, los tiempos de residencia y la circulación en estuarios o bahías. Esto puede afectar la calidad del agua y la distribución de sedimentos. Según su diseño y ubicación, un embalse puede generar impactos moderados o, en otros casos, aumentar la turbidez y perturbar las zonas de reproducción de las especies costeras.

Por otro lado [37] las barreras de marea afectan la biodiversidad local: pueden reducir el acceso de los peces a las zonas específicas, alterar los hábitats intermareales utilizados por las aves y los organismos bentónicos, y favorecer la acumulación o la disminución de ciertas especies. La experiencia histórica como en La Rance demuestra que estos efectos son reales y duraderos, si bien su magnitud depende en gran medida del diseño y la ubicación. Por lo tanto, la elección del emplazamiento y las medidas de mitigación son cruciales.

Así mismo en [38] indica que los impactos pueden manifestarse tanto a nivel local con cambios en la fauna, mortalidad por el funcionamiento de las turbinas y modificaciones en paredes marinas como una escala más amplia, alterando la dinámica de sedimentos y la morfología costera. Por lo tanto, se recomienda realizar evaluaciones integrales que combinen modelos hidrodinámicos, estudios de calidad del agua y análisis ecológicos antes de la aprobación del proyecto.

Finalmente en [39] menciona que además de los efectos físicos y ecológicos, existen impactos sociales y económicos: cambios en usos tradicionales (pesca, marisqueo), repercusiones en el turismo y en actividades portuarias, y necesidad de compensaciones o medidas adaptativas. Los estudios de impacto suelen incluir también estos aspectos sociales porque la aceptación local y las compensaciones son decisivas para que un embalse sea viable.

En conclusión, los embalses mareomotrices representan una alternativa eficiente y predecible para la producción de energía renovable, pero su implementación debe realizarse con cautela. Los estudios analizados coinciden en que este tipo de infraestructura puede alterar el entorno costero, modificar los ecosistemas y afectar las actividades humanas tradicionales. Por lo tanto, es importante aplicar evaluaciones ambientales y sociales integrales que permitan un equilibrio entre el uso de la energía y la preservación del medio marino y el bienestar de las comunidades locales.

2.6 Modelado matemático de un sistema mareomotriz.

El funcionamiento de un embalse mareomotriz se basa en el principio de aprovechar la diferencia de nivel del agua entre el océano y un espacio confinado para generar energía. Con la subida o bajada de la marea, el agua fluye a través de compuertas y turbinas, convirtiendo la energía potencial de la diferencia de nivel en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica.

El modelo matemático de un embalse mareomotriz ofrece una representación sencilla del comportamiento del sistema al generar energía a partir del movimiento del agua. Mediante ecuaciones básicas, es posible determinar la relación entre el volumen y la altura del agua, la velocidad a la que fluye por la tubería o turbina, y la potencia y energía que el sistema puede producir.

Este tipo de modelado se basa en los principios de conservación de la masa y la energía, y se utiliza ampliamente en estudios de energía mareomotriz para analizar el rendimiento de los embalses y estimar su producción energética.

Según [33] Este proceso puede representarse mediante modelos matemáticos simplificados, conocidos como modelos 0D, que consideran el embalse como un único volumen cuyo nivel de agua varía con el tiempo y en función del caudal que pasa por las turbinas. Estos modelos permiten estimar la energía generada a partir de variables como la diferencia de altura, el caudal y la eficiencia del sistema, lo que los convierte en herramientas útiles para evaluar el rendimiento global de una central mareomotriz.

Por su parte en [19] Explican que el diseño de una presa o laguna mareal busca maximizar la carga hidráulica controlando el flujo de entrada y salida del agua. Su estudio destaca que la relación entre la geometría del embalse, el caudal a través de las turbinas y la diferencia de nivel del agua determina directamente la potencia disponible. Por lo tanto, el modelado matemático se convierte en una herramienta fundamental para comprender y predecir el rendimiento energético del sistema antes de su construcción.

En [37] se utiliza un modelo simplificado que relaciona el nivel del agua en el embalse con su área superficial efectiva $A(h)$ y la diferencia de altura entre el interior y el exterior. A partir de esta diferencia, se estima el caudal a través de las turbinas y se calcula la potencia generada utilizando la densidad del agua, la gravedad y la eficiencia del sistema. Este enfoque permite modelar tanto la dinámica hidráulica como la conversión de energía en el embalse.

El modelo 0D se basa en la conservación del volumen, expresada como (2.1):

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (2.1)$$

Donde:

- V representa el volumen de agua del embalse.

- Q_{in} , Q_{out} son los caudales de entrada y salida.

Si se considera que la superficie del embalse no varía significativamente con el nivel, el volumen y la altura del agua se relacionan mediante la siguiente ecuación (2.2):

$$V = Ah \quad \text{o bien} \quad h = \frac{V}{A} \quad (2.2)$$

Donde:

- A es el área del embalse.
- h es la altura del nivel del agua.

Esta relación nos permite calcular cómo varía el nivel interno del embalse con el volumen, lo que a su vez determina la diferencia de altura entre el embalse y el mar. Esta diferencia, conocida como altura de caída, es la que impulsa el flujo a través de las turbinas y define la potencia generada.

En este modelo, la potencia instantánea se obtiene utilizando la expresión general (2.3):

$$P = \rho g Q h \eta \quad (2.3)$$

Donde:

- ρ es la densidad del agua.
- Q es el caudal que atraviesa las turbinas (m^3/s).
- h es la diferencia de nivel.
- η es la eficiencia del sistema.

En [40] Según el modelo presentado, la energía generada en un embalse mareomotriz generalmente se puede expresar como una función de la diferencia de altura entre la marea y el flujo de agua que pasa a través de las turbinas, lo que proporciona una estimación aproximada de la energía disponible durante cada ciclo de marea.

La potencia generada en un embalse mareomotriz puede expresarse de manera general como (2.4):

$$P = \rho Q h \quad (2.4)$$

Donde:

- P es la potencia generada (W).
- ρ es la densidad del agua
- Q es el caudal que atraviesa las turbinas (m^3/s).

- h es la diferencia de altura entre el nivel del mar y el embalse (m).

Esta ecuación muestra que la potencia depende directamente del caudal y del nivel de agua disponible. Una mayor diferencia de nivel y un mayor caudal dan como resultado una mayor potencia.

El caudal Q se determina a partir del área de flujo de la turbina y la velocidad media del flujo, según la siguiente expresión (2.5):

$$Q=AV \quad (2.5)$$

Donde:

- A es el área de la sección transversal de la abertura de la turbina (m^2),
- V es la velocidad del flujo de agua (m/s).

Estudios recientes sobre el comportamiento hidráulico de los embalses de marea resaltan la importancia de definir correctamente la zona de flujo que conecta el embalse con las turbinas. Esta zona, que corresponde a la sección transversal del canal, determina el volumen de agua que puede fluir durante el llenado o el vaciado.

Según [32] El área de la sección transversal se calcula en función del diámetro de la tubería o compuerta utilizando la siguiente expresión (2.6):

$$A_t = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (2.6)$$

Donde

- A_t es el área de la sección transversal (m^2).
- D es el diámetro interno del conducto (m).

A partir de este valor, el caudal a través del sistema se calcula mediante (2.7):

$$Q = CDA_t\sqrt{2g\Delta h} \quad (2.7)$$

Donde

- CD representa el coeficiente de descarga.
- g aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2).
- Δh la diferencia de altura entre el embalse y el nivel de descarga.

Esta formulación nos permite establecer la relación entre la geometría del sistema y el caudal disponible, demostrando que un mayor diámetro o una mayor diferencia de altura incrementa el flujo de agua y, por lo tanto, la potencia generada [32].

Retomando el modelo de [40] la velocidad del flujo está relacionada con la diferencia de altura mediante una expresión empírica basada en la ecuación de Bernoulli,

ajustada por un coeficiente de salida C_d que representa las pérdidas de energía debidas a la fricción y la turbulencia (2.8):

$$V = C_d \sqrt{2gh} \quad (2.8)$$

Donde

- C_d representa el coeficiente de descarga.
- g es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2).

Al insertar estas expresiones en la primera ecuación, se obtiene una forma más completa que permite calcular la potencia en función del área, la altura y la eficiencia del sistema (2.9):

$$P = \eta A \rho g H^{\frac{3}{2}} \frac{C_d}{\sqrt{2}} \quad (2.9)$$

Donde

- η representa la eficiencia total del sistema, que incluye las pérdidas mecánicas y eléctricas.

Este modelo matemático simplificado describe adecuadamente el comportamiento general de un embalse mareomotriz durante los periodos de llenado y vaciado. Si bien no considera todos los efectos hidráulicos complejos (como las pérdidas por fricción en las paredes, la turbulencia no lineal o las variaciones dinámicas de presión), resulta muy útil para la estimación preliminar de la energía disponible y para comprender la relación entre el diseño físico del embalse y la potencia generada.

El mismo artículo señala que este tipo de formulación se ha validado con datos de instalaciones reales, como la central mareomotriz de La Rance en Francia, que presenta errores inferiores al 10 % en los cálculos energéticos. Por lo tanto, el modelo goza de amplia aceptación en los estudios de viabilidad iniciales de proyectos de energía mareomotriz.

En el caso de la maqueta desarrollada para este proyecto, se utilizó el mismo principio físico, adaptado a menor escala. El tanque de 5 litros y 1 metro de altura reproduce, a pequeña escala, el comportamiento de un sistema real: la energía potencial del agua almacenada se convierte en energía cinética al fluir a través de la turbina, generando electricidad. Si bien fenómenos como la fricción y la turbulencia se amplifican a pequeña escala, los principios físicos y matemáticos se mantienen, lo que permite la validación experimental del modelo propuesto.

Por lo tanto, las ecuaciones anteriores establecen una correspondencia directa entre los parámetros medidos experimentalmente (altura del agua, caudal y

potencia) y el modelo teórico, lo que garantiza una base sólida para validar el rendimiento del sistema propuesto.

2.7 Estrategias de control (PI, MPPT, PWM).

2.7.1 Control PI.

En los sistemas de generación de energía mareomotriz, los controladores desempeñan un papel fundamental en la regulación del comportamiento de las turbinas, la optimización de la potencia de salida y el mantenimiento de la estabilidad del sistema. En [41] uno de los controladores más utilizados es el controlador PI (proporcional-integral), debido a su simplicidad y eficacia en procesos que buscan reducir el error entre una variable medida y una referencia establecida.

El controlador PI funciona combinando dos acciones:

- La parte proporcional (P) reacciona al error instantáneo entre el valor deseado y el valor real, aplicando una corrección proporcional a la magnitud.
- La parte integral (I) acumula errores anteriores para eliminar desviaciones permanentes y asegurar que la señal de salida permanezca estable alrededor del punto de operación.

Matemáticamente, el comportamiento se representa como (2.10):

$$GPI(s)kp + \frac{ki}{s} \quad (2.10)$$

Donde

- kp es la ganancia proporcional.
- ki la ganancia integral.

Este tipo de control se utiliza para regular la velocidad de la turbina, controlar el flujo de energía o ajustar el voltaje en el generador.

En el mismo artículo se implementó un controlador PI para regular la velocidad y el par de un sistema de generador de inducción de doble alimentación (DFIG) conectado a una turbina mareomotriz. El objetivo era mejorar la respuesta dinámica del sistema y mantener una generación estable incluso ante variaciones en la velocidad de las corrientes oceánicas.

El modelo matemático de la turbina consideraba la potencia mecánica extraída del flujo como (2.11):

$$Pm = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \quad (2.11)$$

Donde

- ρ es la densidad del agua
- A el área barrida por las palas.
- V la velocidad de la corriente
- C_p el coeficiente de potencia de la turbina.

El estudio demostró que un controlador PI bien ajustado puede mantener la velocidad angular del generador cerca del punto óptimo, lo que reduce las oscilaciones y las pérdidas de energía. Además, los autores propusieron una versión avanzada del controlador, denominada controlador PI fraccional (FOPI), cuya función de transferencia se expresa como (2.12):

$$GFOPI(s) = kp + \frac{ki}{s^\lambda} \quad (2.12)$$

En esta expresión, el exponente λ es un valor fraccionario ($0 < \lambda < 2$) que mejora la flexibilidad y la capacidad de respuesta del sistema, proporcionando un comportamiento más estable ante perturbaciones o variaciones repentinas en el flujo de las mareas. Mediante simulaciones en MATLAB/Simulink, se confirmó que este tipo de regulador tiene menor sobreimpulso, mejor tiempo de ajuste y mayor robustez frente a cambios en el flujo de agua.

En esta misma línea en [42] presenta un modelo de control complementario aplicado a una turbina mareomotriz acoplada a un generador de inducción de doble alimentación (DFIG), centrándose en mejorar la eficiencia y la estabilidad del sistema.

El estudio propone un modelo dinámico de la turbina basado en el equilibrio torques, expresado como (2.13):

$$J\varepsilon = T_{tur} - T_{resist} \quad (2.13)$$

Donde

- J representa el momento de inercia del sistema.
- ε la aceleración angular.
- T_{tur} el torque generado por la turbina.
- T_{resist} el torque resistivo producido por el generador.

Este modelo permite analizar cómo las variaciones en el flujo de agua afectan directamente a la velocidad de rotación y a la potencia, lo cual es importante para diseñar estrategias de control más precisas.

Además, la potencia cinética disponible en el flujo de agua se expresa mediante la siguiente relación (2.14):

$$P = \frac{1}{2}\rho AV^3 \quad (2.14)$$

Donde

- ρ es la densidad del agua.
- A el área barrida por las palas.
- V la velocidad del flujo.

Esta ecuación refleja la dependencia directa entre la energía generada y la velocidad de la corriente, lo que justifica la necesidad de una regulación activa de la potencia.

El enfoque en [42] utiliza un sistema de control complementario que ajusta dinámicamente el consumo de energía del generador en función de la marea. Para lograr una respuesta más estable, se integran controladores PI (proporcional-integral) que modifican la corriente y el par del generador y compensan las variaciones en la velocidad de las corrientes marinas.

El controlador PI tiene la siguiente forma (2.15):

$$GPI(s) = kp + \frac{ki}{s} \quad (2.15)$$

Donde

- kp es la ganancia proporcional.
- ki la ganancia integral.

En este caso, el sistema de control busca mantener la velocidad de rotación de la turbina cerca del punto de máxima eficiencia, evitando así sobrecargas o pérdidas significativas de energía por variaciones en el caudal. Las simulaciones demuestran que esta estrategia proporciona una regulación más precisa y una mejora en la calidad de la energía suministrada.

2.7.2 MPPT en turbinas mareomotrices.

En los sistemas de energía mareomotriz, la potencia que se puede extraer depende directamente del caudal del agua. Esto significa que, si la turbina no opera cerca de su punto óptimo, gran parte de la energía disponible se desperdicia. Por esta razón, se necesita un método para identificar y mantener el funcionamiento en el punto de máxima potencia (MPPT), incluso cuando el caudal de la marea cambia constantemente.

En [43] Se ha desarrollado una estrategia de seguimiento (MPPT) de alta precisión para turbinas conectadas a un generador síncrono de imanes permanentes (PMSG). A diferencia de otros métodos tradicionales, este enfoque evita el uso de sensores externos para medir la velocidad de la corriente, que suelen ser costosos o difíciles de instalar en entornos marinos. En su lugar, se utiliza un algoritmo de regresión de vectores de soporte (SVR), que aprende la relación entre la velocidad del generador y la potencia mediante datos previamente adquiridos durante una fase de entrenamiento.

El modelo de turbina utilizado se basa en la ecuación clásica para la potencia disponible en la corriente (2.16):

$$P_{blade} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p(\lambda) \quad (2.16)$$

Donde

- ρ es la densidad del agua.
- R el radio de la pala.
- V la velocidad de la corriente.
- C_p el coeficiente de potencia.
- λ la razón de velocidad de punta, definida como (2.17):

$$\lambda = \frac{\omega r R}{V} \quad (2.17)$$

Estas expresiones nos permiten identificar el comportamiento real de la turbina y establecer la relación entre la velocidad de rotación y la potencia que se puede extraer. El algoritmo utiliza esta información para estimar continuamente la velocidad óptima del generador que maximiza la captura de energía.

Durante su funcionamiento, el sistema evalúa la potencia generada y ajusta el punto de operación a la condición que proporciona la máxima eficiencia. Esto permite que la turbina siga funcionando cerca de su punto de máxima eficiencia, incluso si el flujo de marea aumenta o disminuye. Las simulaciones realizadas demuestran que este método proporciona una respuesta estable, un seguimiento rápido de los picos de flujo y una reducción de las pérdidas de energía asociadas a cambios bruscos en el flujo.

Aunque el método empleado utiliza técnicas avanzadas como la regresión SVR, la idea principal es directamente aplicable a sistemas de pequeña escala. Para un modelo a escala reducida, el MPPT puede implementarse mediante algoritmos más sencillos como la perturbación y la observación, pero siguiendo el mismo principio: encontrar el punto de máxima producción de energía y ajustarlo automáticamente para mantenerlo. Esto garantiza un mejor aprovechamiento del caudal de agua, incluso en un entorno controlado de menor tamaño como el desarrollado en este proyecto.

Posteriormente en [44] se analiza cómo los sistemas de turbinas mareomotrices pueden mejorar significativamente su eficiencia mediante el uso de un método adecuado de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT). Se basa en que la energía que se puede extraer de la corriente oceánica depende directamente de la velocidad del flujo y del coeficiente de potencia de la turbina, que solo alcanza su valor máximo cuando la relación entre la velocidad del agua y la velocidad del rotor se mantiene en un nivel óptimo.

Para lograr este seguimiento óptimo del punto de máxima potencia (MPPT), el estudio propone un esquema de control donde el MPPT ajusta continuamente la velocidad de rotación de la turbina. Esto garantiza que la máquina mantenga la relación de velocidad de rotación de la turbina (TSR) ideal, lo que le permite capturar la máxima cantidad de energía incluso cuando la corriente de marea fluctúa rápidamente.

Este artículo desarrolla un modelo de una turbina acoplada a un generador síncrono de imanes permanentes (PMSG). Este modelo describe tanto el comportamiento mecánico principalmente el par producido por la turbina en respuesta a las variaciones del flujo como la dinámica eléctrica del generador. Con base en este marco teórico, los autores incorporan un sistema de control avanzado que combina dos técnicas: un controlador de modo deslizante rápido y no singular, y un método de control adaptativo robusto diseñado para mantener el funcionamiento correcto incluso en caso de fallas en los actuadores o perturbaciones del flujo marino.

Aunque el artículo propone un esquema de control más sofisticado que un MPPT convencional, la función principal sigue siendo la misma, garantizar que la turbina funcione lo más cerca posible de su punto de máxima potencia. El sistema modifica la velocidad del generador en tiempo real para compensar efectos como la turbulencia, las variaciones estacionales o las fallas mecánicas que pueden afectar el rendimiento.

En resumen en [44] demuestra que un MPPT bien implementado permite que una turbina mareomotriz mantenga una salida más estable y aproveche mejor la energía disponible en la corriente de marea. Si bien el controlador utilizado en este proyecto de tesis es más sencillo, el principio es el mismo, ajustar el sistema para que la potencia de salida se mantenga cercana al máximo posible a pesar de las variaciones en el caudal del agua.

2.7.3 PWM como modulador de potencia.

En [45] se analiza la importancia de la modulación por ancho de pulsos (PWM) en los sistemas de energía mareomotriz, especialmente cuando se utiliza un generador síncrono de imanes permanentes (PMSG). Se explica que, en estos sistemas, la energía generada varía constantemente debido a los cambios naturales en la velocidad de las mareas, lo que provoca fluctuaciones de tensión y corriente. Para compensar estas variaciones y lograr una salida más estable, el sistema incluye un rectificador controlado por PWM.

El artículo señala que el rectificador PWM permite la regulación de voltaje en el bus de DC, lo que mejora la calidad de la energía suministrada a la carga o a la red. Esto se logra gracias a su capacidad para ajustar rápidamente el ciclo de trabajo, lo cual afecta directamente la forma y la amplitud de la señal. Gracias a esta modulación, el sistema puede compensar los cambios bruscos en la velocidad del

agua y mantener un rendimiento más constante, incluso en situaciones de marea alta o baja.

Para lograr este control, proponen un esquema de dos niveles, un control externo que mantiene una tensión continua estable y un control interno que regula la corriente que entra al generador. Si bien el diseño es complejo, la idea principal es que la modulación por ancho de pulsos (PWM) actúa como una herramienta de ajuste fino para la potencia generada, suavizando las variaciones y reduciendo el contenido armónico de la señal. Esto no solo mejora la eficiencia del sistema, sino que también ayuda a proteger los componentes electrónicos y garantiza un funcionamiento continuo y estable.

Las simulaciones y las pruebas de prototipos físicos demostraron que el sistema basado en PWM responde rápidamente a los cambios en la corriente de marea y mantiene el voltaje dentro de un rango seguro, lo que confirma que la modulación por ancho de pulsos es una estrategia adecuada para los sistemas de energía marina que operan en condiciones variables.

En el contexto del trabajo anterior, este enfoque resulta especialmente útil como referencia. Si bien el modelo se basa en un esquema más sencillo, el principio es el mismo, utilizar la modulación por ancho de pulsos (PWM) para regular la potencia eléctrica y compensar las variaciones causadas por el flujo de agua. Gracias a este tipo de control, el sistema puede suministrar una potencia más estable a la carga, incluso cuando el caudal disminuye o aumenta repentinamente.

Así mismo en [46] presenta una revisión de las topologías electrónicas utilizadas en sistemas de conversión de energía marina, destacando la importancia de la modulación por ancho de pulsos (PWM) como herramienta para regular la energía generada por dispositivos como las turbinas mareomotrices. Se explica que, debido a que la producción de energía en el mar está sujeta a cambios constantes, la potencia suministrada por el generador suele presentar variaciones en voltaje, corriente y frecuencia. Para gestionar estas fluctuaciones, la electrónica de potencia y el control PWM en particular desempeña un papel crucial en la estabilización de la salida y la mejora de la calidad de la energía producida.

Señala que los convertidores basados en PWM permiten ajustar la tensión del bus de DC, reducir el contenido armónico y suavizar la señal eléctrica antes de que llegue a la carga o la red. Esto es posible porque el PWM controla directamente el ciclo de trabajo de los interruptores del convertidor, modulando la corriente suministrada en cada instante y filtrando las variaciones causadas por los cambios en el caudal de agua. Este tipo de control no solo mejora la estabilidad operativa del sistema, sino que también protege los componentes electrónicos y reduce las pérdidas innecesarias durante la conversión.

El artículo describe el modelo general utilizado para analizar y diseñar estos convertidores. El modelo incluye la tensión generada por el generador, el comportamiento de los interruptores del puente PWM, los filtros de salida y el

condensador del bus de DC. También menciona el uso de transformaciones de coordenadas, como las transformaciones, para simplificar las ecuaciones y facilitar el diseño de los lazos de control de corriente y tensión. Si bien el artículo no desarrolla un caso experimental, establece un marco teórico sólido que sirve como referencia para el diseño de sistemas reales o a escala reducida.

En resumen, el uso de controladores como PI, MPPT y PWM se ha convertido en una parte esencial del diseño y la operación de los modernos sistemas de energía mareomotriz. Si bien cada técnica cumple una función distinta, todas contribuyen al mismo objetivo: garantizar que la turbina y el sistema eléctrico funcionen de forma estable y con el máximo aprovechamiento de la energía disponible en el flujo de agua.

Los estudios revisados demuestran que el control PI es una herramienta eficaz para mantener estables la velocidad del generador y el par mecánico, incluso con variaciones constantes en el caudal. Su capacidad para corregir errores y suavizar la respuesta del sistema lo convierte en un recurso fiable tanto en turbinas reales como en modelos a escala. En el modelo a escala desarrollado para este proyecto, el control PI permite ajustar la potencia generada y mantener un funcionamiento estable incluso cuando el nivel del agua disminuye o el caudal se vuelve irregular.

Los métodos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) han demostrado su eficacia para prevenir pérdidas de energía significativas al operar las turbinas cerca de su punto óptimo. Si bien algunos estudios emplean algoritmos avanzados basados en aprendizaje automático, el principio es el mismo en todas las escalas: identificar el punto donde se alcanza la máxima eficiencia y realizar los ajustes necesarios para mantenerla. Esto resulta especialmente útil en modelos a escala, ya que los caudales varían rápidamente durante la descarga, lo que exige correcciones operativas para garantizar una eficiencia óptima.

Finalmente, la modulación por ancho de pulsos (PWM) se consolidó como una herramienta clave para estabilizar la energía eléctrica generada por la turbina. Su capacidad para regular el ciclo de trabajo del inversor ayuda a suavizar las variaciones de voltaje y corriente causadas por los cambios naturales en el flujo de agua. En un sistema de gran escala, esta técnica proporciona una señal más consistente, protege los componentes y garantiza un funcionamiento fiable.

En general, estas estrategias de control proporcionan un marco sólido para el diseño de modelos de energía mareomotriz y permiten una simulación realista del comportamiento de los sistemas de generación de energía mareomotriz. Incluso en un modelo a escala reducida, la integración de PI, MPPT y PWM contribuye directamente a mejorar la estabilidad, la eficiencia y la calidad de la energía generada.

2.8 Estado del arte.

El siguiente estado del arte analiza tres aspectos principales que afectan directamente el diseño y el rendimiento de los sistemas de energía mareomotriz. El primero es el comportamiento del flujo de agua y su efecto en la turbina, donde se estudian los cambios en la velocidad del flujo que alteran la velocidad de rotación, la estabilidad del sistema y la energía disponible para la generación de energía.

El segundo aspecto se refiere a las estrategias de control utilizadas para mejorar la eficiencia. Esto incluye métodos como MPPT, controladores PI, técnicas adaptativas y enfoques inteligentes que permiten al sistema ajustar su funcionamiento en respuesta a las variaciones del caudal, manteniendo así un rendimiento más estable.

Finalmente, el tercer punto aborda los métodos de extracción, conversión y gestión de la energía generada. Esto incluye los diferentes tipos de generadores, la electrónica de potencia utilizada, para optimizar el uso de la energía sin modificar la estructura física del sistema.

A partir de estos tres enfoques, la siguiente tabla muestra los estudios más relevantes y sus principales aportes:

Tabla 1 Estado del arte.

Año	Titulo	Aporte
2018	Hybrid Neural Fuzzy Design-Based Rotational Speed Control of a Tidal Stream Generator Plant	Propone un sistema de control híbrido que utiliza lógica difusa y redes neuronales para optimizar la producción de energía en sistemas de energía mareomotriz, incluso en condiciones variables [47].
2019	Adaptive Intelligent Controllers for Tidal Currents Turbine Driving DDPMSG	Desarrolla controladores PI adaptativos que ajustan el sistema según la velocidad y la fuerza de la marea, logrando así una mayor eficiencia [48].
2020	Small Hydropower Plants with Variable Speed Operation	Investiga cómo el uso de convertidores electrónicos en pequeñas centrales hidroeléctricas proporciona una mejor adaptación al caudal variable [49].
2020	Optimal Operation of the Jirau Hydroelectric Reservoir	Utiliza optimización no lineal para aumentar la producción de energía sin modificar la infraestructura del embalse [50].
2020	Hydropower Case Study Collection	Reúne innovaciones en centrales mareomotrices que equilibran la eficiencia energética y las preocupaciones medioambientales, con especial énfasis en el uso de turbinas respetuosas con el medio ambiente y la digitalización [51].
2020	MPPT Control for Wave Energy Converters on Artificial Breakwaters	Explora el uso de MPPT en la conversión de energía de las olas y muestra cómo estos algoritmos mejoran la eficiencia a pesar de las condiciones cambiantes [52].
2021	Key Technologies for Reservoir Control During Flood Season	Propone estrategias en tiempo real para regular los niveles de agua en los embalses durante las inundaciones, mejorando la seguridad y la eficiencia [53].
2021	Hydraulic Turbine Performance with Aeration Systems	Dispone de sistemas de aireación que mejoran la calidad del agua y el rendimiento de la turbina, minimizando el impacto ambiental [54].
2021	MPPT in Tidal Energy Systems Using Support Vector Regression	Aborda controles robustos que permiten mantener un rendimiento óptimo en turbinas mareomotrices frente a perturbaciones [43].

2022	Evaluation of PV Model-Based MPPT Techniques	Estudia técnicas MPPT en sistemas solares, destacando su fácil implementación y utilidad para el desarrollo de algoritmos adaptativos [55].
2023	Efficiency Improvement of Hydraulic Turbines	Destaca la importancia de comprender a fondo las condiciones de funcionamiento de la turbina y de aplicar métodos de optimización para mejorar el rendimiento [56].
2024	Simulation of Tidal Current-Powered Freshwater and Energy Systems	Propone un sistema sostenible para islas que combina energía mareomotriz y suministro de agua, destacando el rol del control en la eficiencia [57].
2023	Tidal and Ocean Current Energy	Examina distintos diseños de turbinas para energía oceánica, enfocándose en su eficiencia y viabilidad económica [58].

2.9 Resultados estado del arte.

El análisis de los trabajos revisados permite identificar tres ideas principales, correspondientes a los tres ejes del estado del arte, y que también guiaron el desarrollo de este proyecto:

1. Adaptación a las variaciones del flujo de agua.

Numerosos estudios destacan que el rendimiento de las turbinas cambia con las variaciones del caudal. Las turbinas de velocidad variable, los sistemas de control de embalses y los métodos para gestionar las condiciones extremas que mejoran la estabilidad del sistema.

Esto es importante para este proyecto, porque la maqueta también muestra caídas en el caudal a lo largo del proceso de vaciado, y es necesario representarlas correctamente.

2. Mejorar la eficiencia y el uso de las estrategias de control.

La literatura muestra cómo los algoritmos MPPT, los controladores adaptativos y las técnicas inteligentes pueden mantener un suministro de energía estable incluso ante condiciones variables.

Este aspecto es clave para justificar la incorporación de controladores (MPPT y PI) en la fase de simulación avanzada de este trabajo.

3. Recuperación de energía y gestión eficiente.

Muchos autores proponen formas de extraer más energía sin cambiar toda la infraestructura: turbinas optimizadas, aireación, digitalización, electrónica de potencia y uso de datos en tiempo real.

Este punto coincide con el planteamiento de la maqueta, que incluía una única etapa electrónica y una carga de referencia para estudiar cómo se convierte la energía hidráulica en energía eléctrica.

En conjunto, los trabajos revisados proporcionan una base sólida para el desarrollo de la maqueta y la simulación presentados en esta tesis. Además, demuestran que los desafíos observados en sistemas reales (variaciones en el caudal, necesidad de control y optimización de la recuperación de energía) también están presentes en los modelos a escala.

2.10 Modelo matemático del sistema propuesto.

Esta sección describe el modelo matemático que representa el funcionamiento del prototipo desarrollado. La idea es aplicar los mismos principios utilizados en los embalses de mareomotrices reales, pero adaptados a la escala y dimensiones de nuestra maqueta. El modelo muestra claramente cómo cambia el nivel del agua en el embalse, cómo se genera el flujo a través de la tubería y cómo esta energía hidráulica se convierte en energía eléctrica mediante el accionamiento de la turbina y el generador.

En primer lugar, es necesario definir la geometría del depósito principal. El depósito superior tiene un volumen total de 5 litros (0.005 m^3) y dimensiones de $0.2 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$, lo que da una superficie de:

$$A_{base} = w \cdot l = 0.2\text{m} \times 0.3\text{m} = 0.06\text{m}^2 \quad (2.18)$$

Al dividir el volumen del agua por esta área, obtenemos la altura original del líquido:

$$h_0 = \frac{V}{A_{base}} = \frac{0.005}{0.06} = 0.083\text{m} \quad (2.19)$$

Es decir, el modelo comienza con una columna de agua de aproximadamente 8.3 cm.

Caudal en el tubo.

El flujo de agua desde el depósito hasta la turbina se describe mediante una versión simplificada de la ecuación de Bernoulli, que tiene en cuenta las pérdidas por fricción en la tubería:

$$v = \sqrt{\frac{2gh}{1 + f \frac{L_{total}}{D_{tubo}}}} \quad (2.20)$$

Donde

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$ es la gravedad.

- h es la altura actual del agua.
- $f = 0.02$ es el factor de fricción para tubos pequeños.
- $L_{total} = 0.30 + 0.10 = 0.40m$ es la longitud total del sistema.
- $D_{tubo} = 0.015m$ es el diámetro del tubo.

Esta ecuación nos indica que cuanto mayor sea la altura del agua, mayor será la velocidad del flujo, mientras que la fricción en la tubería reduce esta velocidad.

El caudal se calcula multiplicando la velocidad por el área del tubo:

$$Q = A_{tubo} \cdot v \quad (2.21)$$

Donde

$$A_{tubo} = \pi \left(\frac{D_{tubo}}{2} \right)^2 \quad (2.22)$$

Esta ecuación simplemente expresa que el caudal depende de la cantidad de agua que pasa por unidad de tiempo y del "tamaño de la tubería" por la que fluye.

Vaciado del tanque

El cambio en el nivel de agua del tanque se logra mediante la conservación del volumen (2.23):

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q}{A_{base}} \quad (2.23)$$

Esto significa que el nivel del agua baja más rápido cuando el caudal es mayor y más lento cuando queda poca agua.

Potencia hidráulica.

La potencia disponible antes de la turbina se calcula con (2.24):

$$P_{hid} = \rho g Q h \quad (2.24)$$

Donde

- ρ es la densidad del agua.

Esta ecuación representa cuánta energía se libera por el peso del agua que cae desde una altura h .

Energía eléctrica.

Para obtener energía eléctrica, se considera la eficiencia (2.25):

$$P_{el} = \eta \cdot P_{hid} \quad (2.25)$$

En el prototipo se empleó una eficiencia aproximada del 85–95 %, considerando pérdidas internas de la turbina y el generador.

Voltaje generado.

En el modelo de simulación, el voltaje depende directamente del caudal. Se utiliza el parámetro K_{gen} , ajustado para que el generador entregue aproximadamente 2 V con el caudal máximo (2.26):

$$V = K_{gen} \cdot Q \quad (2.26)$$

Esta relación se basa en el comportamiento real del generador a pequeña escala: mayor caudal $\rightarrow$ mayor velocidad de rotación $\rightarrow$ mayor voltaje.

Este conjunto de ecuaciones constituye el modelo matemático completo del sistema, lo que nos permite representar fácilmente cómo se mueve el agua y cómo se convierte la energía en electricidad.

2.11 Aplicación del modelo a la maqueta.

Una vez definido el modelo matemático general, el siguiente paso consiste en aplicarlo directamente a las dimensiones y condiciones del prototipo construido. Esto permite que las ecuaciones representen el comportamiento real del sistema a escala, mostrando cómo fluye el agua, cuánta energía se genera y cómo varían las principales variables durante el funcionamiento.

El modelo consta de un depósito superior de 5 litros que alimenta una turbina mediante una tubería corta. Las dimensiones se eligieron para garantizar un caudal observable. Al tratarse de un sistema a pequeña escala, los efectos de la fricción y la reducción de velocidad son más pronunciados.

Geometría utilizada en la simulación.

Volumen total del tanque.

- $V_0 = 0.005m^3$

Área superficial del tanque.

- $A_{base} = 0.06m^2$

Altura inicial.

- $h_0 = 0.083m$

Diámetro del tubo.

- $D_{tubo} = 0.015m$

Área del tubo.

- $A_{tubo} = 1.77 \times 10^{-4}m^2$

Longitud total del sistema hidráulico.

- $L_{total} = 0.40m$

Eficiencia turbina–generador.

- $\eta = 0.85 \text{ a } 0.95$

Estos valores se incorporaron directamente a la simulación, lo que permitió que las ecuaciones reprodujeran la evolución real del sistema durante el vaciado.

Caudal real del prototipo

Utilizando la ecuación de Bernoulli corregida por pérdidas, la velocidad inicial se calcula como (2.27):

$$v = \sqrt{\frac{2gh}{1+f\left(\frac{L_{total}}{D_{tubo}}\right)}} \quad (2.27)$$

Con los valores del prototipo, esto da una velocidad inicial típica de aproximadamente 1,0 a 1,2 m/s, lo que es consistente con el comportamiento físico esperado en tuberías delgadas con baja altura de agua.

El caudal inicial es:

$$Q_0 = A_{tubo} \cdot v_0$$

Este caudal disminuye gradualmente a medida que baja el nivel del agua, tal como se observa en la simulación.

Descenso del agua en la maqueta.

El vaciado del tanque se corresponde casi exactamente con la ecuación diferencial (2.28):

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{Q}{A_{base}} \quad (2.28)$$

Dado que el caudal depende directamente de h, el nivel del agua disminuye de forma constante y continua, lo cual se comprobó comparando la simulación con el funcionamiento físico del sistema.

Potencia generada en la maqueta.

La potencia hidráulica disponible al arranque se obtiene mediante (2.29):

$$P_{hid} = \rho g Q h \quad (2.29)$$

Dado que el prototipo funciona con una pequeña columna de agua (8,3 cm) y un caudal limitado por el diámetro de la tubería, la potencia hidráulica es baja, del orden de milivatios, lo cual es coherente para un sistema a pequeña escala.

La potencia eléctrica generada se reduce aún más debido a la eficiencia (2.30):

$$P_{el} = \eta P_{hid} \quad (2.30)$$

y la constante del generador (2.31):

$$V = K_{gen} \cdot Q \quad (2.32)$$

Este enfoque nos permitió validar en MATLAB que el comportamiento eléctrico coincide con las mediciones tomadas en el modelo, lo que refleja un voltaje bajo (aproximadamente de 0 a 2 V dependiendo del caudal).

Al aplicar el modelo matemático al modelo a escala, el sistema demuestra que reproduce con precisión la dinámica de un embalse de mareas, aunque a menor escala. Tanto la simulación como el prototipo real muestran pérdidas por fricción, una reducción gradual de la velocidad del flujo y una relación directa entre el nivel del agua y la producción de energía. Esta coherencia valida el modelo y permite utilizarlo como base para evaluar estrategias de control implementadas posteriormente.

2.12 Estrategias de control implementadas.

Para evaluar el comportamiento del sistema y mejorar la eficiencia hídrica durante el vaciado del tanque, se implementaron tres estrategias de control directamente en la simulación del prototipo: un controlador PI, un algoritmo MPPT y un modulador PWM.

Estas técnicas no se aplicaron al prototipo experimental en sí, sino que se integraron en otra simulación y las dimensiones físicas predefinidas del sistema (tanque de 5 litros, tubería de 1,5 cm de diámetro y turbina de 13 mm). De esta manera, la simulación reproduce el comportamiento del prototipo cuando estas estrategias se utilizan en la práctica.

Si bien en los sistemas de energía mareomotriz reales estos controles se utilizan habitualmente en la parte eléctrica, en este trabajo se adaptaron a un sistema hidráulico a pequeña escala, con el mismo principio: optimizar la potencia generada y estabilizar el flujo de agua.

2.12.1 Control PI.

En la simulación, se utilizó un controlador PI para ajustar el ciclo de trabajo PWM. Su función principal era mantener el caudal de agua lo más cerca posible del valor de referencia proporcionado por el MPPT.

El PI compara el ciclo de trabajo actual con el valor recomendado y calcula un error (2.33):

$$error = dutyref - duty \quad (2.33)$$

A partir de ese error, el PI calcula una corrección (2.34):

$$u(t) = Kp \cdot error + Ki \int error dt \quad (2.34)$$

Donde

- Kp corrige el error en ese instante.
- Ki corrige los errores acumulados con el tiempo.
- u(t) es el nuevo valor del cycle duty que se aplicará al PWM.

En la simulación se utilizaron:

- Kp=1.
- Ki=0.5.

Estos valores fueron suficientes para evitar fluctuaciones repentinas y mantener un caudal estable durante todo el proceso de vaciado del tanque. Como resultado, la simulación mostró una transición fluida entre las diferentes fases operativas del sistema.

2.12.2 Algoritmo MPPT (Perturb and Observe).

En la simulación se implementó el algoritmo MPPT con el objetivo de encontrar el punto en el que el sistema genera la mayor potencia eléctrica posible en cada instante, dado que el caudal disminuye a medida que se vacía el tanque.

Para ello, la simulación calcula la fuerza generada para cada cierto número de iteraciones (2.35):

$$P = (V \cdot I) \quad (2.35)$$

El algoritmo determina entonces si debe aumentar o disminuir el ciclo de trabajo PWM.

El principio es muy simple:

- Si se aumenta el duty y la potencia mejora → continuar aumentando.
- Si al aumentar el duty la potencia empeora → invertir la dirección.

Esta lógica permitió que la simulación ajustara automáticamente el sistema a medida que descendía el nivel del agua.

En otras palabras, incluso con el flujo en constante cambio, el MPPT mantuvo el sistema en condiciones óptimas en todo momento.

2.12.3 Modulación PWM.

En la simulación, el PWM actuaba como una válvula virtual que abría o cerraba el flujo de agua a alta velocidad. El objetivo era regular la cantidad de agua que pasaba por la tubería, permitiendo un control preciso del caudal que llegaba a la turbina.

El ciclo de trabajo representa la fracción de tiempo que la válvula virtual permanece abierta:

- $duty = 1 \rightarrow$ paso libre, flujo total.
- $duty = 0 \rightarrow$ válvula cerrada.
- $0 < duty < 1 \rightarrow$ regulación parcial del flujo.

En la simulación se usó una frecuencia de:

- 50 Hz, equivalente a un período de 0.02 s.

El caudal controlado quedó expresado como (2.36):

$$Q_{PWM} = Q \cdot duty \quad (2.36)$$

Esto permitió ajustar el flujo sin tener que cambiar las dimensiones físicas del sistema, lo cual sería mucho más complicado en un prototipo real.

Donde.

- a) El controlador PI redujo las variaciones bruscas del caudal y mantuvo un funcionamiento estable
- b) El algoritmo MPPT identificó consistentemente el punto en el que el sistema generaba la máxima potencia posible.
- c) La modulación por ancho de pulsos (PWM) permitió una regulación precisa y continua del caudal de agua durante toda la simulación.

Gracias a estas tres técnicas, la simulación reflejó un funcionamiento más estable y eficiente, incluso con la disminución gradual del nivel del agua. Esto permitió un análisis más realista del comportamiento del prototipo y la verificación de la eficacia de las estrategias de control antes de su implementación en un sistema físico.

2.13 Conclusión del capítulo.

El contenido de este capítulo proporcionó la base teórica y matemática necesaria para el desarrollo del prototipo de energía mareomotriz a pequeña escala. En primer lugar, se revisaron los principios básicos de la energía marina y los ciclos de las mareas, junto con sus limitaciones y los tipos de tecnologías propuestas en investigaciones recientes. Esta revisión ayudó a identificar el comportamiento del flujo de agua, cómo se convierte la energía y las estrategias de control comúnmente utilizadas en sistemas hidroeléctricos y mareomotriz.

A sí mismo, se presentó un modelo matemático adaptado a las dimensiones reales del prototipo experimental. Este modelo incluía expresiones para describir el nivel

de agua, el caudal, la presión, las pérdidas por fricción y la potencia disponible. Gracias a estas ecuaciones, fue posible predecir el comportamiento del sistema antes de realizar las pruebas físicas, y también se confirmó que los principios teóricos cumplían con las expectativas de un sistema a pequeña escala.

Finalmente, se introdujeron los fundamentos de los métodos de control que se utilizarían posteriormente en la simulación: el controlador PI, el algoritmo MPPT y la modulación PWM. Aunque aún no están implementados físicamente en esta etapa, es necesaria una explicación teórica para comprender cómo pueden mejorar la estabilidad y la eficiencia del sistema en capítulos posteriores.

En general, este capítulo proporciona el marco teórico, las ecuaciones básicas y los principios de control que guían el diseño del prototipo experimental. Con esta sólida base, el siguiente capítulo se centra en la construcción del prototipo físico, su simulación sin control y su posterior comparación con la versión controlada para analizar cómo cambia realmente el comportamiento del sistema.

Capítulo 3

Resultados en

simulación

Capítulo 3: Resultados en simulación.

3.1 Introducción.

El objetivo de este capítulo es presentar la primera simulación del sistema de energía mareomotriz antes de cualquier tipo de control o realización de pruebas en el prototipo físico. El propósito fue observar, de forma sencilla y directa, cómo se comportan el flujo de agua, la turbina y la generación eléctrica cuando el sistema funciona únicamente por el efecto de la gravedad, sin movimientos externos ni ajustes automáticos.

Es importante analizar el sistema sin controladores, ya que esto nos permite comprender su comportamiento natural y reconocer sus limitaciones desde su base. Esto nos ayuda a observar cómo reacciona el flujo, dónde se producen pérdidas de energía y qué variables afectan más al rendimiento. Contar con esta base inicial es fundamental para saber qué se debe corregir o mejorar posteriormente al implementar los controladores.

Esta simulación nos permitió identificar variables clave, estimar la potencia disponible y detectar las principales fuentes de pérdidas. Este análisis sirve como punto de partida para las etapas posteriores del proyecto, ya que proporciona una visión clara del funcionamiento normal del sistema y permite una mayor optimización mediante técnicas como el control MPPT y PI.

3.2 Dimensiones del sistema modelado.

Para simular el sistema, se consideraron las dimensiones reales del modelo y los principios básicos del flujo de agua a presión.

El modelo utiliza las medidas físicas del prototipo:

- Depósito superior: (equivalente a 0.005 m^3).
- Base del depósito: $0.2 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$.
- Altura inicial del agua: calculada a partir del volumen y el área.
- Tubo de conducción: 0.4 m en total (0.3 m rectos + 0.1 m conectados a la turbina).
- Diámetro del tubo: 0.015 m .
- Turbina: longitud de 0.1 m con un diámetro ligeramente menor.

Estas mediciones se introducen directamente en el programa para modelar el vaciado y el flujo.

La velocidad del agua se calcula utilizando una versión de la ecuación de Bernoulli que tiene en cuenta la fricción dentro de la tubería (3.1):

$$v = \sqrt{\frac{2gh}{1+f\frac{L_{total}}{Dtubo}}} \quad (3.1)$$

Donde:

- h = altura del agua.
- f = factor de fricción.
- Ltotal = longitud total del sistema hidráulico.
- Dtubo = diámetro del tubo.

A partir de la velocidad, el caudal se obtiene con (3.2):

$$Q = A \cdot v \quad (3.2)$$

El caudal cambia continuamente a medida que baja el nivel del agua.

La potencia disponible en la turbina se calcula con (3.3):

$$Phid = \rho g Q h \quad (3.3)$$

La potencia eléctrica se estima entonces teniendo en cuenta la eficiencia de la turbina (3.4):

$$Pel = \eta Phid \quad (3.4)$$

El voltaje del generador se modela como proporcional al caudal, pero con un comportamiento exponencial suavizado (3.5):

$$V(t) = Vteor(Q)(1 - e^{-t/\tau}) \quad (3.5)$$

Esto tiene en cuenta la inercia eléctrica y evita cambios repentinos poco realistas.

El programa en MATLAB realiza lo siguiente:

1. Define las dimensiones del depósito.
2. Calcula la velocidad y el caudal del agua en cada instante.
3. Actualiza la altura del agua, considerando el vaciado natural.
4. Calcula potencia hidráulica, potencia eléctrica, voltaje y corriente.
5. Aplica una curva suavizada para representar un vaciado realista.
6. Genera gráficas que permiten visualizar todo el comportamiento del sistema.

El programa se ejecuta durante 180 segundos con un intervalo de tiempo de 0,1 s, proporcionando resultados detallados y continuos.

3.3 Resultados de la simulación

A continuación, se muestran las gráficas obtenidas en esta fase de simulación sin controladores.

Altura del agua vs. tiempo (Figura 13).

La gráfica muestra cómo el nivel del agua disminuye gradualmente. Esto nos permite identificar cuánto tiempo permanece activo el sistema y cómo la pérdida de altura afecta al rendimiento hidráulico.

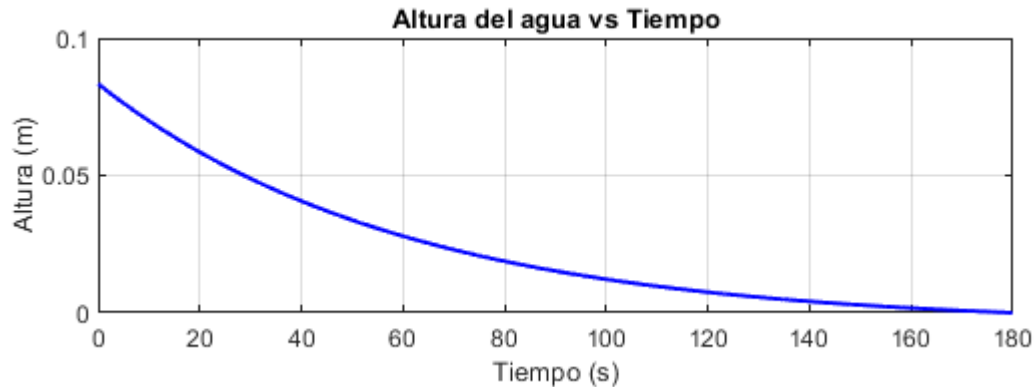


Figura 13 Altura del agua vs. tiempo.

Caudal vs. tiempo (Figura 14)

El caudal es máximo al principio, cuando el nivel del agua está en su punto más alto. A medida que el depósito se vacía, el caudal disminuye. Esta relación directa entre nivel y caudal es típica de los sistemas microhidráulicos.

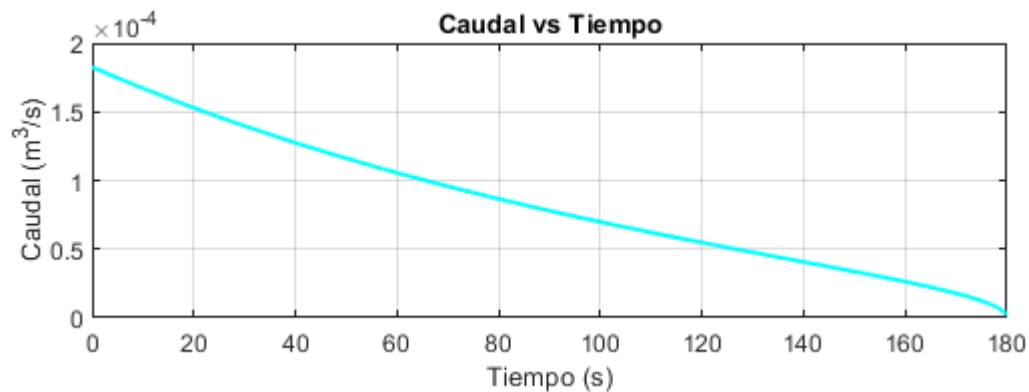


Figura 14 Caudal vs. tiempo.

Potencia hidráulica y potencia eléctrica vs. tiempo (Figura 15 y 16).

La potencia hidráulica refleja la energía contenida en el flujo de agua.

La potencia eléctrica es una fracción de esta energía, reducida por las pérdidas mecánicas y eléctricas del sistema.

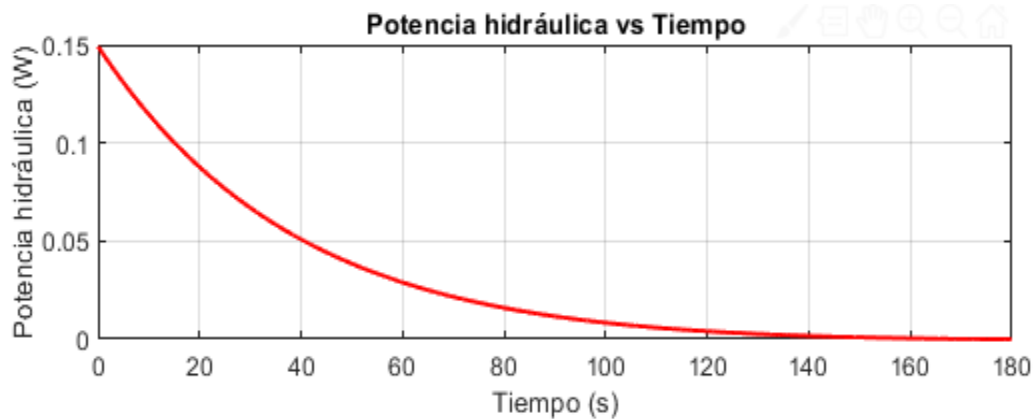


Figura 15 Potencia hidráulica vs tiempo.

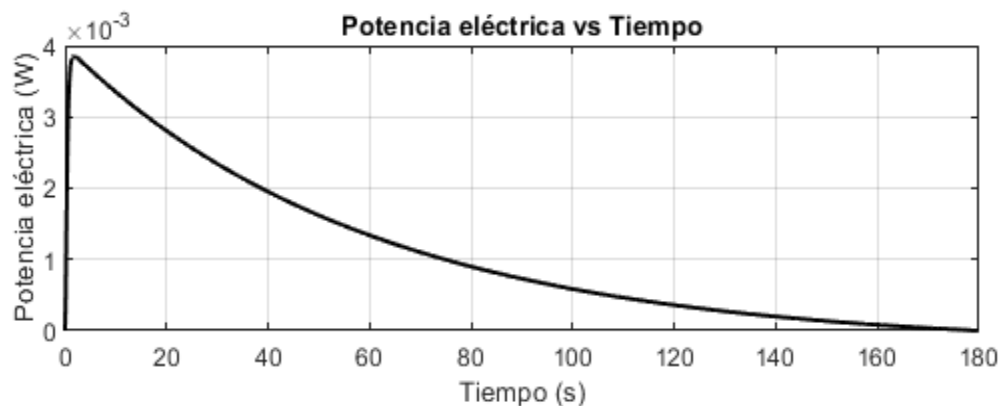


Figura 16 Potencia eléctrica vs. tiempo.

Voltaje y corriente vs. tiempo (Figuras 17 y 18)

Estas curvas muestran la energía eléctrica generada.

A medida que disminuye el caudal, tanto el voltaje como la corriente disminuyen, lo que refleja una correlación directa entre el caudal y la producción de energía eléctrica.

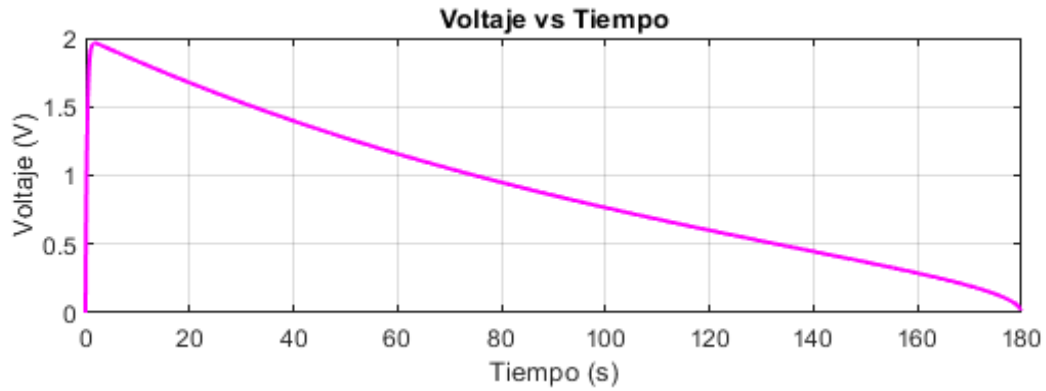


Figura 17 Voltaje vs. tiempo.

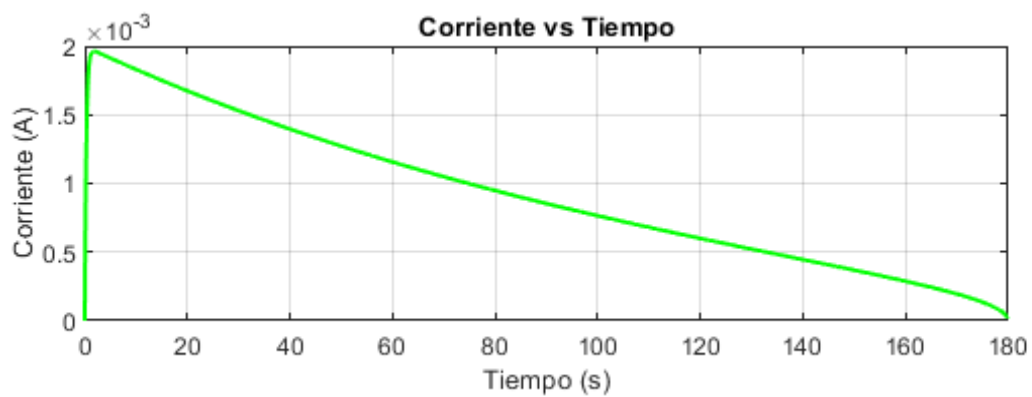


Figura 18 Corriente vs. tiempo.

3.4 Interpretación general

La simulación nos permitió comprender cómo funciona el sistema sin intervención externa.

Los principales puntos que se observaron son:

- El flujo del agua disminuye de forma natural conforme baja la altura.
- La potencia generada depende directamente del caudal disponible.
- El sistema presenta pérdidas que reducen la potencia eléctrica final.
- El comportamiento de todas las curvas es suave y coherente con lo observado en sistemas reales a pequeña escala.

En general, los resultados demuestran que el modelo es estable y adecuado para representar un sistema hidráulico real a pequeña escala.

3.5 conclusión de la simulación.

La simulación permitió comprender claramente el comportamiento del sistema al operar únicamente bajo la influencia de la gravedad. Se identificó la relación directa entre la altura del agua, el caudal y la potencia generada, así como los efectos de las pérdidas mecánicas y eléctricas. Las gráficas resultantes proporcionan una base sólida para comprender la dinámica del sistema y justifican la necesidad de implementar estrategias de control que permitan un mejor aprovechamiento de la energía disponible. Este enfoque inicial sirve como un importante punto de referencia para las fases posteriores de diseño, optimización y experimentación.

Capítulo 4

Desarrollo

Experimental del

Prototipo

Capítulo 4: Desarrollo experimental del Prototipo.

4.1 Selección del perfil del embalse y materiales del prototipo.

Tras verificar el funcionamiento estable del sistema en la simulación, el siguiente paso fue definir el tipo de depósito y los materiales más adecuados para construir el modelo físico. En esta etapa, el objetivo era garantizar que la estructura fuera segura, fácil de manejar y sobre todo, que permitiera una observación clara de los fenómenos hidráulicos durante las pruebas.

Para ello, se revisaron estudios de pequeñas centrales hidroeléctricas y prototipos experimentales, que indicaron rangos típicos de altura de caída, velocidad de flujo y pérdidas hidráulicas en sistemas de pequeña escala. Trabajos como en [59] muestra los criterios de cálculo de altura aprovechable, caudal, pérdidas hidráulicas y cómo estos influyen en la capacidad de generación. De igual forma en [60] proyecto basado en utilizar una turbinas pequeñas tipo tornillo de Arquímedes, resaltan la importancia de contar con un volumen de agua suficiente para superar las pérdidas mecánicas y lograr tensiones medibles.

Esto permitió seleccionar un perfil de tanque pequeño pero funcional que reproducía de forma realista el comportamiento del flujo sin comprometer la seguridad del prototipo.

Selección del material del embalse.

Para elegir el material del depósito superior se compararon varias alternativas considerando:

- Transparencia.
- Resistencia.
- Peso.
- Costo.
- Facilidad de montaje y sellado.

La tabla siguiente resume la comparación.

Tabla 2 Comparación de materiales para el embalse de la maqueta.

Material	Ventajas	Desventajas	Elección final
Plástico comercial	Ligero, fácil de conseguir, seguro	Menor transparencia, puede deformarse con agua	No
Vidrio	Transparente, permite ver el nivel de agua	Pesado, frágil, difícil de manipular	No
Acrílico transparente	Ligero, seguro, transparente, permite ver claramente el flujo y nivel	Puede rayarse si no se maneja con cuidado	Sí
Polycarbonato	Muy resistente a impactos, transparente, ligero, buena durabilidad	Más costoso que el acrílico, puede amarillear con el tiempo	No
Aluminio delgado	Resistente, fácil de moldear, no se rompe con golpes	No es transparente, dificulta la visualización del nivel	No
Otros materiales livianos	Fácil de manejar y mover	Poca disponibilidad o resistencia variable	No

Tras analizar todas las opciones, el acrílico transparente resultó ser la mejor elección por tres razones principales:

- 1.-Permite observar con claridad el nivel del agua y el comportamiento del flujo, lo cual es importante para comparar la simulación con el experimento.
- 2.-Es ligero y fácil de manejar, lo que permite ensamblar, mover y ajustar el modelo sin riesgo de rotura.
- 3.-Sella con precisión, lo cual es crucial en prototipos pequeños donde incluso una fuga mínima puede alterar el caudal.

Selección de componentes adicionales.

Todos los elementos del modelo se seleccionaron por su compatibilidad con el acrílico, su disponibilidad y su durabilidad. Los componentes seleccionados permitieron crear un sistema estable, fácil de ensamblar y lo suficientemente robusto para soportar repetidas pruebas de llenado y vaciado.

Tabla 3 Componentes y materiales de la maqueta.

Componente	Descripción	Material
Contenedor de agua 1	Depósito superior donde se almacena el agua inicial.	Acrílico transparente.
Contenedor de agua 2	Depósito inferior donde se almacena el agua descargada	Acrílico transparente.
Tubo de conexión	Conducto por donde fluye el agua entre los contenedores	Tubo de PVC o acrílico
Turbina	Pequeño generador hidroeléctrico	Mini turbina hidráulica comercial

Una vez definidos los materiales y el perfil del tanque, el siguiente paso fue diseñar la estructura completa del modelo para garantizar su funcionamiento mecánico e hidráulico.

4.2 Diseño y dimensionamiento de la maqueta.

Tras seleccionar los materiales para el prototipo, se definió el diseño general del modelo. El objetivo de esta fase era construir una estructura sencilla pero funcional que demostrara claramente cómo la energía potencial del agua se convierte en energía eléctrica al pasar por la turbina. El diagrama de montaje general se muestra en la (Figura 19), que sirve como referencia visual para identificar cada uno de los componentes mencionados en esta sección.

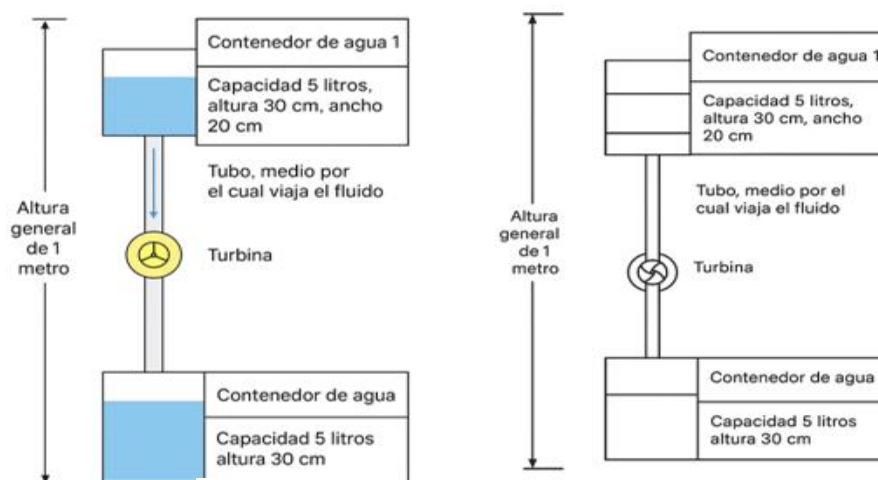


Figura 19 Diagrama de la maqueta.

La Figura 19 es importante porque ayuda a comprender la composición física del sistema: la ubicación del depósito superior, la tubería y la turbina. También

proporciona una visualización rápida del flujo de agua y cómo se relaciona cada parte con las dimensiones que se describen a continuación.

Altura total y capacidad del depósito.

Toda la estructura fue diseñada para tener 1 metro de altura, siguiendo referencias de prototipos experimentales que muestran que no se necesitan grandes alturas para observar el principio de funcionamiento, y que las alturas más pequeñas generan flujos demasiado pequeños para realizar mediciones útiles.

El depósito superior e inferior (Figura 20). Tienen una capacidad de 5 litros. Este volumen representa un equilibrio adecuado entre:

- Facilidad de manejo.
- Peso seguro para la estructura.
- Tiempo suficiente de vaciado.



Figura 20 Depósito superior e inferior.

Sistema hidráulico.

Para dirigir el agua hacia la turbina, se instaló una tubería de PVC con las siguientes características (Figura 21):

- Longitud total: 40 cm.
- Diámetro interno: 1.5 cm.
- Conexión directa a turbina: 10 cm.



Figura 21 Sistema hidráulico.

Esta elección, se basa en las pérdidas en tuberías cortas, donde un diámetro pequeño genera la presión suficiente para permitir la rotación de la turbina, pero sin producir una turbulencia agresiva que afecte la medición.

Montaje y aseguramiento del sistema hidráulico.

Durante el proceso de armado del sistema hidráulico, se prestó especial atención en garantizar un flujo continuo y sin fugas que pudieran afectar el caudal durante las pruebas, se tomaron las siguientes medidas:

- Cinta de teflón en las roscas, para asegurar un cierre hermético.
- Sellador transparente en las uniones acrílicas, especialmente en los puntos donde el depósito se conecta con el conducto de salida.
- Pruebas de presión con agua antes de cada experimento, para verificar que no existieran filtraciones.

Estas correcciones se realizaron debido a que, en las pruebas iniciales, se observaron pequeñas fugas que alteraban ligeramente el flujo del sistema, algo común en prototipos contruidos experimentalmente (Figura 22). Con estos ajustes, se logró un comportamiento más estable y representativo de las condiciones consideradas en el diseño y la simulación.

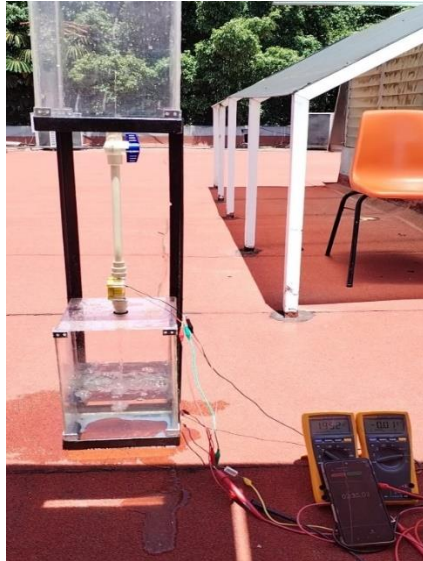


Figura 22 Fugas observadas durante las pruebas del sistema hidráulico.

4.3 Construcción del prototipo físico.

La construcción se realizó utilizando herramientas sencillas para cortar y pegar acrílico. Cada paso del proceso se describe a continuación.

Construcción del embalse superior e inferior (Figura 23).

- Se cortaron láminas de acrílico de 3 mm de espesor según las dimensiones del diseño.
- Se unieron con un pegamento especial para acrílico.
- Se realizaron pruebas visuales y de llenado hasta tener un sellado optimo.

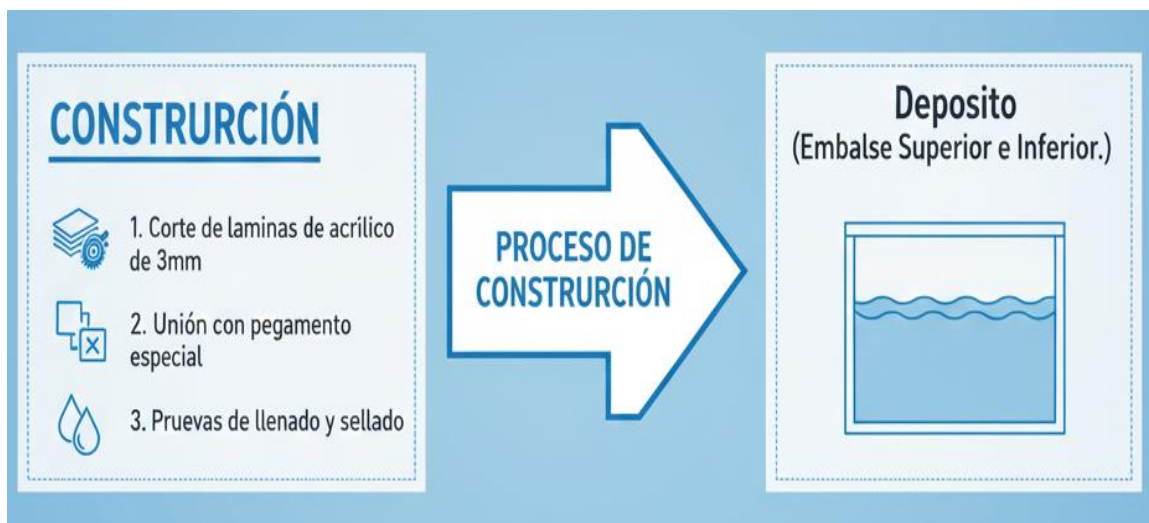


Figura 23 Construcción del embalse superior e inferior.

Instalación del sistema de tubería (Figura 24).

- El tubo se cortó a un largo de 30 cm, el cual se adaptó al acrílico.
- Se conectaron conectores de plástico y teflón para mantener el sellado en las uniones.
- Se fijo una llave de paso para dar flujo a el agua conectada entre la base del contenedor de acrílico y la tubería.

Montaje de turbina (Figura 24).

- Se incorporó 10 cm de turbina respectivamente al tubo hidráulico.
- Se utilizó teflón para evitar filtraciones y pegamento para asegurar el sellado.

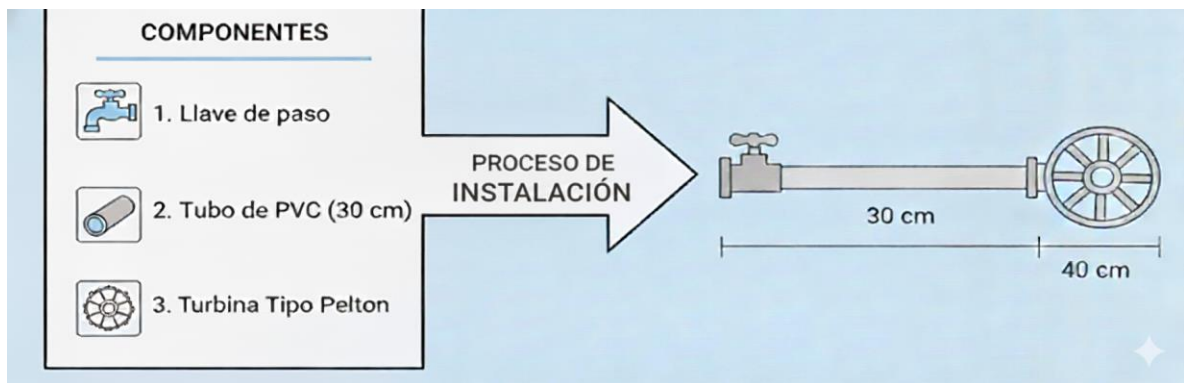


Figura 24 Instalación del sistema de tubería y turbina.

Instrumentación utilizada (Figura 25).

- Multímetro Digital.
- Cronometro.
- Resistencia de 1000 Ω .

Esto permitió registrar en cada prueba:

- Voltaje generado.
- Corriente generada.

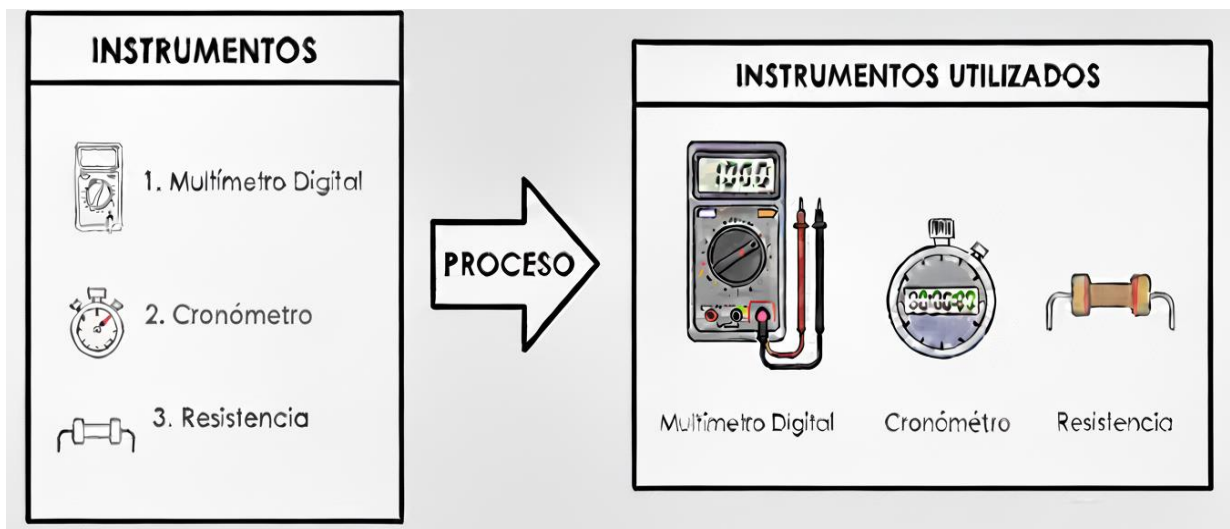


Figura 25 Instrumentación utilizada.

4.4 Sistema eléctrico y medición de datos del prototipo.

Para aprovechar la energía generada por la turbina, se definió una etapa electrónica sencilla, diseñada exclusivamente para demostrar claramente cómo la energía hidráulica se convierte en energía eléctrica. El objetivo no era construir un sistema definitivo, sino establecer una base experimental y basada en simulación que permitiera analizar el comportamiento eléctrico del prototipo en condiciones reales y controladas.

La fase seleccionada consta de tres elementos principales (Figura 26):

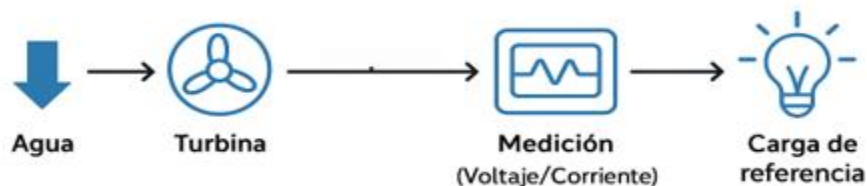


Figura 26 Diagrama de bloques simplificado del sistema.

a) Turbina–generador.

Responsable de convertir la energía del agua en energía eléctrica. La simulación consideró la relación entre el caudal, la velocidad de la turbina y la potencia hidráulica, así como la eficiencia de conversión.

b) Sistema de medición de voltaje y corriente.

Permite registrar los valores de tensión y corriente durante todo el proceso de drenaje. Estos datos son importantes para comparar pruebas reales con simulaciones y calcular las desviaciones entre ambas señales.

c) Carga de referencia.

Se utilizó una resistencia de $1000\ \Omega$ como carga estática para medir la potencia suministrada por el sistema. En el modelo matemático, se consideró una resistencia interna en el generador equivalente a $1\ \Omega$.

En la Tabla 4 se resumen las señales utilizadas tanto en la simulación como en el sistema real, así como la función que desempeñan en el modelo:

Tabla 4 Señales en la simulación.

Elemento en el sistema	Correspondencia en la simulación	Función
Turbina–generador	v_turbina (velocidad de la turbina), Q (caudal de agua), P_hid (potencia hidráulica)	Convierte la energía hidráulica en energía eléctrica
Sistema de medición	Voltaje (tensión generada), Corriente (intensidad generada)	Registra los valores eléctricos producidos
Carga de referencia	R_carga (resistencia de la carga), P_out (potencia entregada a la carga)	Recibe la energía y permite validar el funcionamiento del sistema

Este enfoque concuerda con las propuestas de diversos estudios sobre microcentrales. Por ejemplo, [61] propone combinar generadores, turbinas y electrónica de potencia en pequeñas centrales eléctricas para reducir costos y pérdidas de energía. De igual manera, [62] describe un diseño que utiliza simulaciones para calcular la eficiencia de turbinas y generadores, así como para estimar pérdidas, lo que ayuda a comprender mejor la electrónica de potencia. Por lo tanto, el paso que elegimos para nuestra simulación sigue estos principios básicos y sirve de base para futuras mejoras y estudios más detallados.

4.5 Pruebas experimentales del prototipo.

Tras ensamblar el modelo, se realizaron las primeras pruebas experimentales para comparar el comportamiento real del sistema. Para ello, se llenó el depósito superior con 5 litros de agua y se inició el proceso de vaciado con la turbina conectada a la carga. Durante todo el proceso, se registraron las mediciones del voltaje generado y la corriente generada.

Procedimiento general de las pruebas (Figura 27, 28, 29).

Las pruebas se realizaron en una secuencia ordenada para garantizar la repetibilidad:

1.- Llenado del depósito

Se vertieron cinco litros de agua en el depósito superior y se dejaron reposar. Se comprobaron las conexiones y todas las juntas para detectar fugas.

2.- Apertura del sistema.

Se permitió el flujo a través del tubo de salida y la turbina. El tiempo se midió desde el momento en que la primera gota comenzó a rodar hacia la turbina.

3.- Registro de mediciones.

Se registraron variaciones de voltaje y corriente en intervalos de tiempo utilizando el multímetro.

Se grabaron videos del flujo para observar el comportamiento del agua.

4.- Observaciones mecánicas.

Se registraron todos los fenómenos inesperados o imprevistos en la simulación.

5.-Repetición del proceso.

El proceso se repitió varias veces para confirmar la consistencia y reducir el error experimental.



Figura 27 Sistema completo.



Figura 28 Observación mecánica de la turbina.



Figura 29 Registro de mediciones.

4.6 Fenómenos observados en la práctica.

Durante las pruebas, surgieron varios efectos reales que no se reflejaban directamente en la simulación. Estos fenómenos proporcionan información valiosa sobre el comportamiento físico del sistema:

1.- Turbulencias al inicio del vaciado

Al abrirse la válvula, el agua experimentó turbulencias debido al paso del depósito hacia el tubo. Este fenómeno generó pequeñas fluctuaciones inmediatas en el caudal y en el movimiento inicial de la turbina.

2.-Vibraciones estructurales.

El acrílico presentaba ligeras vibraciones cuando la turbina alcanzaba su velocidad máxima. Mencionando que estas no afectaban al funcionamiento.

3.- Pérdidas mecánicas.

El eje de la turbina presentó fricción adicional debido a la acumulación de partículas y sedimentos en el agua, lo que generó una fricción inesperada. Esto provocó que la turbina girara con menos suavidad y redujo la eficiencia.

4.- Fricción hidráulica.

Se observó que la fricción interna en la tubería era mayor que el parámetro ideal en la simulación. Esto afectó la velocidad real del agua y redujo el caudal efectivo.

5. Variación no uniforme del caudal.

Aunque el modelo reconoce una reducción gradual de la velocidad del flujo, en la práctica se observaron microvariaciones causadas por:

- Ondulaciones en la superficie del agua.
- Cambios de presión momentáneos.
- Vibración estructural.

4.7 Resultados de los experimentos.

Para evaluar el rendimiento real de la maqueta, se realizaron múltiples pruebas independientes con una resistencia de 1 k Ω como carga. Cada prueba consistió en vaciar el tanque con 5 litros de agua y registrar el voltaje y la corriente generados cada 15 segundos, hasta que el sistema dejó de producir energía.

Comportamiento general observado.

A pesar de las pequeñas variaciones entre las distintas pruebas de un sistema mareomotriz a pequeña escala todas mostraron una tendencia muy similar:

- El voltaje máximo aparece aproximadamente a los 15 segundos, cuando el caudal es máximo.
- A medida que baja el nivel del agua, el voltaje comienza a disminuir gradualmente.
- En los momentos finales, especialmente después de 150 segundos, el caudal se vuelve insuficiente y la potencia generada cae prácticamente a cero.
- La corriente medida en (mA) sigue la misma tendencia que el voltaje, lo cual está de acuerdo con la ley de Ohm.

Este comportamiento coincide con lo observado en la simulación, lo que confirma que el prototipo reproduce de forma realista la física que hay detrás del vaciado y su efecto sobre la energía disponible.

Resultados experimentales.

Los datos obtenidos en las múltiples pruebas se presentan a continuación.

Cada columna representa una prueba experimental independiente.

Tabla 5 Prueba 1. Voltaje y corriente medidos durante las pruebas experimentales ($R = 1\text{ k}\Omega$).

Tiempo (s)	V (Prueba 1)	mA (Prueba 1)
0	0	0
15	1.85	1.84
30	1.59	1.59
45	1.51	1.52
60	1.46	1.46
75	1.32	1.34
90	1.24	1.26
105	1.17	1.16
120	1.06	1.08
135	1	1
150	0.94	0.94
165	0.85	0.84
180	0	0

Tabla 6 Prueba 2. Voltaje y corriente medidos durante las pruebas experimentales ($R = 1\text{ k}\Omega$).

Tiempo (s)	V (Prueba 2)	mA (Prueba 2)
0	0	0
15	1.94	1.93
30	1.64	1.65
45	1.57	1.59
60	1.55	1.52
75	1.47	1.49
90	1.43	1.41
105	1.33	1.34
120	1.17	1.2
135	1.14	1.16
150	1.05	1.08
165	0	0

180	0	0
-----	---	---

Tabla 7 Prueba 3. Voltaje y corriente medidos durante las pruebas experimentales ($R = 1\text{ k}\Omega$).

Tiempo (s)	V (Prueba 3)	mA (Prueba 3)
0	0	0
15	1.69	1.71
30	1.65	1.63
45	1.61	1.63
60	1.6	1.58
75	1.47	1.44
90	1.39	1.39
105	1.33	1.39
120	1.17	1.14
135	1.05	1.05
150	1.03	1.03
165	0	0
180	0	0

Interpretación de los resultados.

1. Voltaje máximo inicial.

En las pruebas, el voltaje más alto se produjo después de 15 segundos:

- Prueba 1: 1.85 V.
- Prueba 2: 1.94 V (el valor más alto).
- Prueba 3: 1.69 V.

Esto coincide con el momento en que el tanque está lleno y el caudal es máximo.

2. Disminución progresiva del voltaje.

Tras el pico inicial, la tensión disminuye gradual y continuamente, lo que refleja:

- La pérdida de altura del agua.
- La reducción del caudal.
- Menores velocidades en la turbina.

Este comportamiento es totalmente coherente con la simulación.

3. Corriente directamente proporcional al voltaje.

Dado que la carga tiene una resistencia fija de $1\text{ k}\Omega$, la corriente sigue la misma forma que el voltaje.

- Prueba 2 $\rightarrow 1.64\text{ V} \rightarrow 1.65\text{ mA}$.
- Prueba 3 $\rightarrow 1.65\text{ V} \rightarrow 1.63\text{ mA}$.

La pequeña diferencia entre voltaje y corriente se debe a la resistencia interna del generador, como se observa en el modelo teórico.

4. Fin de la generación.

En las pruebas 2 y 3, las lecturas caen a cero después de 165–180 segundos, cuando el depósito alcanza el nivel mínimo.

En la prueba 1, todavía se observan 0.85 V a los 165 s , lo que indica una pequeña diferencia en el flujo, posiblemente debido a:

- Microfugas.
- Pequeñas variaciones en la abertura del tubo.

4.8 Conclusión experimental.

El desarrollo del prototipo permitió observar directamente el comportamiento de un sistema hidráulico a pequeña escala. Desde la construcción del depósito hasta la realización de las pruebas, el proceso puso de manera notoria la importancia de elegir los materiales adecuados, garantizar conexiones seguras y tener en cuenta fenómenos reales como la turbulencia, las vibraciones y las pequeñas pérdidas mecánicas.

Las mediciones realizadas durante las pruebas demostraron que el sistema es estable, funcional y capaz de generar valores de voltaje y corriente repetibles, lo que confirma que el diseño del modelo es adecuado para demostrar el principio de conversión de la energía potencial del agua en energía eléctrica. El registro de datos mostró claramente la reducción progresiva del caudal, el comportamiento de la turbina y la variación natural de los valores eléctricos a medida que se vacía el depósito.

En general, el capítulo experimental demuestra que el modelo cumple su propósito: proporcionar una representación sencilla, segura y comprensible del funcionamiento real de un sistema mareomotriz a pequeña escala. Además, establece una base sólida para las etapas posteriores de análisis y mejora, y facilita la integración de técnicas de control y optimización en capítulos posteriores.

Capítulo 5

Comparación en simulación de la parte experimental

Capítulo 5: Comparación en simulación de la parte experimental

5.1 Comparación entre simulación y pruebas reales

Para evaluar la simulación en comparación con el modelo físico, se recopilaron y organizaron los datos utilizados en ambos casos. El propósito de esta sección es aclarar qué información se utilizó como referencia y cómo se preparó para garantizar una comparación justa y consistente.

En primer lugar, se realizó una simulación básica del sistema, reproduciendo el flujo de agua, el funcionamiento de la turbina y la producción de energía bajo las mismas condiciones que el modelo físico. Esta simulación proporciona valores continuos para el voltaje, la corriente y el tiempo de vaciado del tanque.

Por otro lado, se realizaron pruebas experimentales independientes con el modelo físico. En cada ensayo, se midieron la tensión y la corriente generadas al conectar una resistencia de 1 k Ω como carga. Estas mediciones permitieron obtener valores reales del comportamiento eléctrico del sistema bajo las mismas condiciones iniciales que la simulación.

Para comparar cuantitativamente ambos resultados, se calculó el error RMS (Raíz Cuadrada Media), lo que permite medir directamente cuánto se desvían los valores simulados de los registrados en las pruebas reales.

Los principales datos experimentales que se tuvieron en cuenta fueron:

- Voltajes registrados entre 0 y aproximadamente 2 V.
- Corrientes medidas entre 0 y aproximadamente 2 mA.
- Tiempo total de vaciado del depósito: alrededor de 180 segundos.

Esta información permitió una comparación clara entre el comportamiento teórico y el observado en la práctica, y sirvió de base para analizar la precisión del modelo.

5.2 Comparación de simulación vs Pruebas experimentales.

Esta sección explica las gráficas utilizadas para comparar la simulación del sistema con los resultados del modelo físico. El objetivo es demostrar visualmente la similitud en el comportamiento eléctrico entre ambos casos y determinar si la simulación representa con precisión lo que sucede en la realidad.

Para ello, se utilizaron gráficos que superponen las curvas de simulación sobre las tres pruebas experimentales. Esto permite observar claramente las similitudes, las diferencias y cómo evoluciona cada variable a lo largo del tiempo.

Análisis de las gráficas comparativas entre la simulación y los experimentos.

Las figuras de esta sección permiten comparar directamente el comportamiento eléctrico obtenido en la simulación con los resultados de las pruebas realizadas en

el modelo físico. Cada gráfica proporciona información distinta sobre la evolución y comportamiento del sistema durante el vaciado del depósito y la precisión de la simulación. El análisis de cada gráfica se describe a continuación.

El gráfico Voltaje vs tiempo (Simulación vs Experimentos) (Figura 30) muestra la evolución del voltaje generado desde el inicio del proceso de drenaje hasta que el sistema deja de producir energía.

La simulación comienza con un voltaje inicial cercano al medido en las pruebas reales y muestra una caída progresiva a medida que disminuye el flujo de agua, lo cual coincide con la tendencia experimental.

Las tres pruebas muestran un comportamiento muy similar, pero con ligeras diferencias en el valor máximo alcanzado y la tasa de atenuación de la señal.

Cuando el modelo se superpone a la simulación, reproduce con precisión la forma general de la curva.

- Sube al inicio.
- Se mantiene estable durante los primeros segundos.
- Desciende conforme se reduce la presión en el depósito.

Las variaciones entre los experimentos se deben a factores específicos del modelo, como la fricción interna en la tubería o pequeñas diferencias en el sello del tanque, mientras que la simulación muestra una curva más suave. No obstante, la tendencia es consistente entre ambas fuentes de datos.

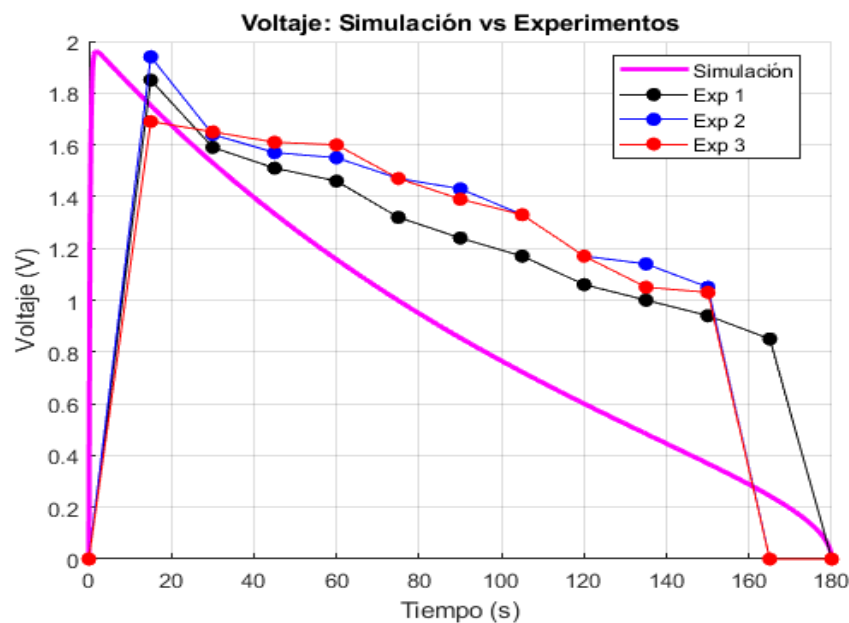


Figura 30 Voltaje vs tiempo.

En la gráfica de Corriente vs. tiempo (Simulación vs. Experimentos) (Figura 31), la corriente sigue un patrón similar al del voltaje, ya que ambos están relacionados por la resistencia conectada como carga. Esta gráfica muestra si la simulación representa con precisión la respuesta eléctrica del generador.

Las tres pruebas muestran valores iniciales similares, con corrientes cercanas a 1.8–2 mA, y todas presentan una disminución gradual a medida que el flujo se debilita. La simulación reproduce nuevamente esta tendencia general y se mantiene dentro del rango observado experimentalmente.

Al igual que con el voltaje, las señales medidas muestran pequeños picos y variaciones típicas del sistema físico, mientras que la curva simulada es más regular. A pesar de esto, el comportamiento general coincide bien, lo que indica que el modelo eléctrico utilizado describe adecuadamente el generador empleado en el modelo.

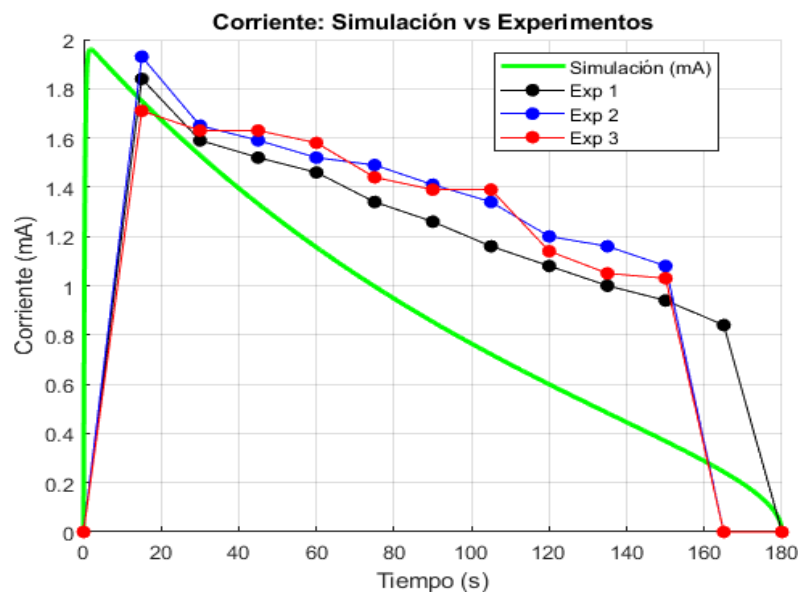


Figura 31 Corriente vs. tiempo.

En la gráfica de Potencia eléctrica vs tiempo (Simulación vs Experimentos) (Figura 32) permite visualizar directamente la eficiencia energética del sistema. Como era de esperar, la potencia eléctrica inicial es mayor cuando el tanque está lleno, ya que la corriente es más intensa, y disminuye a medida que el tanque se vacía.

Las tres pruebas experimentales muestran una tendencia muy similar, aunque con diferencias en el pico inicial o en la forma del descenso. La curva de simulación sigue la misma dinámica: comienza en un valor relativamente alto y luego disminuye suavemente.

En comparación, la simulación tiende a ser algo más uniforme, mientras que las pruebas muestran pequeñas fluctuaciones causadas por vibraciones, cambios en el

chorro de agua o fricción de la turbina. No obstante, todas las curvas coinciden en su forma general, lo que confirma que el modelo reproduce con precisión el comportamiento energético del prototipo.

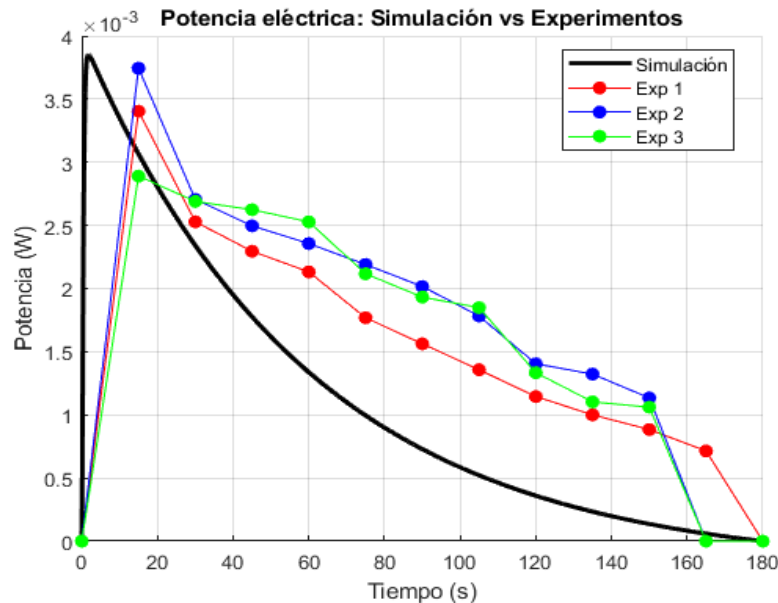


Figura 32 Potencia eléctrica vs tiempo.

5.2.1 Interpretación general de las curvas comparativas.

Al analizar en conjunto las gráficas de voltaje, corriente y potencia, podemos comprender el comportamiento del sistema al comparar la simulación con las pruebas realizadas en el modelo físico. Al superponer los datos, se pueden identificar tres puntos relevantes que ayudan a evaluar la precisión del modelo y las razones de las diferencias observadas.

1. Coincidencia en el comportamiento general.

En general, la simulación reproduce con precisión la dinámica del sistema durante el proceso de vaciado. Se observan claras similitudes en tres aspectos importantes:

- El valor máximo registrado al inicio del proceso, que aparece alrededor de los primeros 15 segundos tanto en la simulación como en los experimentos.
- La disminución continua de las señales, que sigue a la reducción del nivel del agua y de la potencia disponible para mover la turbina.
- El punto final en el que el sistema deja de generar energía, que se sitúa entre 165 y 180 segundos, coincide con el momento en que el tanque está completamente vacío.

Estas coincidencias indican que el modelo simulado representa adecuadamente la tendencia principal del fenómeno y que los cálculos utilizados describen con precisión el comportamiento del prototipo.

2. Diferencias en valores específicos.

Aunque las curvas muestran un comportamiento general, existen pequeñas diferencias específicas que son normales en un sistema físico:

- En algunos experimentos se observaron tensiones máximas ligeramente superiores a las obtenidas en la simulación. Esto puede deberse a variaciones en la posición inicial del agua, diferencias en la alineación de las tuberías o al estado mecánico de la turbina en cada prueba.
- Las corrientes experimentales muestran pequeñas fluctuaciones, especialmente durante los primeros segundos. Esto se debe a vibraciones del sistema, pequeños cambios en el chorro de agua, turbulencia, fricción de en la turbina.

Estas variaciones son típicas en prototipos a pequeña escala, donde cualquier cambio físico por mínimo que sea puede generar diferencias en las mediciones. Sin embargo, no alteran la interpretación general, ya que todas las curvas siguen la misma tendencia y se mantienen dentro del rango esperado.

3. Correspondencia entre simulación y experimentos.

De forma general, las similitudes observadas y las diferencias explicadas nos permiten concluir que la simulación describe adecuadamente el funcionamiento real del sistema. Si bien no reproduce todos los detalles del comportamiento físico, representa con precisión:

- La forma de las curvas.
- El ritmo de descenso.
- Los valores aproximados a lo largo del tiempo.

Esto demuestra que el modelo matemático utilizado cumple su propósito: reproducir el comportamiento del sistema con la precisión suficiente para realizar análisis, comparaciones y ajustes posteriores.

5.3 Cálculo de error RMS.

Para determinar la precisión de la simulación con respecto al comportamiento real del prototipo, se calculó el error RMS entre las señales simuladas y cada medición experimental. Este procedimiento proporciona un valor cuantitativo que representa la diferencia promedio entre las dos curvas a lo largo del proceso de vaciado del depósito.

De esta manera no sólo se observan coincidencias visuales en los gráficos, sino que también se obtiene una medida que respalda esta comparación. Tabla 8 (RMS).

Resultados obtenidos.

Los valores de voltaje y corriente calculados se muestran a continuación:

Tabla 8 (RMS) entre simulación y experimento.

Métrica	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Unidad
RMS error Voltaje (V)	0.368	0.435	0.422	V
RMS error Corriente (A)	0.000372	0.000444	0.000432	A

Estos valores representan la diferencia promedio entre la simulación y cada una de las pruebas que se realizaron de forma independiente.

Interpretación de los resultados.

Para comprender correctamente estos números, es necesario analizarlos dentro de la escala real del sistema:

- Durante las pruebas experimentales, la corriente máxima registrada fue de aproximadamente 2 mA.
- En este contexto, un error RMS de 0.44 mA, que es el más alto de las tres pruebas, corresponde a una variación relativa de aproximadamente el 22% con respecto al valor máximo medido.
- Esta diferencia es razonable para un prototipo físico de tamaño pequeño, donde es normal tener pequeñas variaciones en cada muestra.
- En términos de voltaje, el RMS se mantiene alrededor de 0.4 V, lo cual es consistente dado que el sistema alcanzó valores pico cercanos a 2 V durante las pruebas.

En otras palabras, la diferencia promedio entre la simulación y las mediciones reales representa sólo una fracción del valor total generado por el prototipo.

En general, estos resultados muestran que la simulación sigue de cerca la tendencia de las curvas reales y que las desviaciones están dentro de un rango aceptable para un modelo físico de esta escala.

Factores que explican las pequeñas diferencias.

Las diferencias entre los datos de simulación y los experimentales no indican un error en el modelo, sino que reflejan el comportamiento natural del sistema al tratar con un caudal de agua real y un generador en movimiento. Los factores que explican estas variaciones incluyen:

- Pequeños cambios en el flujo de agua real cuando se vacía el depósito.
- Pérdidas por fricción interna que no permanecen exactamente iguales en cada prueba.

- Pequeñas microfugas o diferencias mínimas en las conexiones del sistema.
- Variaciones en la resistencia interna del generador, que no siempre responde linealmente.
- Vibraciones u oscilaciones en la turbina cuando cambia el flujo.

Todos estos elementos introducen pequeñas irregularidades que no pueden ser capturadas con total precisión por un modelo numérico, pero sí pueden representarse mediante una tendencia general, como es el caso de los resultados obtenidos.

5.4 Conclusiones de la comparación entre simulación y pruebas experimentales.

La comparación de los resultados de la simulación con las pruebas del prototipo proporciona una visión clara del rendimiento del sistema. El análisis de las curvas de voltaje, corriente y potencia, así como de los valores de error RMS, permite concluir que la simulación representa con precisión el comportamiento real del prototipo durante el proceso de vaciado del depósito.

En primer lugar, los gráficos muestran que la forma general de las señales es consistente tanto en simulación como en los experimentos. El sistema comienza con valores altos, disminuye gradualmente a medida que baja el nivel del agua y llega casi a cero cuando el tanque está vacío. Esta consistencia indica que la simulación captura los aspectos esenciales del fenómeno.

Por otro lado, las diferencias específicas observadas entre las curvas se explican por las variaciones naturales del sistema físico. Factores como pequeñas fluctuaciones en el chorro de agua, cambios en la fricción interna, vibraciones de la turbina u otras irregularidades generan diferencias entre las pruebas. La simulación, que es un modelo idealizado, produce líneas más suaves, pero mantiene la misma tendencia observada en la realidad.

El cálculo del error RMS refuerza esta conclusión. Los valores obtenidos se mantienen dentro de un rango estrecho tanto para la tensión como para la corriente, lo que confirma que las desviaciones no son tan grandes en comparación con los valores máximos registrados durante las pruebas. En otras palabras, la diferencia entre el modelo y el prototipo representa solo una fracción de la señal total, lo que demuestra que el sistema se adapta bien a las condiciones físicas de montaje.

En general, estos resultados demuestran que la simulación es una herramienta útil y fiable para analizar el comportamiento del prototipo. Si bien no reproduce todos los detalles del sistema real, permite predecir con precisión su evolución general y proporciona una base sólida para realizar ajustes, probar escenarios y estudiar el rendimiento del sistema sin depender únicamente del modelo físico.

Capítulo 6

simulación con

controladores

Capítulo: 6 Simulación con controladores.

6.1 introducción.

En esta fase del proyecto, el objetivo no era solo generar energía, sino también aprender a controlarla en la práctica para utilizarla de forma más eficiente. Durante las pruebas realizadas en el capítulo anterior, se observó que la energía generada por el prototipo no es constante debido a diferentes factores (Figura 33).

Para evitar que estas variaciones afectaran el rendimiento eléctrico, se desarrolló una simulación específica, que incluía una etapa de control compuesta por tres elementos principales: un algoritmo MPPT, un controlador PI y modulación PWM. El objetivo era asegurar que el sistema mantuviera una potencia de salida más estable, cercana a su punto de mejor desempeño, incluso con niveles de agua más bajos (Figura 34).

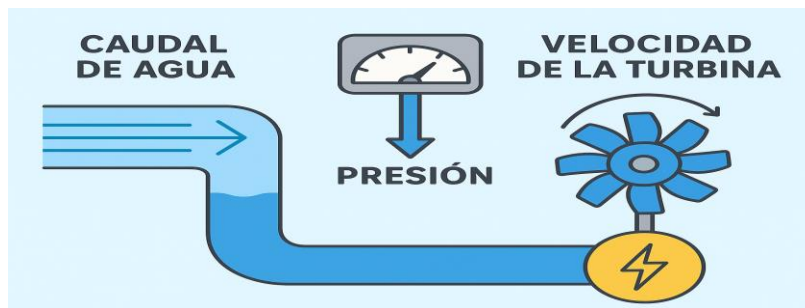


Figura 33 Caudal, presión y turbina.

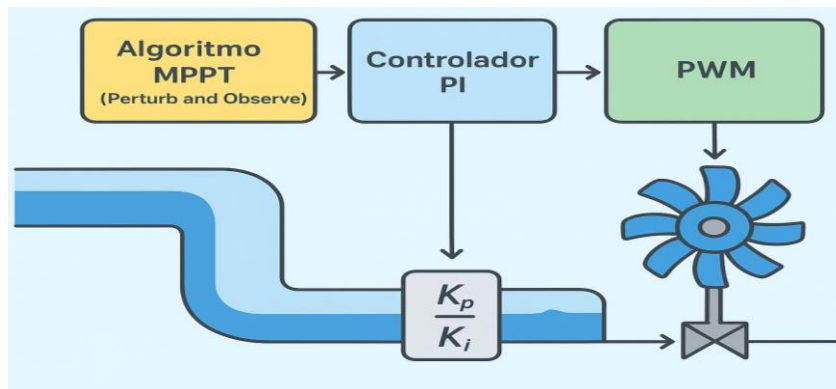


Figura 34 MPPT+PI+PWM.

6.2 Integración del esquema de control.

El esquema de control implementado en la simulación está compuesto por tres componentes que trabajan en conjunto, cada uno cumpliendo una función diferente en el proceso de regulación energética.

a) Algoritmo MPPT (Perturb and Observe).

El primer elemento es el algoritmo MPPT (Perturbar y Observar), una técnica utilizada en sistemas donde la potencia depende de variables cambiantes. Su función es mantener el sistema operando cerca del punto donde se alcanza la máxima potencia posible.

El método funciona realizando pequeños cambios en el flujo y comparando los resultados. Si el ajuste aumenta la eficiencia, esta se mantiene; si no, se corrige. De esta manera, el sistema prueba y se ajusta en tiempo real, buscando siempre el punto de máxima eficiencia.

Su uso en simulación está respaldado por estudios como [63] que muestran que el uso de MPPT mejora significativamente la eficiencia en sistemas de turbinas hidráulicas e hidrocinéticas, y [64] que muestran que el método P&O es confiable para sistemas pequeños y de fácil control, mientras que [65] sugiere mejoras para reducir las oscilaciones y estabilizar la operación.

b) Controlador PI.

Para suavizar los cambios producidos por el MPPT, se agregó un controlador proporcional-integral (PI). El objetivo es evitar que los ajustes provoquen fluctuaciones repentinas o inestabilidad en el sistema. El PI toma como referencia la carga calculada por el MPPT y corrige la señal, haciendo la respuesta más gradual y estable.

La combinación de MPPT + PI también se menciona en estudios como [66], donde se ha demostrado que utilizar MPPT junto con un controlador PI ayuda a reducir las oscilaciones y hacer que el sistema sea más estable.

c) PWM.

El tercer componente del esquema es la modulación por ancho de pulsos (PWM). En esta simulación, el PWM regula directamente la apertura y el cierre de la válvula que controla el flujo hacia la turbina.

Cuando la válvula permanece abierta durante más tiempo (pulsos más largos), entra más agua, lo que aumenta la producción de energía. Al cerrarse más rápido, el caudal disminuye, lo que a su vez reduce la potencia. Este método proporciona un control sencillo pero muy eficaz, ya que la potencia se regula directamente desde la fuente hidráulica antes de llegar al generador. En sistemas pequeños, esta estrategia es adecuada porque evita complejidad adicional y mantiene un control preciso del caudal.

Aunque se trata de una adaptación sencilla, este enfoque está relacionado con la regulación de potencia en sistemas eléctricos. Como se explica en [67], la modulación por ancho de pulso (PWM) ayuda a mantener la potencia estable en sistemas fotovoltaicos, y [68] muestra cómo la integración de MPPT y controladores similares facilita la regulación de potencia en sistemas pequeños.

6.3 Parámetros utilizados en la simulación.

Los valores utilizados en la simulación para implementar los controladores se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 9 Parámetros de implementación del esquema de control en la simulación.

Controlador	Variable controlada	Estrategia aplicada	Parámetros usados
MPPT (P&O)	Potencia eléctrica de salida	Perturba el duty y compara con la potencia previa para quedarse con el mejor resultado	$\Delta \text{Duty} = 0.01$, actualización cada 5 pasos
PI	Señal de referencia de duty (duty_ref)	Corrige el duty calculado por MPPT suavizando la respuesta y reduciendo oscilaciones	$K_p = 1$, $K_i = 0.5$
PWM	Caudal de agua hacia la turbina	Modulación ON/OFF de la válvula para regular el flujo	Frecuencia ≈ 50 Hz ($T_{\text{pwm}} = 0.02$ s)

Estos parámetros fueron elegidos para lograr una respuesta estable sin comprometer la velocidad de los ajustes.

6.4 Resultados de la simulación con controladores.

La simulación se realizó considerando el tanque de 5 litros, las propiedades hidráulicas de la tubería y la turbina, y la carga eléctrica utilizada en los experimentos reales. Los principales resultados obtenidos con el esquema de control se presentan a continuación.

1.-Altura del agua en la (Figura 35) disminuye de manera gradual. Gracias al control PWM, el vaciado no es rápido, lo que permite que la generación de energía se mantenga durante más tiempo.

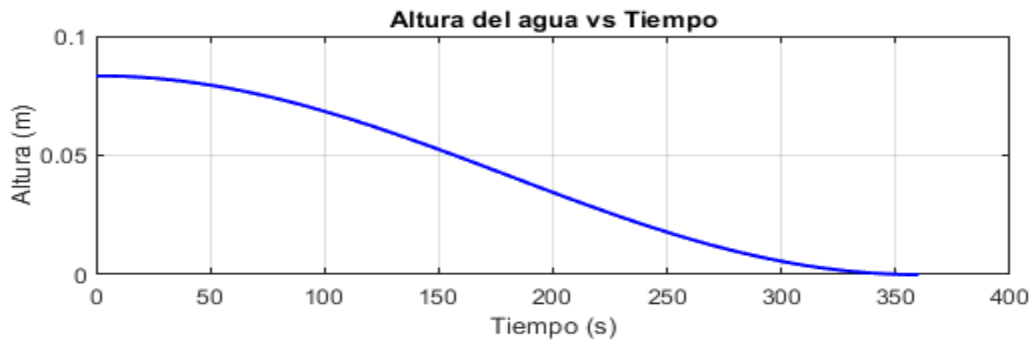


Figura 35 Altura del agua vs tiempo.

2.-Caudal en la (Figura 36) muestra un comportamiento pulsante, regulado por la válvula hidráulica, lo que asegura un flujo más constante hacia la turbina.

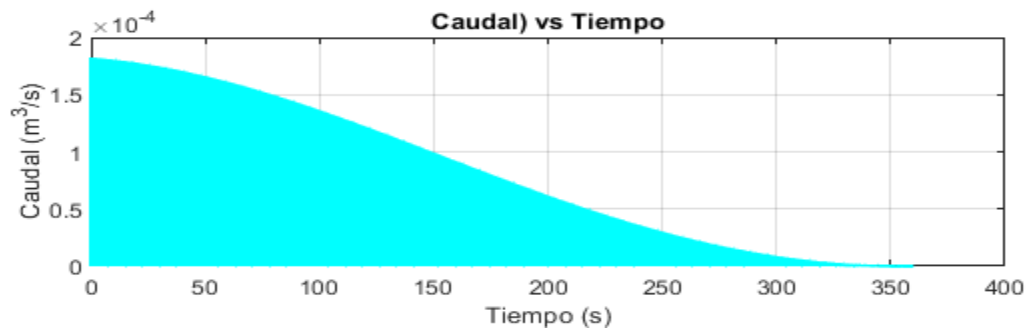


Figura 36 Caudal vs tiempo.

3.-Potencia hidráulica y eléctrica (Figura 37 y 38) permanecen más estables que sin control, evitando caídas bruscas y manteniendo la generación más uniforme.

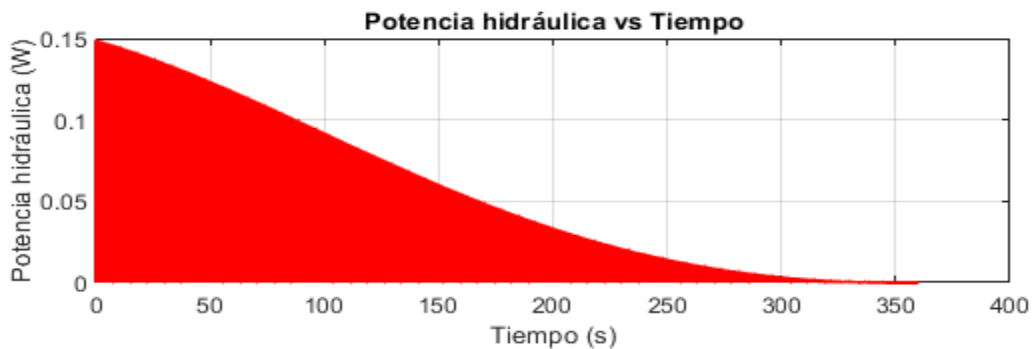


Figura 37 Potencia hidráulica vs tiempo.

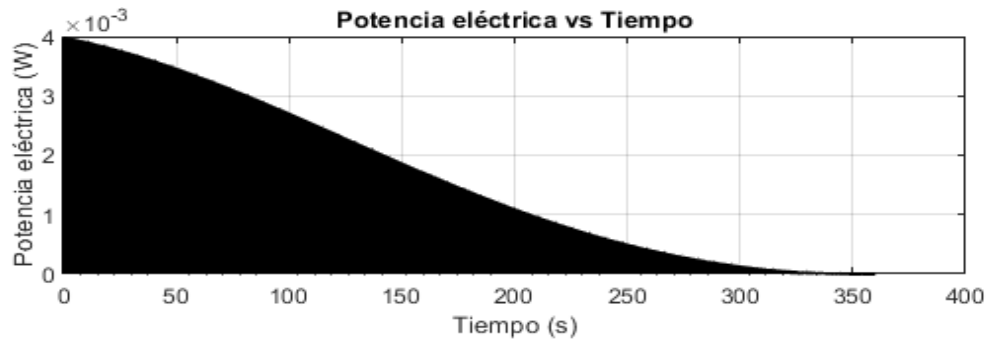


Figura 38 Potencia eléctrica vs tiempo.

4.-El voltaje en la (Figura 39) se mantiene cercano a su valor más alto, regulado de forma más uniforme a lo largo del tiempo.

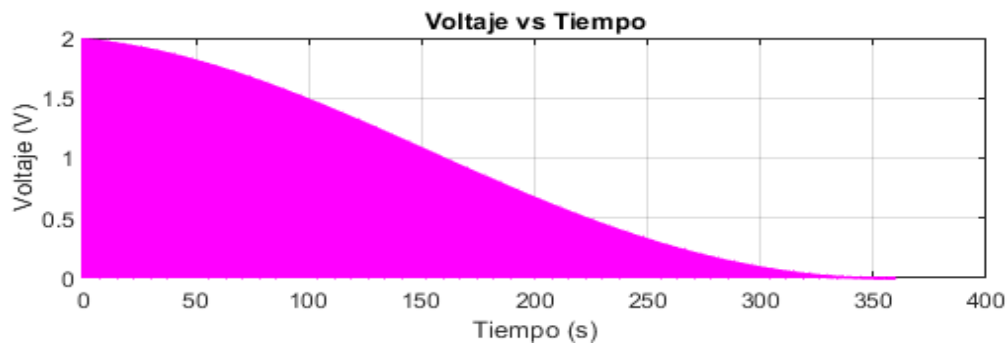


Figura 39 Voltaje vs tiempo.

5.-PWM (Figura 40) la señal de control muestra cómo la válvula se abre y cierra en pulsos, ajustando el flujo de agua para mantener la potencia estable.

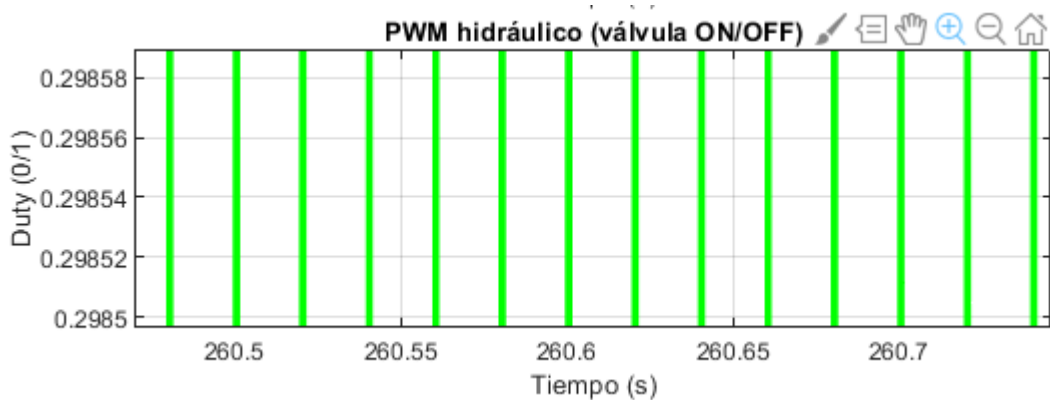


Figura 40 PWM.

6.5 Conclusiones del uso de controladores.

La integración del algoritmo MPPT (P&O), el controlador PI y la modulación por ancho de pulso (PWM) permitió que el sistema funcionara de manera más estable y eficiente, compensando eficazmente las variaciones naturales que ocurren en un pequeño prototipo hidráulico.

Gracias a esto el comportamiento general del sistema mostró varias mejoras importantes:

- El vaciado del depósito se hace más gradual, ya que PWM regula la apertura de la válvula en pulsos, lo que evita descargas bruscas y permite un uso más prolongado del recurso disponible.
- El caudal mantiene un comportamiento más controlado, ajustándose según la demanda del sistema y las decisiones tomadas por el MPPT y PI.
- La potencia hidráulica y la potencia eléctrica se estabilizan, sin las fluctuaciones bruscas que se producen cuando el sistema funciona sin controles.
- El voltaje se mantiene más alto durante más tiempo, lo que indica que el MPPT y el PI están realizando ajustes efectivos para mantener la operación cerca del punto de máxima potencia.
- La producción total de energía aumenta porque la potencia útil de la turbina se utiliza durante un período de tiempo más largo y con menos variaciones.

En general, estos resultados muestran que con esquema relativamente simple puede proporcionar mejoras significativas en un sistema de generación de energía a pequeña escala. La combinación de MPPT (P&O), un controlador PI y PWM proporciona un funcionamiento más estable, una mejor regulación del caudal y una recuperación de energía más eficiente, sin necesidad de equipos electrónicos complejos o costosos.

Esta integración demuestra que, incluso en prototipos educativos o de investigación, es posible optimizar el rendimiento del sistema utilizando las técnicas de control disponibles, logrando un mejor aprovechamiento de los recursos hidráulicos y una mayor continuidad en la producción de energía.

Capítulo 7

conclusiones

Capítulo: 7 Conclusiones

7.1 Discusión de resultados.

Los resultados obtenidos en este proyecto proporcionan una comprensión clara del comportamiento de un sistema mareomotriz a pequeña escala y los factores que influyen en su rendimiento. En primer lugar, la comparación entre la simulación inicial y las pruebas experimentales demostró que el modelo es capaz de reproducir con precisión el comportamiento general del sistema. Si bien se observaron diferencias entre los valores simulados y medidos, estas variaciones son normales en un prototipo físico y no afectan la interpretación del comportamiento del sistema.

Al implementar el esquema de control basado en MPPT, PI y PWM, la simulación mostró mejoras claras el vaciado del embalse fue más gradual, el caudal se reguló con mayor fluidez y tanto la potencia como el voltaje se mantuvieron más estables durante períodos más largos. Esto sugiere que, incluso en sistemas pequeños, el uso de técnicas de control básicas puede marcar una diferencia significativa en la eficiencia y la estabilidad de la generación de energía.

La comparación de las curvas obtenidas en las diferentes etapas del proyecto muestra que el modelo responde consistentemente a los principios teóricos, lo que valida el diseño y el enfoque utilizados. En general, los resultados muestran que la combinación de un modelo matemático simple, mediciones experimentales y un esquema de control sencillo puede proporcionar una comprensión clara del comportamiento de un sistema mareomotriz a pequeña escala.

7.2 Conclusión general.

El objetivo principal de este trabajo fue evaluar el funcionamiento de un sistema mareomotriz a pequeña escala y analizar la energía eléctrica generada a partir del flujo de agua. Este objetivo se logró. El modelo experimental permitió observar directamente cómo el nivel del agua, el caudal y la respuesta del generador afectan la energía producida. Además, demostró que incluso un dispositivo simple puede replicar el comportamiento básico de los sistemas reales.

La integración de los sistemas de control MPPT, PI y PWM demostró que es posible optimizar el aprovechamiento de los recursos hidráulicos y mantener una producción más estable, evitando variaciones repentinas en la potencia eléctrica. Esto confirma que un control adecuado es clave para lograr sistemas más eficientes, incluso con prototipos pequeños.

En general, el proyecto proporcionó una mejor comprensión de los principios físicos y eléctricos que intervienen en la conversión de la energía mareomotriz y demostró la viabilidad de construir prototipos experimentales que puedan servir de base para investigaciones más avanzadas. Los resultados obtenidos sientan una base sólida para el desarrollo de futuras versiones a mayor escala, con instrumentación

mejorada y sistemas de control más sofisticados, contribuyendo así al desarrollo de tecnologías limpias y sostenibles.

7.3 Trabajos futuros.

A partir de las experiencias y resultados alcanzados, se han identificado varias oportunidades para continuar y ampliar este trabajo:

1.-Implementación física del sistema de control.

Reproducir el esquema MPPT-PI-PWM utilizado en la simulación en el modelo real permitiría validar su rendimiento fuera del entorno digital.

2.-Mejorar la instrumentación del prototipo.

La incorporación de sensores más precisos para medir el caudal, la presión, la velocidad de la turbina y la potencia permitirá obtener datos más detallados y mejorar la comparación con la simulación.

3.-Diseño de un convertidor DC–DC real.

En lugar de PWM en la válvula, se puede integrar un convertidor electrónico para regular la potencia de forma más eficiente.

En general, estas propuestas abren la puerta a seguir desarrollando sistemas de generación de energía mareomotriz a pequeña escala, tanto desde el punto de vista experimental como desde el de la simulación y los controladores.

Bibliografía

Bibliografía

- [1] V. Khare and M. A. Bhuiyan, "Tidal energy-path towards sustainable energy: A technical review," *Cleaner Energy Systems*, vol. 3, p. 100041, 2022.
- [2] R. Dashti, G. R. Ghanbari, H. R. Shaker, and H. Mirshekali, "Transient Analysis of Tidal Power Plant Connected to Network When Faced with Symmetrical and Unsymmetrical Faults," in *2020 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE)*, 2020: IEEE, pp. 165-169.
- [3] M. T. Graciá Ribes, "Estudio de las diferentes formas de conseguir energía con el mar y su aplicabilidad en el litoral español," 2014.
- [4] K. Solaun and E. Cerdá, "The impact of climate change on the generation of hydroelectric power—a case study in Southern Spain," *Energies*, vol. 10, no. 9, p. 1343, 2017.
- [5] M. Ciampittiello, A. Marchetto, and A. Boggero, "Water resources management under climate change: a review," *Sustainability*, vol. 16, no. 9, p. 3590, 2024.
- [6] T. Montllonch Araquistain, "TIDAL POWER: Economic and Technological Assessment," 2010.
- [7] L. Bao, Y. Wang, H. Li, J. Chen, F. Huang, and C. Jiang, "Design and Experimental Research of a Lifting-Type Tidal Energy Capture Device," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, no. 7, p. 1100, 2024.
- [8] R. Alipour, R. Alipour, S. S. Rahimian Koloor, M. Petru, and S. A. Ghazanfari, "On the performance of small-scale horizontal axis tidal current turbines. Part 1: One single turbine," *Sustainability*, vol. 12, no. 15, p. 5985, 2020.
- [9] D. R. Noble, S. Draycott, A. Nambiar, B. G. Sellar, J. Steynor, and A. Kiprakis, "Experimental assessment of flow, performance, and loads for tidal turbines in a closely-spaced array," *Energies*, vol. 13, no. 8, p. 1977, 2020.
- [10] M. Pintar and A. J. Kolios, "Design of a novel experimental facility for testing of tidal arrays," *Energies*, vol. 6, no. 8, pp. 4117-4133, 2013.
- [11] I.-c. Kim, J. Wata, W. Tongphong, J.-S. Yoon, and Y.-H. Lee, "Magnetic Coupling for a 10 kW Tidal Current Turbine: Design and Small Scale Experiments," *Energies*, vol. 13, no. 21, p. 5725, 2020.
- [12] S. Rouhi, S. Sadeqi, N. I. Xiros, E. Aktosun, L. Birk, and J. Ioup, "Development of mathematical model for coupled dynamics of small-scale ocean current turbine and generator to optimize hydrokinetic energy harvesting applications," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 16, p. 7164, 2024.
- [13] P. Schmitt *et al.*, "A comparison of tidal turbine characteristics obtained from field and laboratory testing," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 10, no. 9, p. 1182, 2022.
- [14] M. Lewis *et al.*, "Power variability of tidal-stream energy and implications for electricity supply," *Energy*, vol. 183, pp. 1061-1074, 2019.
- [15] S. Barbarelli and B. Nastasi, "Tides and tidal currents—Guidelines for site and energy resource assessment," *Energies*, vol. 14, no. 19, p. 6123, 2021.

- [16] G. Giannini, "Modelling and feasibility study on using tidal power with an energy storage utility for residential needs," *Inventions*, vol. 4, no. 1, p. 11, 2019.
- [17] N. Čož, R. Ahmadian, and R. A. Falconer, "Implementation of a full momentum conservative approach in modelling flow through tidal structures," *Water*, vol. 11, no. 9, p. 1917, 2019.
- [18] L. Kangaji, E. F. Orumwense, and K. M. Abo-Al-Ez, "Modelling and simulation of tidal energy generation system: a systematic literature review," *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*, 2022.
- [19] D. Vandercruyssen, S. Baker, D. Howard, and G. Aggidis, "Tidal range barrage design and construction," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 11, p. 4592, 2024.
- [20] J. G. Rueda-Bayona, J. L. García Vélez, and D. M. Parrado-Vallejo, "Effect of Sea Level Rise and Access Channel Deepening on Future Tidal Power Plants in Buenaventura Colombia," *Infrastructures*, vol. 8, no. 3, p. 51, 2023.
- [21] J. Oviedo-Salazar, M. Badii, A. Guillen, and O. L. Serrato, "Historia y Uso de Energías Renovables," *Revista Daena: International Journal of Good Conscience*, vol. 10, no. 1, 2015.
- [22] C. V. M. Labriola and C. E. Peralta, "Análisis de sistema de convertidores fluido-dinámicos de energía renovable para la Patagonia Austral de Argentina," *Informe Científico Técnico UNPA*, vol. 4, no. 1, pp. 128-143, 2012.
- [23] F. Jarabo, C. Perez, N. Elortegui, J. Fernandez, and J. Macias, "El libro de las energías renovables," *SAPT-1988*, 1988.
- [24] S. P. Neill, K. A. Haas, J. Thiébot, and Z. Yang, "A review of tidal energy—Resource, feedbacks, and environmental interactions," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 13, no. 6, 2021.
- [25] P. Fernández-Díez, "Energía mareomotriz," *Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Catabria López-González J., Hiriart-Le Bert G. y Silva-Casarín R*, 2018.
- [26] L. Flores Mateos and M. Hartnett, "Hydrodynamic effects of tidal-stream power extraction for varying turbine operating conditions," *Energies*, vol. 13, no. 12, p. 3240, 2020.
- [27] Z. Yang *et al.*, "Modeling assessment of tidal energy extraction in the Western Passage," *Journal of marine science and engineering*, vol. 8, no. 6, p. 411, 2020.
- [28] J. Zanganeh, K. Gwynne, Z. Peng, and B. Moghtaderi, "Investigation of Hydrokinetic Tidal Energy Harvesting Using a Mangrove-Inspired Device," *Sustainability*, vol. 15, no. 22, p. 15886, 2023.
- [29] Y. Zheng, W. Yang, K. Wei, Y. Chen, and H. Zou, "Enhancing Efficiency and Reliability of Tidal Stream Energy Conversion through Swept-Blade Design," *Energies*, vol. 17, no. 2, p. 334, 2024.
- [30] J. Thiébot, N. Djama Dirieh, S. Guillou, and N. Guillou, "The efficiency of a fence of tidal turbines in the Alderney Race: Comparison between analytical and numerical models," *Energies*, vol. 14, no. 4, p. 892, 2021.
- [31] A. Roberts, B. Thomas, P. Sewell, Z. Khan, S. Balmain, and J. Gillman, "Current tidal power technologies and their suitability for applications in

- coastal and marine areas," *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, vol. 2, no. 2, pp. 227-245, 2016.
- [32] D. Parrado and J. G. Rueda-Bayona, "Three-Dimensional Hydrodynamic and CFD Modeling of a Tidal Barrage Power Plant without Sluicing in Buenaventura, Colombia," *Infrastructures*, vol. 9, no. 8, p. 127, 2024.
 - [33] J. Xue, R. Ahmadian, and R. A. Falconer, "Optimising the operation of tidal range schemes," *Energies*, vol. 12, no. 15, p. 2870, 2019.
 - [34] D. R. Noble, K. Grattan, and H. Jeffrey, "Assessing the Costs of Commercialising Tidal Energy in the UK," *Energies*, vol. 17, no. 9, p. 2085, 2024.
 - [35] E. Segura, R. Morales, and J. A. Somolinos, "Cost assessment methodology and economic viability of tidal energy projects," *Energies*, vol. 10, no. 11, p. 1806, 2017.
 - [36] E. Marin-Coria, R. Silva, C. Enriquez, M. L. Martínez, and E. Mendoza, "Environmental assessment of the impacts and benefits of a salinity gradient energy pilot plant," *Energies*, vol. 14, no. 11, p. 3252, 2021.
 - [37] L. Mackie, D. Coles, M. Piggott, and A. Angeloudis, "The potential for tidal range energy systems to provide continuous power: a UK case study," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 8, no. 10, p. 780, 2020.
 - [38] J. Wolf, I. A. Walkington, J. Holt, and R. Burrows, "Environmental impacts of tidal power schemes," in *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Maritime Engineering*, 2009, vol. 162, no. 4: Thomas Telford Ltd, pp. 165-177.
 - [39] T. Hooper and M. Austen, "Tidal barrages in the UK: Ecological and social impacts, potential mitigation, and tools to support barrage planning," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 23, pp. 289-298, 2013.
 - [40] J. López-González, H.-L. Bert, and R. Silva-Casarín, "Cuantificación de energía de una planta mareomotriz," *Ingeniería, investigación y tecnología*, vol. 11, no. 2, pp. 233-245, 2010.
 - [41] H. Chen *et al.*, "Fractional-order PI control of DFIG-based tidal stream turbine," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 8, no. 5, p. 309, 2020.
 - [42] K. Ghefiri, S. Bouallègue, I. Garrido, A. J. Garrido, and J. Haggège, "Complementary power control for doubly fed induction generator-based tidal stream turbine generation plants," *Energies*, vol. 10, no. 7, p. 862, 2017.
 - [43] A. G. Abo-Khalil and A. S. Alghamdi, "MPPT of permanent magnet synchronous generator in tidal energy systems using support vector regression," *Sustainability*, vol. 13, no. 4, p. 2223, 2021.
 - [44] M. Wang, X. Wang, and T. Wang, "Fault-tolerant control of tidal stream turbines: non-singular fast terminal sliding mode and adaptive robust method," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, no. 4, p. 539, 2024.
 - [45] Y. Ran, M. Qiao, and Y. Xia, "Research on control strategy of PMSG-PWM power generation system with tidal energy," *Electronics*, vol. 13, no. 13, p. 2455, 2024.
 - [46] A. Darwish and G. A. Aggidis, "A review on power electronic topologies and control for wave energy converters," *Energies*, vol. 15, no. 23, p. 9174, 2022.

- [47] K. Ghefiri, I. Garrido, S. Bouallègue, J. Haggège, and A. J. Garrido, "Hybrid neural fuzzy design-based rotational speed control of a tidal stream generator plant," *Sustainability*, vol. 10, no. 10, p. 3746, 2018.
- [48] H. H. Aly, F. M. Alhaddad, and M. El-Hawary, "A Proposed Adaptive Intelligent Controllers for Tidal Currents Turbine Driving DDPMSG for Improving the Output Power Generated," in *2019 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, 2019: IEEE, pp. 1-4.
- [49] D. Borkowski and M. Majdak, "Small hydropower plants with variable speed operation—an optimal operation curve determination," *Energies*, vol. 13, no. 23, p. 6230, 2020.
- [50] F. d. S. L. Ribeiro, R. C. Brandão Filho, A. R. Galvão Filho, R. V. de Carvalho, and C. J. Coelho, "Optimal operation of the Jirau hydroelectric power plant reservoir using nonlinear optimization," in *2020 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE)*, 2020: IEEE, pp. 1-4.
- [51] E. Quaranta *et al.*, "Hydropower case study collection: Innovative low head and ecologically improved turbines, hydropower in existing infrastructures, hydropeaking reduction, digitalization and governing systems," *Sustainability*, vol. 12, no. 21, p. 8873, 2020.
- [52] J. Xu, Y. Yang, Y. Hu, T. Xu, and Y. Zhan, "MPPT control of hydraulic power take-off for wave energy converter on artificial breakwater," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 8, no. 5, p. 304, 2020.
- [53] J. Zhang, Y. Min, B. Feng, and W. Duan, "Research and application of key technologies for dynamic control of reservoir water level in flood season," *Water*, vol. 13, no. 24, p. 3576, 2021.
- [54] F. Bunea, G. D. Ciocan, D. M. Bucur, G. Dunca, and A. Nedelcu, "Hydraulic turbine performance assessment with implementation of an innovative aeration system," *Water*, vol. 13, no. 18, p. 2459, 2021.
- [55] M. Ahmed, I. Harbi, R. Kennel, M. L. Heldwein, J. Rodríguez, and M. Abdelrahem, "Performance evaluation of PV Model-Based maximum power point tracking techniques," *Electronics*, vol. 11, no. 16, p. 2563, 2022.
- [56] Y. Ji, H. Song, Z. Xue, Z. Li, M. Tong, and H. Li, "A Review of the Efficiency Improvement of Hydraulic Turbines in Energy Recovery," *Processes*, vol. 11, no. 6, p. 1815, 2023.
- [57] Y. Gu *et al.*, "Simulation of a Tidal Current-Powered Freshwater and Energy Supply System for Sustainable Island Development," *Sustainability*, vol. 16, no. 20, p. 8792, 2024.
- [58] R. Morales and E. Segura, "Tidal and ocean current energy," vol. 11, ed: MDPI, 2023, p. 683.
- [59] N. G. Cuervo, "Dimensionamiento matemático de obras hidráulicas para una pequeña central hidroeléctrica en Río Negro, Cundinamarca mediante métodos lógicos deductivos por medio de ábacos y gráficas obsoletas," *Publicaciones e Investigación*, vol. 13, no. 2, pp. 61-76, 2019.
- [60] J. Pérez Molina, R. Badillo Lora, R. I. López Téllez, J. F. Melchor Hernández, and E. F. Zarza Camacho, "Desarrollo de un prototipo de un generador de energía hidráulica utilizando una turbina tipo tornillo de Arquímedes," 2022.

- [61] D. Liszka *et al.*, "Alternative solutions for small hydropower plants," *Energies*, vol. 15, no. 4, p. 1275, 2022.
- [62] B. A. Nasir, "Design of micro-hydro-electric power station," *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, vol. 2, no. 5, pp. 39-47, 2013.
- [63] R.-A. Chihaia, I. Vasile, G. Cîrciumaru, S. Nicolaie, E. Tudor, and C. Dumitru, "Improving the energy conversion efficiency for hydrokinetic turbines using mppt controller," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 21, p. 7560, 2020.
- [64] T. Esram and P. L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques," *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439-449, 2007.
- [65] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method," *IEEE transactions on power electronics*, vol. 20, no. 4, pp. 963-973, 2005.
- [66] H. Islam, S. Mekhilef, N. M. Shah, T. K. Soon, A. Wahyudie, and M. Ahmed, "Improved proportional-integral coordinated MPPT controller with fast tracking speed for grid-tied PV systems under partially shaded conditions," *Sustainability*, vol. 13, no. 2, p. 830, 2021.
- [67] D. Sera, L. Mathe, T. Kerekes, S. V. Spataru, and R. Teodorescu, "On the perturb-and-observe and incremental conductance MPPT methods for PV systems," *IEEE journal of photovoltaics*, vol. 3, no. 3, pp. 1070-1078, 2013.
- [68] F. A. Mohammed, M. E. Bahgat, S. S. Elmasry, and S. M. Sharaf, "Design of a maximum power point tracking-based PID controller for DC converter of stand-alone PV system," *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 9, no. 1, p. 9, 2022.

Anexos.

1.1 Código de simulación sin control.

```
2 clc; clear; close all;
3 % 📏 Parámetros físicos de la maqueta
4 w = 0.20; % Ancho del contenedor superior (m)
5 l = 0.30; % Largo del contenedor superior (m)
6 volumen_agua = 0.005; % Volumen total de agua (m^3) = 5 litros
7 A_base = w * l; % Área de la base del contenedor (m^2)
8 h = volumen_agua / A_base; % Altura inicial del agua (m)
9 h0 = h; % Guardar la altura inicial (para usar en la curva)
10 %esta altura cambia dinámicamente a medida que se vacía el depósito
11 % 📏 Parámetros del tubo y la turbina
12 % Tubo de conexión
13 L_tubo = 0.30; % Longitud del tubo recto (m)
14 D_tubo = 0.015; % Diámetro del tubo (m) = 1.5 cm
15 A_tubo = pi * (D_tubo/2)^2; % Área transversal del tubo (m^2)
16 % Turbina
17 L_turbina = 0.10; % Longitud de la turbina (m)
18 D_turbina = 0.013; % Diámetro hidráulico interior (m)
19 A_turbina = pi * (D_turbina/2)^2; % Área efectiva del paso del agua en la
    turbina
20 % Longitud total del sistema hidráulico (tubo + turbina)
21 L_total = L_tubo + L_turbina;
22 % ⚙️ Constantes físicas del fluido
23 g = 9.81; % Gravedad (m/s^2)
24 rho = 1000; % Densidad del agua (kg/m^3)
25 f = 0.02; % Factor de fricción en el tubo
26 eta = 0.85; % Eficiencia de la turbina (85%)
27 % se considera pérdidas internas en la turbina y el generador
28 % ⚡ Parámetros del generador y carga
29 R_carga = 1000; % Resistencia de la carga (Ohm)
30 R_int = 1; % Resistencia interna del generador (Ohm)
31 % Velocidad máxima estimada y caudal máximo
32 v_max = sqrt(2*g*h/(1 + f*(L_total/D_tubo))); % Velocidad máxima estimada
33 Q_max = A_tubo * v_max; % Caudal máximo en el tubo
34 K_gen = 2 / Q_max; % Constante que convierte
    caudal en voltaje
35 % ⌚ Parámetros de simulación temporal
36 dt = 0.1; % Paso de tiempo (s)
37 t_total = 180; % Tiempo total de simulación (s)
38 N = t_total/dt; % Número de iteraciones
39 t = (0:N-1)*dt; % Vector de tiempo
40 % Inicialización de vectores
41 Altura = zeros(1, N); % Altura del agua (m)
42 Caudal = zeros(1, N); % Caudal (m^3/s)
43 Pot_hidraulica = zeros(1, N); % Potencia hidráulica (W)
44 Voltaje = zeros(1, N); % Voltaje de salida (V)
45 Corriente = zeros(1, N); % Corriente en la carga (A)
```

```

46 Potencia_electrica = zeros(1, N); % Potencia eléctrica entregada a la
    carga (W)
47 % Constante de tiempo para crecimiento exponencial del voltaje=
48 tau = 0.3; % Constante de tiempo (s) para que el voltaje suba suavemente
49 % Bucle principal de la simulación
50 for k = 1:N
51     % 🌀 Cálculo de la velocidad del agua (con fricción en tubo)
52     if h > 0
53         v_tubo = sqrt(2*g*h/(1 + f*(L_total/D_tubo)));
54         % Bernoulli con fricción para velocidad en el tubo
55     else
56         v_tubo = 0;
57     end
58
59     % 📏 Caudal en el tubo
60     Q_tubo = A_tubo * v_tubo; % Caudal volumétrico (m^3/s)
61
62     % Velocidad en la turbina (continuidad)
63     v_turbina = Q_tubo / A_turbina; % Aumento de velocidad por reducción
de área
64     Q = A_turbina * v_turbina; % Caudal efectivo en la turbina
65
66     % ⚡ Potencia hidráulica y eléctrica
67     P_hid = rho * g * Q * h; % Potencia hidráulica disponible
68     P_el = eta * P_hid; % Potencia eléctrica considerando eficiencia
de la turbina
69
70     % Voltaje generado (crecimiento exponencial desde 0)
71     V_teorico = K_gen * Q; % Voltaje proporcional al caudal
72     factor_exp = 1 - exp(-t(k)/tau); % Crecimiento exponencial
73     V_out = V_teorico * factor_exp; % Voltaje final con respuesta
gradual
74
75     % Corriente y potencia en carga
76     I = V_out / (R_carga + R_int); % Ley de Ohm
77     P_out = V_out * I; % Potencia real entregada a la carga
78
79     % Vaciado del depósito
80     h = h - (Q / A_base) * dt; % Vaciado del contenedor
81     if h < 0
82         h = 0; % Evitar altura negativa
83     end
84
85     % Guardar resultados
86     Altura(k) = h;
87     Caudal(k) = Q;
88     Pot_hidraulica(k) = P_hid;
89     Voltaje(k) = V_out;
90     Corriente(k) = I;
91     Potencia_electrica(k) = P_out;

```

```

92 end
93 % Caída suave
94 % Normalizado 0..1
95 x = t ./ t_total;
96 x(x>1) = 1;
97 % 4) Exponencial normalizada (muy controlable con "a"; suave al inicio)
98 a = 3; % prueba 1..6: mayor a = más curvatura (suaviza inicio)
99 h_des = h0 * ( (exp(-a*x) - exp(-a)) ./ (1 - exp(-a)) );
100 % Evitar negativos
101 h_des(h_des < 0) = 0;
102 %Recalcular todas las magnitudes de forma vectorial usando la misma
    física
103 v_tubo_des = sqrt( 2*g .* h_des ./ (1 + f*(L_total / D_tubo)) ); %
    velocidad en el tubo
104 Q_des      = A_tubo .* v_tubo_des;                                %
    caudal (m^3/s)
105 v_turb_des = Q_des ./ A_turbina;                                  %
    velocidad en turbina (si la necesitas)
106 P_hid_des  = rho .* g .* Q_des .* h_des;                          %
    potencia hidráulica (W)
107 P_el_des   = eta .* P_hid_des;                                    %
    potencia eléctrica (como en tu script)
108 V_teorico_des = K_gen .* Q_des;                                   % voltaje teórico
    proporcional al caudal
109 factor_exp_vec = 1 - exp(-t ./ tau);                             % misma
    inercia/exponencial que usas
110 V_out_des    = V_teorico_des .* factor_exp_vec; % voltaje de salida
    suavizado
111 I_des        = V_out_des ./ (R_carga + R_int);                    % corriente en la carga
112 P_out_des     = V_out_des .* I_des;                               % potencia en la carga
113 % --- Reemplazar los vectores originales por las versiones suavizadas ---
114 Altura = h_des;
115 Caudal = Q_des;
116 Pot_hidraulica = P_hid_des;
117 Voltaje = V_out_des;
118 Corriente = I_des;
119 Potencia_electrica = P_out_des;
120 %% ===== GRÁFICAS DE RESULTADOS
    =====
121 figure('Name','Simulación Maqueta
    Mareomotriz','NumberTitle','off','Color','w');
122 subplot(3,2,1)
123 plot(t, Altura, 'b','LineWidth',1.5);
124 xlabel('Tiempo (s)'); ylabel('Altura (m)');
125 title('Altura del agua vs Tiempo'); grid on;
126 subplot(3,2,2)
127 plot(t, Caudal, 'c','LineWidth',1.5);
128 xlabel('Tiempo (s)'); ylabel('Caudal (m^3/s)');
129 title('Caudal vs Tiempo'); grid on;
130 subplot(3,2,3)

```

```

131 plot(t, Pot_hidraulica, 'r','LineWidth',1.5);
132 xlabel('Tiempo (s)'); ylabel('Potencia hidráulica (W)');
133 title('Potencia hidráulica vs Tiempo'); grid on;
134 subplot(3,2,4)
135 plot(t, Voltaje, 'm','LineWidth',1.5);
136 xlabel('Tiempo (s)'); ylabel('Voltaje (V)');
137 title('Voltaje vs Tiempo'); grid on;
138 subplot(3,2,5)
139 plot(t, Potencia_electrica, 'k','LineWidth',1.5);
140 xlabel('Tiempo (s)'); ylabel('Potencia eléctrica (W)');
141 title('Potencia eléctrica vs Tiempo'); grid on;
142 subplot(3,2,6)
143 plot(t, Corriente, 'g','LineWidth',1.5);
144 xlabel('Tiempo (s)'); ylabel('Corriente (A)');
145 title('Corriente vs Tiempo'); grid on;

```

2.2 Código simulación con controladores.

```

clc; clear; close all;
%% 📏 Parámetros físicos de la maqueta
w = 0.20;           % Ancho del contenedor (m)
l = 0.30;           % Largo del contenedor (m)
volumen_agua = 0.005; % Volumen total de agua (m^3) = 5 litros
A_base = w * l;     % Área de la base del contenedor (m^2)
h = volumen_agua / A_base; % Altura inicial del agua (m)
%% 📏 Parámetros del tubo y la turbina
% Tubo
L_tubo = 0.30;      % Longitud del tubo recto (m)
D_tubo = 0.015;     % Diámetro del tubo (m) = 1.5 cm
A_tubo = pi * (D_tubo/2)^2; % Área del tubo (m^2)
% Turbina
L_turbina = 0.10;   % Longitud de la turbina (m)
D_turbina = 0.013;  % Diámetro hidráulico interior de la turbina (m) = 13 mm
A_turbina = pi * (D_turbina/2)^2; % Área efectiva del paso en la turbina
% Longitud total del sistema hidráulico
L_total = L_tubo + L_turbina;
%% ⚡ Constantes físicas del fluido
g = 9.81;           % Aceleración de la gravedad (m/s^2)
rho = 1000;         % Densidad del agua (kg/m^3)
f = 0.02;           % Factor de fricción en el tubo
eta = 0.95;         % Eficiencia de la turbina
%% ⚡ Parámetros eléctricos del generador y carga
R_carga = 1000;     % Resistencia equivalente (Ohm)
R_int = 1;          % Resistencia interna aproximada del generador (Ohm)
% Constante del generador (ajustada a 2.5 V con caudal máximo inicial)
v_max = sqrt(2*g*h/(1+f*(L_total/D_tubo))); % Velocidad máxima estimada
Q_max = A_tubo * v_max; % Caudal máximo en tubo
K_gen = 2 / Q_max;  % Constante generador

```

```

%% ⌚ Parámetros de simulación temporal
dt = 0.001;           % Paso de tiempo para la simulación (s)
t_total = 360;         % Tiempo total de simulación (s)
N = t_total/dt;        % Número total de iteraciones
%% 🔍 Parámetros del MPPT (Perturb and Observe)
duty = 0;              % Valor inicial del ciclo de trabajo (entre 0 y 1)
delta_duty = 0.01;     % Perturbación para el algoritmo MPPT
dir = 1;               % Dirección inicial para cambiar duty (+ o -)
P_prev = 0;            % Potencia previa para comparación en MPPT
%% ⚙️ Parámetros del controlador PI
Kp = 1;                % Ganancia proporcional
Ki = 0.5;              % Ganancia integral
integral_error = 0;    % Estado integral
%% 📏 Parámetro del PWM (señal cuadrada ON/OFF)
T_pwm = 0.02;          % Periodo PWM (s) → 50 Hz, señal real
%% Inicialización de vectores para almacenar resultados
Tiempo = zeros(1, N);
Altura = zeros(1, N);
Caudal = zeros(1, N);
Pot_hidraulica = zeros(1, N);
Voltaje = zeros(1, N);
Corriente = zeros(1, N);
Potencia_electrica = zeros(1, N);
Duty_arr = zeros(1,N); % Señal cuadrada almacenada (0/1)
%% Bucle principal de simulación
for k = 1:N
    Tiempo(k) = (k-1)*dt; % Tiempo actual
    % 🌀 Cálculo de la velocidad del agua (con fricción en tubo)
    if h > 0
        v_tubo = sqrt(2 * g * h / (1 + f * (L_total / D_tubo)));
    else
        v_tubo = 0;
    end

    % 📏 Caudal en el tubo
    Q_tubo = A_tubo * v_tubo;

    % ⚙️ Ajuste al pasar por la turbina (continuidad)
    v_turbina = (A_turbina > 0) * (Q_tubo / A_turbina); % Continuidad
    Q = A_turbina * v_turbina; % Caudal efectivo en turbina
    %% 🌀 PWM aplicado en la válvula (hidráulica)
    duty_bin = (mod(Tiempo(k), T_pwm) < duty * T_pwm);
    Q = Q * double(duty_bin); % Solo fluye agua cuando la válvula está ON
    % ⚡ Potencias (hidráulica disponible y eléctrica útil teórica)
    P_hid = rho * g * Q * h; % Potencia hidráulica disponible
    P_el = eta * P_hid; % Potencia útil con eficiencia
    % 📦 Generador: voltaje proporcional al caudal (antes de PWM)
    V_gen = K_gen * Q;
    V_out = V_gen; % ya pulsado, no se corta eléctricamente
end

```

```

I = V_out / (R_carga + R_int);
P_out = V_out * I;
%% MPPT P&O (cada 5 pasos) usando la potencia medida P_out (se actualiza
más abajo)
if mod(k,5) == 0
    if P_out > P_prev
        dir = dir;
    else
        dir = -dir;
    end
    duty_ref = max(0, min(1, duty + dir*delta_duty));
    P_prev = P_out;
else
    if ~exist('duty_ref','var'); duty_ref = duty; end
end
%% Controlador PI sobre duty
error = duty_ref - duty;
integral_error = integral_error + error*dt;
duty = duty + Kp*error + Ki*integral_error;
duty = max(0,min(1,duty));
%% ☐ Vaciado del tanque
h = h - (Q / A_base) * dt;
if h < 0, h = 0; end
%% Guardar resultados
Altura(k) = h;
Caudal(k) = Q;
Pot_hidraulica(k) = P_hid;
Voltaje(k) = V_out;
Corriente(k) = I;
Potencia_electrica(k) = P_out;
Duty_arr(k) = double(duty_bin);
end
%% ☐ Suavizado SIN golpe a cero
Nsuav = 1000000; % Número de muestras sobre las que se aplica el suavizado
final
n = numel(Tiempo); % Longitud total de los vectores
% 1) Se encuentra el último instante donde todavía hay flujo, potencia o
voltaje
idx_last = find(Caudal > 0 | Pot_hidraulica > 0 | Voltaje > 0 |
Potencia_electrica > 0, 1, 'last');
if isempty(idx_last), idx_last = n; end % Si no se encuentra, usar el
último punto
% 2) Se define la ventana de suavizado (Muestras antes del final hasta el
final)
i1 = max(1, idx_last - Nsuav + 1);
i2 = idx_last;
if i2 > i1
    % Factor de caída suave: cosenoide que va de 1 a 0
    factor = 0.5*(1 + cos(linspace(0,pi,(i2 - i1 + 1))));
    % Se aplica el factor a todas las variables dependientes del caudal

```

```

Caudal(i1:i2)          = Caudal(i1:i2)          .* factor;
Pot_hidraulica(i1:i2)  = Pot_hidraulica(i1:i2)  .* factor;
Voltaje(i1:i2)         = Voltaje(i1:i2)         .* factor;
Potencia_electrica(i1:i2) = Potencia_electrica(i1:i2) .* factor;
% Se ajusta también la altura del agua para que llegue a cero suavemente
h_ini = Altura(i1);
Altura(i1:i2) = h_ini * factor;
% Cuando se llega a cero, se mantener todo en cero
if i2 < n
    Altura(i2+1:end)      = 0;
    Caudal(i2+1:end)      = 0;
    Pot_hidraulica(i2+1:end) = 0;
    Voltaje(i2+1:end)     = 0;
    Potencia_electrica(i2+1:end)= 0;
end
end
%% ===== GRÁFICAS =====
figure('Name','Simulación Maqueta Mareomotriz con PWM
hidráulico','NumberTitle','off','Color','w');
subplot(3,2,1)
plot(Tiempo, Altura, 'b','LineWidth',1.5);
xlabel('Tiempo (s)'); ylabel('Altura (m)');
title('Altura del agua vs Tiempo'); grid on;
subplot(3,2,2)
plot(Tiempo, Caudal, 'c','LineWidth',1.5);
xlabel('Tiempo (s)'); ylabel('Caudal (m^3/s)');
title('Caudal vs Tiempo'); grid on;
subplot(3,2,3)
plot(Tiempo, Pot_hidraulica, 'r','LineWidth',1.5);
xlabel('Tiempo (s)'); ylabel('Potencia hidráulica (W)');
title('Potencia hidráulica vs Tiempo'); grid on;
subplot(3,2,4)
plot(Tiempo, Voltaje, 'm','LineWidth',1.5);
xlabel('Tiempo (s)'); ylabel('Voltaje (V)');
title('Voltaje vs Tiempo'); grid on;
subplot(3,2,5)
plot(Tiempo, Potencia_electrica, 'k','LineWidth',1.5);
xlabel('Tiempo (s)'); ylabel('Potencia eléctrica (W)');
title('Potencia eléctrica vs Tiempo'); grid on;
subplot(3,2,6)
stairs(Tiempo, Duty_arr, 'g','LineWidth',1.5);
xlabel('Tiempo (s)'); ylabel('Duty (0/1)');
title('PWM hidráulico (válvula ON/OFF)'); grid on;
ylim([-0.1 1.1]);

```



