

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A TRAVÉS DE LAS  
OLAS DEL MAR**

**PRESENTADO POR**

**Br. RICARDO ADOLFO BONILLA GUTIÉRREZ**

**Br. YECSON NAHUM LOVO MORALES**

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO ELECTRICISTA**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, AGOSTO DEL 2023**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**RECTOR**

MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

**SECRETARIO GENERAL**

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**DECANO**

PHD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

**SECRETARIO**

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**DIRECTOR INTERINO:**

ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN PREVIO A LA OPCIÓN AL GRADO DE**  
**INGENIERO ELECTRICISTA**

**TÍTULO**

**POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A TRAVÉS DE LAS**  
**OLAS DEL MAR**

**PRESENTADO POR**

**Br. RICARDO ADOLFO BONILLA GUTIÉRREZ**

**Br. YECSON NAHUM LOVO MORALES**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN APROBADO POR**

**DOCENTE ASESOR:**

**ING. JOSÉ MIGUEL HERNÁNDEZ**

**SAN SALVADOR, AGOSTO DEL 2023**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN APROBADO POR**

**DOCENTE ASESOR:**

ING. JOSÉ MIGUEL HERNÁNDEZ

## NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, lunes 10 de julio de 2023, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 3:00 p.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Werner David Meléndez Valle  
Director Interino

  
\_\_\_\_\_  
Firma 

MSc. José Wilber Calderón Urrutia  
Secretario

  
\_\_\_\_\_  
Firma

Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

- ING. JOSE MIGUEL HERNANDEZ  
(Docente Asesor)

  
\_\_\_\_\_  
Firma

- ING. GERARDO MARVIN JORGE HERNANDEZ

  
\_\_\_\_\_  
Firma

- DR. CARLOS OSMIN POCASANGRE JIMENEZ

  
\_\_\_\_\_  
Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A TRAVÉS DE LAS OLAS DEL MAR

A cargo de los Bachilleres:

- BONILLA GUTIÉRREZ RICARDO ADOLFO

- LOVO MORALES YECSON NAHUM

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 9.2  
( Nueve punto dos )

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente, le doy gracias a Dios, por la vida, por la salud y por la gran bendición de permitirme tener a mi padre y a mi madre, quienes, con su gran amor y cariño, con su esfuerzo, fueron mi motor que impulsó mis sueños y esperanzas, quienes me dieron la oportunidad de iniciar, perseverar y finalizar mis estudios universitarios. Gracias a su apoyo incondicional, brindándome los recursos materiales, económicos necesarios para poder cumplir mis metas, por estar ahí a mi lado en los días y noches más difíciles, protegiéndome y haciendo lo mejor para mí. Gracias doy por sus oraciones, para que Dios me cuidara, me guiara en cada paso, en cada decisión que tomé. Orgullosamente digo que este logro, es de ustedes, mis amados padres.

Agradezco a mis hermanos, que también me brindaron apoyo y recursos necesarios para finalizar mi carrera. Agradezco a cada persona que aportó su granito de arena para verme triunfar. Agradezco a mi hermosa prometida, quien me brindó tanto apoyo emocional, por sus palabras de ánimo, por tener fe y creer en mis capacidades, por ayudarme en el proceso de mi carrera.

Gracias doy a Dios, por la vida y el bienestar de mis docentes en cada etapa de mi vida, que con gran dedicación, pasión y alegría compartieron gran parte de sus conocimientos. Y aunque algunos ya no estén presentes, su memoria estará en mi corazón.

Gracias doy a Dios, por mis compañeros de estudio, por tantas mañanas, tantas tardes de dedicación a cada trabajo, a los que se tomaron el tiempo de enseñarme las cosas que poco comprendía, gracias por los compañeros que también han sido mis grandes amigos.

Las gracias sean dadas a Dios siempre y para siempre, por darme la fuerza, el coraje, el deseo de prepararme, gracias por mis logros y mis errores, por mis ánimos y desánimos, por mi seguridad y mis miedos, por la abundancia y la escasez que viví en el proceso, por mi salud y mis enfermedades, por mis capacidades, por lo que no podía comprender, gracias a Dios por todas las cosas, pues todas las cosas me han ayudado para bien.

Gracias doy a Dios por la vida de niña Reinita, quien también se tomó ese tiempo muy valioso para ayudarnos en los procesos académicos y así poder llegar a la etapa de titulación.

Pido a Dios que también bendiga a cada persona que leerá este trabajo de graduación, que este trabajo sea un impulso para continuar y llevar a cabo mejores proyectos.

Yecson Nahum Lovo Morales

## AGRADECIMIENTOS

Ante todo, y lo más importante le doy gracias a Dios por guiar mi camino hasta este momento, sin su ayuda y misericordia nada de esto hubiera sucedido. Gracias Señor Jesucristo porque cuando más lo necesitaba estabas tú conmigo abriendo puertas y permitiéndome conocer personas que me fueron apoyando a lo largo de mi carrera.

A mi padre que está en el cielo le doy gracias por sus consejos, por forjarme un carácter y enseñarme a no rendirme ante las dificultades. Siempre estarás en mi mente y corazón esperando seguir adelante con valor y honestidad como tú lo hiciste.

A mi madre por estar ahí cuidándome y apoyándome con sus oraciones. Su amor y cariño me impulsaron a lograr terminar mi carrera, sus palabras de aliento fueron una motivación enorme para llegar a este punto importante para mí.

A cada uno de mis hermanos que junto a mis padres formamos una familia maravillosa que Dios me ha dado, cada uno de ellos fueron un pilar fundamental en mi vida de estudiante, cada uno con sus diferentes puntos de vista me hicieron ver la vida de diferente forma, cada quien a su manera me ayudaron en tantas situaciones donde más necesitaba un consejo ahí estuvieron todos apoyándome, les agradezco infinitamente a cada uno porque en cada ciclo siempre necesite de cada uno y siempre tuvieron el tiempo para responderme o guiarme.

A mis amigos de ASERC que con mucho cariño los recuerdo, cada uno de los integrantes fueron un gran apoyo a mi carrera enseñándome a no rendirme, luchar hasta suficiencia y ayudándonos mutuamente en cada una de las materias que cursamos, recuerdos que siempre quedaran marcados y que no olvidare.

Gracias a cada uno de los ingenieros con los que recibí clases, charlas, exposiciones, consejos de vida etc. Todas las personas que mucho o poco me cruce con cada uno en mi carrera universitaria y que con una buen gesto o amabilidad me ayudaron en cualquier proceso.

Mi asesor de tesis Ing. Miguel Hernández que me dio la oportunidad de realizar este trabajo y nos ayudó en todo el proceso. A mi compañero de tesis Yecson Lovo porque decidió llagar hasta el final con este trabajo y nos complementamos para su finalización.

Gracias a cada persona que de alguna u otra manera ya sea animándome, preguntándome o con sus oraciones velaron por mi finalización de mi carrera. A cada persona que lea este documento, a los mencionados anteriormente que Dios los bendiga y que los llene de salud, sabiduría y que cumplan todo lo que se propongan.

Ricardo Adolfo Bonilla Gutiérrez

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo primeramente a Dios, por ser mi ayuda en todo momento, por darme la sabiduría necesaria para poder finalizar mi carrera, por bendecir a mis padres y a mis hermanos, para que ellos pudieran bendecirme a mí también. Sin su ayuda no hubiera sido posible llegar a mi meta final.

(Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente; no temas ni desmayes, porque Jehová tu Dios estará contigo en donde quiera que vayas – Josué 1:9)

Dedico este trabajo a mis padres, quienes, con gran esfuerzo, lucharon para darme la mejor herencia (mis estudios universitarios). Por haberme enseñado, educado y guiado por este camino de mejores oportunidades.

Ruego a Dios, que bendiga a cada persona que me apoyó, que me animó a seguir adelante, a no desmayar, a seguir en pie sin importar los tropiezos.

Yecson Nahum Lovo Morales

# ÍNDICE GENERAL

NOMENCLATURA .....	XI
CAPÍTULO UNO .....	1
INTRODUCCIÓN .....	2
1.1.0 ANTECEDENTES.....	2
1.2.0 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.3.0 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.4.0 OBJETIVOS.....	5
1.5.0 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	5
CAPÍTULO DOS .....	6
INTRODUCCIÓN .....	7
2.1.0 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA GENERACIÓN ELÉCTRICA EN EL SALVADOR.....	7
2.1.1 <i>CENTRAL HIDROELÉCTRICA 5 DE NOVIEMBRE</i> .....	7
2.1.2 <i>CENTRAL HIDROELÉCTRICA GUAJOYO</i> .....	8
2.1.3 <i>PLANTA GEOTÉRMICA AHUACHAPÁN</i> .....	9
2.1.4 <i>CENTRAL HIDROELÉCTRICA CERRÓN GRANDE</i> .....	9
2.1.5 <i>CENTRAL HIDROELÉCTRICA 15 DE SEPTIEMBRE</i> .....	10
2.1.6 <i>PLANTA GEOTERMICA BERLIN</i> .....	10
2.1.7 <i>CENTRALES TÉRMICAS</i> .....	11
2.1.8 <i>PLANTAS FOTOVOLTAICAS</i> .....	11
2.1.9 <i>GENECIÓN ELÉCTRICA POR BIOMASA</i> .....	13
2.1.10 <i>PLANTA DE GENERACIÓN A BIOGAS</i> .....	14
2.1.11 <i>PROYECTOS DE GENERACIÓN FUTUROS</i> .....	16
2.2.0 ANTECEDENTES DEL SECTOR ELECTRICO EN EL SALVADOR.....	18
2.2.1 <i>CAPACIDAD DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN EL SALVADOR</i> .....	19
2.2.2 <i>CAPACIDAD INSTALADA</i> .....	20
2.2.3 <i>CAPACIDAD DISPONIBLE</i> .....	20
2.2.4 <i>CAPACIDAD FIRME</i> .....	21
2.3.0 DEMANDA ENERGÉTICA EN EL SALVADOR .....	22
2.4.0 ENERGÍAS RENOVABLES EN EL SALVADOR.....	26
2.5.0 UNA NUEVA FORMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA: ENERGÍA UNDIMOTRÍZ. ....	28
CAPÍTULO TRES .....	29

INTRODUCCIÓN .....	30
3.1.0 HISTORIA DE LA ENERGÍA UNIMOTRIZ.....	30
3.2.0 TIPOS DE OLAS .....	32
3.2.1 SEGÚN SU CATEGORÍA .....	34
3.2.2 SEGÚN LA DIRECCIÓN EN LA QUE ROMPEN.....	35
3.2.3 SEGÚN LA FORMACIÓN DE OLA .....	36
3.2.4 SEGÚN EL TIPO DE FONDO MARINO .....	36
3.3.0 PARTES DE UNA OLA.....	37
3.4.0 REPRESENTACIÓN DE UNA OLA.....	39
3.5.0 MODELOS MATEMÁTICOS DE LAS OLAS .....	40
3.5.1 TEORÍA LINEAL DE LAS OLAS: MODELO DE AIRY.....	40
3.5.2 TEORÍA NO LINEAL DE LAS OLAS: MODELO DE STOKES .....	46
3.6.0 TÉCNICAS PARA LA CAPTACIÓN DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ .....	48
3.6.1 EMPUJE DE LA OLA .....	49
3.6.2 VARIACIÓN DE LA ALTURA EN LA SUPERFICIE DE LA OLA .....	49
3.6.3 VARIACIÓN DE LA PRESIÓN BAJO LA SUPERFICIE DE LA OLA .....	50
3.7.0 CLASIFICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE CAPTACIÓN.....	51
3.7.1 CLASIFICACIÓN SEGÚN SU POSICIÓN RESPECTO A LA COSTA [C] .....	51
3.7.2 CLASIFICACIÓN SEGÚN LA POSICIÓN RELATIVA RESPECTO AL FRENTE DE OLA [O] .....	52
3.7.3 CLASIFICACIÓN RESPECTO A LA POSICIÓN EN EL AGUA [A] .....	53
3.7.4 CLASIFICACIÓN SEGÚN EL PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO [F] .....	53
3.8.0 CENTRALES DE GENERACIÓN UNDIMOTRÍZ EN OPERACIÓN. ....	58
3.9.0 INVESTIGACIÓN SOBRE EL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL OLEAJE EN LAS COSTAS DE EL SALVADOR.....	60
3.9.1 SONDA SONTEK ADV TRITON.....	60
3.9.2 MODELO NUMÉRICO SWAN PARA LA PREDICCIÓN DEL OLEAJE .....	63
CAPÍTULO CUATRO.....	67
INTRODUCCIÓN .....	68
4.1.0 ANSYS CFD.....	69
4.1.1 DEFINICION DE LA GEOMETRIA.....	71
4.1.2 MALLADO .....	71
4.1.3 MODELO FISICO.....	73
4.1.4 MODELOS DE TURBULENCIA .....	75
4.1.5 CONDICIONES DE FRONTERA (Boundary Conditions) .....	77

4.1.6	<i>METODOS DE SOLUCION</i> .....	77
4.1.7	<i>CALCULO DE EJECUCION (RUN CALCULATION)</i> .....	78
4.2.0	COLUMNA DE AGUA OSCILANTE.....	79
4.2.1	<i>TURBINAS</i> .....	81
4.2.2	<i>GENERADOR</i> .....	85
4.3.0	CALIBRACION DEL MODELO NUMERICO CON VALIDACION FISICA EN ANSYS. 88	
4.3.1	<i>GEOMETRIA</i> .....	88
4.3.2	<i>4.4.2 MALLADO</i> .....	88
4.3.3	<i>MODELO Y CONFIGURACION EN ANSYS FLUENT</i> .....	89
4.3.4	<i>RESULTADOS</i> .....	92
CAPÍTULO CINCO.....		95
INTRODUCCIÓN. ....		96
5.1.0	<i>MODELO NUMERICO DE UNA PLANTA OWC EN EL LITERAL SALVADOREÑO</i> 96	
5.1.1	<i>DATOS DEL OLEAJE A UTILIZAR PARA GEOMETRIA DEL CANAL DE OLAS</i> 96	
5.2.0	<i>RESULTADOS DE LA SIMULACION</i> .....	99
CONCLUSIONES .....		103
RECOMENDACIONES .....		104
BIBLIOGRAFIA.....		105
ANEXOS.....		108
A.1.	FIGURA PARA ELABORACIÓN DE CÁMARA DE CAPTACIÓN .....	108
A.2	CONFIGURACION DE PROGRAMA ANSYS .....	109
A.3	GRAFICOS CAMARA CON OLEAJE REAL ANSYS FLUENT .....	117
A.4	VALORES EXTREMALES DE MAREA .....	118
A.5	TABLA DE ECUACIONES TEORIA DE AIRY .....	119
A.6.	CENTRAL UNDIMOTRIZ MUTRIKU ESPAÑA .....	120

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: <i>central hidroeléctrica Guajoyo.</i> .....	8
Figura 2: <i>Presa Hidroeléctrica 5 de noviembre. Foto de archivo de La Prensa Gráfica 2019.</i> 8	
Figura 3: <i>geotérmica Ahuachapán. Foto de archivo LaGeo.</i> .....	9
Figura 4: <i>central hidroeléctrica Cerrón Grande. Foto de archivo CEL.</i> .....	9
Figura 5: <i>central hidroeléctrica 15 de septiembre. Foto de archivo CEL.</i> .....	10
Figura 6: <i>planta Geotérmica Berlín. Foto de archivo CEL.</i> .....	10
Figura 7: <i>central Térmica Nejapa Power. Foto cortesía de AES El Salvador.</i> .....	11
Figura 8: <i>planta solar ALBIREO.</i> .....	11
Figura 9: <i>planta solar Sonsonate. Foto de archivo Diario El Mundo.</i> .....	12
Figura 10: <i>planta Solar ECOSOLAR. Foto de archivo SIGET.</i> .....	12
Figura 11: <i>planta Solar Opico Power. Foto de archivo Diario El Mundo.</i> .....	13
Figura 12: <i>planta Solar Moncagua. Foto de archivo La Prensa Gráfica.</i> .....	13
Figura 13: <i>planta de Biogás en Nejapa. Foto cortesía de AES El Salvador.</i> .....	14
Figura 14: <i>parque Eólico Ventus. Foto de archivo SIGET.</i> .....	15
Figura 15: <i>central hidroeléctrica El Chaparral. Foto de archivo CEL.</i> .....	16
Figura 16: <i>planta de generación de Gas Natural. Foto de archivo de SIGET.</i> .....	17
Figura 17: <i>ejemplo capacidad firme.</i> .....	22
Figura 18: <i>generación de energía por recurso. Datos anuales de la UT en GWh (UT, s.f.).</i> 23	
Figura 19: <i>consumo de electricidad por sector económico (IRENA, 2020).</i> .....	23
Figura 20: <i>demanda máxima de potencia desde el año 2000.</i> .....	24
Figura 21: <i>potencia máxima mensual en diferentes años.</i> .....	25
Figura 22: <i>crecimiento de la demanda de energía de los últimos 22 años.</i> .....	25
Figura 23: <i>capacidad instalada de recursos renovables.</i> .....	26
Figura 24: <i>zona costera de El Salvador.</i> .....	28
Figura 25: <i>propulsión de una ola en las tablas de surf.</i> .....	30
Figura 26: <i>boya Masuda.</i> .....	31
Figura 27: <i>buque Kaimei.</i> .....	31

Figura 28: <i>olas costeras.</i> .....	33
Figura 29: <i>formación de olas según su profundidad.</i> .....	33
Figura 30: <i>tipos de olas según su categoría.</i> .....	34
Figura 31: <i>tipos de olas según su dirección de rompimiento.</i> .....	35
Figura 32: <i>tipos de olas según su formación.</i> .....	36
Figura 33: <i>tipos de olas según tipo de fondo marino.</i> .....	37
Figura 34: <i>partes de una ola.</i> .....	37
Figura 35: <i>características de una onda senoidal en representación de las olas.</i> .....	39
Figura 36: <i>superposición de ondas.</i> .....	39
Figura 37: <i>onda lineal de Airy.</i> .....	40
Figura 38: <i>representación de un grupo de olas sucesivas con forma de ondas sinusoidales con diferentes períodos (Modelo de Airy 1845.)</i> .....	43
Figura 39: <i>movimiento de las olas cuando se acercan a la costa.</i> .....	48
Figura 40: <i>diferentes técnicas para la captación de energía Undimotriz.</i> .....	48
Figura 41: <i>empuje de una ola.</i> .....	49
Figura 42: <i>variación de la altura de ola.</i> .....	49
Figura 43: <i>variación de la presión bajo la superficie de la ola.</i> .....	50
Figura 44: <i>otras técnicas para la captación de energía de las olas.</i> .....	50
Figura 45: <i>clasificación de las olas respecto a la costa.</i> .....	52
Figura 46: <i>clasificación de sistemas de captación según su orientación.</i> .....	53
Figura 47: <i>OWC fijo.</i> .....	54
Figura 48: <i>OWC flotante.</i> .....	55
Figura 49: <i>funcionamiento del dispositivo de desbordamiento.</i> .....	55
Figura 50: <i>boyas oscilantes fijas de cuerpo simple.</i> .....	56
Figura 51: <i>boyas fijas de cuerpo doble.</i> .....	57
Figura 52: <i>central eléctrica convertidor columna de agua oscilante Mutriku.</i> .....	58
Figura 53: <i>sonda Oceanográfica ADV Tritón.</i> .....	60
Figura 54: <i>diagrama de sujeción del sistema de anclaje.</i> .....	61

Figura 55: <i>esquema de la instalación del sistema de medición en las cercanías de la playa Santa María Mizata, km 87.5 en la carretera Litoral.</i> .....	61
Figura 56: <i>ubicación de la sonda ADV Tritón.</i> .....	62
Figura 57: <i>entorno programa ANSYS Workbench.</i> .....	70
Figura 58: <i>ventana de inicio de ANSYS FLUENT.</i> .....	71
Figura 59: <i>ejemplo de mallado en ANSYS Student.</i> .....	72
Figura 60: <i>sub aplicaciones que realizan la geometría y el mallado en ANSYS Workbench.</i> 72	
Figura 61: <i>tipos de modelos disponibles. ANSYS 2023.</i> .....	73
Figura 62: <i>modelo volumen de fluido (Fernández, 2018).</i> .....	73
Figura 63: <i>partes que componen un modelo de captación OWC (Gutiérrez, 2018).</i> .....	79
Figura 64: <i>modelo de funcionamiento de un OWC (Garrido, y otros, 2015).</i> .....	80
Figura 65: <i>esquema de una turbina well.</i> .....	82
Figura 66: <i>dimensionamiento importante de una turbina Well (Valdez, 2015).</i> .....	82
Figura 67: <i>esquema de una turbina de impulso (Falcao &amp; Henriques, 2016, págs. 1391-1424).</i> .....	84
Figura 68: <i>comparación de eficiencia entre pozos turbina y turbina de impulso para diferentes coeficientes de flujo, <math>\Phi\eta</math> representa las condiciones de máxima eficiencia.</i> .....	85
Figura 69: <i>dimensiones del canal para el oleaje y cámara de captación en modelo físico y numérico. Las dimensiones están en metros.</i> .....	86
Figura 70: <i>sección transversal vertical de la malla en la cámara de captación del OWC. Color rojo es agua y color azul es aire.</i> .....	87
Figura 71: <i>serie temporal de elevación. (a) Aguas arriba de la cámara y (b) dentro de la cámara.</i> .....	87
Figura 72: <i>geometría del diseño original para la validación numérico-físico.</i> .....	88
Figura 73: <i>mallado para el sistema numérico para calibración.</i> .....	89
Figura 74: <i>ingresando parámetros de diseño y olas en la condición de entrada de las olas.</i> .....	90
Figura 75: <i>ventana de modelos multifásicos.</i> .....	90
Figura 76: <i>página de tareas.</i> .....	90

Figura 77: <i>modelo de turbulencia.</i> .....	90
Figura 78: <i>validación de los parámetros de la ola y teoría que se aplica.</i> .....	91
Figura 79: <i>métodos de solución y factores de relajación.</i> .....	91
Figura 80: <i>ajustes de tiempo para la simulación.</i> .....	92
Figura 81: <i>t/T de 3.2</i> .....	92
Figura 82: <i>t/T de 3.8</i> .....	93
Figura 83: <i>resultados y comparación del modelo en ANSYS y OpenFOAM.</i> .....	93
Figura 84: <i>diseño del canal de olas con la estructura OWC. ANSYS Workbench.</i> .....	97
Figura 85: <i>mallado del canal de olas.</i> .....	97
Figura 86: <i>resultados de velocidad del sistema.</i> .....	100
Figura 87: <i>rango de operación de la gráfica de velocidad.</i> .....	100
Figura 89: <i>diversos resultados para la obtención del coeficiente de presión según coeficiente de flujo.</i> .....	101
Figura 88: <i>diversos resultados para la obtención del coeficiente de torque según coeficiente de flujo.</i> .....	101

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: <i>generación de energía eléctrica de los distintos recursos que hay en el país (PROESA, Sector Eléctrico de El Salvador, 2015), (SIGET, 2019-2020).</i> .....	19
Tabla 2: <i>capacidad instalada y capacidad disponible por central generadora de electricidad en el año 2020 (SIGET, 2020).</i> .....	21
Tabla 3: <i>datos estadísticos del oleaje y viento en El Salvador (Datos del MARN).</i> .....	38
Tabla 4: <i>clasificación de las olas en diferentes profundidades (Water Wave Mechanic).</i> ...	42
Tabla 5: <i>características de la central eléctrica Mutriku.</i> .....	58
Tabla 6: <i>datos de altura, periodos y ángulos de las olas en playa Mizata. Promedio de febrero de 2007.</i> .....	65
Tabla 7: <i>resumen de clasificación de altura de las olas según ocurrencia.</i> .....	66
Tabla 8: <i>resumen de clasificación para periodos del oleaje.</i> .....	66
Tabla 9: <i>límites de análisis para la versión de ANSYS Student.</i> .....	70
Tabla 10: <i>parámetros de frontera para el submodelo Open Channel Flow.</i> .....	74
Tabla 11: <i>datos para simulación.</i> .....	86
Tabla 12: <i>datos de oleaje para la simulación.</i> .....	96
Tabla 13: <i>datos importantes para simulación.</i> .....	98
Tabla 14: <i>modelos de configuración.</i> .....	99
Tabla 15: <i>características de turbina NACA0015.</i> .....	99

## NOMENCLATURA

CAD: Computer Aided Desing.  
CFD: Computational Fluid Dynamics. Dinámica de Fluidos computacional.  
CFL: Courant-Friedrichs-Lewy.  
 $C_p$  : Coeficiente de presión estática [-]  
c: Longitud Coordinada [-]  
D: Fuerza de Arrastre  
FEM: Método de elementos finitos.  
FEV: Método de volúmenes finitos.  
f: Frecuencia de oscilación [ $s^{-1}$ ].  
 $F_N$ : Fuerza de arrastre [N].  
 $F_T$ : Fuerza tangencial [N].  
 $h_b$ : Altura de la hoja (alabe)[m]  
L: Fuerza de Elevación [N].  
n: Numero de Hojas (alabe)[-].  
OWC. Columna de agua Oscilante.  
OCF: Open Channel Flow.  
OCW BC: Open Channel Wave BC.  
P: Presion [ $N/m^2$ ] o [Pa].  
PTO: Power Take-Off  
Q:Caudal Volumétrico [ $m^3/s$ ].  
 $r_m$ : Radio medio [m].  
 $r_t$ : Radio de la punta [m].  
T: Torque [ $N\cdot m$ ].  
T\*: Coeficiente de Torque [-].  
 $t_b$ : Grosor máximo de la hoja (Alabe)[m].  
 $t_e$ : Espesor de la placa final [m].  
u: Velocidad de aire de entrada [m/s].  
VOF: Volumen de Fluido.  
w:Ancho de la placa final [m].  
WEC: Converter Energy Wave  
 $\alpha$ : Angulo de ataque [ $^\circ$ ].  
 $\eta$ : Eficiencia [-].  
 $\mu$ : Viscosidad Dinámica [ $Pa\cdot s$ ].  
 $\omega_r$ : Velocidad rotacional [RPM]o [rad/s].  
 $\rho$ : Densidad del aire o agua [ $Kg/m^3$ ].  
 $\sigma$ : Solidez de la Turbina [-].  
 $\varphi$ : Coeficiente de flujo [-].  
 $\Delta P$ : Diferencia de Presión [ $N/m^2$ ].  
 $\Delta P^*$ : Coeficiente de caída de presión [-]

# **CAPÍTULO UNO**

## **GENERALIDADES**

## **INTRODUCCIÓN**

El carbón es la base del sistema eléctrico en la mayoría de los países del mundo, sin embargo, al usar carbón para producir energía eléctrica, estamos generando gases de efecto invernadero y otros residuos que incrementan la cantidad de contaminantes en la atmósfera, por lo que es deseable combinar este recurso con otras fuentes de energía más limpias.

La contaminación del medio ambiente es uno de los principales factores que obliga a buscar diferentes métodos en la obtención de la energía eléctrica de manera que reduzca las emisiones de gases que afecten el medio ambiente y que al mismo tiempo acelere el calentamiento global.

Actualmente se están implementando muchas metodologías para estos propósitos y una de las más evidentes son la generación fotovoltaica y eólica, que desde hace años han tenido un crecimiento exponencial en cuanto a la creación de nuevas plantas para la generación de energía eléctrica.

En la actualidad, hay tecnologías que se han ido desarrollando para obtener energía eléctrica a través de diferentes medios, alejados de la generación fotovoltaica y eólica, dichas tecnologías aún no se han explotado en su totalidad, pero son una buena opción para la generación de energía eléctrica a través de las olas del mar (energía undimotriz).

Los océanos son una de las fuentes de energía más importantes en la actualidad debido a su magnitud y alcance, a pesar de que hay pocos estudios que nos permitan desarrollar esta alternativa, existen muchos países, que están llevando a cabo muchos proyectos y están obteniendo buenos resultados en cuanto a la generación de energía eléctrica.

Con 336,000 km de costas en el planeta, la energía undimotriz atesora un potencial suficiente para situarla entre las fuentes de energía renovable emergentes que contribuyan a una mayor sostenibilidad del mundo.

En cuanto a su funcionamiento, el modo de producir energía eléctrica, es mediante el movimiento de las olas, pero para ello, se deben realizar estudios de los oleajes en las costas, por lo que el objetivo principal de este trabajo, es estudiar el oleaje en una de las costas salvadoreñas (según el presidente de Comisión Ejecutiva del Río Lempa (CEL), Daniel Álvarez, en El Salvador se tiene un oleaje agresivo en el que se puede explorar la metodología undimotriz), y de esta manera conocer más a fondo esta forma de generación de energía eléctrica, para una posible implementación que pueda ayudar a reducir el costo de la energía y ampliar la matriz de generación de energía limpia y de esta manera, ayudar a minimizar el impacto ambiental.

### **1.1.0 ANTECEDENTES**

La energía undimotriz, tiene sus antecedentes en el siglo XIX, “cuando el español José Barrufet, patentó, lo que dominó “marmotor”, esta máquina producía electricidad a partir de la oscilación vertical del oleaje y no se comercializó hasta los años 80 del siglo XX” (C., 2019)

El aparato de Barrufet consistía en una serie de boyas que oscilaban de arriba abajo con las olas, accionando un generador eléctrico. El sistema era poco eficiente, pero, según su inventor era capaz de generar 0.36 kW.

Hoy en día existen más de 600 patentes para aprovechar la fuerza del oleaje a fin de generar energía eléctrica. Estos pueden funcionar mediante la fuerza producida por la oscilación vertical o la generada por el choque de la ola en la costa.

Con la intención de maximizar el rendimiento de su propósito, Barrufet realiza un estudio previo de las olas y sus características, clasificándolas en tres categorías: olas transitorias, olas de traslación y olas coexistentes. Cada una de ellas respondiendo a distintos estados del mar.

La primera patente de energía de las olas se realizó en Francia al final del siglo XVIII, en el año 1799. En la década de los años de 1970's del pasado siglo XX, surgieron proyectos financiados por empresas privadas y gobiernos de países como Japón e Inglaterra, y el lento desarrollo de la tecnología y los grandes costos de inversión fueron paralizando proyecto tales como Oscillating Water Column (OWC), Archimedes Wave Swing, Ocean Power Technologies OPT, etc.

La energía de las olas aparece como una alternativa consistente basada en la fuerza que llevan las olas a lo largo de los océanos del mundo. Esta forma de generación puede presentar un gran potencial como alternativa a las energías no renovables, en determinadas zonas dadas las características del clima y de la costa marítima, ya que la demanda actual de energía eléctrica y las previsiones de un incremento considerable por la mejora en el nivel de vida de la población, hacen necesaria la explotación y desarrollo de nuevas formas de generación de energía que permitan garantizar su abastecimiento. Esto acompañado de la importancia de sustituir los recursos utilizados actualmente, que presentan una duración limitada y un alto grado de contaminación, incrementa el interés en la investigación de las energías provenientes de fuentes naturales.

“En El Salvador, el Ing. Mario E. Rodríguez Sosa, realizó mediciones de parámetros del oleaje marino costero en el Muelle del puerto La Libertad, km 32, carretera El Litoral, departamento La Libertad” (Guzmán R., y otros, 2007), con el objetivo de calcular el potencial energético, utilizando medición directa con la ayuda de instrumentos básicos de medición, considerando, que, utilizando la energía cinética del oleaje a lo largo de la costa salvadoreña, es posible generar energía eléctrica en el país. Este trabajo de graduación, surge de la inquietud del Ing. Mario E. Rodríguez Sosa y de estudios similares realizados por estudiantes de la Universidad de El Salvador en conocer el potencial energético del oleaje marino costero.

### **1.2.0 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Uno de los problemas del mundo es la gradual disminución de las fuentes tradicionales de energía como el petróleo, gas y carbón. La combustión de importantes cantidades de estos recursos está produciendo severos efectos sobre el clima y resultan altamente contaminantes. Esto conlleva a buscar fuentes alternas de energía, especialmente de tipo renovable; por ejemplo, la energía de las olas del mar, ya que, el mar presenta una gran cantidad de energía cinética, energía en constante movimiento, con la finalidad de reducir el impacto negativo sobre la economía del país, que generan los costos del petróleo y sus derivados; impactando, la canasta básica de la población.

### **1.3.0 JUSTIFICACIÓN**

Debido a la demanda a nivel mundial de consumo de electricidad en la humanidad, se tiene la necesidad de implementar estrategias nuevas en cuanto a la generación de energía limpia y renovable, con el propósito de reducir las toneladas de emisiones de dióxido de carbono hacia la atmósfera, así como atenuar el efecto invernadero producido por el CO<sub>2</sub>, esto atribuido, en gran medida a la quema de combustible fósiles.

La Universidad de El Salvador a través de la Investigación científica en años anteriores ha presentado un informe sobre el estudio del comportamiento de las mareas y las olas en zonas del país, específicamente en la playa Mizata en el departamento La Libertad, por lo que, se debe de investigar diferentes métodos o tecnologías que existen para la obtención de energía eléctrica y aprovechar de usar esos datos y resultados para en un futuro implementar estudios más concretos en la generación de energía eléctrica a través de las olas del mar.

## **1.4.0 OBJETIVOS**

### **GENERAL**

Realizar una investigación sobre la Energía Undimotriz para la generación de electricidad, conocer y clasificar las olas por su aprovechamiento para la generación de energía eléctrica mediante métodos o tecnologías que existen actualmente y posteriormente realizar un análisis con datos reales proporcionados por la Investigación Científica de la Universidad de El Salvador, en la que se buscará determinar el potencial de generación en el área de estudio.

### **ESPECÍFICOS**

- Realizar una investigación sobre la energía Undimotriz.
- Describir las olas y su movimiento en la superficie del mar.
- Conocer las clasificaciones de los diferentes tipos de olas.
- Analizar los datos obtenidos por parte de un estudio de las olas, hecho por la Investigación Científica de la Universidad de El Salvador realizado en la playa Mizata, departamento de La Libertad.
- Determinar el potencial de las olas para la generación de energía eléctrica en el sitio de estudio.

## **1.5.0 ALCANCES Y LIMITACIONES**

### **ALCANCES**

- Se presentará el comportamiento de las olas a través de estudios y análisis que se han descubierto a través del tiempo, específicamente teorías de Airy y Stokes.
- Se identificarán algunos métodos o tecnologías que se utilizan actualmente en la generación de energía eléctrica a través de las olas que mejor se adapten a nuestro país.
- Para determinar el potencial de generación eléctrica se hará a través de cálculos matemáticos, esto conlleva un cierto grado de error debido a que se necesita más información sobre fenómenos físicos que determinan sobre el comportamiento real del oleaje en el área de estudio.

### **LIMITACIONES**

- Pocas investigaciones en el país sobre el tema específico que se ha realizado.
- Los dispositivos o equipos que se usan en la generación de energía eléctrica Undimotriz aún están en etapa de pruebas.

**CAPÍTULO DOS**  
**GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL SALVADOR**

## INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se mostrará como ha ido progresando en los últimos años (una breve reseña histórica) la generación de energía eléctrica, su definición y las fuentes de generación de energía en forma general. Así mismo, se darán a conocer los diferentes tipos de generación que existen en nuestro país y su distribución por medio de empresas especializadas según la zona geográfica del mismo.

El aprovechamiento de la energía está ligado, en efecto, al desarrollo humano. La unión de la humanidad con la energía empezó seguramente con el dominio del fuego. Hoy en día sin embargo existe una complejidad creciente en los temas energéticos. Se dispone de un número cada vez mayor de fuentes energéticas, redes energéticas más complejas, métodos de almacenamiento, etc.

La energía eléctrica es la forma más utilizada. Gracias a la flexibilidad en generación y transporte, se ha convertido para la industria en la forma más extendida de consumo de energía.

### **2.1.0 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA GENERACIÓN ELÉCTRICA EN EL SALVADOR.**

La electrificación en El Salvador se inició en los años cuarenta con la creación de la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Rio Lempa (CEL) el 3 de octubre de 1945 con el objetivo de gestionar ante expertos internacionales sobre el estudio de la hidráulica, la geología y la electricidad con el fin de implementar lo que serían los primeros proyectos hidroeléctricos en El Salvador. CEL fue creada como institución autónoma y se encargaría de desarrollar, administrar y utilizar los recursos energéticos y fuentes de energía en El Salvador.

El desarrollo energético estuvo en manos del estado en los años posteriores para la realización de diferentes proyectos y fue así como se lograron implementar las primeras centrales hidroeléctricas y geotérmicas.

#### **2.1.1 CENTRAL HIDROELÉCTRICA 5 DE NOVIEMBRE.**

“La primera central hidroeléctrica se inició en el mes de junio de 1951 y finalizada en 1954 en el municipio de Sensuntepeque, departamento de Cabañas, llamada Presa Hidroeléctrica 5 de noviembre” (Arteaga, 2019) con una capacidad inicial para generar 30 MW (dos generadoras de 15 MW cada una) que con el transcurso de los años ha incrementado su capacidad hasta llegar a una capacidad nominal de 81.4 MW y luego de una repotenciación se llegó a generar 99.4 MW. En el año 2016 se ejecutó una ampliación donde se esperaba instalar dos generadoras más de 40 MW cada uno llegando a una generación aproximada de 179.4 MW.

### **2.1.2 CENTRAL HIDROELÉCTRICA GUAJOYO**

“En diciembre del año 1963 se iniciaban las operaciones de la central hidroeléctrica Guajoyo, ubicado en el municipio de Metapán, departamento de Santa Ana” (Central hidroeléctrica Guajoyo, s.f.). Esta central aprovecha el agua que se almacena proveniente del Lago de Guija y a pesar de contar con solo una unidad generadora de 15 MW, era parte del proyecto de producción de energía nacional en ese tiempo. Es la única central que no depende del río Lempa.



**Figura 2:** Presa Hidroeléctrica 5 de noviembre. Foto de archivo de La Prensa Gráfica 2019.



**Figura 1:** central hidroeléctrica Guajoyo.

### **2.1.3 PLANTA GEOTÉRMICA AHUACHAPÁN**

En el año de 1975 en El Salvador dio un nuevo paso hacia la generación de electricidad, esta vez no por una central hidroeléctrica, iniciando operaciones con la primera unidad generadora de energía Geotérmica en la cordillera de Apaneca municipio de Ahuachapán, departamento de Ahuachapán. “Su construcción inició en 1972 y finalizó en 1975 con una unidad generadora de 30 MW colocando a El Salvador como el segundo país en América latina que utilizaba vapor para la generación de electricidad” (Central geotérmica Ahuachapán, s.f.). Posteriormente se logró adicionar otra unidad generadora de 30 MW y en 1981 se adiciona otra unidad, pero esta vez de 35 MW haciendo un total de 95 MW en capacidad instalada.



**Figura 3:** geotérmica Ahuachapán. Foto de archivo LaGeo.

### **2.1.4 CENTRAL HIDROELÉCTRICA CERRÓN GRANDE**

“Desde 1963 no se construyó otra central hasta febrero de 1976 que inició operaciones la central Cerrón Grande” (Economía, 2017) entre los municipios de Jutiapa, departamento de Cabañas, y Potonico, departamento de Chalatenango, el cual utiliza el agua del embalse también llamado Cerrón Grande. Está compuesta de dos unidades de 67.5 MW cada una, la primera instalada en 1976 y la segunda un año después en febrero de 1977. Luego de una reestructuración se instalaron nuevas generadoras entre 2003 y 2007 con capacidad de 85 MW cada una haciendo un total de 170 MW en capacidad instalada aproximadamente.



**Figura 4:** central hidroeléctrica Cerrón Grande. Foto de archivo CEL.

### **2.1.5 CENTRAL HIDROELÉCTRICA 15 DE SEPTIEMBRE.**

“En el año de 1983 iniciaba operaciones la Central Hidroeléctrica 15 de septiembre ubicada entre los municipios de San Ildefonso, departamento de San Vicente, y Estanzuelas, departamento de Usulután”. “Inició a operar con una unidad de 78.3 MW y posteriormente se adicionó en 1984 otra unidad de la misma capacidad haciendo un total de 156.6 MW de capacidad instalada, siendo la central con mayor capacidad de generación en el país en ese tiempo” (Anónimo, s.f.).



**Figura 5:** central hidroeléctrica 15 de septiembre. Foto de archivo CEL.

### **2.1.6 PLANTA GEOTÉRMICA BERLIN**

“La segunda planta geotérmica inició operaciones en 1992 construido en el municipio de Alegría, departamento de Usulután, con dos unidades generadoras de 5 MW cada una. En 1999 entraron en operación dos generadoras con capacidad de 28.1 MW cada una, en febrero de 2007 se adicionó otra unidad de 40 MW y en diciembre de 2007 se adicionó una más de 9.2 MW entre diferentes ciclos de los procesos geotérmicos” (Toledo, 2018).



**Figura 6:** planta Geotérmica Berlín. Foto de archivo CEL.

### **2.1.7 CENTRALES TÉRMICAS**

Para los años setenta se inició el proceso de construcción de centrales térmicas, siendo la de Acajutla, departamento de Ahuachapán, en 1965 con una capacidad instalada de 295.1 MW y la de Soyapango, departamento de San Salvador, el 1973 con una capacidad instalada de 56.5 MW. La próxima central térmica fue iniciando operaciones hasta 1984 en el departamento de San Miguel con una capacidad instalada de 31.9 MW y finalmente la central térmica Nejapa Power en 1995 con una capacidad instalada de 144.5 MW. Con el pasar del tiempo se han instalado muchas centrales térmicas de igual o menor capacidad.



**Figura 7:** central Térmica Nejapa Power. Foto cortesía de AES El Salvador.

### **2.1.8 PLANTAS FOTOVOLTAICAS**

El recurso solar es de las que más se ha ido avanzando en el país y sigue incrementando la matriz energética en este rubro. Siendo algunas de las más importantes:

#### **PLANTAS ALBIREO I Y ALBIREO II.**

“Entraron en operación de abril del año 2020 en el cual ALBIREO I y ALBIREO II tiene una capacidad 50 MW cada una, haciendo un total de 100 MW de capacidad instalada. Esta es de origen privado a través de la sociedad CAPELLA SOLAR” (Mercado eléctrico de El Salvador, 2021).



**Figura 8:** planta solar ALBIREO.

### **PLANTA SONSONATE SOLAR.**

“Igualmente, en el año 2020 a través del grupo del Proyecto La Trinidad entró en operación la planta solar que tiene una capacidad instalada de 10 MW” (economía, 2020).



**Figura 9:** *planta solar Sonsonate. Foto de archivo Diario El Mundo.*

### **PLANTA FOTOVOLTAICA ECOSOLAR**

Uno de los proyectos de energía solar más actuales del país está situado en el municipio de el Rosario, departamento de La Paz, comenzando operaciones en abril del 2021. Este proyecto tiene una capacidad instalada de 9.9 MW.



**Figura 10:** *planta Solar ECOSOLAR. Foto de archivo SIGET.*

## **OPICO POWER**

“Esta planta solar se inauguró en noviembre de 2020 en el municipio de Armenia, departamento de Sonsonate, a través de AES El Salvador el cual tiene una capacidad instalada de 5.2 MW” (Uveli, 2020).



**Figura 11:** *planta Solar Opico Power. Foto de archivo Diario El Mundo.*

## **PLANTA SOLAR MONCAGUA**

“Instalada en el municipio de Moncagua, departamento de San Miguel, a través de AES El Salvador en la que tiene una capacidad instalada de 2.5 MW” (Segovia, 2015).



**Figura 12:** *planta Solar Moncagua. Foto de archivo La Prensa Gráfica.*

### **2.1.9 GENECCIÓN ELÉCTRICA POR BIOMASA**

Históricamente, El Salvador se ha destacado por la exportación de granos básicos y de diferentes clases de semillas de mayor valor agregado como lo es el café. Otra cosecha de alto valor es la caña de azúcar y se viene haciendo esta cultura desde muchos años. Pero a través del tiempo se han ido mejorando los procesos para la obtención del azúcar y se llegó a un aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar para la generación de electricidad.

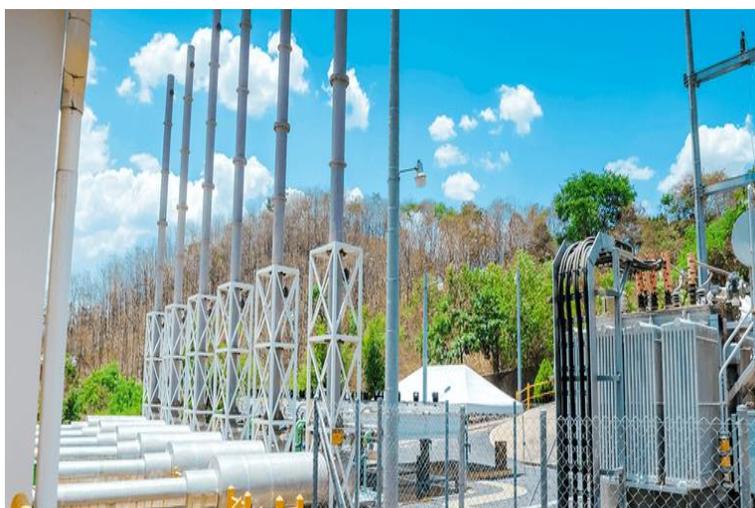
En los años sesenta se empezaron a construir ingenios azucareros que con el paso del tiempo se han venido transformando y aportando a El Salvador a la generación de energía eléctrica. En el país existen 4 principales generadoras de electricidad a través de la biomasa como lo son:

- CASSA CENTRAL IZALCO. Capacidad instalada de 45 MW
- CASSA CENTRAL CHAPARRASTIQUE. Capacidad instalada de 62.5 MW
- INGENIO EL ANGEL. Capacidad instalada de 97.5 MW
- INGENIO LA CABAÑA. Capacidad instalada de 21 MW

(“Sector Eléctrico de El Salvador”, PROESA. Datos del año 2015)

#### ***2.1.10 PLANTA DE GENERACIÓN A BIOGAS.***

“Una de las fuentes de generación más innovadoras es la planta de biogás en el municipio de Nejapa por parte de AES El Salvador, tiene una capacidad instalada de 6 MW obtenido del relleno sanitario captando el biogás”.



**Figura 13:** planta de Biogás en Nejapa. Foto cortesía de AES El Salvador.

### **PROYECTO EÓLICO VENTUS**

“Tracia Network Corporation ha encargado con éxito el proyecto eólico Ventus, el primer parque eólico de El Salvador, con el apoyo de los servicios técnicamente avanzados de ArcVera Renewables aplicados desde la prospección hasta el desarrollo y la finalización” (Roca, 2021).

Este parque se encuentra ubicado en Metapán, El Salvador. El parque eólico Ventus de 54 MW comprende 15 turbinas Vestas V136-3.6. Aumentará significativamente la capacidad de

El Salvador para la generación de energía renovable y evitará la emisión de aproximadamente 200.000 toneladas de CO2 por año a la atmósfera.



**Figura 14:** parque Eólico Ventus. Foto de archivo SIGET.

Además, el uso de la energía eólica en El Salvador ayudará a reducir la dependencia de la nación de los combustibles fósiles importados, brindará al país una mayor estabilidad en el precio de la energía y diversificará la red eléctrica nacional.

ArcVera fue pionero en el uso de modelos de microescala / meso escala de muy alta resolución (en la escala de espaciado de turbina a turbina) que se usaba más comúnmente para la investigación de la ciencia atmosférica y la predicción del tiempo. La firma define patrones de flujo de viento a la altura del eje mucho más precisos utilizando superordenadores y otras técnicas patentadas para generar modelos de series de tiempo tridimensionales de alta resolución de los vientos y el clima donde funcionan las turbinas eólicas.

### **2.1.11 PROYECTOS DE GENERACIÓN FUTUROS.**

En los últimos años se han estado realizando proyectos de generación de energía eléctrica, tanto concluidos como aún en proceso de finalización, que busca diversificar la matriz energética. La búsqueda por encontrar nuevas formas de generación que sean limpias con el medio ambiente es la prioridad del estado, de esta forma se garantiza evitar la contaminación y al mismo tiempo la sostenibilidad a través del tiempo. A continuación, se hará una recopilación de los proyectos más importantes.

#### **PROYECTO CENTRAL HIDROELÉCTRICA EL CHAPARRAL O CENTRAL HIDROELÉCTRICA 3 DE FEBRERO**

Este proyecto es uno de los que está más próximos a terminar y está ubicado en el municipio de San Luis de la Reina, departamento de San Miguel, sobre el río Torola y tendrá una capacidad instalada proyectada de 66 MW.



**Figura 15:** central hidroeléctrica El Chaparral. Foto de archivo CEL.

#### **PROYECTO GEOTÉRMICO CHINAMECA**

LaGeo tiene proyectado la perforación de más pozos geotérmicos en diferentes partes del país, esta vez en el municipio de Chinameca, departamento de San Miguel, en el que se tiene previsto una capacidad de generación de electricidad de hasta 50 MW (Lageo.com). Se estima que el tiempo de construcción de la fase uno en el que se instalará una generadora de 25 MW es de 26 meses y para la fase 2 otra generadora de igual potencia un tiempo de 33 meses.

#### **PROYECTO GEOTÉRMICO SAN VICENTE**

Este proyecto estará situado en el municipio de Tepetitan, departamento de San Vicente. Para el desarrollo de esta planta se prevé que será realizado en dos fases. La primera estará diseñada para una instalación de una generadora de 10 MW y la segunda fase una generadora de 20 MW; haciendo un total de 30 MW de capacidad instalada. El tiempo de ejecución de la fase uno es de 36 meses y la fase dos en 48 meses.

## CENTRAL TÉRMICA A BASE DE GNL

Este proyecto de generación es a base de gas natural y está ubicado en el municipio de Acajutla, departamento de Sonsonate, cerca del puerto. Es una de los proyectos más ambiciosos que está cerca de aperturarse ya que contará con una capacidad instalada de 378 MW y con ello siendo una de las generadoras de mayor capacidad en el país. Se espera que el proyecto inicie en 2023 o 2024 con abastecimiento a largo plazo de unos 20 años aproximadamente.



**Figura 16:** planta de generación de Gas Natural. Foto de archivo de SIGET.

## PLANTA DE BIOGÁS EN RÍO ACELHUATE.

Este proyecto está en estudio, hasta la fecha solo estudios de Impacto Ambiental, se tiene planeado realizarlo en el río Tomayate y Urbina y lleva un avance del 20% entre los diversos análisis que se están llevando a cabo. Se desconoce la capacidad a futuro, pero se espera beneficiar a 21 mil familias. En los próximos años se espera tener más detalles sobre el proyecto.

## ENERGÍAS DEL MAR.

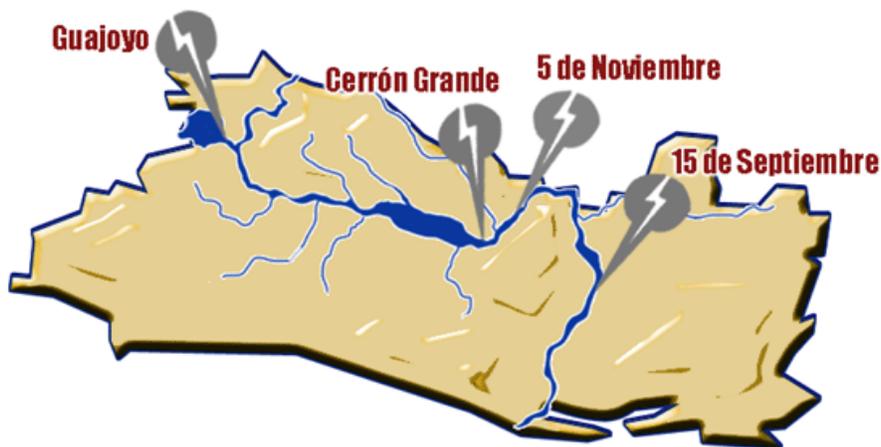
“La administración de CEL retomó un estudio que estuvo engavetado, que busca determinar el potencial de generación eléctrica a partir del aprovechamiento de las aguas del mar en la costa salvadoreña. Para este propósito se está trabajando en la concretización de acciones de cooperación técnica con instituciones internacionales especialistas en la materia” (CEL, 2019-2020).

## 2.2.0 ANTECEDENTES DEL SECTOR ELECTRICO EN EL SALVADOR

Antes de la creación de la CEL el sector eléctrico era privatizado, creándose empresas como CAESS, en San Salvador, CLESA (Compañía de Luz eléctrica de santa Ana) Y CLEA (Compañía de Luz Eléctrica de Ahuachapán) en la zona occidental del país en el año de 1936. En el 57 se creó la Distribuidora eléctrica de Usulután (DEUSEM) siendo la mayoría de sus usuarios habitantes de zonas rurales. Para 1961 la CEL asumió la responsabilidad de distribuir electricidad en las zonas rurales y debido a situaciones coyunturales y ante el vencimiento de la concesión al sector privado de la distribución de electricidad en 1986 se nacionalizó las empresas existentes: CAESS, CLESA, CLES y CLEA. Pasando a ser administradas por la CEL.

En los años noventa se comenzó a realizar reformas para hacer una estructura más definida para el mercado eléctrico nacional y fue así como en 1996 se creó una Ley General de electricidad para la cual se creó l Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones (SIGET), entidad encargada de regular y hacer cumplir la ley ante las diferentes disposiciones legales; así también, como aprobar los pliegos tarifarios. En 1998 surgieron cambios y se redistribuyeron las actividades que hacía la CEL en forma privatizada como lo fue la creación de LaGeo S.A de C.V. que es la encargada de la geotermia en el país, la Empresa Transmisora Salvadoreña (ETESAL) y la Unidad de Transacciones (UT) que está a cargo del Mercado de Contratos y el Mercado Regulador del Sistema (MRS) en 1999. En ese mismo año Duke Energy compró las instalaciones y lo relacionado a la generación Térmica.

Para el año 2007 la asamblea legislativa aprobó la creación del Consejo Nacional de Energía (CNE) como la autoridad superior en materia de política energética y ente coordinador de diferentes sectores energéticos. En el año 2009 el CNE inició operaciones con el objetivo de desarrollar la política energética nacional, tomando decisiones e impulsando leyes y reglamentos para el sector energético en el país.



## 2.2.1 CAPACIDAD DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN EL SALVADOR

Como vimos en el punto anterior la generación de electricidad ha iniciado desde los años cincuenta y a través de los años se han ido creando nuevas fuentes de generación, pero para que sea suficiente debemos tener claro la capacidad instalada en el país y como está diversificada la matriz energética. A la par de estos datos tenemos que ver el comportamiento de la demanda y eso nos lleva a la pregunta ¿Es suficiente la generación de electricidad para atender a toda la demanda del país? En un principio diríamos que sí, pero la pregunta clave ¿A qué costo? Para tener una respuesta clara debemos conocer que es lo que tenemos disponible y al día de hoy dejar de depender de los sistemas fósiles que va de la mano con el costo de generación. Es por ello que tanto la SIGET, CEL, CNE están en búsqueda de nuevas alianzas estratégicas con nuevas formas de generación limpia que ayuden a disminuir la dependencia de los hidrocarburos en sus nuevos proyectos de generación eléctrica.

Para lograr tener una mejor perspectiva en la tabla 1 están datos registrados desde el 2015 hasta el 2020 de los diferentes recursos de generación en el país.

GENERADORAS	CAPACIDAD INSTALADA					
	2015		2019		2020	
	MW	(%)	MW	(%)	MW	(%)
HIDROELECTRICA	472.60	28.50	573.79	25.40	573.79	24.30
GEOTERMICA	204.40	12.30	204.40	9.10	204.40	8.70
TERMICA	756.60	45.60	771.11	34.20	771.11	32.70
BIOMASA	226.00	13.60	293.60	13.00	293.60	12.40
SOLAR	-	0.00	406.33	18.00	474.46	20.10
BIOGAS	-	0.00	6.85	0.30	6.85	0.30
EOLICA	-	0.00	-	0.00	36.00	1.50
<b>TOTAL</b>	<b>1659.60*</b>	<b>100.00</b>	<b>2256.08**</b>	<b>100.00</b>	<b>2360.21**</b>	<b>100.00</b>

**Tabla 1:** generación de energía eléctrica de los distintos recursos que hay en el país (PROESA, Sector Eléctrico de El Salvador, 2015), (SIGET, 2019-2020).

Como podemos observar en la **tabla 1** desde el año 2015 hubo pocos incrementos en la potencia instalada en la generación hidroeléctrica y geotérmica. La generación solar fotovoltaica empezó a desarrollarse masivamente a la red eléctrica desde el año 2019 siendo de las que más crecimiento ha tenido a lo largo de los últimos 5 años. La generación que está desarrollándose actualmente como lo es la Eólica empezó a dar sus inicios en el año 2020 que es de las últimas en conectarse a la red en la que se espera que en los próximos años aumente su producción.

Para tener una idea más clara sobre lo que realmente se está produciendo en energía eléctrica en el país es necesario conocer algunos conceptos ya que el conocer la potencia instalada es un panorama general pero realmente lo que está llegando al sistema es diferente. Estos conceptos son:

## 2.2.2 CAPACIDAD INSTALADA

Es la potencia que una máquina generadora es capaz de entregar nominalmente a una carga máxima especificada por el fabricante.

Es lo que se detalla en la **tabla #1** en la cual indica la potencia total instalada en el país es un aspecto de lo que entregaría la maquina generadora a máxima potencia. Pero este dato es bastante impreciso ya que no todas las maquinas entregan toda su potencia las 24 horas del día ni los 365 días del año, por lo cual, en aspectos de energía se necesita otro concepto importante como lo es la capacidad disponible.

## 2.2.3 CAPACIDAD DISPONIBLE

Es la potencia que las unidades generadoras son capaces de entregar al sistema eléctrico y que dependen de aspectos como la demanda máxima, disponibilidad entre otros.

Este es un detalle más cercano a las cifras reales de lo que respecta a la generación de energía del país en la que toma varios aspectos que disminuye la potencia máxima de la maquina generadora con respecto al tiempo de servicio. En la **tabla #2** podemos observar las diferentes fuentes de generación eléctrica, pero con más detalles que la tabla anterior. Si hacemos una comparación vemos que en la mayoría de las centrales generadoras no entregan toda la potencia por lo que hay un dato muy diferente entre lo que se tiene con lo que se genera.

Tomando de ejemplo **la tabla # 2** la capacidad instalada total es de 2062.79 MW y la potencia disponible es de 1871.59 MW es una reducción alrededor del 9% que en valores de mega watts es muy considerable por lo que el concepto de capacidad disponible es un buen indicador de cómo está el país en términos de generación de energía.

N°	NOMBRE	TIPO	CAPACIDAD INSTALADA		CAPACIDAD DISPONIBLE	
			MW	PORCENTAJE	MW	PORCENTAJE
1	<b>HIDROELECTRICAS</b>		<b>552.69</b>	<b>27%</b>	<b>552.69</b>	<b>29.53%</b>
	CEL					
	1.1 - GUAJOYO	HIDRAULICA	19.80	0.96%	19.80	1.06%
	1.2 - CERRON GRANDE	HIDRAULICA	172.80	8.38%	172.80	9.23%
	1.3 - 5 DE NOVIEMBRE	HIDRAULICA	180.09	8.73%	180.09	9.62%
	1.4 - 15 DE SEPTIEMBRE	HIDRAULICA	180.00	8.73%	180.00	9.62%
2	<b>GEOTERMICAS</b>		<b>204.4</b>	<b>9.91%</b>	<b>175.00</b>	<b>9.35%</b>
	LAGEO					
	2.1 - AHUACHAPAN	GEOTERMICA	95	4.61%	74.70	3.99%
	2.2 - BERLIN	GEOTERMICA	109.4	5.30%	100.30	5.36%
3	<b>TERMICAS</b>		<b>757.10</b>	<b>36.70%</b>	<b>724.20</b>	<b>38.69%</b>
	ORAZUL					
	3.1 - ACAJUTLA	VAPOR	63.00	3.05%	59.50	3.18%
	3.2 - ACAJUTLA	GAS	82.10	3.98%	64.00	3.42%
	3.3 - ACAJUTLA	MOTORES	150.00	7.27%	147.30	7.87%
	3.4 - ACAJUTLA	GAS	27.00	1.31%	27.00	1.44%
	3.5 - SOYAPANGO	MOTORES	16.20	0.79%	15.30	0.82%
	4 NEJAPA POWER	MOTORES	143.90	6.98%	141.50	7.56%
	5 HOLCIM	MOTORES	25.90	1.26%	25.90	1.38%
	6 CENTRAL ELECTRICA TALNIQUE	MOTORES	100.80	4.89%	100.80	5.39%
	7 TEXTUFIL S.A.	MOTORES	42.50	2.06%	42.50	2.27%
8 GENERADORA ELECTRICA CENTRAL S.A. de C.V.	MOTORES	11.60	0.56%	10.90	0.58%	
9 ENERGIA BOREALIS	MOTORES	13.60	0.66%	11.30	0.60%	
10 HILCASA ENERGY	MOTORES	6.80	0.33%	6.50	0.35%	
11 TERMOPUERTO S.A. de C.V.	MOTORES	73.70	3.57%	71.70	3.83%	

	<b>BIOMASA</b>		<b>293.60</b>	<b>14.23%</b>	<b>181.70</b>	<b>9.71%</b>
12	CASSA					
	12.1 - CENTRAL IZALCO	TURBOGENERADOR	45.00	2.18%	28.00	1.50%
	12.2 - INGENIO CHAPARRASTIQUE	TURBOGENERADOR	78.40	3.80%	35.00	1.87%
13	INGENIO EL ANGEL	TURBOGENERADOR	95.30	4.62%	53.80	2.87%
14	INGENIO LA CABAÑA	TURBOGENERADOR	30.00	1.45%	30.00	1.60%
15	INGENIO JIBOA	TURBOGENERADOR	44.90	2.18%	34.90	1.86%
	<b>FOTOVOLTAICO</b>		<b>219.00</b>	<b>10.62%</b>	<b>202.00</b>	<b>10.79%</b>
16	PROVIDENCIA SOLAR ANTARES	FOTOVOLTAICA	60.00	2.91%	60.00	3.21%
17	PROYECTO LA TRINIDAD LTDA de C.V.					
	17.1 - LA TRINIDAD	FOTOVOLTAICA	8.00	0.39%	8.00	0.43%
	17.2 - MARQUEZ	FOTOVOLTAICA	6.00	0.29%	6.00	0.32%
18	ACAJUTLA ENERGIA SOLAR LTDA. De C.V.					
	18.1 - LOS REMEDIOS	FOTOVOLTAICA	20.00	0.97%	20.00	1.07%
19	CAPELLA SOLAR					
	19.1 ALBIREO I	FOTOVOLTAICA	57.50	2.79%	50.00	2.67%
	19.2 ALBIREO II	FOTOVOLTAICA	57.50	2.79%	50.00	2.67%
20	SONSONATE SOLAR	FOTOVOLTAICA	10.00	0.48%	8.00	0.43%
	<b>EOLICO</b>		<b>36.00</b>	<b>1.75%</b>	<b>36.00</b>	<b>1.92%</b>
21	VENTUS S.A de C.V.	EOLICO	36.00	1.75%	36.00	1.92%
	<b>TOTAL</b>		<b>2062.79</b>	<b>100.00%</b>	<b>1871.59</b>	<b>100.00%</b>

**Tabla 2:** capacidad instalada y capacidad disponible por central generadora de electricidad en el año 2020 (SIGET, 2020).

#### 2.2.4 CAPACIDAD FIRME

Es la capacidad que las unidades generadoras pueden entregar con una alta probabilidad de entrega en determinado periodo de tiempo.

La disponibilidad en una central generadora es de suma importancia conocerla, a través de ello se determina la potencia firme inicial según la fuente que se esté analizando y se considera lo siguiente.

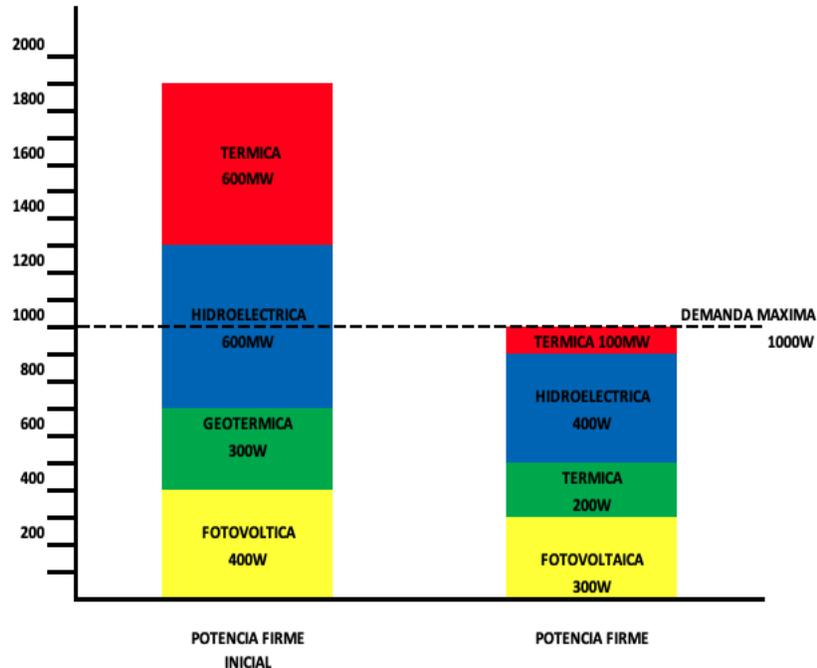
**GENERADORES TERMICOS Y GEOTERMICOS:** Se calcula en base a la potencia máxima a través de su índice de disponibilidad.

**GENERADORES HIDROELECTRICOS:** Se determina en función de la higrología más seca registrada históricamente (Datos registrados desde 1986).

**BIOMASA:** Se calcula en base a los excedentes que pueda inyectar. Se representarán como una unidad térmica con una potencia máxima neta igual al excedente máximo de potencia.

**GENERADORES NO CONVENCIONALES:** Son la que incluyen la generación fotovoltaica, eólica, biomasa etc. Se determinará con la energía generable en el año de menor disponibilidad del insumo primario.

Una vez definida la potencia firme inicial, en la cual se hace cada mes, la Unidad de Transacciones (UT) determinara la potencia firme ajustándola a la demanda máxima. En un cierto periodo las personas o empresas demandas más energía en ciertas horas del día por lo que se necesita saber cuáles generadoras tienen la mayor disponibilidad para ese caso. Como ejemplo tenemos LA FIGURA 17.



**Figura 17:** ejemplo capacidad firme.

Como vimos en las tablas anteriores cada generadora tiene disponible cierto número de potencia que puede entregar al sistema como se ve en la primera columna. La potencia firme es la potencia máxima que podría generar una unidad de generación con un alto nivel de seguridad dependiendo si es hidroeléctrico, geotérmico, solar o térmico. Por eso es que en la segunda columna a pesar de tener una mayor capacidad de generación solo se toma lo que realmente puede aportar durante un periodo de tiempo determinado. Se toma como base todos los recursos renovables para que ingresen primero al sistema ya que la principal fuente que se necesita disminuir es el uso de la generación térmica.

### 2.3.0 DEMANDA ENERGÉTICA EN EL SALVADOR

Actualmente en el país, la preocupación por el cambio climático es uno de los temas de mayor importancia ya que somos muy vulnerables ante estos fenómenos, que por ser un país pequeño las alternativas para la fuente de generación eléctrica son escasas y la dependencia en mayor parte por la generación térmica (bunker) hace que el problema se agrave debido al crecimiento bastante considerable del consumo energético de la población que crece con el paso de los años.

La emisión de gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>) es uno de los mayores problemas que afectan no solo a El Salvador sino al mundo, los combustibles fósiles, utilizados en la generación de energía eléctrica, son los grandes contaminantes del medio ambiente, por tanto, es necesario reducir la dependencia de estos. Para ello, el país avanza en la implementación de nuevas reformas de generación eléctrica que a pesar de refuerzos importantes aún no son suficientes para dejar de depender de métodos que afecten el medio ambiente.

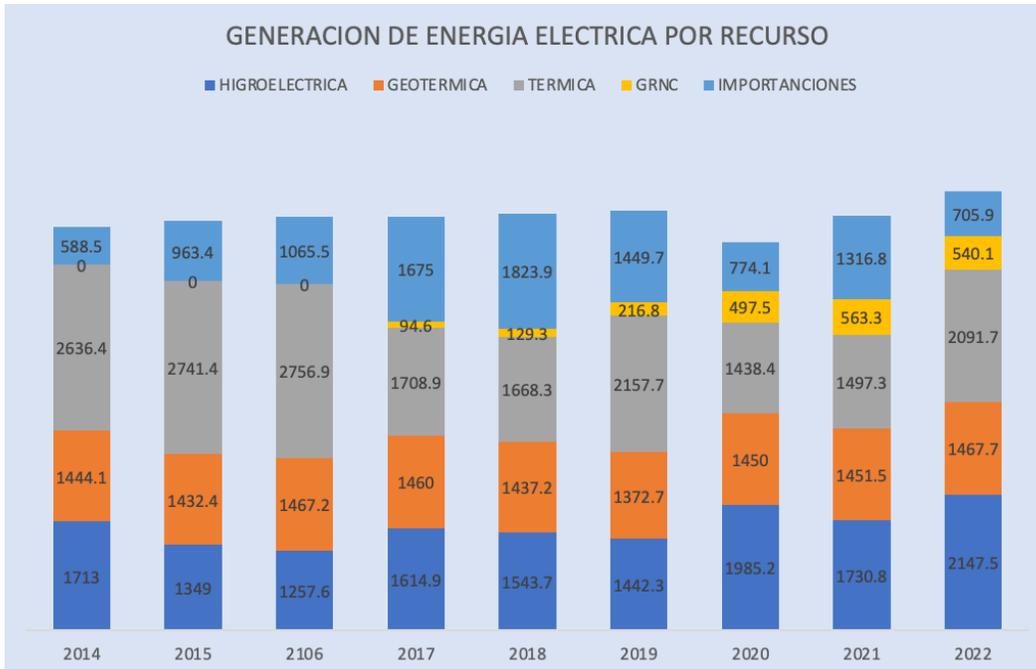


Figura 18: generación de energía por recurso. Datos anuales de la UT en GWh (UT, s.f.).

En la **figura 18** se observa que entre los años 2014 al 2016 la generación térmica era la más dominante y en la que más se dependía para entregar energía al sistema de electricidad del país. A partir del año 2017 se fueron ingresando nuevas alternativas que han ido creciendo con el pasar de los años de esta forma se nota una diferencia muy significativa en cuanto a la reducción de la generación de energía a través de fuentes no renovables. Es importante también observar que las importaciones tuvieron una reducción de más del 50% del máximo de 2018 y el año 2022. En el año 2022 se interconectaron más generadoras de energía fotovoltaica, así como en incremento en la capacidad de varias generadoras ya existentes.

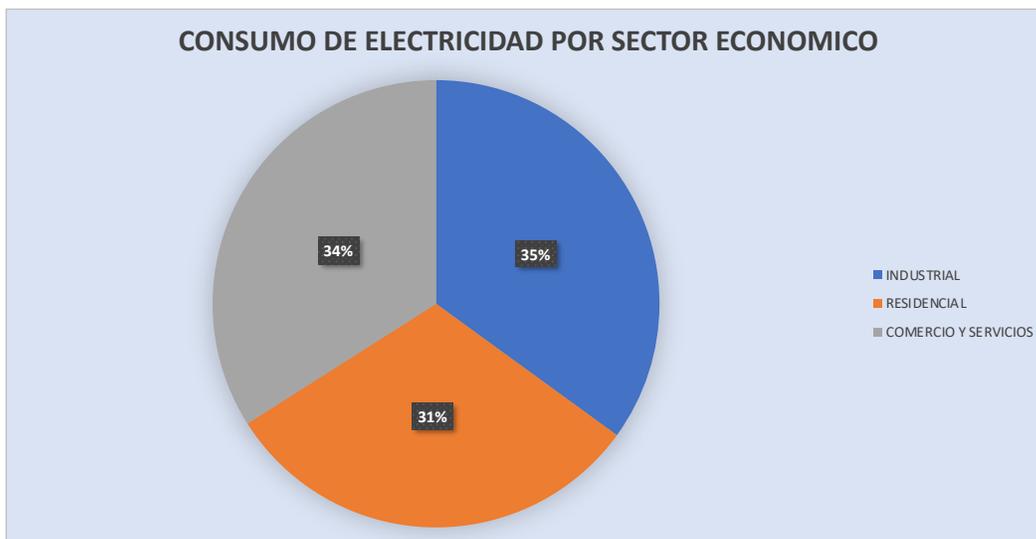
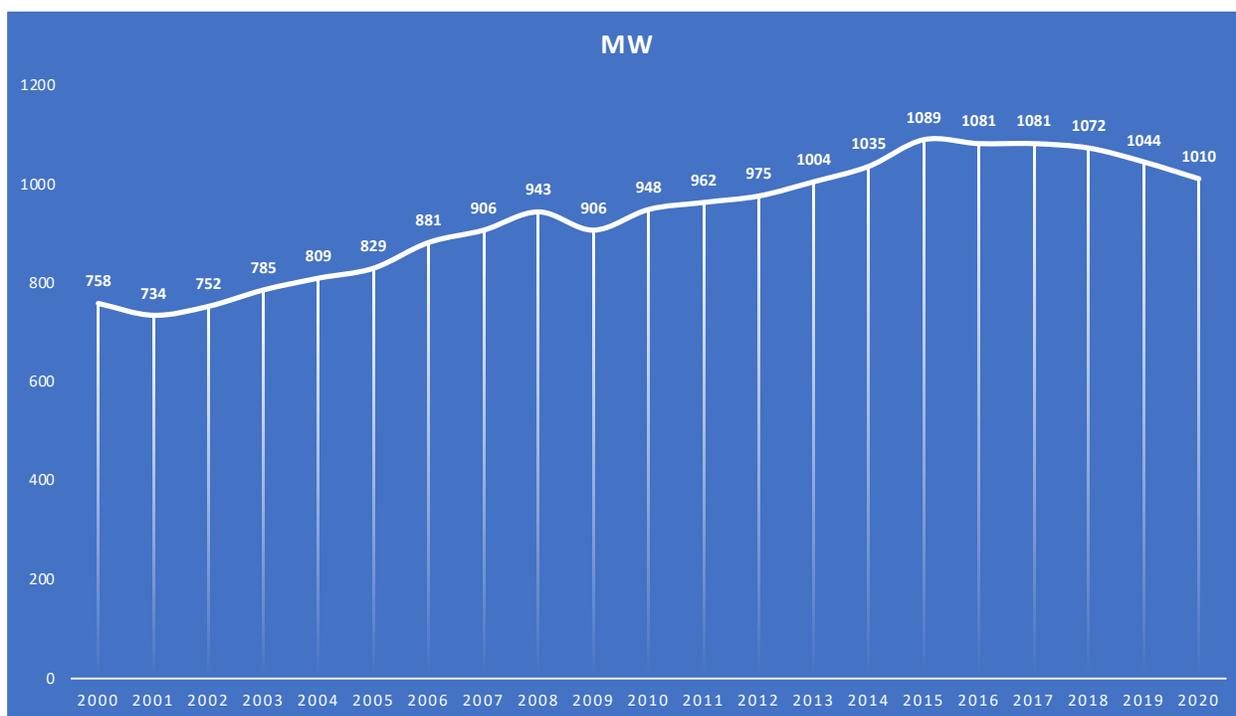


Figura 19: consumo de electricidad por sector económico (IRENA, 2020).

La generación de electricidad en nuestro país es muy importante, ya que, los grandes sectores económicos dependen de este suministro y por consiguiente es necesario aumentar la capacidad para cubrir la demanda que crece con los años, tal como se muestra a continuación.

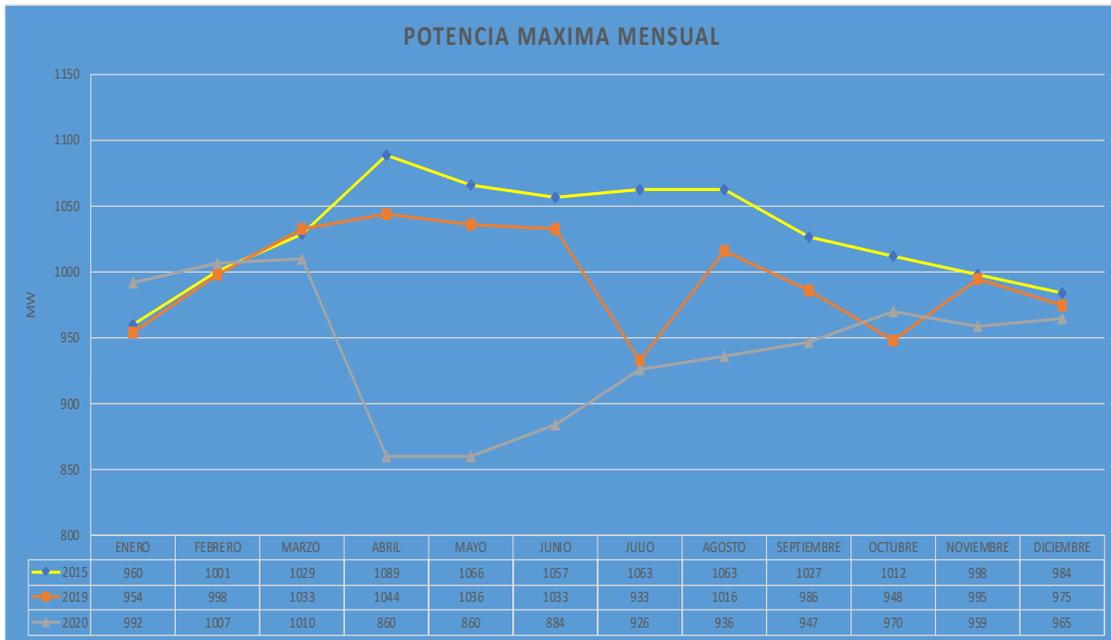
En la **figura 19**, el sector industrial y comercio representa el 69% de la demanda de electricidad, por lo que, se convierte en un factor fundamental en la economía del país, esto aumentará cada año y si no se tiene la capacidad de generación eléctrica que se necesita para cubrir toda esa demanda traerá problemas no solo climáticos, sino también económicos.

Con el paso de los años la demanda de potencia se ha ido incrementando por causas demográficas y nuevas inversiones que cada vez demandan una fuente de energía más confiable. En la figura 20 a partir del año 2000 vemos una tendencia al alza llegando a un punto máximo en 2015 pasando de 758 MW a 1089 MW en 15 años. Entre los años 2016 a 2018 se mantiene estable haciendo un estancamiento en la demanda de potencia y por el caso mundial del COVID19 en el año 2019 y 2020 hay una tendencia a la baja por dicho motivo.



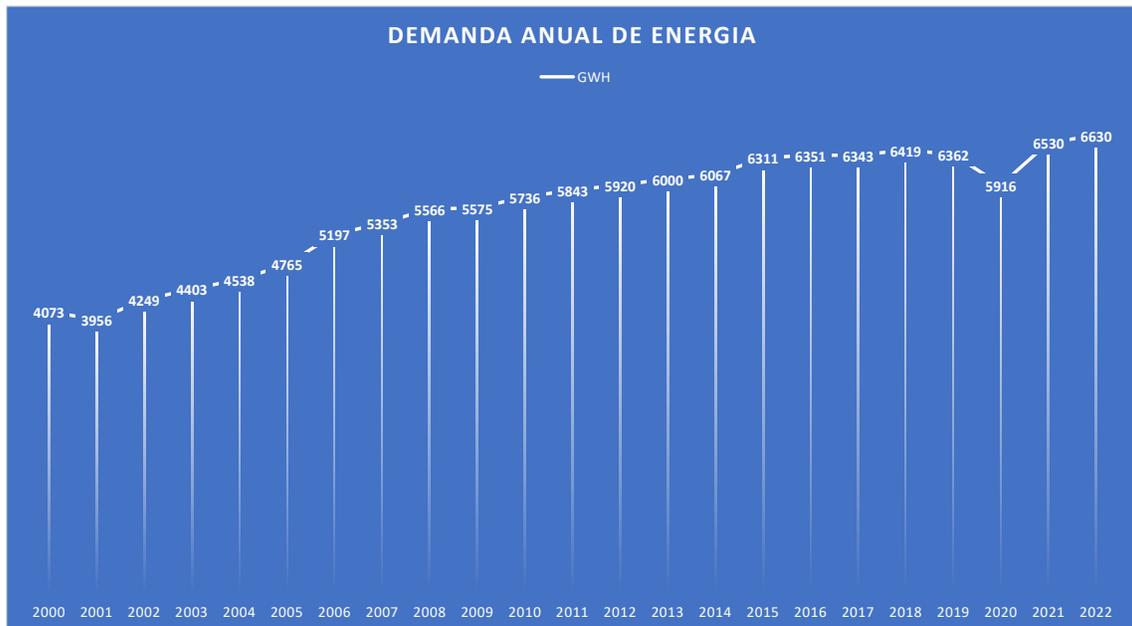
**Figura 20:** demanda máxima de potencia desde el año 2000.

En el transcurso de año la demanda varía según las estaciones del año, como se observa en el gráfico 21, por lo que es necesario hacer ajustes en cuanto a la disponibilidad de las diferentes fuentes generadoras de energía ya que en el los meses de temporada seca (Abril) es cuando aumenta la mayor demanda de potencia y como sabes las fuentes hidrológicas están en su menor nivel por lo que se hace necesario en estas temporadas aumentar la capacidad de energías renovables que ayuden a solventar esta baja específicamente en las centrales hidroeléctricas para disminuir el uso de las energías fósiles.



**Figura 21:** potencia máxima mensual en diferentes años.

Entre abril y agosto se tienen los índices más elevados de demanda de potencia máxima, 5 meses en los que se tiene que cumplir con los objetivos y se tiene que estar preparado aumentando la disponibilidad de las centrales generadoras por lo que el ingresar más recurso renovable está siendo vital. Mas aun cuando vemos que la demanda de energía crece de manera exponencial con el pasar de los años; en el grafico 22 desde el año 2000, recordando que el 2001 hubo una emergencia ante los terremotos, no ha hecho más que incrementarse pasando de tener 4073 GWh a 6419 GWh en el 2018 es decir un aumento de más del 30%.



**Figura 22:** crecimiento de la demanda de energía de los últimos 22 años.

La baja en el 2020 se debe a los efectos de la crisis mundial del COVID19, pero en 2021 y 2022 está volviendo a retomar el ritmo y de nuevo incrementándose. Así como se ve la tendencia El Salvador puede estar al límite de su generación de energía teniendo que depender de la importación y las energías fósiles; el utilizar todos los recursos disponibles que se pueden utilizar en país y diversificar la matriz energética, principalmente renovables, hará que este efecto disminuya a corto y mediano plazo.

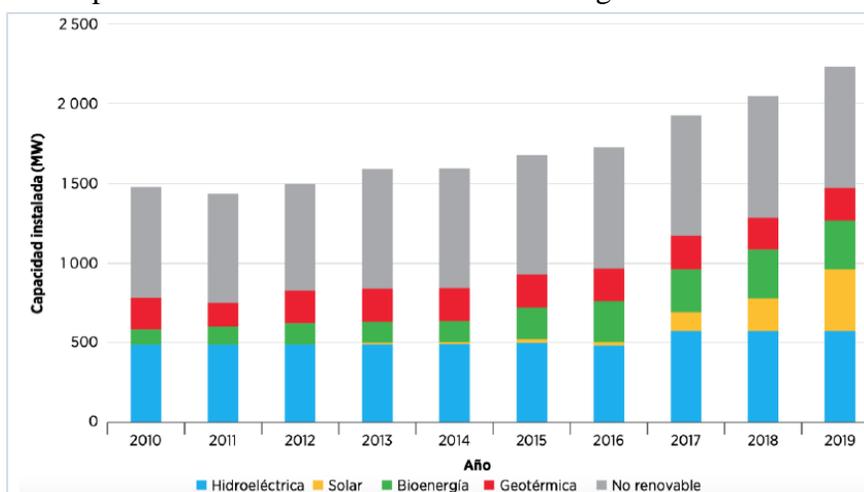
## 2.4.0 ENERGÍAS RENOVABLES EN EL SALVADOR

En El Salvador se han estado dando los primeros pasos en cuanto a la utilización de más recursos renovables para la generación de energía desde el año 2017 (**GRAFICO 18**) y con proyectos aún pendientes, sección 2.1.11, se están haciendo esfuerzos por diversificar la matriz energética.

“El 16 de enero de 2022 El Salvador firmo un acuerdo con la Agencia Internacional de Energías Renovables (International Renewable Energy Agency, IRENA) una de las mayores agencias internacionales de energías renovables que hará que las dos partes trabajen en estrecha colaboración para impulsar los esfuerzos nacionales de descarbonización del país en apoyo del cambio climático y objetivos de desarrollo económico” (Bnamericas, 2022).

“El Salvador está en proceso de implementar una nueva política energética nacional de largo plazo 2020 – 2050, que tiene como objetivo reducir las tarifas eléctricas en el país priorizando las energías renovables sobre las importaciones de combustible y facilitando la eliminación de los subsidios a la electricidad hacia el final del período de la política” mencionaron en dicho acuerdo. El Salvador recurre cada vez más a las fuentes de energía renovables como la energía hidroeléctrica, la biomasa, la energía solar fotovoltaica y la energía geotérmica. En 2019, más de dos tercios del suministro total de energía del país provino de combustibles fósiles importados.

Antes del acuerdo en 2022 se han estado haciendo estudios desde el año 2019 sobre la situación de la generación de energía a través de fuentes de energía limpia en el cual detallo que la capacidad instalada aún está empezando a construirse como se ve en el grafico 23.



**Figura 23:** capacidad instalada de recursos renovables.

La capacidad instalada total en El Salvador alcanzó 2,2 GW. En los últimos 5 años, la tasa de crecimiento anual promedio de la capacidad instalada total ha sido alrededor del 6%. Sin embargo, desde 2013 no ha habido nuevas adiciones de capacidad térmica convencional. Sin embargo, este tipo de generación de energía eléctrica sigue teniendo la mayor participación entre todas las fuentes de energía.

La generación de energía renovable -hidroeléctrica, solar, geotérmica, eólica y biomasa- abasteció el 76 % de la demanda nacional durante 2022, confirmó la Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones (Siget).



La generación renovable suele tener un precio más barato en comparación a la fósil, pues depende de condiciones climáticas mientras que el crudo está sujeto a la especulación del mercado [9]. Cuando es invierno, por ejemplo, hay mayor participación de la hidroeléctrica, pero si hay una sequía se tiene que echar mano de las plantas de búnker y eso eleva el costo (Aleman, 2023).

Al 31 de diciembre, la tecnología hidro representó el 33.70 % de la matriz de generación acumulada. En segundo lugar, estuvo la geotérmica, que suele tener precios mucho más competitivos, con un aporte del 23 %.

Las plantas fotovoltaicas representaron un 8.48 % y la eólica un 2.13 %, mientras que la biomasa (ingenios azucareros) fue un 8.65 %. El gas natural, que se considera una tecnología de transición, aportó un 16 % y el búnker un 7.93 %.

## 2.5.0 UNA NUEVA FORMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA: ENERGÍA UNDIMOTRÍZ.

Como se logró apreciar en los apartados anteriores, crecer la matriz energética a través de energías renovables es de vital importancia para bajar la contaminación por CO<sub>2</sub> en base a la generación térmica (combustibles) tanto para el medio ambiente como para aumentar la generación de electricidad ante una demanda que crece año con año. Estadísticamente vimos como la energía solar fotovoltaica ha duplicado su influencia en la capacidad instalada y la importancia de la energía geotérmica para nuestro país.

Ahora, es de ver nuevos horizontes, tener nuevas formas de generación de electricidad para seguir diversificando la matriz energética. Es por ello, que el mundo está viendo los océanos como una nueva fuente de generación eléctrica. Se iniciaron estudios sobre las mareas y su aprovechamiento (energía mareomotriz), luego vieron las olas del mar como una fuente potencial para este propósito, lo que hoy se denomina como energía Undimotriz. El Salvador cuenta con 321 km de costa, con un área marina de 100,000 km<sup>2</sup>, lo que hace atractivo este tipo de tecnologías. Por ser un país pequeño, se tienen que analizar todas las tecnologías disponibles actualmente en el mundo y ver cual se podría empezar a implementar, ya que se debe tener en cuenta de hay sitios de preservación natural, pero ciertamente el potencial energético está ahí, solo basta con realizar buenos estudios para la implementación de proyectos para aprovechar la zona costera de nuestro país como una nueva opción de generación de electricidad. En el siguiente capítulo se conocerán los puntos y aspectos más importantes sobre este tipo de generación eléctrica.



Figura 24: zona costera de El Salvador.

**CAPÍTULO TRES**  
**GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA UNDIMOTRIZ**

## INTRODUCCIÓN

Se entiende el término fuentes de energía renovables a aquellas que virtualmente son inagotables dado que son capaces de regenerarse naturalmente. Los sistemas de generación de energía renovable más conocidos son los sistemas de generación eólicos, solar e hídricos. Pero existen otras alternativas de generación que han captado la atención de los investigadores en los últimos años, como la biomasa, la geotérmica, la mareomotriz y la undimotriz. En esta última, la energía se produce por el movimiento de las olas.

### 3.1.0 HISTORIA DE LA ENERGÍA UNIMOTRIZ

La idea de aprovechar la energía del oleaje es bastante antigua. En el pacífico, la gente tiene una larga tradición en el uso de tablas, donde las olas han sido usadas como propulsores, tal como se muestra en la figura 25.



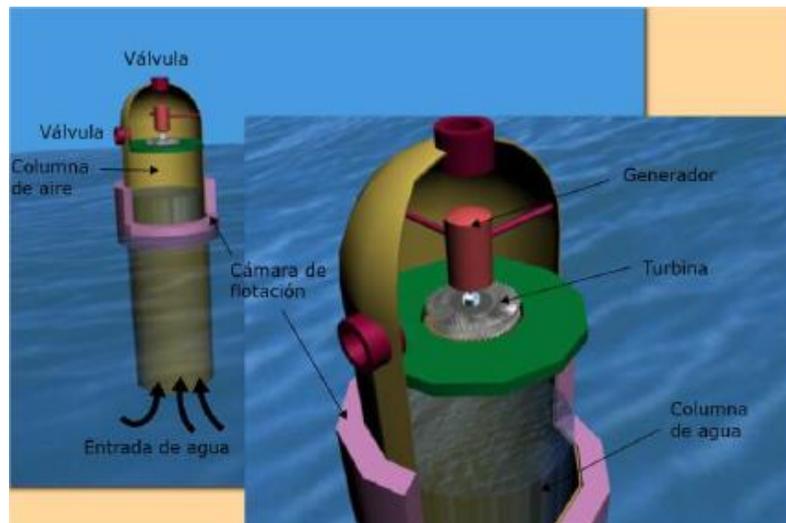
**Figura 25:** *propulsión de una ola en las tablas de surf.*

La posibilidad de tener energía de las olas se ha estudiado desde la época de la revolución francesa. La primera patente de un dispositivo de aprovechamiento del oleaje se llevó a cabo en 1799 por un parisino de apellido Girard y su hijo. Ellos proponían el uso de la acción mecánica directa para accionar bombas, sierras, molinos, u otras maquinarias. Estos inventores franceses habían observado que, la enorme masa de un barco, que necesita de una gran fuerza para poderla levantar, respondía al más leve movimiento de las olas. La invención de los Girard consistía en una balsa situada fuera de la costa. Los movimientos de ascenso y descenso de la balsa, similares a los de una boya, estaban conectados por numerosos alambres y poleas a algún aparato de la orilla.

A principios del siglo XX, el francés Bouchaux-Pacei suministra electricidad a su casa en Royan, mediante un sistema neumático, parecido a las actuales columnas oscilantes de agua. En esta misma época se prueban sistemas mecánicos en California, y en 1920 se ensaya un motor de péndulo en Japón. Desde 1921 el Instituto Oceanográfico de Mónaco, utiliza una bomba accionada por las olas para elevar agua a 60 m con una potencia de 400W. En 1958, se proyecta una central de 20 MW en la isla Mauricio, que no llegó a construirse, consistente en una rampa fija sobre un

arrecife, a través de la cual subía el agua a un embalse situado a 3 m por encima del nivel del mar. Los franceses construyeron en Argelia en los años cuarenta dos plantas piloto tipo con canal convergente. En 1975 se construye un sistema similar en Puerto Rico, con el fin de alimentar con agua un puerto deportivo.

“Uno de los pioneros en el campo del aprovechamiento de la energía de las olas fue el japonés Yoshio Masuda, que empezó sus investigaciones en 1945 y ensayó en el mar, en 1947, el primer prototipo de una balsa; a partir de 1960 desarrolla un sistema, denominado boya Masuda (figura 26), para la carga de baterías en boyas de navegación, con una turbina de aire de 60W, de la que se vendieron más de 1200 unidades” (Kimerius, s.f.).



**Figura 26:** boya Masuda.

En 1976 Masuda promovió la creación de un dispositivo mucho mayor que la boya de navegación, que fue denominado “Kaimei” (figura 27). Consistía en una barcaza de 80 metros de eslora y 20 metros de ancho cuyo objetivo principal era realizar pruebas experimentales para diferentes dispositivos de aprovechamiento de energía undimotriz.



**Figura 27:** buque Kaimei.

Este buque estuvo en funcionamiento 2 años, entre 1978 y 1980, en el primer año se realizaron pruebas sobre la durabilidad de diferentes dispositivos en el entorno marino, que resulta muy severo con los materiales; mientras que en el segundo año el objetivo era extraer datos sobre ciertos parámetros relacionados con la energía undimotriz tales como la fuerza de amarre que necesitarían los dispositivos o diversos factores de conversión de las turbinas utilizadas para extraer energía eléctrica a partir de la energía de las olas.

La energía undimotriz aún se encuentra en una etapa de desarrollo por lo que aún es difícil estimar cómo progresará con el paso de los años. La investigación a gran escala del aprovechamiento de la energía de las olas se inicia a partir de 1974 en varios centros del Reino Unido, estudiándose sofisticados sistemas para grandes aprovechamientos, actividad que se abandona casi totalmente en 1982, por falta de recursos económicos. A mediados de los ochenta entran en servicio varias plantas piloto de distintos tipos en Europa y Japón.

Sin embargo, es a partir de los años 90 cuando un cierto número de empresas en varios lugares del mundo comienzan a involucrarse en el diseño y desarrollo de aparatos para el aprovechamiento de la energía de las olas. Entre estas empresas pueden señalarse: Aqua Energy Group (USA), Archimedes Wave Swing (Países Bajos), Energetech Australia (Australia), Ocean Power Delivery (Reino Unido), Wavegen (Reino Unido), WavePlane Internacional (Dinamarca) y Wavemill Energy (Canadá)

Esta incertidumbre tiene su origen en el desconocimiento en relación a temas como el comportamiento del oleaje, la transmisión de energía y vida útil de los dispositivos, que dependen de una mantención difícil de realizar debido a la profundidad en la que se pueden ubicar y del deterioro de los dispositivos por el ambiente salino y el crecimiento de organismos marinos sobre estructuras undimotrices.

Sin embargo, esta tecnología es una opción de energía renovable ya que no genera emisiones al aire ni descargas al agua. El oleaje tiene un funcionamiento relativamente predecible por lo que es posible tener un mayor manejo del recurso, logrando una conversión continua de energía renovable.

### **3.2.0 TIPOS DE OLAS**

Todo tipo de oscilación en la superficie de agua que sea periódica se le denomina ola. Las olas de los océanos son originadas por diversas causas. Entre estas causas se pueden señalar el viento, las fuerzas de atracción gravitacional que ejercen la Luna y el Sol sobre las masas oceánicas, los maremotos, las tormentas entre otras.

Sin embargo, de todas ellas, el viento constituye el agente que genera las olas más comunes y de mayor densidad energética. Se suele decir que la energía que poseen las olas del mar son un derivado terciario de la energía solar, ya que el viento se origina como consecuencia del desigual calentamiento que el Sol produce en la superficie terrestre, y el viento, al actuar sobre el agua del mar le transmite energía y la pone en movimiento, produciendo ondulaciones

en las capas superficiales que constituyen el oleaje que se observa en todas las aguas de los océanos y que golpean las costas.



**Figura 28:** olas costeras.

Para el estudio de las olas, éstas se dividen en olas de agua profunda, que no están influenciadas por el fondo, se mueven independientemente de él y olas poco profundas (o costeras) en que, por disminución de la profundidad del agua, su forma y movimiento están afectados por el fondo.



**Figura 29:** formación de olas según su profundidad.

La cantidad de energía que se transmite a los océanos por medio del oleaje depende principalmente de los siguientes factores:

- La intensidad con la que sopla el viento.
- El tiempo que sopla el viento en una misma dirección.
- El fetch o distancia en la que el viento sopla en la misma dirección.

Dado que el 70% de la superficie terrestre la conforman mares y océanos, este recurso supone una fuente de energía renovable de gran potencial, esto hace que el aprovechamiento de las olas para la generación de energía eléctrica sea más atractivo.

“A continuación, se muestran los diferentes tipos de olas” (The Indian Face, 2021):

### 3.2.1 SEGÚN SU CATEGORÍA

#### OLAS DE OSCILACIÓN.

Se representan en toda la superficie del mar y se deben a las variaciones del nivel del mar. Entre ellas el agua no avanza, solo describe un giro al subir y bajar casi en el mismo sitio en el cual se originó el ascenso de la ola. Suelen producirse a muchos kilómetros de la costa, siendo el lugar en el que más se notan los cambios de nivel del mar.

#### OLAS FORZADAS

Las olas forzadas están producidas por el viento. Se suelen dar a causa de los temporales que se forman en el mar. No suelen ser olas muy estables y es difícil prever como serán cuando lleguen a la costa, pudiendo ser imposibles de surfear.

#### OLAS LIBRES

Son las que se forman en alta mar sin la presencia del viento don se observan que las olas “ruedan” por varios kilómetros.

#### OLAS DE TRASLACIÓN

Éstas se producen cuando el mar avanza y se estrella con el fondo marino. Al levantarse, varían la superficie del mar. Generalmente, se producen cerca del litoral y forman mucha espuma al romper.

#### OLAS SÍSMICAS (TSUNAMIS)

Son causadas por un terremoto, explosión volcánica y movimiento de placas tectónicas. El cambio de presión modifica su tamaño y produce olas con gran fuerza y dimensión y son formadas por grandes ondas que van a mucha velocidad en alta mar.



Figura 30: tipos de olas según su categoría.

### 3.2.2 SEGÚN LA DIRECCIÓN EN LA QUE ROMPEN

#### OLAS DERECHAS

Al surfearla, nos desplazamos a la derecha. Estas olas tienen un pico en la zona más alta y rompen progresivamente hacia la derecha.

#### OLAS IZQUIERDAS

Al surfearlas, nos desplazamos a la izquierda. Estas olas tienen un pico en la zona más alta y rompen progresivamente hacia la izquierda.

#### OLAS MIXTAS

Este tipo de olas, rompen en ambas direcciones, al surfear la persona elige el lado o dirección que desee. Este tipo de olas permite tener más de un surfista, uno en cada dirección.

#### OLAS CERROTE

Las olas rompen completamente de golpe, no tienen pared y no podemos dirigirnos a ningún lado en concreto. Son olas que no poseen un pico, toda su extensión rompe a la vez.



Figura 31: tipos de olas según su dirección de rompimiento.

### 3.2.3 SEGÚN LA FORMACIÓN DE OLA

#### OLAS DE VIENTO

Surgen del efecto del viento en el agua del mar y se crean a poca distancia de la costa y en poco tiempo. Son olas pequeñas e inestables, rompen de forma precipitada, mezclan distintas direcciones, incómodas de surfear generalmente, pero en zonas de poco mar de fondo, como el mediterráneo, sí son muy buenas para surfear.

#### OLAS SWELL (OLAS DE MAR DE FONDO)

Son olas de buena calidad y tamaño y no les afecta el viento. Se producen a miles de kilómetros de distancia del lugar en el que rompen. Tienen mucha más fuerza que las olas de viento al llegar a la costa y al producirse a gran distancia de la costa es sencillo prever cuando van a llegar a la playa.



Figura 32: tipos de olas según su formación.

### 3.2.4 SEGÚN EL TIPO DE FONDO MARINO

#### OLAS CON FONDO DE ARENA

La ola rompe sobre un fondo de arena y son menos peligrosas que el resto de los fondos. Son olas inestables, varían según las mareas y las corrientes.

### OLAS CON FONDO DE ROCA

La ola rompe sobre un fondo de piedra o roca. Son fondos muy estables, apenas se producen variaciones. Son olas muy constantes con picos similares, son fondos peligrosos, solo para surfistas expertos.

### OLAS DE FONDO DE CORAL

La ola rompe sobre un fondo de arrecifes de coral, tienen las mismas condiciones que las de fondo de roca. El coral es un organismo vivo, con escaso crecimiento, manteniendo la estabilidad y se producen en agua más oxigenadas. El fondo es más fácil de observar.



Figura 33: tipos de olas según tipo de fondo marino.

### 3.3.0 PARTES DE UNA OLA

Para comprender como se forma y comporta una ola debemos establecer ciertos conceptos importantes que se utilizarán más adelante que nos ayuden a entender que parámetros se utilizan para establecer la idea de cómo utilizar este recurso para la generación eléctrica. Alguno de los más principales se observa en la figura 35.

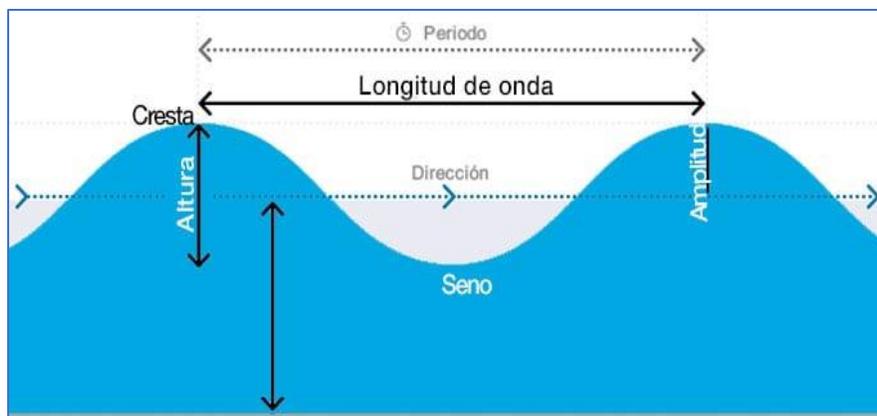


Figura 34: partes de una ola.

**Longitud de Onda:** Distancia entre dos crestas sucesivas.

**Cresta:** Punto más alto de la ola.

**Seno o Valle:** Punto más bajo de la ola

**Altura:** Distancia entre cresta y seno consecutivos con un paso por nivel medio entre ellos.

**Amplitud:** Distancia entre la cresta y el nivel medio de la superficie libre.

**Periodo:** Intervalo de tiempo entre el paso de dos crestas por un punto determinado. El período de olas se mide en segundos. Si ha viajado de una larga distancia, el intervalo será más largo y las olas llegarán en series muy agrupadas y con quedadas casi totales entre series.

**Nivel medio:** Línea teórica que deja igual superficie bajo las crestas que sobre los senos.

**Velocidad de propagación:** Es el cociente entre la longitud de onda y el periodo.

Como las olas son muy variables para analizarlas y describirlas se usan métodos estadísticos. Así, para la altura, normalmente se refiere a la altura significativa, esto es el promedio de un tercio de las olas más altas observadas en una serie en un período de tiempo determinado.

Con respecto a la velocidad y altura de las olas en El Salvador, el MARN lleva registros y datos históricos en las costas. Más del 90% de olas que arriban a nuestra costa son generadas por las tormentas extra-tropicales del hemisferio sur, localizadas frente a la costa de la Antártida, a más de 7,500 kilómetros de distancia de la costa de El Salvador. Con respecto al periodo está en un rango entre 13 y 19 segundos.

Sección	Planicie Costera Occidental	Cordillera del Bálsamo	Planicie Costera Central	Planicie Costera Oriental	Golfo de Fonseca
Oleaje					
Altura máxima (metros)	1.6	1.6	1.5	1.5	1.3
Rango de período (segundos)	13-19	13-19	13-19	13-19	13-19
Dirección promedio	Suroeste	Suroeste	Suroeste	Sur-suroeste	Sur-suroeste
Viento					
Rapidez máxima (kilómetro/hora)	36	28	20	20	24
Dirección promedio	Sur	Suroeste	Sur-suroeste	Suroeste	Suroeste

**Tabla 3:** datos estadísticos del oleaje y viento en El Salvador (Datos del MARN).

### 3.4.0 REPRESENTACIÓN DE UNA OLA

Las olas se pueden definir como ondas provocadas por la propagación de energía mecánica a lo largo de la superficie del agua. La forma más simple de representar una ola es por medio de ondas sinusoidales.

Las olas se caracterizan por su longitud de onda ( $L$ ), altura de onda ( $H$ ) y el periodo ( $T$ ) (figura 36). La frecuencia  $f$  de la ola se define como el número de oscilaciones pico a pico (o valle a valle) de la superficie de la ola por segundo, visto por un observador fijo, y es el inverso del periodo, Es decir,  $f = 1/T$ . La velocidad  $c$  de propagación de una ola viene dada por el cociente entre la longitud  $L$  y el periodo  $T$ , es decir,  $c = L/T$ .

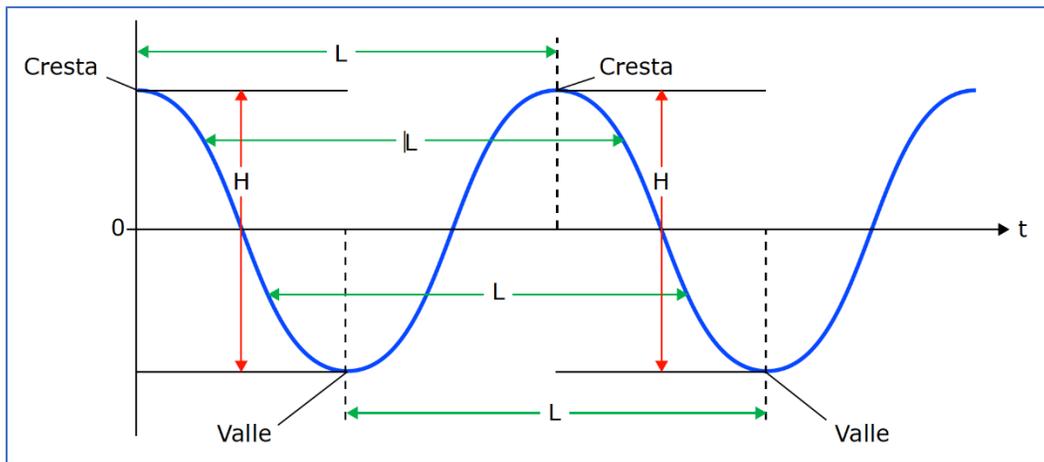


Figura 35: características de una onda sinusoidal en representación de las olas.

El tamaño de las olas generadas por un campo de viento depende de tres factores: La velocidad del viento; el tiempo durante el cual éste está soplando, y la distancia o alcance sobre la cual la energía del viento se transfiere al océano para formar las olas.

En realidad, el océano no se compone de ondas sinusoidales puras como se han representado en la figura 36, sino más bien son una superposición de muchas de ellas, cuya superficie puede ser reconstruida como suma de ondas de amplitud variable, llamada análisis espectral.

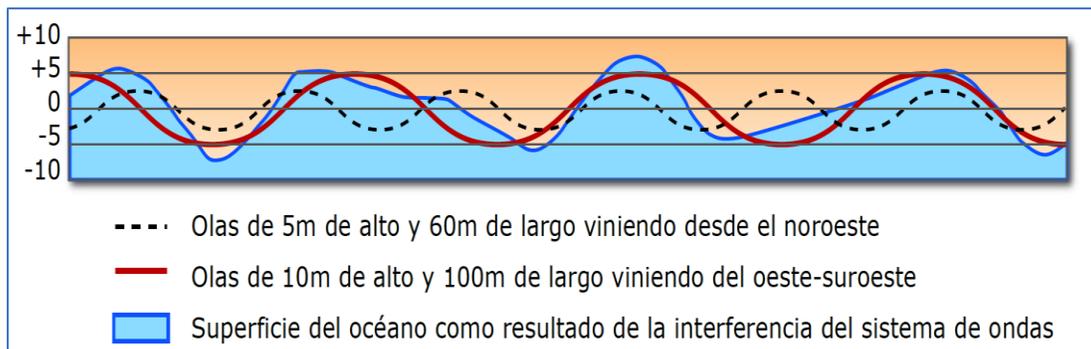


Figura 36: superposición de ondas.

Por tanto, un estado típico del mar se compone de una superposición de ondas, cada onda con características propias, es decir, su propia velocidad, periodo, altura de onda, y dirección (figura 37). Es la combinación de estas ondas lo que se observa cuando se mira la superficie del mar. La envolvente de estas olas viaja a una velocidad distinta de la de las ondas individuales, y se la denomina velocidad de grupo.

### 3.5.0 MODELOS MATEMÁTICOS DE LAS OLAS

#### 3.5.1 TEORÍA LINEAL DE LAS OLAS: MODELO DE AIRY

“La teoría lineal, desarrollada por Airy (1845), es fácil de aplicar y dan una aproximación razonable a las características del oleaje, para ello, se hacen muchas aproximaciones en cada variable que componen la ola (Figura 38)” (Úveda & López, 2014).

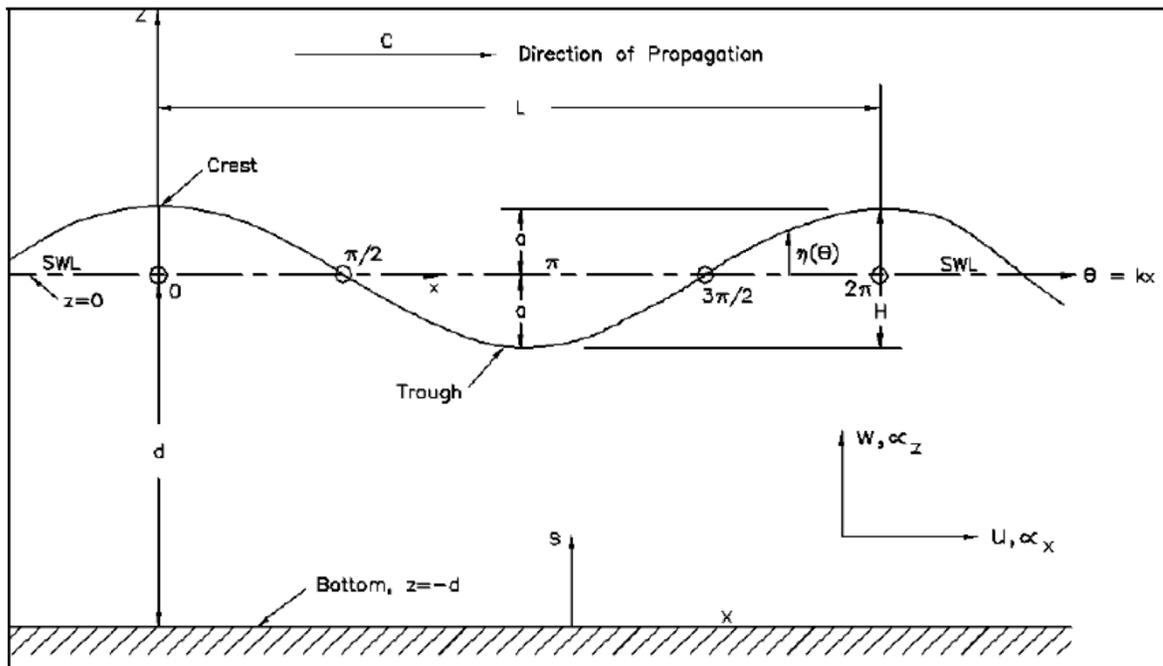


Figura 37: onda lineal de Airy.

Para cumplir dichas aproximaciones, es necesario tener un límite o condiciones para poder aplicarlas cuando se van desarrollando durante la observación. Estas aproximaciones, que desarrollan la teoría lineal, son (López & López, 2014):

1. El medio es homogéneo e incomprensible.
2. La densidad es constante.
3. La tensión Superficial y efecto de Coriolis aproximadamente nula.
4. La presión sobre la superficie es constante y uniforme.

5. El fluido en el medio es Ideal.
6. Las partículas en la ola no interactúan con otras al movimiento de ésta.
7. El fondo del mar es horizontal, incomprensible, limite impermeable.
8. La amplitud de la ola es pequeña y la forma de la ola no varía tanto en espacio ni en tiempo.
9. La ola se desplaza en dos dimensiones.

## VELOCIDAD DE LAS OLAS

“La velocidad en la cual las olas se propagan es llamada velocidad de fase o rapidez de la ola (C); está relacionada a través de su Longitud de Onda (L) y su Periodo (T)” (Gonzáles, 2018):

$$C = \frac{L}{T} \quad (Ec. 1)$$

Una expresión en la cual relacione la rapidez, con la longitud y la profundidad está dada por:

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \quad (Ec. 2)$$

Donde “d” es la profundidad en el punto donde se desplaza la ola (ver figura 38). Y “g” es la gravedad.

Esta ecuación (2) es llamada *Relación de Dispersión*. Para una situación donde se tenga más de una ola presente, la ola con el periodo más grande viajará más rápido. Así la ecuación 2 se modifica para estar en función del periodo:

$$C = \sqrt{\frac{g \cdot T}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi \cdot d}{L}\right)} \quad (Ec. 3)$$

El valor de  $2\pi/L$  es también llamado el número de onda (k) y  $2\pi/T$  es la frecuencia angular de la ola ( $\omega$ ). De la ecuación anterior se observa que cuanto mayor es el periodo de una ola más rápido viaja. El concepto de dispersión implica que las olas se separan en su propagación hacia la costa, ordenándose por periodos. Comúnmente, dentro de un mismo tren de ondas, las olas de mayor período suelen tener también mayor altura.

Para tener una expresión de la Longitud de ola en función de la profundidad y el periodo puede ser obtenido sustituyendo la ec.1 en la ec3 a través de C:

$$L = \frac{g \cdot T^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi \cdot d}{L}\right) = \frac{g \cdot T}{\omega} \sqrt{\tanh(k \cdot d)} \quad (Ec. 4)$$

## VELOCIDAD DE LAS OLAS EN AGUAS PROFUNDAS

Las olas en aguas profundas pueden ser consideradas como olas gravitacionales. Las siguientes clasificaciones son hechas de acuerdo a la magnitud de  $d/L$  y los valores resultantes son tomados por la función  $\tanh(2\pi d/L)$ . Es de tener en cuenta que el argumento de la tangente hiperbólica es igual a  $k_d = (2\pi d/L)$ . Si el valor de  $k_d$  es mucho mayor, la  $\tanh(k_d) = 1$ ; y si es pequeño su valor  $\tanh(k_d) = k_d$ .

Las olas del agua son clasificadas en la tabla 3, basado en el criterio de la profundidad relativa  $d/L$ .

CLASIFICACIÓN	$d/L$	$k_d$	$\tanh(k_d)$
Aguas profundas	$1/2$ a $\infty$	$\pi$ a $\infty$	$\cong 1$
Aguas transicionales	$1/20$ a $1/2$	$\pi/10$ a $\pi$	$\tanh(k_d)$
Aguas poco profundas	$0$ a $1/20$	$0$ a $10$	$\cong k_d$

**Tabla 4:** clasificación de las olas en diferentes profundidades (Water Wave Mechanic).

En aguas profundas,  $\tanh(k_d)$  es aproximadamente a 1, por lo tanto, la ecuación 2 y 3 se reducen a:

$$Co = \sqrt{\frac{g \cdot Lo}{2\pi}} \quad (Ec. 5)$$

$$Co = \sqrt{\frac{g \cdot T}{2\pi}} \quad (Ec. 6)$$

Dónde  $Co$  es la velocidad de la ola generada en aguas profundas y  $Lo$  Longitud de onda en aguas profundas.

Aunque en aguas profundas ocurre que, a una infinita profundidad, la  $\tanh(k_d)$ , llega a tener un valor mucho menor que  $d/L$ . Cuando la profundidad relativa  $d/L$  es mayor que 0.5, las características de la ola son independientes de la profundidad. En condiciones de aguas profundas, son indicadas por  $Lo$  y  $Co$  en excepción del periodo, que se mantiene constante e independiente de la profundidad. Cuando la profundidad relativa llega a aguas poco profundas ( $2\pi d/L < 1/4$  o  $d/L < 1/25$ ), la ecuación 2 puede ser simplificada a:

$$C = \sqrt{g \cdot d} \quad (Ec. 7)$$

Cuando una ola se desplace en aguas poco profundas, la rapidez de la ola solo dependerá de la profundidad.

## VELOCIDAD DE OLAS SUCESIVAS

En los análisis del modelo de Airy el concepto de velocidad de grupo ( $C_g$ ) puede ser descrito por la interacción de dos trenes de olas sinusoidales moviéndose en la misma dirección con poca diferencia de longitud de onda y periodo. La ecuación del tren de olas sobre la superficie del agua está dada por:

$$\eta_T = \eta_1 + \eta_2 = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi \cdot x}{L_1} - \frac{2\pi \cdot t}{T_1}\right) + \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi \cdot x}{L_2} - \frac{2\pi \cdot t}{T_2}\right) \quad (Ec. 8)$$

Dónde:  $\eta_T$  es la componente resultante del tren de ola.

$\eta_1$  y  $\eta_2$  son las componentes de cada ola.

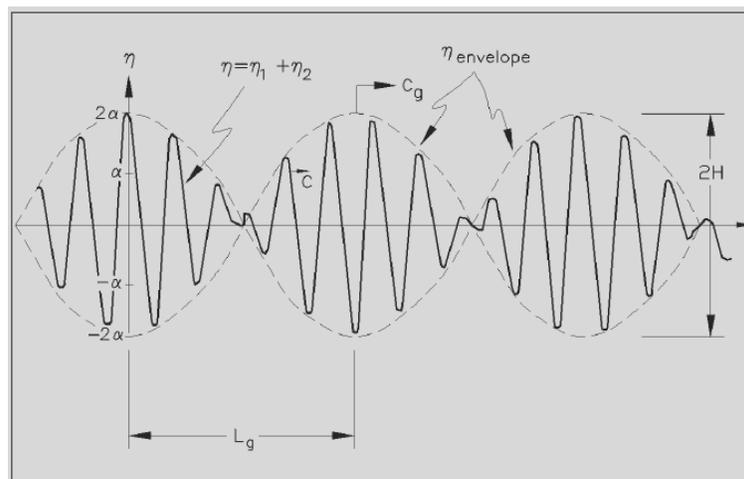
$H/2$  es la mitad de la altura de la ola.

$L_1$  y  $L_2$  son la longitud de onda de cada ola.

$T_1$  y  $T_2$  son el periodo de cada ola.

La altura de ambas olas se asume que son iguales. Desde que las longitudes de las olas de las dos componentes,  $L_1$  y  $L_2$ , son levemente diferentes para unos valores de “ $x$ ” en un tiempo dado, las dos componentes estarán en fase y la altura de la ola observada será de “ $2H$ ”; para algún otro valor de “ $x$ ”, las olas estarán completamente fuera de fase y la altura resultante será cero. El perfil de superficie hecho de la suma de las dos olas sinusoidales está dado en la ecuación 8 y se muestra en la figura 39. Cada tren de ola puede ser simplificada por el teorema de superposición y es permisible cuando se utiliza la teoría lineal de las olas. Las olas mostradas en la figura 39 parecen estar viajando en grupos descritos por la ecuación de la curva envolvente:

$$\eta_{env} = \pm 2 \cdot H \cos\left[\pi \left(\frac{L_2 - L_1}{L_2 \cdot L_1}\right)x - \pi \left(\frac{T_2 - T_1}{T_2 \cdot T_1}\right)t\right] \quad (Ec. 9)$$



**Figura 38:** representación de un grupo de olas sucesivas con forma de ondas sinusoidales con diferentes periodos (Modelo de Airy 1845.)

La ecuación 9 es la velocidad de dos olas sucesivas. El límite de velocidad del grupo de ola llega a ser grande debido a que la longitud de ola  $L1$  se aproxima a  $L2$  y, por ende, el periodo de la ola  $T1$  se aproxima a  $T2$ . Por lo tanto, a través de la ecuación 1, la velocidad de un grupo de olas puede ser escrita de la siguiente manera:

$$C_g = \frac{L}{2 \cdot T} \left[ 1 + \frac{\frac{4\pi \cdot d}{L}}{\sinh\left(\frac{4\pi \cdot d}{L}\right)} \right] = n \cdot C \quad (Ec. 10)$$

$$n = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{\frac{4\pi \cdot d}{L}}{\sinh\left(\frac{4\pi \cdot d}{L}\right)} \right] \quad (Ec. 11)$$

En aguas profundas el cociente dentro del corchete es aproximadamente cero por lo que  $n=1/2$ , por lo que la ecuación 11 pasa a ser:

$$C_{go} = \frac{1}{2} \cdot \frac{L_o}{T} = \frac{1}{2} C_o \quad (Ec. 12)$$

En aguas poco profundas el seno hiperbólico pasa a ser aproximadamente  $4\pi d/L$ , entonces:

$$C_{go} = \frac{L}{T} = C \cong \sqrt{g \cdot d} \quad (Ec. 13)$$

La velocidad de grupo y de fase son iguales en aguas poco profundas, esto es debido a que la rapidez de la ola es determinada por la profundidad, todas las componentes de las olas en un tren de ola se desplazarán a la misma velocidad impidiendo el refuerzo alterno y la cancelación de componentes. En aguas profundas y transicionales, la rapidez de ola depende de la longitud de la misma; aun así, olas ligeramente más largas viajan ligeramente más rápido y producen pequeñas diferencias de fase en un grupo de olas.

## POTENCIA Y ENERGÍA DE UNA OLA

La velocidad de grupo de olas sucesivas (o tren de olas) es importante debido a que a la velocidad con la que se desplaza se puede estimar la energía de la ola. La energía total de un oleaje es la suma de su energía cinética y su energía potencial. La energía cinética de la ola es la energía total asociada a la velocidad de ola en movimiento, por lo tanto, la energía cinética en coordenadas rectangulares por unidad de longitud, viene dada por:

$$E_K = \int_x^{x+L} \int_{-d}^{\eta} \rho \cdot \left( \frac{u^2 + w^2}{2} \right) \quad (Ec. 14)$$

Resolviendo la integral tenemos:

$$E_K = \frac{1}{16} \cdot \rho \cdot g \cdot H^2 \cdot L \quad (\text{Ec. 15}) \text{ [Energía cinética de la ola]}$$

Dónde:  $\rho$  es la densidad del agua del mar.

$G$  es la gravedad de La Tierra.

$H$  es la altura de la ola.

$L$  es Longitud de onda.

La energía potencial de la ola se percibe mayormente en la cresta. Su energía por unidad de longitud, para una onda lineal está dada por:

$$E_P = \int_x^{x+L} \rho \cdot g \left( \frac{(\eta + d)^2}{2} - \frac{d^2}{2} \right) \quad (\text{Ec. 16})$$

Integrado la ecuación 17, tenemos como resultado:

$$E_P = \frac{1}{16} \cdot \rho \cdot g \cdot H^2 \cdot L \quad (\text{Ec. 17}) \text{ [Energía potencias de la ola]}$$

Según la teoría lineal de Airy, si la energía potencial es determinada al nivel del mar, y todas las olas siguen la misma dirección, las componentes de la energía potencial y cinética son iguales, y la energía total de la ola viene resultando:

$$E = E_K + E_P \quad (\text{Ec. 18})$$

$$E = \frac{1}{16} \rho g H^2 L + \frac{1}{16} \rho g H^2 L = \frac{1}{8} \rho g H^2 L. \quad (\text{Ec. 19})$$

El promedio de la energía del oleaje por unidad de longitud, es conocida como Energía Específica o Densidad de Energía:

$$\bar{E} = \frac{E}{L} = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (\text{Ec. 20}) \text{ [Densidad de energía de la ola]}$$

El Flujo de Energía del oleaje, es conocido como la velocidad en el cual la energía se transmite en la dirección de propagación de la ola a través de un plano vertical perpendicular a la dirección propagación de la ola que se extiende hacia abajo en la profundidad, el cual viene dado por:

$$P = \frac{1}{T} \int_t^{t+C} \int_{-d}^{\eta} \rho \cdot u \, dz dt \quad (\text{Ec. 21})$$

Donde  $u$  es la componente horizontal de la velocidad de la ola. Integrando la ecuación anterior se obtiene:

$$\bar{P} = \bar{E} \cdot n \cdot C = \bar{E} \cdot C_g \quad (\text{Ec. 22})$$

Donde  $\bar{P}$  es la potencia del oleaje promedio, la variable “n” está definida en la ecuación 11. De esta forma se puede hacer una aproximación de la potencia tanto para aguas profundas y poco profundas como sigue:

$$\bar{P}_o = \frac{1}{2} \bar{E}_o \cdot C_o \quad (\text{Ec. 23}) \quad [\text{Aguas profundas}]$$

$$\bar{P} = E \cdot C \quad (\text{Ec. 24}) \quad [\text{Aguas poco profundas}]$$

En aguas profundas para una altura  $d > L/2$  se cumple que  $C_g = C/2$ . Para aguas poco profundas  $d < L/2$  se cumple que  $C_g = C$ .

### 3.5.2 TEORÍA NO LINEAL DE LAS OLAS: MODELO DE STOKES

En 1847 y en 1880 Stokes desarrolló una teoría para ondas de amplitud finita<sup>33</sup>, cuya primera aproximación coincide con los resultados obtenidos por Airy de la teoría lineal, en el cual el potencial de velocidades es función directa de la esbeltez de la onda ( $H/L$ ).

Las hipótesis en que se basa la teoría lineal son las siguientes:

1. El agua es homogénea.
2. El flujo es rotacional.
3. El fondo es fijo, impermeable y horizontal en un punto de estudio.
4. La presión a lo largo de la interfase agua-aire es constante.
5. La amplitud de la onda es pequeña comparada con la longitud y con la profundidad del agua.

El desarrollo de la teoría de Stokes tiene la misma línea que la teoría de Airy, pero aplicando las series de Taylor alrededor de la elevación media de la superficie libre para las condiciones de contorno. En función del primer término despreciado en dichas series de Taylor obtendremos consecuentemente las olas de Stokes de segundo orden, tercer orden, cuarto orden, quinto orden etc. Las ondas periódicas progresivas que poseen una forma permanente deben propagarse a celeridad  $C$  constante.

### ONDAS DE STOKES DE SEGUNDO ORDEN

Como vimos en la sección anterior, tras aplicar la teoría del potencial, establecimos un sistema de ecuaciones diferenciales con unas condiciones de contorno no lineales. Para resolverlo optamos por linealizar dichas ecuaciones despreciando los términos cuadráticos. Para estos casos, será preciso solucionar el sistema de ecuaciones con otro método, ya sea numérico o analítico

como el de los desarrollos en serie de potencias. Para determinar la elevación de las olas  $\eta$  en la teoría de Stokes de segundo orden se dispone de la siguiente ecuación:

$$\eta_{2nd} = \frac{H}{2} \cos(\theta) + \left( \frac{\pi \cdot H^2}{8L} \right) \left( \frac{\cosh(kh)}{\sinh(kh)^3} \right) [2 + \cosh(kh)] \cos 2(\theta) \quad (Ec. 25)$$

La celeridad y la longitud de onda en la teoría de Stokes 2nd coinciden con las de la teoría de Airy

$$c_{stokes} = c_{airy} = \frac{g \cdot T}{2\pi} \tanh(kh) \quad (Ec. 26)$$

$$L_{stokes} = L_{airy} = \frac{g \cdot T^2}{2\pi} \tanh(kh) \quad (Ec. 27)$$

La velocidad es

$$u_{stokeII} = \frac{\pi \cdot H}{T} \cdot \frac{\cosh[k(z+h)]}{\sinh(kh)} \cdot \cos(\theta) + \frac{3}{4} \left( \frac{\pi \cdot H}{L} \right)^2 \cdot c \cdot \frac{\cosh[2k(z+h)]}{\sinh(kh)^4} \cdot \cos(2\theta)$$

### 3.6.0 TÉCNICAS PARA LA CAPTACIÓN DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ

El calentamiento desigual de la atmósfera terrestre genera vientos, cuya energía es transferida a la superficie marina. En esta interacción se generan inestabilidades que dan origen a las olas en la superficie. Una de las propiedades de las olas es su capacidad de desplazarse a grandes distancias sin pérdida de energía. La energía generada en cualquier parte del océano acaba en las costas, concentrando grandes olas de acuerdo a la barimetría de cada lugar.

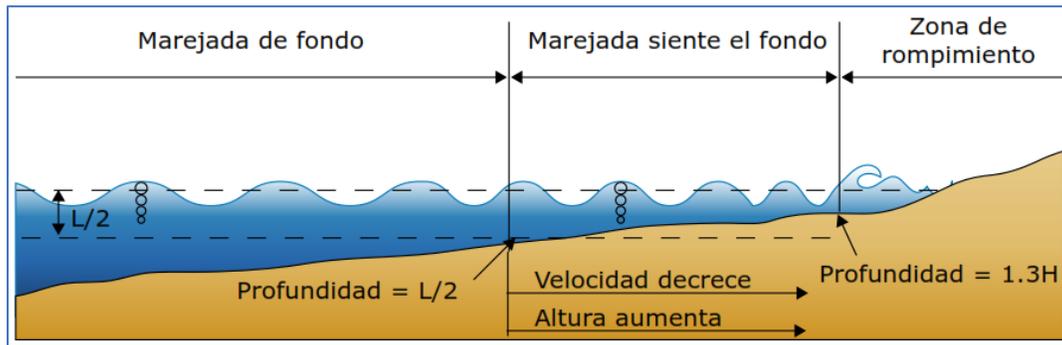


Figura 39: movimiento de las olas cuando se acercan a la costa.

La cantidad de energía asociada a una ola depende de varios factores como la velocidad y duración del viento, la profundidad de las aguas, el tipo de costa, el lugar de generación de las olas, entre otros.

Los diferentes métodos que convierten la energía undimotriz en energía eléctrica toman en cuenta 3 técnicas en las que actualmente están siendo estudiadas hasta el momento:

1. Empuje de la Ola.
2. La variación de la altura en la superficie de la ola.
3. La variación de la presión bajo la superficie de la ola.

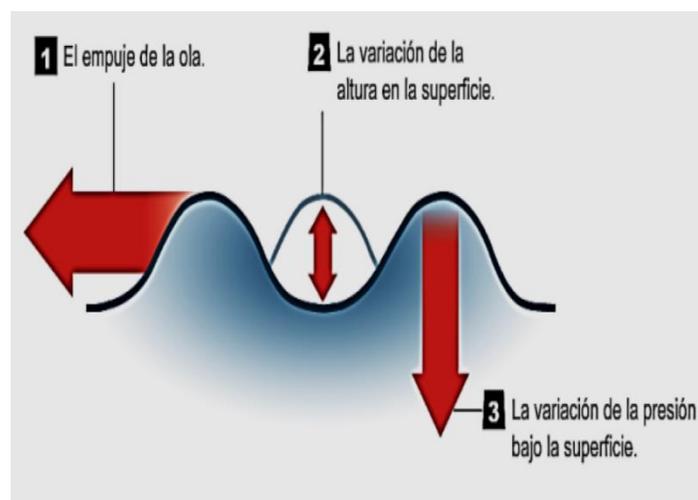


Figura 40: diferentes técnicas para la captación de energía Undimotriz.

### 3.6.1 EMPUJE DE LA OLA

En aguas poco profundas la velocidad horizontal de las olas no varía con la profundidad; la energía de las olas se puede absorber mediante un obstáculo que transmite la energía a un pistón como se observa en la siguiente figura (Días, 2000 - 2023).

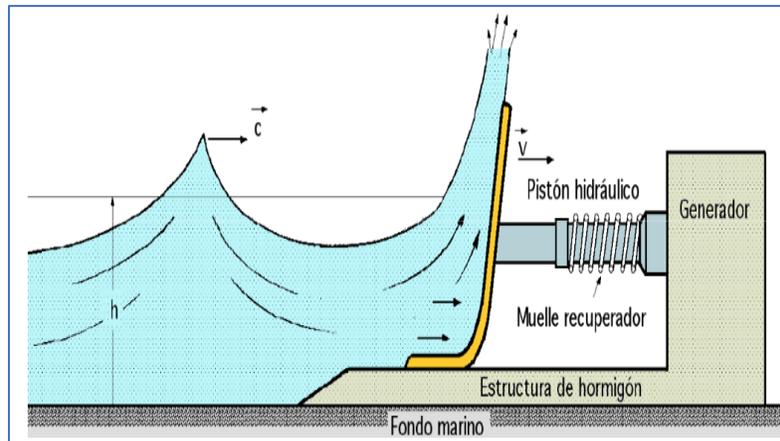


Figura 41: empuje de una ola.

### 3.6.2 VARIACIÓN DE LA ALTURA EN LA SUPERFICIE DE LA OLA

Situando estructuras flotantes que se mueven con las olas, sintonizadas de manera que puedan captar su energía. Se dispone de un gran número de dispositivos para capturar la energía, de forma similar a la de un receptor de ondas de radio, ya que se basan en que cualquier proceso que pueda generar olas también sirve para captar la energía que se pueda producir (Figura 43). Su pequeño tamaño resulta ventajoso y permite su fabricación en serie. La mayoría de estos aparatos utilizan el efecto de bombeo que proporciona un flotador. Sus inconvenientes derivan principalmente de la fiabilidad de los caudales y de la interconexión eléctrica (Días, 2000 - 2023).

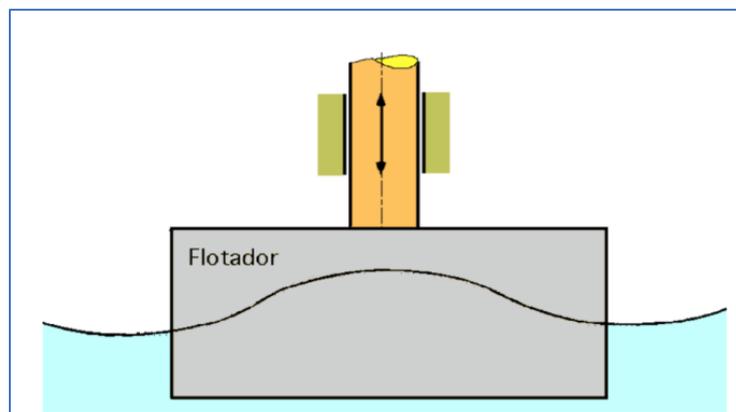


Figura 42: variación de la altura de ola.

### 3.6.3 VARIACIÓN DE LA PRESIÓN BAJO LA SUPERFICIE DE LA OLA

Son los sistemas de columna de agua oscilante y consisten en una cámara abierta al mar, que encierra un volumen de aire que se comprime y expande por la oscilación del agua inducida por el oleaje (figura 43); el aire circula a través de una turbina que puede ser bidireccional.

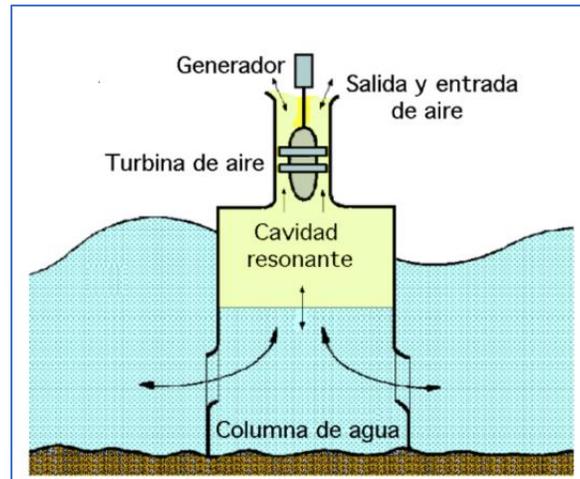


Figura 43: variación de la presión bajo la superficie de la ola.

#### OTRAS TÉCNICAS DE ESTUDIO.

**Los sistemas activos:** son aquellos en los que los elementos del dispositivo, al moverse a impulsos del oleaje, generan energía, aprovechando el movimiento relativo entre sus partes fijas y móviles.

**Los sistemas pasivos:** son aquellos en los que la estructura permanece inmóvil, generándose energía directamente, a partir, del propio movimiento de las partículas del agua.

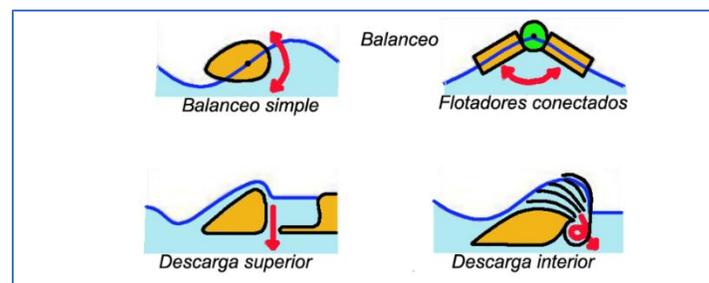


Figura 44: otras técnicas para la captación de energía de las olas.

Estas técnicas son la base, para las diferentes tecnologías o sistemas de captación de energía eléctrica que se ampliará en el siguiente capítulo, solo se tiene que tomar como referencia que los diferentes sistemas van enfocados a estas tres técnicas mencionadas anteriormente.

### 3.7.0 CLASIFICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE CAPTACIÓN

Aunque se dispone de diversas tecnologías para extraer energía de las olas, la mayoría se encuentran todavía en una etapa de desarrollo. Actualmente, las potencias instaladas en este tipo de centrales son del orden de 100-2000 kW por módulo, mientras que se espera llegar a construir centrales de hasta 40 MW, como afirma la compañía escocesa Lewis Wave Power Ltd. El Reino Unido es uno de los países con mayor potencial de esta energía en sus costas. Las inversiones combinadas de instituciones públicas y privadas lo colocan a la cabeza del desarrollo y la investigación de esta energía marina, la cual se espera que ocupe un lugar importante en la red eléctrica del país.

El EMEC (European Marine Energy Centre), situado en Escocia, es un centro vanguardista en el desarrollo de la energía undimotriz y mareomotriz. En este lugar se llevan a cabo prototipos de los dispositivos de captación en tanques artificiales, simulando condiciones de oleaje. Este centro ofrece recoger información y estudiar el comportamiento de los dispositivos para demostrar su viabilidad comercial. Muchos de los logros del sector han sido posibles gracias a este centro.

La clasificación de los dispositivos de captación de energía undimotriz se puede realizar teniendo en cuenta, entre otros, los siguientes factores (Amer, 2015):

- La posición respecto a la costa.
- La posición relativa respecto al frente de ola.
- La posición en el agua.
- El principio de funcionamiento.

#### 3.7.1 CLASIFICACIÓN SEGÚN SU POSICIÓN RESPECTO A LA COSTA [C]

La primera clasificación que se realiza depende del lugar donde se sitúen los sistemas de captación de energía eléctrica. De esta forma surgen tres tipos de emplazamientos:

- **Instalaciones en la costa (Onshore).** Están situadas en tierra. Su instalación y mantenimiento son los más sencillos debido a su relativamente fácil accesibilidad. Estas instalaciones tienen la dificultad para encontrar zonas adecuadas para la funcionalidad del sistema; también, el reducido potencial de las olas en la costa. Esto provoca limitantes en cuanto a la generación de grandes potencias.
- **Instalaciones cerca de la costa (Nearshore).** Llevadas a cabo a una distancia de la costa hasta los 500 metros aproximadamente, donde las profundidades están entre los 10 y los 40 metros. En estas zonas hay mayor exposición al oleaje, por lo que se aprovecha más el potencial de la ola. Generalmente en estas zonas se colocan dispositivos flotadores o de estructuras fijas ancladas al lecho marino

- **Instalaciones en alta mar (Offshore).** Están distanciados más de 500 metros de la costa. Son las que disponen de un mayor potencial energético. En cambio, las labores de construcción y mantenimiento, junto con el cableado submarino hacen que su operación sea más complicada. En estos lugares se instalan dispositivos de tipo flotante, sumergidos o no en el agua.

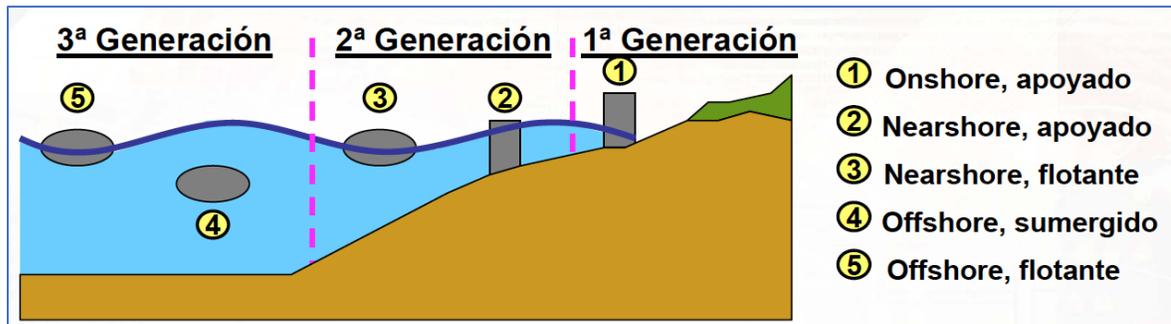


Figura 45: clasificación de las olas respecto a la costa.

### 3.7.2 CLASIFICACIÓN SEGÚN LA POSICIÓN RELATIVA RESPECTO AL FRENTE DE OLA [O]

La orientación de los dispositivos respecto de las olas se puede expresar de dos maneras. La primera atendiendo a la dirección de propagación de las olas en las que son perpendiculares a la costa y la segunda atendiendo al frente de ola en la que suele ser paralelo a la costa.

Los diferentes dispositivos gracias a su principio de funcionamiento, pueden aprovechar la energía de las olas según sea conveniente. Según la posición relativa de los dispositivos de captación respecto al frente de ola, estos pueden clasificarse en:

- **Terminadores.** Son los dispositivos cuya orientación es paralela al frente de ola, por tanto, tienen forma alargada. Esta configuración es capaz de interceptar la mayor energía disponible en la ola. Experimentan fuerzas considerables, por lo que necesitan de amarres fuertes al lecho marino.
- **Atenuadores.** Son alargados como los terminadores, pero con la diferencia de que estos dispositivos se colocan perpendicularmente al frente de ola y captan la ola de manera progresiva. Al soportar menores esfuerzos, el sistema de amarre puede ser menos resistente.
- **Absorbedores puntuales.** Son estructuras más pequeñas que las anteriores, generalmente con forma cilíndrica. Aunque son capaces de capturar energía igualmente de todas direcciones, son incapaces de capturar energía de olas muy largas debido a su reducido tamaño. Generalmente se colocan varios dispositivos en serie.

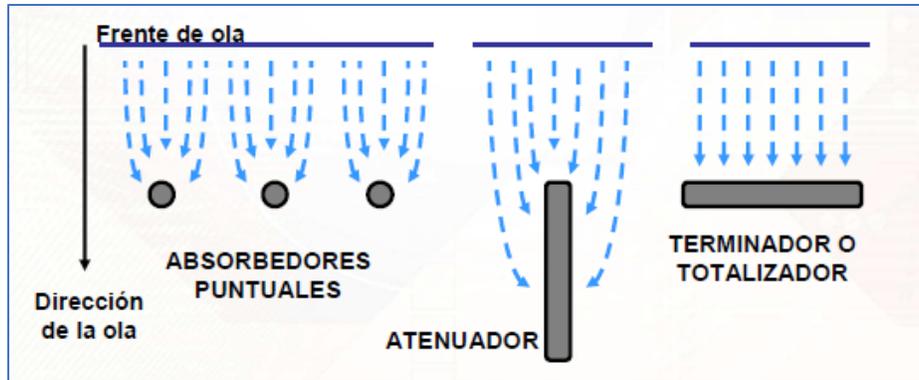


Figura 46: clasificación de sistemas de captación según su orientación.

### 3.7.3 CLASIFICACIÓN RESPECTO A LA POSICIÓN EN EL AGUA [A]

Los diferentes sistemas de captación pueden estar:

- Fijos: Estos se encuentran anclados al lecho marino o a tierra en el borde del mar. La estructura de estos no experimenta movimiento alguno debido al oleaje. Se aprovecha la oscilación del oleaje que produce cambios de presión en el aire situado sobre el agua. Esto hace que se expanda y comprima, aprovechándose en el movimiento de una turbina.
- Flotantes: Estos, aunque están amarrados al lecho marino, oscilan con el movimiento de las olas.
- Parcialmente Sumergidos: Los dispositivos semisumergidos aprovechan tanto la variación de presión como el movimiento del oleaje.
- Completamente Sumergidos: Estos únicamente aprovechan la variación de presión.

### 3.7.4 CLASIFICACIÓN SEGÚN EL PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO [F]

Los dispositivos para aprovechar la energía almacenada en las olas deben captar la energía cinética y/o potencial de la misma y convertirla eficientemente en otra de energía útil, generalmente energía eléctrica. En este apartado se clasifican los dispositivos de aprovechamiento de energía undimotriz según el principio de funcionamiento que siguen en la extracción de energía a partir del oleaje marino.

- **Columna de Agua Oscilante (Oscillating Water Column) OWC.**

Utilizan el movimiento oscilatorio de las olas para generar energía eléctrica. Su funcionamiento se basa en una cámara de metal o cemento que posee dos aperturas, una inferior por la que transita el agua marina y otra superior por la que circula aire atmosférico. Dentro de dicha cámara conviven el agua del mar y el aire atmosférico, de tal modo que en el momento que una ola llega al dispositivo, aumenta la cantidad de agua existente en la cámara produciéndose un ascenso de la superficie libre de líquido.

Este ascenso provoca que el aire atmosférico contenido en la cámara posea menos espacio aumentando de este modo su presión, surgiendo un gradiente entre la presión del aire que se encuentra dentro de la cámara y el aire atmosférico, ambos conectados mediante la apertura superior. Este gradiente de presión provoca un movimiento del aire de la cámara hacia el exterior a través de dicha apertura pudiéndose aprovechar esta corriente de aire a través de una turbina a fin de extraer energía eléctrica.

Son muchas las modalidades de OWCs que permiten obtener energía del oleaje, aunque no está todavía claro cuáles son las opciones más favorables, realizándose el aprovechamiento de la energía de las olas en base a algunas de las siguientes metodologías:

**Conversión primaria:** Consiste en la extracción de la energía de las olas mediante sistemas mecánicos o neumáticos, convirtiendo el movimiento de las olas (oleaje), en el movimiento de un cuerpo o en un flujo de aire. La energía del oleaje se puede aprovechar para mover flotadores en sentido vertical y en rotación.

**Conversión secundaria:** Consiste en la conversión de movimientos mecánicos o neumáticos en energía utilizable, generalmente electricidad. Los medios utilizados para ello son turbinas neumáticas e hidráulicas, dispositivos de transmisión mecánica, y de inducción magnética; a veces, el sistema se diseña exclusivamente para la desalinización del agua.

Cabe destacar que podemos clasificar los dispositivos de columna de agua oscilante en dos grandes grupos, dependiendo de su posición en el mar:

**Dispositivos OWC fijos:** Este tipo de dispositivos son estructuras fuertemente fijadas, ya sea a la línea de costa o al suelo marino, son dispositivos que funcionan a modo de escolleras recibiendo el impacto de las olas, lo que les permite efectuar el aprovechamiento de la energía del oleaje siguiendo el modo de funcionamiento descrito anteriormente.



**Figura 47:** OWC fijo.

**Dispositivos OWC flotantes:** Este tipo de dispositivos aprovechan el movimiento oscilatorio que el oleaje cede a la boya con el fin de generar un movimiento relativo entre dicho dispositivo y la superficie libre de líquido, pudiendo realizarse de este modo un aprovechamiento de la energía de las olas utilizando el principio de funcionamiento de la columna de agua oscilante.

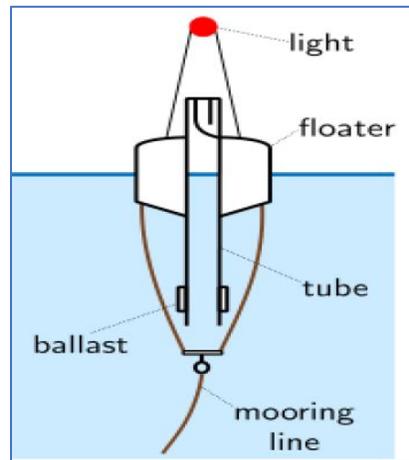


Figura 48: OWC flotante.

Estos dispositivos son los más estudiados y utilizados, hay muchas más clasificaciones de los OWC con tecnologías bastante interesantes, pero en este trabajo dejaremos como principales estos dos.

- **Dispositivos de desbordamiento.**

Son llamados también “Overtopping devices” en inglés, este tipo de dispositivos consisten en pequeños embalses o depósitos abiertos que se encuentran unos metros sobre el nivel del mar. Cuando una ola impacta sobre el dispositivo, parte del agua supera una altura determinada quedando almacenada en el pequeño embalse. Llegado el momento, esta agua almacenada se deja caer a través de una compuerta hacia una turbina hidráulica de bajo salto generando de este modo energía eléctrica. El agua se devuelve al mar tras pasar por la turbina.

En este caso el principio de funcionamiento seguido es el de almacenar una cierta cantidad de agua por encima de la superficie libre de líquido del agua del mar colindante con el dispositivo, dicho almacenamiento es posible debido a la altura que adquiere el agua por el oleaje.

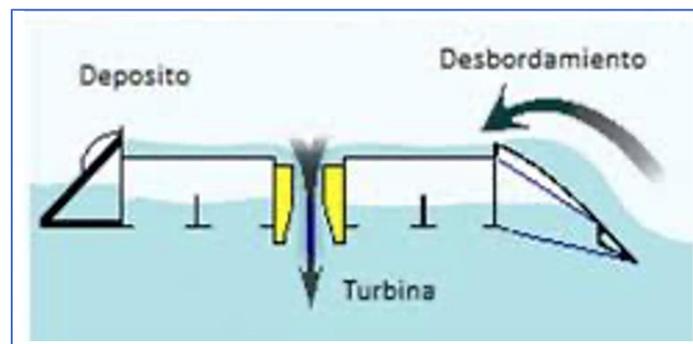


Figura 49: funcionamiento del dispositivo de desbordamiento.

- **Dispositivos oscilantes.**

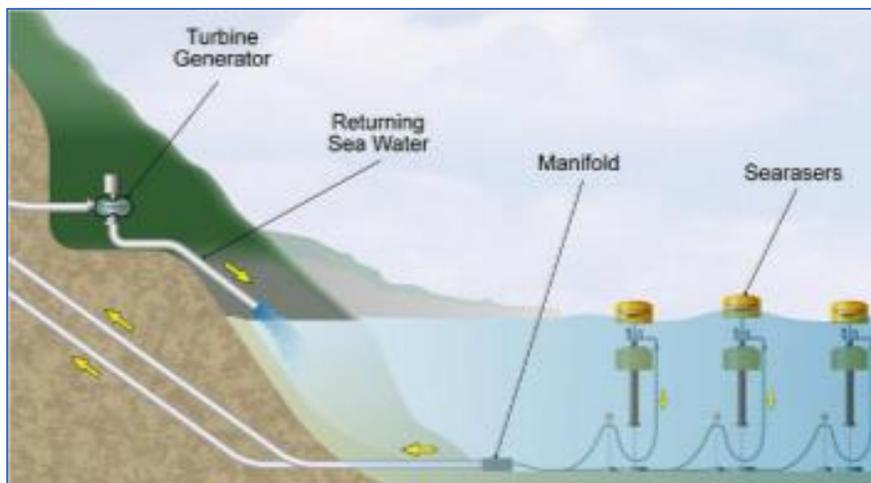
El funcionamiento de estos es a través de boyas que flotan libremente. El movimiento que experimentan debido al oleaje es transformado mediante sistemas hidráulicos o mecánicos en movimiento lineal o rotativo, el cual puede ser aprovechado de diversas formas para obtener energía. Dentro de estos dispositivos se puede hacer una división en dos: dispositivos flotantes (absorbedores puntuales o con articulaciones) y dispositivos instalados en el lecho marino (aprovechan el movimiento lineal).

La descripción que se ha dado es muy amplia y engloba a una gran cantidad de dispositivos, por lo cual es conveniente clasificarlos en diferentes grupos según el modo que tienen de aprovechar el movimiento oscilatorio que reciben del oleaje. La clasificación es la que se muestra a continuación:

**Boyas oscilantes de cuerpo simple.**

Este tipo de dispositivos de aprovechamiento de energía undimotriz utilizan el movimiento relativo entre la boya, que es excitada por el oleaje, y el fondo marino o una estructura fija con la que se encuentran unidos. Cabe destacar que este tipo de dispositivos constituyen el grupo más simple de dispositivos oscilantes y que en la mayoría de los casos son clasificados como extractores puntuales debido a sus relativamente bajas dimensiones horizontales.

Este tipo de dispositivos poseen una gran desventaja, ya que el hecho de tener la necesidad de unirlos al fondo marino o a una estructura fija conlleva gastos tanto de instalación como de mantenimiento importantes. Ya que, a causa de las duras condiciones marinas, así como que este tipo de dispositivos suelen ser lejanos a la costa; provoca que se deban construir cimentaciones y un dispositivo de unión entre el fondo marino y la boya en profundidades mayores a 40 metros, lo cual conlleva unos gastos y una reducción de la vida útil de gran entidad.



**Figura 50:** boyas oscilantes fijas de cuerpo simple.

## Boyas oscilantes de cuerpo doble.

Este grupo de dispositivos engloba a todos aquellos que poseen dos partes móviles diferenciadas entre las cuales existe movimiento relativo al ser excitadas por el oleaje. Es decir, se realiza un diseño para el dispositivo de aprovechamiento de energía undimotriz que al ser golpeado por una ola genere un movimiento relativo entre dos de las partes que lo componen.

La mayor ventaja de este tipo de dispositivos es que ya no es necesario unirlos a una estructura fija o al fondo marino para provocar un movimiento relativo aprovechable en la generación de energía eléctrica, lo cual conlleva un ahorro en los costes de instalación y mantenimiento interesante. Este tipo aún está en estudio.



Figura 51: boyas fijas de cuerpo doble.

- **Efecto Arquímedes.**

Basado en el movimiento relativo entre dos cuerpos debido al empuje vertical causado por el volumen de fluido desalojado. Se encuentran completamente sumergidos y utilizan la diferencia de presión existente entre las crestas y los valles de las olas con el fin de generar energía eléctrica. Su funcionamiento consta de un cilindro lleno de aire y un pistón introducido verticalmente en dicho cilindro de tal modo que cuando la cresta de una ola pasa por encima del dispositivo se produce un aumento de la presión sobre este provocando la bajada del pistón y la consiguiente compresión del aire introducido en el cilindro.

Sin embargo, cuando la cresta de la ola ya ha pasado por encima del dispositivo, se produce en este caso una disminución de presión sobre él, ascendiendo de este modo el pistón. Este es el ciclo se repite durante la vida útil del dispositivo utilizándose el fluido presurizado en la generación de energía eléctrica.

La gran ventaja de este tipo de dispositivos es que al estar sumergidos no soportan condiciones tan duras como los dispositivos flotantes que están sometidos a unas fuerzas mucho mayores, debidas al oleaje. Sin embargo, esto trae consigo una desventaja y es la extracción de energía eléctrica por lo general será menor.

### 3.8.0 CENTRALES DE GENERACIÓN UNDIMOTRÍZ EN OPERACIÓN.

#### CONVERTIDOR COLUMNA DE AGUA OSCILANTE (OWC)

La planta de Mutriku fue inaugurada en 2011 tras finalizar los trabajos de construcción del dique de protección del puerto de esta localidad costera, al que se añadió la central de aprovechamiento energético renovable. La central eléctrica cuenta con tecnología denominada OWC (Columna de Agua Oscilante) con una potencia total instalada de 296 kW y con turbinas fabricadas ad-hoc en Tolosa, España. Se trata de la primera instalación marina comercial conectada a la red en funcionamiento en Europa.



Figura 52: central eléctrica convertidor columna de agua oscilante Mutriku.

<b>País de Origen</b>	<b>España</b>
Potencia Total	296 kW
Profundidad Mín/Max	25 m / desconoce
Locación	Dispositivo sobre la costa (Shoreline)
Número de Dispositivos Instalados	16 Turbinas
Sistema de Captación	Presión Neumática
Proyectos en la Actualidad	Mutriku, España

Tabla 5: características de la central eléctrica Mutriku.

Cuando las olas llegan, el agua entra en la cámara de captación y comprime el aire del interior, que sale a presión por el orificio superior. A su paso impulsa la turbina que, a su vez, hace girar el generador eléctrico y así obtener energía eléctrica. Cuando la ola se retira succiona aire a

través del mismo orificio y vuelve a impulsar la turbina generando nuevamente energía eléctrica. La energía producida en esta instalación se inyecta en su totalidad en la red de distribución eléctrica para su consumo por parte de todos los usuarios. Se calcula que la planta, ya en producción automática, es capaz de abastecer las necesidades eléctricas domésticas de aproximadamente 100 viviendas.

La planta de energía marina o planta undimotriz de Mutriku es la única instalación comercial (no es un prototipo) en el mundo que funciona inyectando energía eléctrica generada por las olas a la red de manera regular (Flores, 2018).

#### ECO WAVE POWER ISRAEL



<b>País de Origen</b>	<b>Australia</b>
Potencia de salida	CETO 5– 240 kW, CETO 6 – 1MW
Profundidad	20 metros
Locación	Cerca la costa y (nearshore)
Sistema Captación	Absorbedor puntual con un sistema de bombas hidráulicas
Proyectos en la Actualidad	CETO 6 en el Océano indico en las costa de Australia

### **3.9.0 INVESTIGACIÓN SOBRE EL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL OLEAJE EN LAS COSTAS DE EL SALVADOR.**

La escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador tomo una iniciativa en el año 2006 a través de un estudio realizado en 1988 por el ingeniero Mario Ernesto Rodríguez Sosa en su estudio “Obtención de energía Eólica en la plataforma Continental Usando Recursos Marinos” donde determina que las costas salvadoreñas tienen la posibilidad de usar la energía que producen las olas.

En dicho estudio realizó mediciones en el muelle del puerto de La Libertad, kilómetro 32, carretela Litoral, departamento de La Libertad, con el objetivo de calcular el potencial de las olas usando medición directa con instrumentos básicos como cronómetro, contómetros, cinta métrica etc. Y en base a mediciones hechas en un solo día pudo determinar datos como: Altura promedio de la ola, período de la ola y velocidad. Tomando como base esas variables calculó el flujo de energía de las olas que en promedio fue en aquel entonces de 30 KW/m (\*\*Evaluación del potencial energético del oleaje en las costas de El Salvador, Trabajo de Graduación año 2007\*\*) de frente de onda, donde determinó que a lo largo de las costas salvadoreñas se podría generar energía eléctrica a través de las olas utilizando su energía cinética.

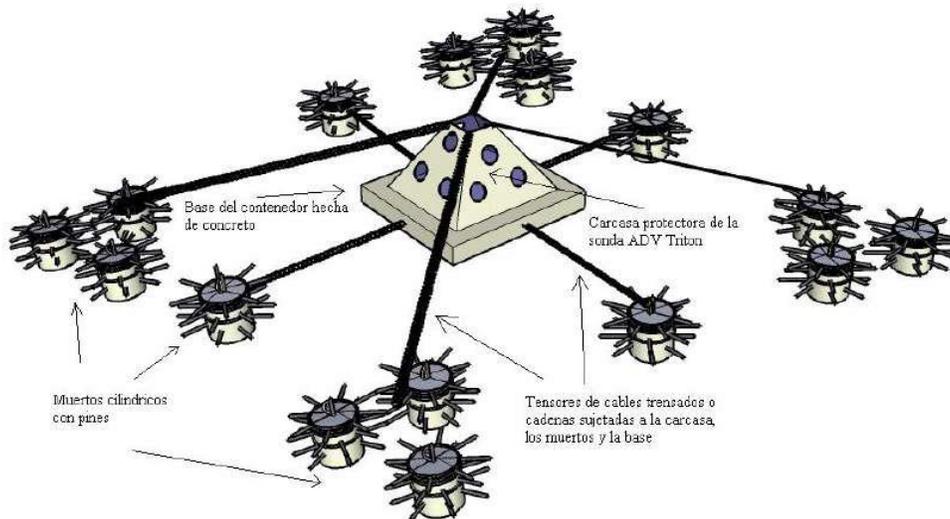
#### **3.9.1 SONDA SONTEK ADV TRITON**

El trabajo de investigación de Ingeniería Mecánica finalizada en el año 2007 sigue los pasos de la investigación del ing. Mario Ernesto Rodríguez Sosa por conocer el potencial energético del oleaje costero en donde se realizaron prototipos para hacer mediciones más precisas sobre el oleaje, es por ello que se necesitó una sonda oceanográfica llamada ADV Tritón. El tipo de anclaje que se utilizó es como se muestra en la ilustración 55 y los datos de donde fue instalada se observan en la ilustración 56.

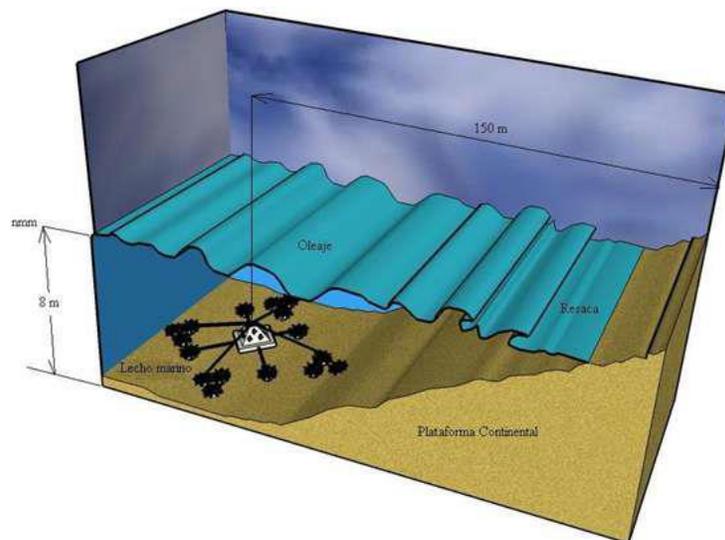


**Figura 53:** sonda Oceanográfica ADV Tritón.

Este instrumento es muy sofisticado ya que es acústico estilo Doppler, es una tecnología que muchos oceanógrafos los toman como sus principales herramientas para medir la velocidad del agua. Cada vez fue avanzando hasta que se llegó a un método pulso a pulso que permite frecuencia de muestreo muy altas al tiempo que proporciona una buena precisión en un rango de velocidad dado.



**Figura 54:** diagrama de sujeción del sistema de anclaje.



**Figura 55:** esquema de la instalación del sistema de medición en las cercanías de la playa Santa María Mizata, km 87.5 en la carretera Litoral.

La técnica Doppler de pulso a pulso consiste en transmitir un par de pulsos separados por un desfase  $T_{yo}$  y calcula la diferencia de fase entre los dos. La velocidad de Doppler se calcula:

$$V = C \cdot \Delta\varphi / (4 \cdot \pi \cdot F_o \cdot T_{yo}) \text{ (Ec.28)}$$

Donde  $C$  es la velocidad del sonido,  $\Delta\varphi$  es la diferencia de fase entre pulsos y  $F_o$  es la frecuencia del sistema.

Las características principales del sitio donde se realizó el experimento son las siguientes:

- Costa acantilada, donde existe poca formación de resaca, por las características propias del lecho marino, declinando la ola muy cerca del acantilado o rompiendo directamente sobre este.
- Estabilidad en las laderas, evitando poner en riesgo cualquier equipo de medición respecto a deslizamientos del talud continental.
- Lecho marino rocoso, con el propósito de reducir costos en la instalación de estructuras.
- Casi nula la actividad turística.
- Se estudió lugares donde no se produzca desplazamiento de familias.



**Figura 56:** ubicación de la sonda ADV Tritón.

Una vez calibrada e instalada la sonda ADV Tritón se procedió a la obtención de datos en donde, según la investigación, se establecieron cinco condiciones de frontera: Velocidad y dirección del viento, altura, periodo y dirección del oleaje. Todo para obtener las características más importantes del oleaje en la cual más adelante las utilizaremos para las simulaciones en CFD como lo son: Altura significativa, periodo y dirección de propagación. Estos datos comprenden entre el 7 de febrero al 20 de marzo del año 2007. Los datos almacenados son muestras periódicas más representativas en la que se medían 15 minutos

continuos por cada hora haciendo un total de 24 muestras de 15 minutos cada día de forma teórica ya que se tenían que hacer extracciones y mantenimientos respectivos.

Uno de los puntos importantes con respecto a las mediciones es que el periodo de tiempo no contempla la totalidad de los diferentes factores que contribuyen a las formas del oleaje en sus diferentes estaciones que suceden en el país, invierno y verano, por lo que es impensable hasta este momento establecer resultados de energía del oleaje completas ya que suceden variaciones como la lluvia donde se incrementan las alturas de la ola o en verano donde las alturas del oleaje disminuyen así como las transiciones de las fases lunares.

### ***3.9.2 MODELO NUMÉRICO SWAN PARA LA PREDICCIÓN DEL OLAJE***

Hay distintos modelos de oleaje que se utilizan para rutas de embarcaciones, plataformas, industrias en mar abierto o de clima. Esto se da en el entendimiento entre las fluctuaciones de presión asociados a flujos de aire sobre las olas. Entre los modelos de oleaje que han sido desarrollados para simular la evolución del oleaje están: la resolución de fase (phase resolving) y el promediado de fase (phase averaged). Los modelos con resolución de fase son usados para condiciones de oleaje muy variables en dominios pequeños y generalmente no consideran generación ni disipación. Por el contrario, los modelos de promediado de fase asumen que las propiedades de las olas varían lentamente en escalas de la longitud de onda y consideran los fenómenos de generación, disipación de energía e interacciones no lineales en los que la superficie del mar es descrita por un espectro de energía.

El modelo SWAN “Simulating Waves Nearshore” es un modelo de tercera generación que describe la evolución del espectro de energía del oleaje tomando en cuenta las condiciones del viento, corrientes marinas y batimetría, calculando procesos de generación, disipación e interacciones no lineales.

Los procesos de propagación representados en SWAN son:

- Propagación recti-lineal en espacio.
- Transformaciones de olas por cambios en profundidad o corrientes (Shoaling y refracción).
- Bloqueo o reflexión de olas por corrientes marinas.
- Transmisión, bloqueo o reflexión por obstáculos.

Los procesos de generación y disipación del oleaje marino considerado en el

SWAN son:

- Generación por viento.
- Disipación por rotura.
- Disipación por rotura por fondo.
- Disipación por fricción en el fondo.
- Interacción entre olas (triadas/quadrupletas).

Tanto el espectro de energía frecuencial como el direccional se pueden ajustar a funciones teóricas desarrolladas para caracterizar distintos estados del mar. Los resultados en la obtención de datos se empleó un espectro denominado JONSWAP (Join Wave Observation Program for the North Sea) modificado por Goda. Este espectro incluye la velocidad de propagación de la ola como parámetro de oleaje en función de los parámetros de alturas de olas, su expresión es la siguiente:

$$S(f) = B_j \cdot H_{1/3}^2 \cdot T_p^{-4} \cdot f^{-5} \cdot e^{-1.25 \cdot (T_p \cdot f)^{-4}} \cdot \gamma e^{-\frac{(T_p \cdot f - 1)^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{Ec.29})$$

Donde

$$B_j = \frac{0.0624}{0.23 + 0.033\gamma - 0.185 \cdot (1.9 + \gamma)^{-1}} \cdot [1.094 - 0.01915 \cdot \ln \gamma]$$

S(f): Función de densidad espectral de la ola direccional.

$H_{1/3}$  : Altura significativa.

$f$ : Frecuencia pico.

$T_p$ : Periodo Pico  $T_p = 1/f$

$\gamma$ : Parametro de ruptura de la ola.

En la tesis de ingeniería mecánica “Evaluación del potencial energético del oleaje en las costas de El Salvador” se seleccionó un punto cercano a la playa Santa María Mizata, Kilómetro 87.5, carretera El Litoral, departamento La Libertad, con el objetivo de caracterizar el oleaje, el cual se midió con la sonda oceanográfica ADV Tritón, instalada a 150 metros desde la línea de costa, de 6 m a 8 m de profundidad, registrando datos durante 42 días, comprendidos entre el 7 de febrero al 20 de marzo de 2007. El procesamiento de los datos se hace aplicando el modelo numérico SWAN para la predicción del oleaje frente a la faja costera salvadoreña.

En base a esta investigación se seleccionaron los datos más importantes a la hora de realizar el modelo numérico descrito en el capítulo anterior y poder aplicarlo a un oleaje real, de esta forma determinar un posible potencial de las olas para la generación de energía eléctrica.

Las variables más representativas para la construcción del sistema OWC son:  $H_s$  (altura significativa),  $T_p$  (período pico). En la figura 58 se muestran los resultados del estudio de las olas en dicho sitio obteniendo un promedio en el mes de febrero una altura significativa  $H_s$  de 0.77 metros y un periodo  $T_p$  de 12.98 segundos. En el mes de marzo un promedio de  $H_s$  1.15m y  $T_p$  14.55 s.

Fecha	Hs (m)	Tp (s)	$\theta_m$ (°)	F (KW/m)	Fecha	Hs (m)	Tp (s)	$\theta_m$ (°)	F (KW/m)
07/01/1900	0.96	7.97	190.18	3.41	18/01/1900	0.68	13.69	212.40	2.94
08/01/1900	0.71	8.05	200.22	1.88	19/01/1900	0.76	12.48	211.04	3.34
09/01/1900	0.67	12.08	212.54	2.46	20/01/1900	0.76	12.25	217.70	3.28
10/01/1900	0.74	12.08	216.99	2.99	21/01/1900	0.70	13.43	220.60	3.06
11/01/1900	0.69	12.07	215.08	2.68	22/01/1900	0.82	12.49	221.39	3.80
12/01/1900	0.63	13.28	208.10	2.47	23/01/1900	0.92	14.75	231.01	5.75
13/01/1900	0.71	12.88	211.60	2.98	24/01/1900	0.95	14.91	215.67	6.14
14/01/1900	0.75	12.38	204.81	3.21	25/01/1900	0.92	13.07	204.19	5.02
15/01/1900	0.75	15.37	218.71	4.03	26/01/1900	0.73	13.41	208.75	3.35
16/01/1900	0.75	14.85	219.33	3.87	27/01/1900	0.74	15.02	215.39	3.83
17/01/1900	0.67	13.65	212.89	2.85	28/01/1900	0.88	15.30	204.47	5.58
Promedio						0.77	12.98	212.41	3.59

Fecha	Hs (m)	Tp (s)	$\theta_m$ (°)	F (KW/m)
01/03/2007	0.86	14.52	203.45	5.00
02/03/2007	0.86	13.71	206.58	4.71
03/03/2007	0.88	14.26	213.61	5.10
04/03/2007	0.79	14.40	210.87	4.18
05/03/2007	0.80	13.52	203.06	4.00
06/03/2007	0.74	12.51	191.31	3.17
07/03/2007	0.89	15.84	212.15	5.96
08/03/2007	1.15	15.55	220.09	9.60
09/03/2007	1.41	15.69	208.63	14.42
10/03/2007	1.37	15.02	209.36	13.16
11/03/2007	1.17	14.40	218.52	9.12
12/03/2007	1.55	16.24	221.33	18.66
13/03/2007	1.83	15.78	221.30	24.63
14/03/2007	1.63	14.87	229.55	18.27
15/03/2007	1.60	15.05	223.11	17.97
16/03/2007	1.49	14.73	228.87	15.11
17/03/2007	1.40	14.10	222.68	13.04
18/03/2007	0.94	12.91	216.42	5.47
19/03/2007	0.77	12.77	217.60	3.55
20/03/2007	0.78	15.13	223.87	4.26
<b>Promedio</b>	<b>1.15</b>	<b>14.55</b>	<b>215.12</b>	<b>9.97</b>

**Tabla 6:** datos de altura, periodos y ángulos de las olas en playa Mizata. Promedio de febrero de 2007.

También se realizó una clasificación de las muestras de los oleajes en cuento la su repetición. A partir de estos parámetros en la investigación se establecieron olas con altura desde 0.72 m hasta 0.88 m, que representa el 36.41 %, alturas de olas de 1.89 m a 2.23 m, representando 1.44% que es la menor de las ocurrencias, los demás resultados de alturas de olas, registrados durante la medición se presentan en la tabla 7.

Eventos	Intervalo de altura de la ola (m)	Número de muestras	Porcentaje del muestreo total
A	0.55 a 0.72	237	24.31 %
B	0.72 a 0.88	355	36.41 %
C	0.88 a 1.05	131	13.44 %
D	1.05 a 1.89	238	24.41 %
E	1.89 a 2.23	14	1.44 %

**Tabla 7:** resumen de clasificación de altura de las olas según ocurrencia.

Al obtener el número de ocurrencias en la altura de olas también se determinaron intervalos para los diferentes periodos en los resultados obtenidos como se muestra en la tabla 8.

Eventos	Intervalo de Período pico(s)	Número de muestras	Porcentaje del muestreo total
A	6.3 a 8.64	41	4.21%
B	8.64 a 10.98	2	0.21%
C	10.98 a 12.15	56	5.74%
D	12.15 a 15.66	717	73.54%
E	15.66 a 16.83	124	12.72%
F	16.83 a 18.00	35	3.59%

**Tabla 8:** resumen de clasificación para periodos del oleaje.

## **CAPÍTULO CUATRO**

**SIMULACIÓN, MODELO DE CAPTACIÓN Y CALIBRACIÓN POR  
SOFTWARE A TRAVÉS DE MODELOS DE DINÁMICA DE FLUIDOS  
COMPUTACIONAL CFD.**

## INTRODUCCIÓN

En este capítulo se abordará el proceso de obtención de datos gracias a un estudio realizado por la escuela de Ingeniería Mecánica dicha investigación se realizó en la zona de la playa Santa María Mizata, kilómetro 87.5 carretera Litoral, departamento de La Libertad y es de las primeras en presentarse en la Universidad de El Salvador (capítulo 3.7.0) mostrando resultados interesantes. Posteriormente se analizarán los datos importantes para obtener una simulación denominada Fluidos Dinámicos Computacional (del inglés CFD – Computational Fluid Dynamic) en la cual se hará una simulación de olas con los parámetros obtenidos de la investigación de la escuela de Ingeniería Mecánica, interpretaremos los resultados y analizaremos el posible potencial de generación eléctrica.

A continuación, se detallarán los aspectos más importantes para la simulación de un oleaje a través de un software CFD que es fundamental para los propósitos de este trabajo y al mismo tiempo poner en análisis las ecuaciones definidas en el APARTADO 3.5.1 y 3.5.2.

En todos los líquidos según el caso que se analiza están caracterizados por una serie de ecuaciones que hacen una representación a las leyes que los gobiernan como por ejemplo conservación de la masa, la cantidad de movimiento, energía etc. Estas ecuaciones fundamentales del flujo de fluidos se resuelven gracias a las ecuaciones de Navier-Stokes (Connor, 2019) que llevan el nombre de Claude-Louis Navier (1785-1836) y George Gabriel Stokes (1819-1903). En situaciones en las que no hay fuertes gradientes de temperatura en el fluido, estas ecuaciones proporcionan una muy buena aproximación de la realidad.

$$\rho \left[ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{v} \quad (\text{Ec.30})$$

Donde

$\rho \left[ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right]$  : Representa el cambio de velocidad con respecto al tiempo.

$-\nabla p$  : Gradiente de presión. Los fluidos tienden a seguir la dirección donde existe el mayor cambio de presión.

$\rho \mathbf{g}$  : Fuerzas que interactúan. Como la fuerza gravitacional que actúa en el fluido y/o electromagnética.

$\mu \nabla^2 \mathbf{v}$ : Término de difusión. En los fluidos newtonianos la viscosidad opera como difusión del momento.

Las ecuaciones de Navier-Stokes son ecuaciones diferenciales parciales no lineales de segundo orden, sus soluciones se han encontrado para una variedad de problemas interesantes de flujo viscoso. Con los CFD se resuelven estas ecuaciones de forma algebraica a través de simulaciones por computadora en la cual se pretende analizar el comportamiento de los fluidos. En base a estas técnicas de CFD se han creado muchos softwares con la finalidad de tener disponibles diferentes entornos como por ejemplo su uso en análisis hidrodinámicos, combustión, hidráulica, comportamiento de piezas mecánicas ante esfuerzos etc.

Existen una variedad de software para simulaciones CFD entre los más utilizados están OpenFOAM y ANSYS del cual este último se utilizará para hacer el desarrollo del presente trabajo. En general, el análisis de CFD implica tres fases principales:

**Pre Proceso:** Aquí es cuando el problema del flujo de fluidos se transforma en un modelo de computadora discreto e ideal. Se hacen algunas suposiciones basadas en el tipo de flujo, como compresible, incompresible, estable, transitorio, viscoso, no viscoso, etc.

**Resolución:** El análisis CFD utiliza potentes solucionadores que realizan cálculos reales sobre problemas o ecuaciones de flujo de fluidos y brinda soluciones precisas y rápidas.

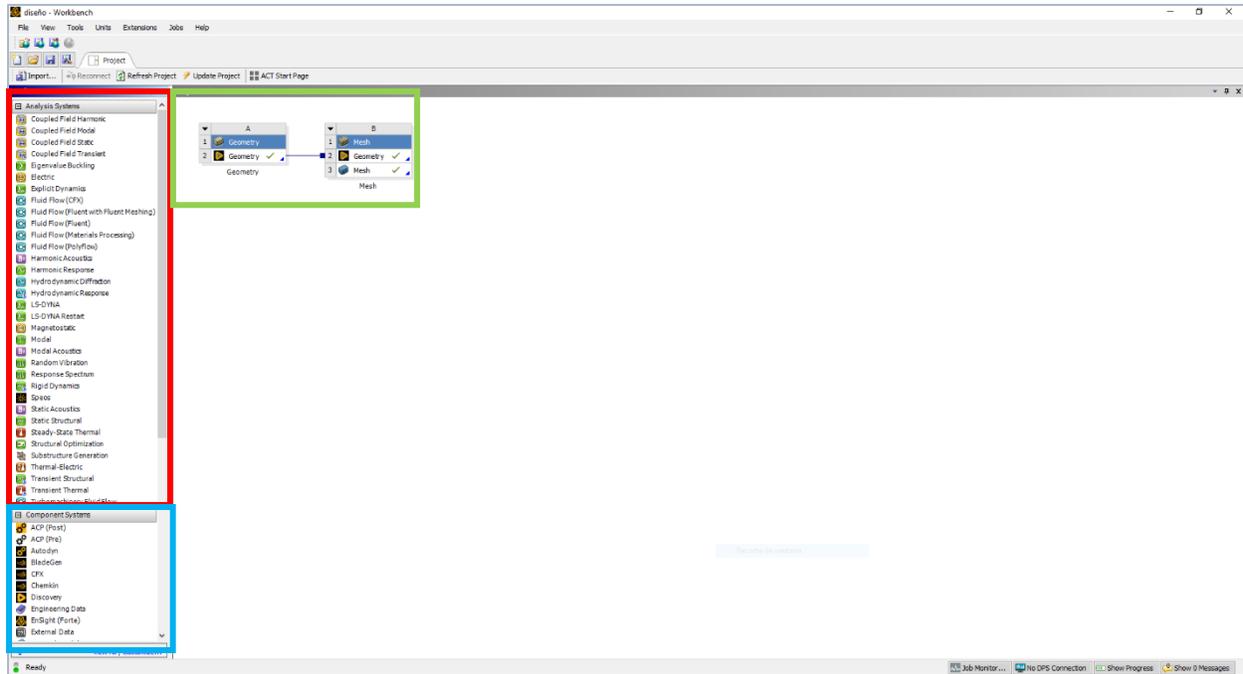
**Post Proceso:** Se visualizan y analizan los resultados en la fase final para concluir en forma de tablas, gráficos, imágenes en movimiento, etc.

#### **4.1.0 ANSYS CFD**

ANSYS es un Software libre (de paga para algunas ejecuciones específicas) de simulación para dinámica de fluidos computacional para análisis y simulación por FEM. Incluye las fases de preproceso, resolución y postproceso en una única plataforma de trabajo. Ansys ejecuta análisis a piezas o conjuntos usados en ingeniería y diseño mecánico que están sometidos a uno o varios fenómenos físicos de manera individual o simultánea.

Con el pasar de los años se han hecho modificaciones y cuenta con diversas herramientas en las que se puede simular diversos análisis sobre los fluidos. Para el presente trabajo se utilizó la versión 2023 R1 que es una versión para estudiantes en la cual tiene ciertos límites de mallado pero que son suficientes para los propósitos de este trabajo.

El programa funciona con un conjunto de sub aplicaciones (Figura 58) en las que se utilizaran dependiendo del fenómeno de estudio (cuadro rojo). El en cuadro azul están las aplicaciones individuales en las que se eligen que elementos necesitas para hacer los análisis. En el cuadro verde se observan los diferentes casos que se interconectan para llegar a una finalidad concreta ya sea que solo quieren análisis o resultados finales. Para este trabajo solo se ocuparon 2 aplicaciones que son: Geometry y Mesh. Geometry es donde se crea la geometría denotando las medidas y límites que se necesitan respetar. El Mesh es donde se hace el mallado que una etapa importante ya que de ahí dependen los resultados que se esperan obtener sean fiables.



**Figura 57:** entorno programa ANSYS Workbench.

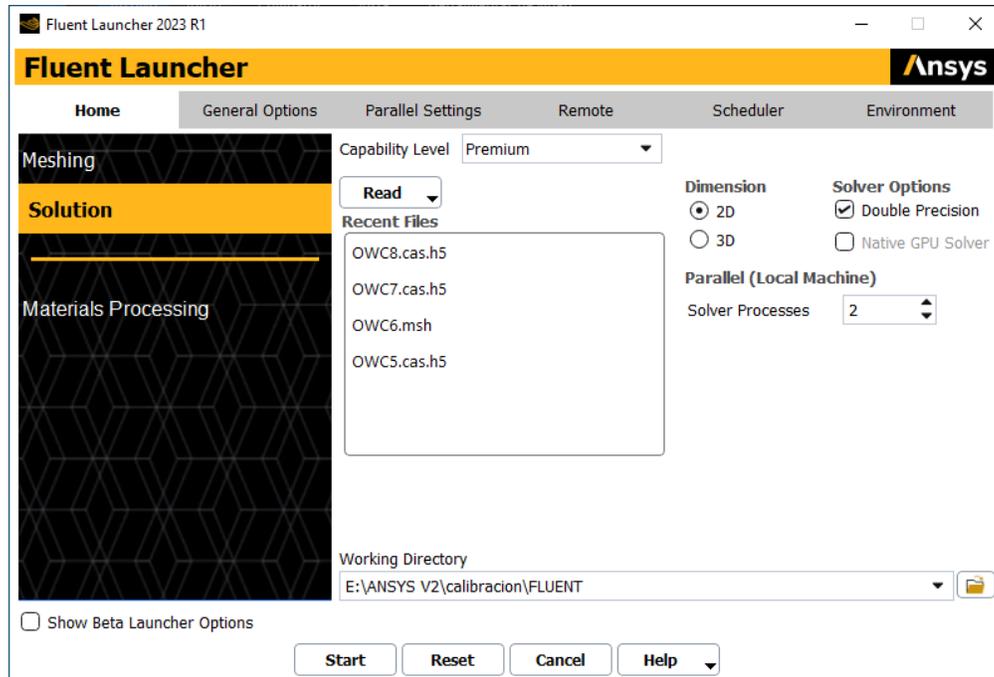
ANSYS 2023 R1 ver. Estudiante	LIMITES
Refinamiento estructural	128000 nodos/elementos
Refinamiento de fluidos	512000 nodos/elementos
Celdas de análisis	50 cuerpos y 300 caras
Procesadores	2

**Tabla 9:** límites de análisis para la versión de ANSYS Student.

Siguiendo un ejemplo para nuestro caso se determinó un orden de elaboración del problema para la configuración del programa como lo veremos a continuación.

## ANSYS FLUENT

Integrado al ANSYS Workbench también está el sub programa ANSYS FLUENT en el que se harán los análisis del canal de oleaje junto con la cámara de OWC. En él se hacen las configuraciones respectivas para realizar la simulación. Para utilizarlo se debe crear un archivo. msh que es el archivo de mallado que se puede exportar de Workbench e integrarlo a fluent. Ansys Workbench también tiene una sub aplicación llamada CFX en la que puede hacer el mismo proceso, pero fluent tiene la ventaja de guardar los resultados y análisis dentro de un disco duro externo el cual es eficiente si se hacen simulaciones de mayor tiempo de ejecución.



**Figura 58:** ventana de inicio de ANSYS FLUENT.

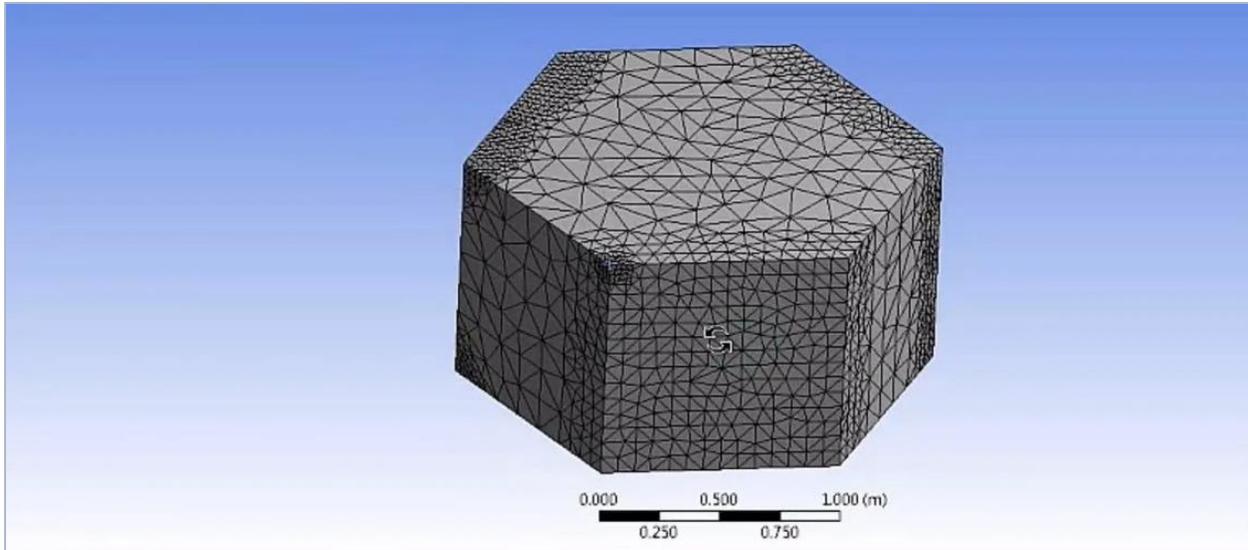
#### **4.1.1 DEFINICION DE LA GEOMETRIA**

Representa los límites físicos del problema en un entorno parecido a un entorno CAD (En la versión 2023). Se pueden generar geometrías bidimensionales y tridimensionales. Para problemas tridimensionales supondrá, por razones obvias, un mayor número de elementos o subdominios que el mismo problema tratado de forma bidimensional, por ende, el costo computacional se verá también incrementado. Es pues una tarea fundamental determinar si el problema debe ser abordado tridimensionalmente o puede hacerse de manera simplificada y de forma bidimensional a mucho menor coste computacional.

#### **4.1.2 MALLADO**

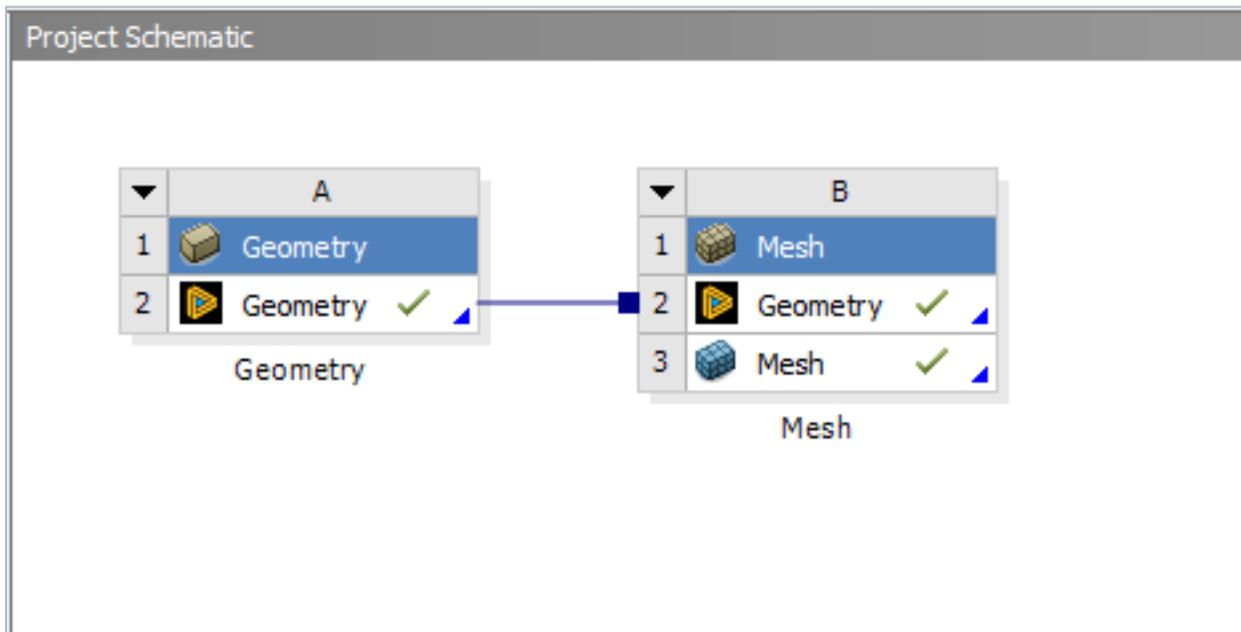
En el Mallado o Meshing consiste en la división de la geometría en pequeñas celdas que pueden tener distintas formas y que comúnmente se les denomina también elementos con el fin de poder aplicar las ecuaciones de gobierno de los flujos fluidos de forma discretizada a cada uno de los subdominios creados.

Las formas que pueden adoptar estas subdivisiones son comúnmente hexaedros y tetraedros en 3D y cuadriláteros y triángulos en 2D. Pero también pueden generarse mallas con elementos piramidales, prismáticos o poliédricos arbitrarios. Para disminuir el costo computacional en las secciones de interés se puede hacer un refinamiento de malla que es donde queremos ver los resultados como se ve en la figura 60 en la que se puede observar los mallados más pequeños en las secciones exteriores donde se requiere un mayor detalle para los resultados finales.



**Figura 59:** ejemplo de mallado en ANSYS Student.

El mallado es una parte crítica en la resolución de un problema de CFD, es por ello que los softwares de mallado cuentan con una serie de métodos que ayudan al usuario a discretizar la geometría de la forma más apropiada posible. Para este trabajo solo se utilizó el refinamiento de mallado Sizing que es un método de mallado que permite controlar las dimensiones de los elementos del mallado, puede aplicarse a todo el mallado o a zonas específicas que requieran un mayor grado de discretización del espacio.



**Figura 60:** sub aplicaciones que realizan la geometría y el mallado en ANSYS Workbench.

### 4.1.3 MODELO FISICO

El primer paso para resolver cualquier problema multifásico es determinar cuál de los regímenes descritos representa mejor su flujo. Ansys proporciona algunas pautas generales para determinar los modelos apropiados para cada régimen.

Dependiendo de los problemas que involucran a flujos fluidos pueden tener naturalezas muy distintas, existen diferentes modelos físicos para abordarlos, es decir, diferentes maneras de aplicar las ecuaciones de gobierno de los fluidos (conservación de masa, momentum y energía). Cada uno de los diferentes modelos se aproxima a la realidad de una forma distinta, con diferentes simplificaciones o herramientas matemáticas, lo que hace que la elección del modelo físico a usar sea también un aspecto fundamental y crítico a la hora de afrontar un problema de CFD, sobre todo si el flujo a tratar es un flujo turbulento que es nuestro caso.

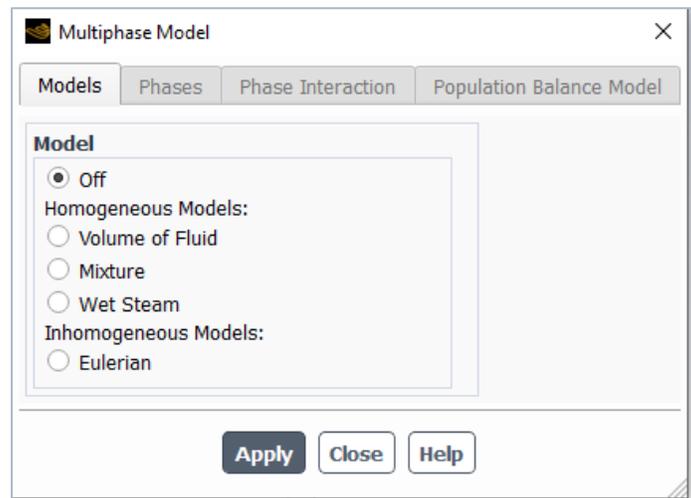


Figura 61: tipos de modelos disponibles. ANSYS 2023.

### Modelo Volumen de Fluido

El modelo VOF puede modelar dos o más fluidos inmiscibles resolviendo un solo conjunto de ecuaciones de momento y rastreando la fracción de volumen de cada uno de los fluidos en todo el dominio. Las aplicaciones típicas incluyen la predicción de la ruptura de un chorro, el movimiento de grandes burbujas en un líquido, el movimiento del líquido después de la ruptura de un dique y el seguimiento constante o transitorio de cualquier interfaz líquido-gas.



Figura 62: modelo volumen de fluido (Fernández, 2018).

Los sistemas de canales abiertos involucran el fluido que fluye (la fase secundaria) y el fluido por encima de él (la fase primaria). Si ambas fases ingresan a través de entradas separadas (por ejemplo, entrada-fase2 y entrada-fase1), estas dos entradas forman un grupo de entrada. Este grupo de entradas se reconoce por el parámetro ID de grupo de entradas, que será el mismo para las dos entradas que componen el grupo de entradas. Por otro lado, si ambas fases ingresan a través de la misma entrada (por ejemplo, entrada combinada), entonces la entrada en sí representa el grupo de entrada.

### ***Submodelo Open Channel Flow***

Para establecer parámetros específicos para un límite particular para flujos de canales abiertos, se habilita la opción Open Channel Flow en la pestaña Multifase del cuadro de diálogo de condición de límite correspondiente. La tabla 10 resume los tipos de límites disponibles y los parámetros adicionales necesarios para modelar el flujo de canal abierto (ANSYS, 2009).

<b>Boundary Type</b>	<b>Parameter</b>
pressure inlet	Inlet Group ID; Secondary Phase for Inlet; Flow Specification Method; Free Surface Level, Bottom Level; Velocity Magnitude
pressure outlet	Outlet Group ID; Pressure Specification Method; Free Surface Level; Bottom Level
mass flow inlet	Inlet Group ID; Secondary Phase for Inlet; Free Surface Level; Bottom Level
outflow	Flow Rate Weighting

**Tabla 10:** *parámetros de frontera para el submodelo Open Channel Flow.*

### ***Submodelo Open Channel Wave BC***

Cuando se modelan las condiciones de contorno de onda de canal abierto, muchas de las variables que se utilizan en el flujo de canal abierto también existen para las condiciones de contorno de onda de canal abierto.

### **Modelo Mixture**

El modelo mixture es un modelo multifásico simplificado que se puede utilizar de diferentes maneras. Se puede usar para modelar flujos multifásicos donde las fases se mueven a diferentes

velocidades, pero asumen un equilibrio local en escalas de longitud espacial corta. Se puede utilizar para modelar flujos multifásicos homogéneos con acoplamiento muy fuerte y fases moviéndose a la misma velocidad y, por último, los modelos de mezcla se utilizan para calcular la viscosidad no newtoniana.

Puede modelar “n” fases (fluido o partículas) resolviendo las ecuaciones de cantidad de movimiento, continuidad y energía para la mezcla, las ecuaciones de fracción de volumen para las fases secundarias y expresiones algebraicas para las velocidades relativas. Las aplicaciones típicas incluyen sedimentación, separadores de ciclones, flujos cargados de partículas con carga baja y flujos burbujeantes donde la fracción de volumen de gas permanece baja. El modelo mixture le permite seleccionar fases granulares y calcula todas las propiedades de las fases granulares. Esto es aplicable para flujos líquido-sólido.

### ***Modelo West Steam***

El modelado West Steam es muy importante en el análisis y diseño de turbinas de vapor. El aumento en la humedad de salida de la turbina de vapor puede causar una erosión severa en los álabes de la turbina en las etapas de baja presión y una reducción en la eficiencia aerodinámica de las etapas de la turbina que operan en la región de vapor húmedo.

### ***Modelo Euleriano***

El modelo multifásico euleriano permite el modelado de múltiples fases separadas pero que interactúan. Las fases pueden ser líquidos, gases o sólidos en casi cualquier combinación. Se usa un tratamiento Euleriano para cada fase, en contraste con el tratamiento Euleriano-Lagrangiana que se usa para el modelo de fase discreta.

Con el modelo multifásico euleriano, el número de fases secundarias está limitado solo por los requisitos de memoria y el comportamiento de convergencia. Se puede modelar cualquier número de fases secundarias, siempre que haya suficiente memoria disponible. Sin embargo, para flujos multifásicos complejos, es posible que su solución esté limitada por el comportamiento de convergencia. Este modelo no distingue entre flujos multifásicos fluido-líquido y fluido-sólido (granular). Un flujo granular es simplemente uno que involucra al menos una fase que ha sido designada como fase granular.

## **4.1.4 MODELOS DE TURBULENCIA**

El problema en los flujos turbulentos es que las variables de interés, velocidad y presión, fluctúan en una escala muy pequeña de tiempo lo que hace computacionalmente imposible poder resolver un problema tratando cada una de dichas variaciones. Los modelos RANS se fundamentan en aplicar la descomposición de Reynolds a dichas variables, consistente en descomponer las cantidades de flujo turbulento en componentes promedio y fluctuante. Estas fluctuaciones mezclan cantidades transportadas, como cantidad de movimiento, energía y concentración de especies, y

hacen que las cantidades transportadas también fluctúen. Dado que estas fluctuaciones pueden ser de pequeña escala y alta frecuencia, son demasiado costosas desde el punto de vista computacional para simularlas directamente en cálculos prácticos de ingeniería.

En su lugar, las ecuaciones gobernantes instantáneas (exactas) pueden ser promediadas en el tiempo, promediadas por conjuntos o manipuladas de otro modo para eliminar la resolución de escalas pequeñas, lo que da como resultado un conjunto modificado de ecuaciones cuya solución es menos costosa desde el punto de vista computacional. Sin embargo, las ecuaciones modificadas contienen variables desconocidas adicionales y se necesitan modelos de turbulencia para determinar estas variables en términos de cantidades conocidas. Los modelos más utilizados se describen a continuación.

### **Modelo K-épsilon**

Los modelos completos más simples de turbulencia son los modelos de dos ecuaciones en los que la solución de dos ecuaciones de transporte independientes permite determinar de forma independiente la velocidad de la turbulencia y las escalas de longitud. El modelo k-épsilon estándar en ANSYS FLUENT cae dentro de esta clase de modelos y se ha convertido en el más utilizado de los cálculos prácticos de flujo de ingeniería en el tiempo desde que fue propuesto por Launder y Spalding en la que se obtiene robustez, economía y precisión razonable para una amplia gama de flujos turbulentos explican su popularidad en la industria simulaciones de flujo y transferencia de calor.

Es un modelo semiempírico y la derivación de las ecuaciones del modelo se basa en consideraciones fenomenológicas y empirismo. En la derivación del modelo k-épsilon se supone que el flujo es completamente turbulento y que los efectos de la viscosidad molecular son insignificantes. Por lo tanto, es válido solo para flujos totalmente turbulentos.

### **Modelo K-omega**

El modelo estándar k-omega en ANSYS incorpora modificaciones para efectos de bajo número de Reynolds, compresibilidad y dispersión del flujo de corte. Predice tasas de dispersión de flujo de cizallamiento libre que concuerdan estrechamente con las mediciones de estelas lejanas, capas de mezcla y chorros planos, redondos y radiales y, por lo tanto, es aplicable a flujos delimitados por paredes y flujos de cizallamiento libre

El modelo k-omega estándar es un modelo empírico basado en ecuaciones de transporte para la energía cinética de la turbulencia (k) y la tasa de disipación específica (omega). A medida que el modelo k-omega se modificó a lo largo de los años, se agregaron términos de producción a las ecuaciones k y omega, lo que mejoró la precisión del modelo para predecir flujos de corte libre.

#### **4.1.5 CONDICIONES DE FRONTERA (*Boundary Conditions*)**

El dominio de los CFD es limitado y por ello es preciso definir cómo se comporta el mismo en su frontera. Por condiciones de frontera se entienden aquellas condiciones que definen el comportamiento del modelo en sus límites. En otras palabras, las condiciones de contorno que se imponen en un recinto establecen las condiciones de masa, momentum y energía en las fronteras del recinto. Hay varias definiciones para poder configurar el programa dependiendo de las condiciones de interés, entre algunas destacan:

- **Velocity inlet:** Se utiliza para definir las propiedades de velocidad y escalares del flujo en los límites de entrada.
- **Pressure inlet:** Se usa para definir la presión total y otras cantidades escalares en las entradas de flujo.
- **Outflow:** Se usa para modelar salidas de flujo donde los detalles de la velocidad y presión del flujo no se conocen antes de la solución del problema de flujo. Son apropiados cuando el flujo de salida está cerca de una condición totalmente desarrollada, ya que la condición de límite de flujo asume un gradiente de flujo cero para todas las variables de flujo, excepto la presión. No son apropiados para cálculos de flujo compresible.
- **Pressure outlet:** se usa para definir la presión estática en las salidas de flujo (y también otras variables escalares, en caso de flujo inverso). El uso de una condición de límite de salida de presión en lugar de una condición de flujo de salida a menudo da como resultado una mejor tasa de convergencia cuando se produce flujo de retorno durante la iteración.
- **Wall:** Se usa para separar regiones de sólidos de regiones fluidos. Las paredes pueden ser estacionaras o móviles, en este último caso se les suele denominar moving walls.
- **Symetry:** se usa para reducir la extensión del modelo computacional a una subsección simétrica del sistema físico general.

#### **4.1.6 METODOS DE SOLUCION**

Las ecuaciones que gobiernan al modelo escogido y que se han discretizado de forma algebraica en todo el dominio del problema son resueltas a partir de forma iterativa. Es preciso un cierto número de iteraciones para alcanzar una solución convergente, es decir, aquella situación en que de una iteración a otra el cambio sea despreciable y los residuales del método iterativo sean menospreciables. El tiempo de computación de cada iteración depende de la naturaleza del problema, del modelo físico escogido y fuertemente del número de elementos con los que se trabaja entre otros. Para ANSYS 2023 existen 3 alternativas principales en las que se detalla a continuación.

- **SIMPLE**

El método SIMPLE es el primer método utilizado para resolver las ecuaciones de conservación en forma discretizada. Por defecto el solucionador del programa ANSYS utiliza este método. El método se utiliza para obtener presión y velocidad; consta de simplificaciones de términos en las ecuaciones de conservación y de una corrección de presión y una corrección de velocidad de la siguiente forma:

1. Una aproximación del campo de velocidad se obtiene al resolver la ecuación de conservación del momento. El término de gradiente de presión se calcula utilizando la distribución de presión de la iteración anterior o una suposición inicial.
2. La ecuación de presión se formula y se resuelve para obtener la nueva distribución de presión.

Las velocidades se corrigen y se calcula un nuevo conjunto de flujos conservativos.

- **SIMPLEC**

El método SIMPLEC es una forma modificada del algoritmo SIMPLE y también es de uso muy común. Su eficacia a la hora de converger a una solución se estima de un 20-30% superior a la del algoritmo SIMPLE. El método SIMPLEC para obtener presión y velocidad también consta de una corrección de presión y una corrección de velocidad, pero a diferencia del método SIMPLE no se realizan simplificaciones de ningún término en las ecuaciones de conservación.

- **PISO**

El algoritmo PISO es muy recomendable para todos los cálculos de flujo transitorio, especialmente cuando desea utilizar un paso de tiempo grande. Generalmente ofrece resultados más estables y acarrea menos coste computacional. El método PISO para obtener presión y velocidad consta de dos correcciones de presión y dos correcciones de velocidad a diferencia de los métodos SIMPLE y SIMPLEC. Pese a que este método fue inventado para flujos compresibles hoy en día puede aplicarse también a flujos incompresibles.

#### ***4.1.7 CALCULO DE EJECUCION (RUN CALCULATION)***

En este apartado le permite iniciar las iteraciones del solucionador del programa. Las simulaciones de CFD pueden abarcarse desde el punto de vista estacionario o transitorio en función de la naturaleza del problema a tratar. Sea de un tipo o de otro, todo problema de CFD debe inicializar sus variables previamente de empezar a iterar la solución, pero sólo si la simulación es en régimen transitorio, deben definirse además de todo lo expuesto el intervalo temporal entre pasos de tiempo y el número de pasos de tiempo a calcular.

El intervalo temporal entre pasos de tiempo es un parámetro crítico para la convergencia de las soluciones. El manual de ANSYS sugiere que un intervalo de tiempo adecuado es aquel que permite que las soluciones a cada paso de tiempo converjan tras 20 iteraciones, siendo el número de iteraciones mucho mayor en los primeros pasos. Una manera de estimar el intervalo temporal entre pasos de tiempo es a través del número de Courant denominado CFL. Esta condición es necesaria para la convergencia de los problemas de CFD puesto que está relacionada con el término conectivo en las ecuaciones de gobierno. Se expresa (Número de Courant-Friedrichs-Levy, 2022):

$$C = \frac{\Delta t \cdot v}{\Delta x}$$

Donde  $\Delta t$  es el intervalo de tiempo en segundos,  $v$  es la velocidad y  $\Delta x$  es el intervalo de espacio en la malla. Generalmente para toda simulación transitorio el número de courant C debe ser igual a 1.

#### 4.2.0 COLUMNA DE AGUA OSCILANTE

Este modelo de captación es de los más extendidos a día de hoy pero también sigue en fase de desarrollo. Las primeras pruebas experimentales de un OWC empezaron en el año 1910 en Burdeos, Francia. Con el pasar de los años se fue extendiendo la idea tal que hoy en día existen distintos prototipos como los de Azores (Portugal), Galway (Escocia), Kaimei (Japón) y Mutriku (España).

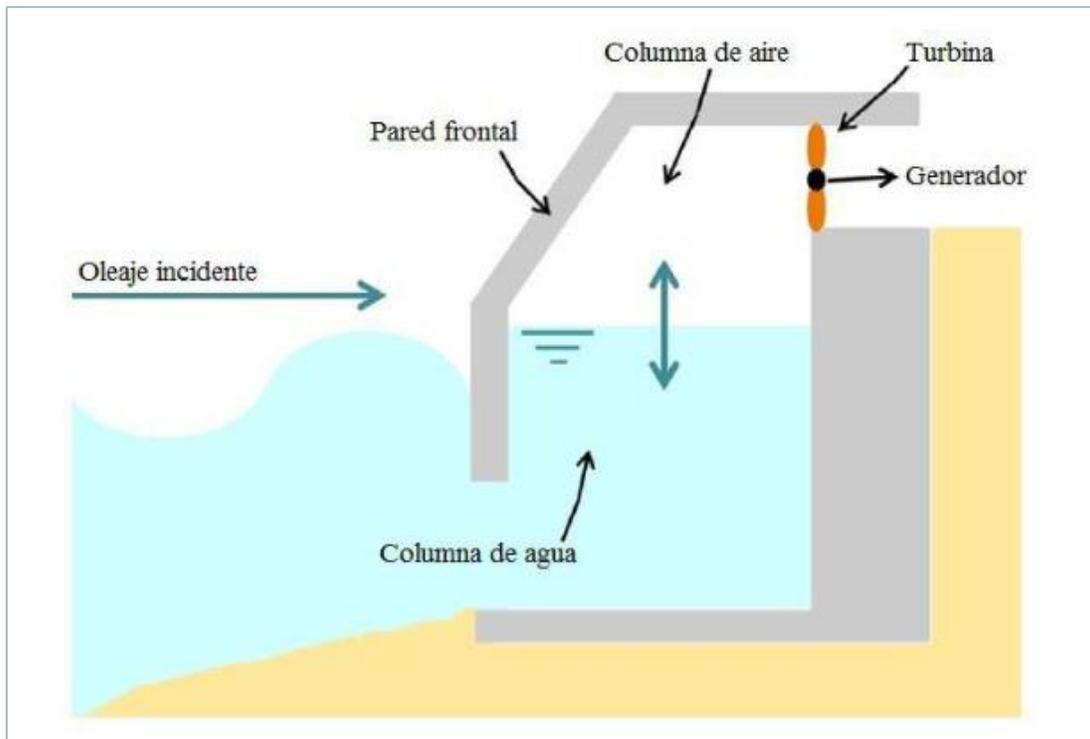


Figura 63: partes que componen un modelo de captación OWC (Gutiérrez, 2018).

Como se puede observar en la figura 65 las centrales OWC constan principalmente de las siguientes partes:

- **Cámara del OWC:** En ella están complementadas la columna de agua y la columna de aire donde interactúan para realizar el movimiento oscilatorio.
- **Turbina:** Es la parte principal de este método de captación, es el dispositivo que se encarga de convertir la energía cinética de las olas en energía mecánica aprovechable.
- **Generador:** Es la parte que convierte la energía mecánica en energía eléctrica.

Cuando el oleaje incidente llega a la pared frontal, la velocidad de estas impulsa el agua que entra en la cámara y comprime el interior de la columna de aire, que sale a presión por el orificio superior que a su paso impulsa la turbina y que, a su vez, hace girar el generador eléctrico y así obtener energía eléctrica. Cuando la ola se retira succiona aire a través del mismo orificio y vuelve a impulsar la turbina generando nuevamente energía eléctrica.

El rendimiento de la central OWC depende principalmente del comportamiento de la cámara y de la turbina. Aunque son dos elementos independientes, y pueden ser estudiados aisladamente, el rendimiento de la central es función del acoplamiento entre estos dos elementos porque las características de cada uno de ellos afecta al funcionamiento del otro. El desplazamiento de la superficie libre en el interior de la cámara está condicionado por el salto de presión que existe entre el interior y el exterior.

Este salto de presión depende de la curva característica de la turbina. Por otro lado, el punto de funcionamiento de la turbina depende del caudal circulante, que depende a su vez del desplazamiento de la superficie libre. Ambos elementos están estrechamente relacionados y cuando se plantea la construcción de una planta OWC se debe proyectar teniendo en cuenta las características de los dos elementos.

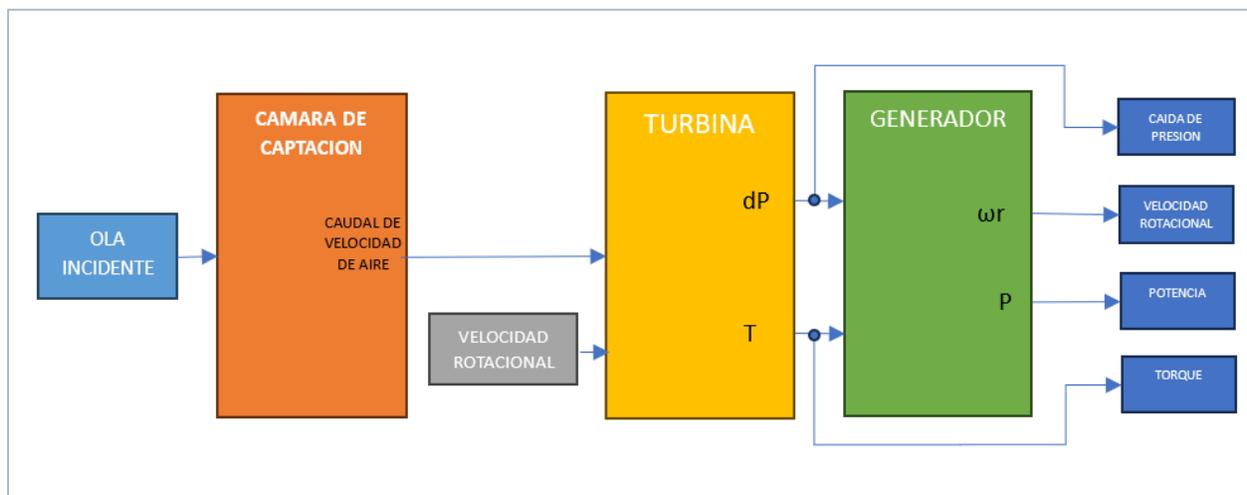


Figura 64: modelo de funcionamiento de un OWC (Garrido, y otros, 2015).

Las centrales OWC son actualmente el sistema más extendido de extracción de energía de las olas debido a que se basa en un concepto relativamente sencillo, la columna de agua oscilante y otra razón es que se trata de un sistema muy versátil que se puede ubicar en cualquier punto de la geografía marina. En el caso de este trabajo será de forma Onshore como lo vimos en la sección 3.7.1 ya que tiene ciertas ventajas en cuanto a su instalación, siendo este una de los métodos con los menores gastos de mantenimiento actualmente.

Conociendo los aspectos más importantes sobre la simulación por el programa ANSYS a continuación debemos elegir un modelo de captación que se adecue a la realidad del país y es por ello que se eligió un modelo OWC para la generación de energía.

#### **4.2.1 TURBINAS**

La turbina es la parte más importante de una central OWC, y posiblemente el elemento más complejo desde el punto de vista de diseño porque desarrolla su trabajo bajo condiciones de funcionamiento muy desfavorables que condicionan su diseño, por ejemplo (Pereiras, 2011):

- Amplitud del rango de funcionamiento: Las condiciones del oleaje son sumamente cambiantes y la turbina debe ser capaz de trabajar en una amplia gama de situaciones.
- No estacionariedad y bidireccionalidad del flujo. La bidireccionalidad del flujo es otro problema que condiciona el diseño de la turbina porque debe tener la capacidad de funcionar correctamente en los dos sentidos del flujo.
- Velocidad de rotación constante: La turbina debe girar a velocidad constante para el correcto funcionamiento del alternador. Esto, combinado con la no estacionariedad del flujo, condiciona totalmente el patrón de flujo en el interior de la turbina.

Los primeros sistemas OWC empleaban turbinas convencionales de flujo unidireccional combinadas con un sistema de válvulas antirretorno para rectificar el flujo. Este sistema eliminaba el problema de la bidireccionalidad del flujo, sin embargo, planteaba numerosos problemas, sobre todo de mantenimiento. Para resolver el problema de la bidireccionalidad sin recurrir a la rectificación del flujo se idearon las turbinas de flujo bidireccional.

Los dos tipos más utilizados de turbinas son las turbinas Wells y las turbinas de impulso. Cada una de ellas se han estado estudiando y modificando sus componentes para obtener mejor eficiencia siempre en función del modelo básico.

#### **TURBINAS WELL**

La turbina Wells fue propuesta en 1976 por Dr. A.A. Wells de Queen's University, Belfast (Raghunathan, 1995). Fue la primera propuesta de turbina bidireccional, y tradicionalmente, las turbinas de este tipo han sido las más utilizadas en instalaciones OWC. Estas turbinas tienen la capacidad de rotar cuando la columna de agua asciende hasta una altura máxima (inhalación) y cuando desciende hasta una altura mínima (exhalación).

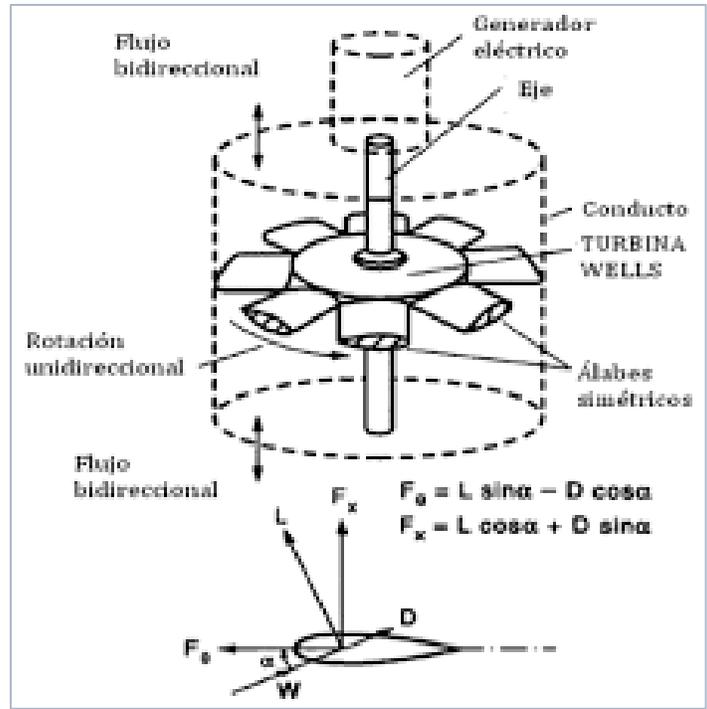


Figura 65: esquema de una turbina well.

En la figura 66 se presenta un esquema de la turbina well en la que se puede observar que esta interconectada a un eje que es el que se interconecta al generador lo que hace producir energía eléctrica.

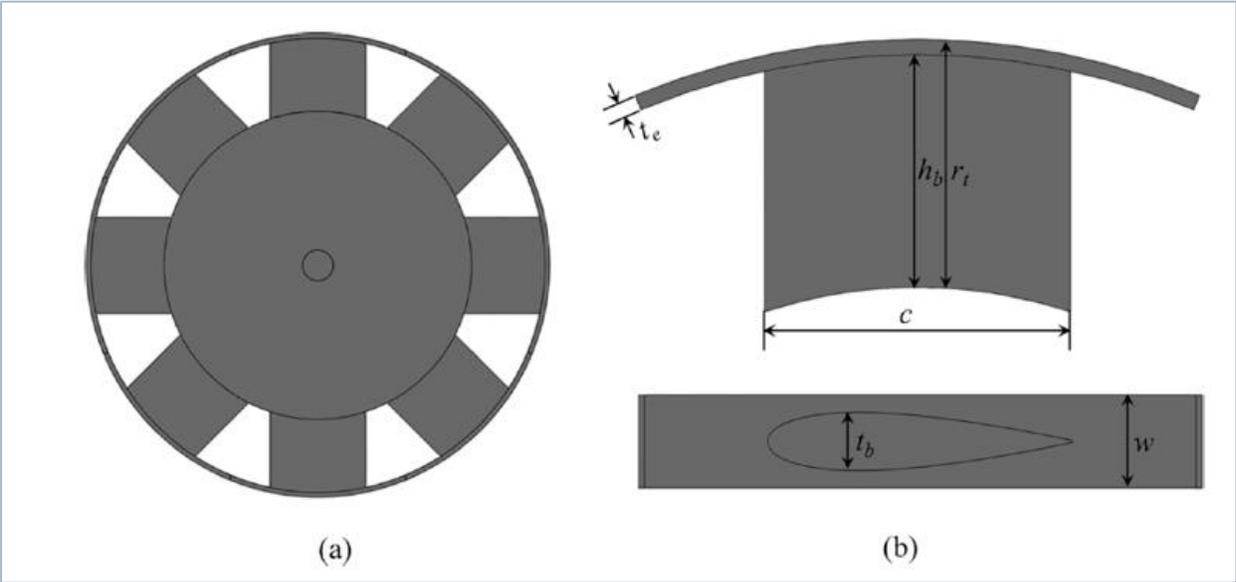


Figura 66: dimensionamiento importante de una turbina Well (Valdez, 2015).

Las principales características de esta turbina son:

- El radio de la turbina puede ser relativamente grande
- Alta velocidad de rotación (1000-2000 RPM).
- Eficiencias de punta instantáneas relativamente altas, cercanas a 0.7 -0.75.
- Son muy sensibles al efecto “Stalling”, que ocurre cuando la presión sobrepasa un límite crítico y la turbina comienza a disminuir la captura de potencia.
- Son relativamente fáciles de construir.

El rendimiento de la turbina Wells se ha venido modificando con el pasar de los años y se cambian las ecuaciones que rigen el modelo base, pero siempre se encuentran en los mismos términos a pesar de sus modificaciones y se caracteriza por cuatro parámetros adimensionales de la siguiente manera:

### **Coefficiente de Flujo**

Es el que relaciona la velocidad del flujo de aire por el conducto con la velocidad de rotación. Dicha relación viene dada por la siguiente expresión (Das, y otros, 2022):

$$\varphi = \frac{u}{r_t \cdot \omega_r}$$

Donde “u” es la velocidad del flujo de aire [m/s], “rt” es el radio de la turbina [m] y “wr” es la velocidad de rotación de la turbina donde según sea el estudio la velocidad de rotación se puede tomar en RPM o rad/s.

### **Coefficiente de Torque**

Coefficiente adimensional que representa el comportamiento de la turbina en cuanto a su par de torsión o torque basándose en el coeficiente de flujo que ingresa a la turbina. Su expresión en la siguiente (Das, y otros, 2022):

$$T^* = \frac{T}{\rho \cdot \omega_r^2 \cdot r_t^5}$$

Donde  $\rho$  es la densidad del aire,  $T^*$  es el coeficiente de torque y T es el torque.

### **Coefficiente de caída de presión**

Coefficiente adimensional que representa el comportamiento de la turbina en cuanto a la caída de presión en la turbina con respecto a su velocidad basándose en el coeficiente de flujo que ingresa a la turbina. Su expresión en la siguiente (Das, y otros, 2022):

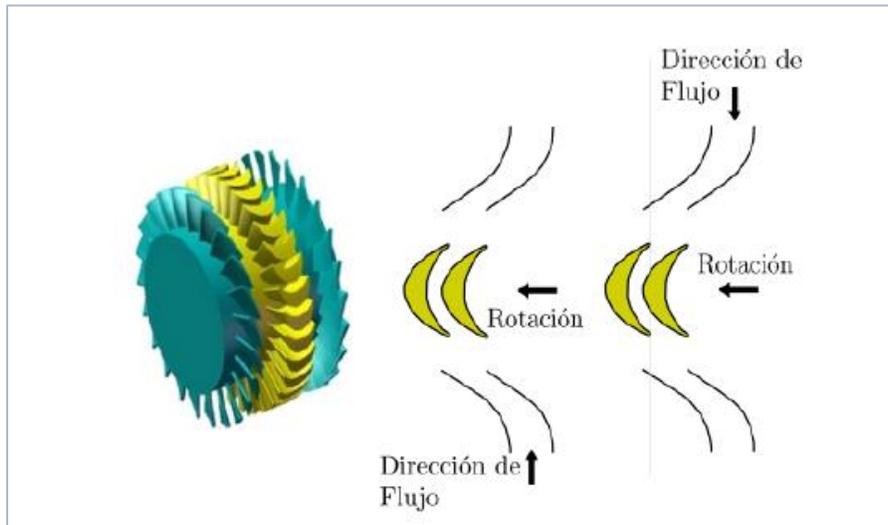
$$\Delta P_o^* = \frac{\Delta P_o}{\rho \cdot \omega_r^2 \cdot r_t^2}$$

Eficiencia

$$\eta = \frac{T \cdot \omega_r}{\Delta P_o \cdot Q}$$

## **TURBINAS DE IMPULSO**

La turbina de impulso es la alternativa más directa a la turbina Wells. Su rotor es idéntico al rotor de una turbina de impulso de flujo axial, utilizada como turbina de vapor de etapa simple. Para lograr que esta turbina funcione de manera bidireccional, se le instalan dos filas de alabes guía, ubicados simétricamente a ambos lados del rotor. Estas guías están ubicadas en espejo una respecto de la otra para lograr que el rotor se mueva siempre en la misma dirección sin importar el sentido del flujo de aire. Las turbinas de impulso se clasifican según la dirección del flujo de aire a través de él: axial y radial.



**Figura 67:** *esquema de una turbina de impulso (Falcao & Henriques, 2016, págs. 1391-1424)*

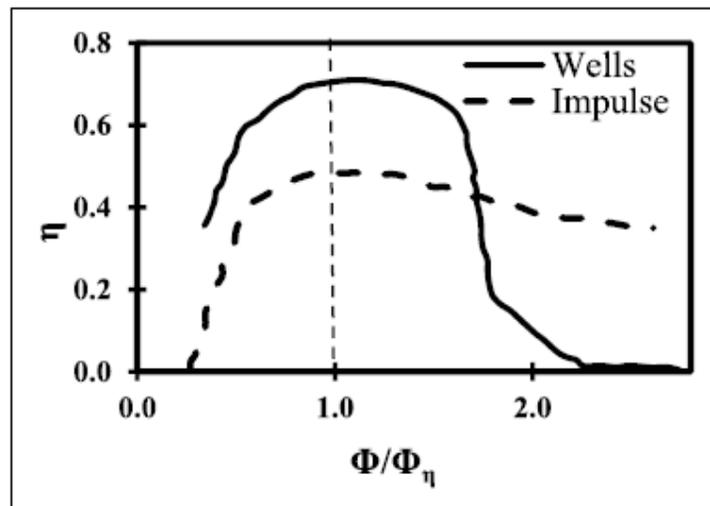
Esta forma constructiva le permite a la turbina mantener su eficiencia en un rango más amplio del coeficiente de flujo, además de que tiene un mejor comportamiento en el arranque. Su configuración hace que esta turbina sea la más lenta, con velocidades de rotación en un rango de 400 600 rpm. Esta turbina tiene los mismos parámetros adimensionales que la turbina well dependiendo de los estudios que se analicen para su optimización. Este tipo de turbina también se conoce como turbina autorrectificante. Además, las paletas guía se pueden clasificar como fijas, tipo de mecanismo de enlace y autocontrolado por paso.

Algunas de sus principales características son:

- Diámetro relativamente pequeño
- Velocidad rotacional relativamente baja
- Posee “guías mecánicas” las que son esenciales para su funcionamiento ya que redirigen el flujo de aire, éstas pueden ser del tipo fijas o variables.
- La eficiencia máxima que pueden alcanzar es cercana al 50%.

## Turbina Wells vs Turbina de Impulso

Una de las principales desventajas de la turbina de impulso es la pérdida aerodinámica. Esto sucede debido a la gran incidencia ángulo de flujo de aire cerca de la fila aguas abajo de la guía paletas (Estudio de Karthikeyan et al., 2013); esto es inevitable como es requerido para la simetría de las paletas guía. Una comparación de ambas turbinas indica que la turbina de impulso tiene un rango operativo más amplio que la turbina Wells como se ve en la figura 69. Sin embargo, tiene un costo de máxima eficiencia ya que el pico de la eficiencia de la turbina de impulso apenas supera el 50% aunque es más estable. Para la turbina Wells, la eficiencia máxima cae bruscamente cuando la parada se produce a un caudal más alto. El análisis de flujo bidimensional de Falcão y Gato (2012) \* indica que el cambio en el número de Reynolds tiene más impacto en la eficiencia de la turbina Wells en comparación a la eficiencia de la turbina de impulso. Todo depende de la forma física, estructura y datos que se generen para elegir el tipo de turbina que se desea ocupar que se adapte mejor a todos los parámetros posibles que integren el modelo.



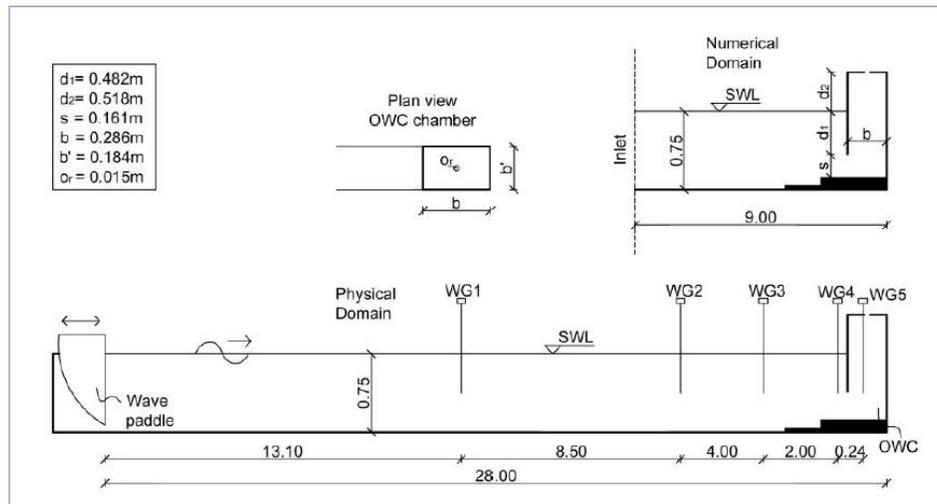
**Figura 68:** comparación de eficiencia entre pozos turbina y turbina de impulso para diferentes coeficientes de flujo,  $\Phi_{\eta}$  representa las condiciones de máxima eficiencia.

### **4.2.2 GENERADOR**

Habiendo analizado las turbinas en la sección 4.2.1, la velocidad de la turbina debe ser variable para obtener máximo aprovechamiento de energía. Por tanto, se puede utilizar un generador eléctrico de velocidad variable que entregue una frecuencia y tensión determinadas por la red eléctrica. Los generadores síncronos son una opción bastante aceptable, solo se necesita una etapa de control en la turbina que permita rotar a una velocidad específica. Para el presente trabajo solo se analizará la potencia que entrega la turbina al generador y dependiendo del tipo de generador se tomará su eficiencia teórica para obtener el potencial de generación de las olas a través de un sistema de captación OWC.

Para obtener los parámetros necesarios para la representación de un sistema a escala real se necesita la validación de un modelo numérico con respecto a un modelo físico donde se trate de reproducir los resultados obtenidos y de este modo calibrar los parámetros más importantes para pasar al siguiente nivel que es modelarlo a una base con datos reales para su análisis.

Es por ello que se tomó como parte inicial un experimento físico con validación numérica en el cual a través de un canal real se obtuvieron datos en los que luego se representaron y calibraron de forma numérica. Los aspectos más importantes en cuanto a las dimensiones del modelo se observan en la figura 70 en donde el canal principal para el modelo físico tiene una longitud de 28 metros, para el modelo numérico establecieron que solo 9 metros eran suficientes para tener resultados bastante aceptables (Vyzikas, 2016).

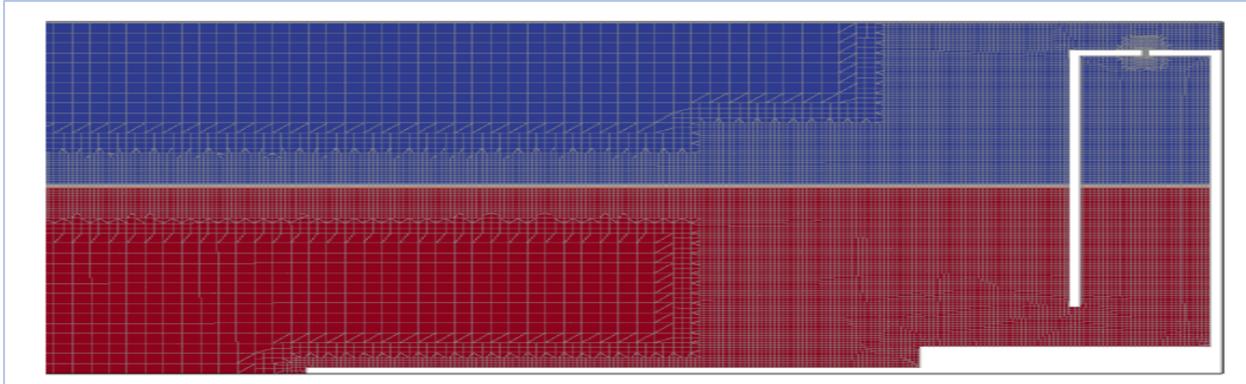


**Figura 69:** dimensiones del canal para el oleaje y cámara de captación en modelo físico y numérico. Las dimensiones están en metros.

Las alturas de la cámara de captación también están especificados a una altura entre el nivel del mar y el fondo de 0.75 metros. Para este modelo usaron el programa OpenFOAM en el que el marco de referencia principal es el comportamiento de un OWC. Así mismo se utiliza el modelo matemático de Stokes en su segundo orden para la generación regular de las olas, permitiendo el cálculo de la posición de la superficie libre del agua y los componentes de velocidad en el límite de entrada en los diferentes pasos de tiempo. Los datos más importantes para este experimento se describen en la tabla 11 (Vyzikas, 2016).

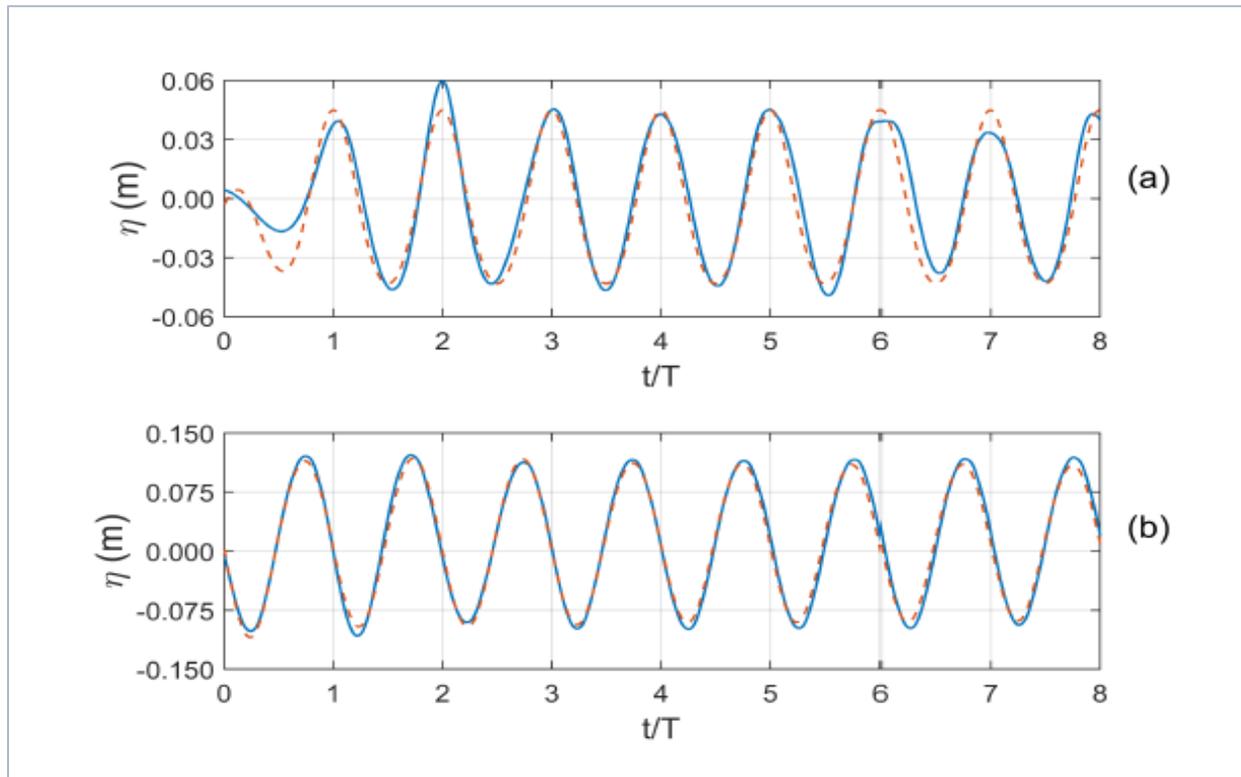
DATOS	VALORES
Modelo de turbulencia	K-epsilon $C_\mu=0.09$ ; $C_1=1.44$ ; $C_2=1.92$ ; $\sigma=1.30$
Altura de la ola	$H=0.088\text{m}$
Periodo de la ola	$T=2.15\text{s}$
Longitud de onda	$\lambda=5.20\text{m}$
Mallado	1.000.000 elementos
Profundidad	$h=0.75\text{m}$
Diámetro de la boquilla	$D=0.015\text{m}$
Densidad del agua	$\rho=998.2\text{ Kg/m}^3$
Gravedad	$g=9.81\text{ m/s}^2$
Teoría	Stokes 2do Orden
Condición	Estado de mar intermedio/poco profundo

**Tabla 11:** datos para simulación.



**Figura 70:** sección transversal vertical de la malla en la cámara de captación del OWC. Color rojo es agua y color azul es aire (Vyzikas, 2016).

Para la validación se tomaron en cuenta las elevaciones tanto de la ola como dentro de la cámara de captación obteniendo los resultados como se muestran en la figura 72. Se determinaron las características de las olas utilizadas como entrada para el modelo numérico extraído de resultados experimentales mediante análisis de elevación de la superficie registrada en una ventana de tiempo después de la aceleración de las olas y antes de la cámara para evitar corrientes de reflexión obteniendo los resultados en la figura 72 (a). La comparación entre los resultados experimentales y numéricos se hacen presente dentro de la cámara de captación en la figura 72 (b) en donde si bien hay algunos pequeños errores al principio está bastante similar.



**Figura 71:** serie temporal de elevación. (a) Aguas arriba de la cámara y (b) dentro de la cámara (Vyzikas, 2016).

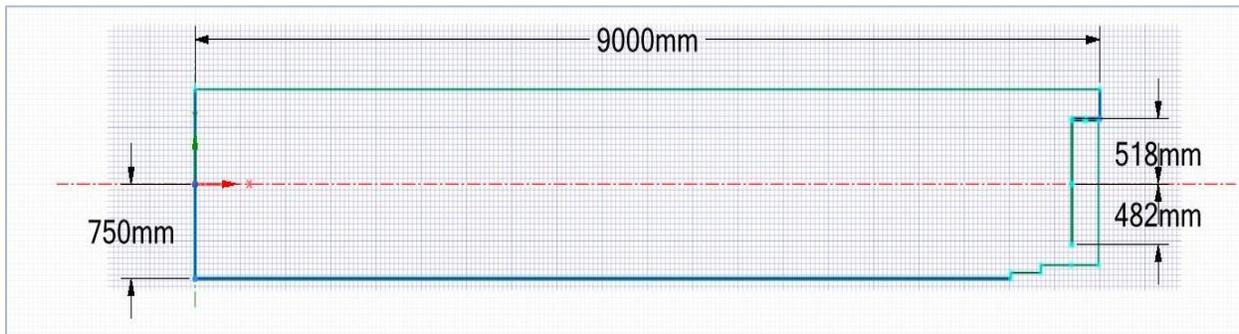
La variable utilizada para validar el modelo fue la elevación de la columna de agua en la cámara del OWC a lo largo del tiempo con una duración de 8 periodos, 6 ondas desarrolladas completamente en un estado pseudo-estacionario y 17.2 segundos. Para este experimento se usó una computadora con procesador Intel Xeon E5-2650 con 8 núcleos en paralelo en OpenFOAM 2.1.1 en un tiempo de 100 horas para una simulación de 30 segundos.

#### 4.3.0 CALIBRACION DEL MODELO NUMERICO CON VALIDACION FISICA EN ANSYS.

A partir de los resultados en la sección anterior (4.3.0) se hará una réplica del sistema con los mismos valores de la tabla 8 a excepción del mallado ya que ANSYS en su versión para estudiantes tiene limitantes como se vio en la tabla 7. Se hará una comparación con los resultados con respecto a la elevación de la columna de agua dentro de la cámara de captación que es el parámetro utilizado en el modelo físico-numérico para su validación.

##### 4.3.1 GEOMETRIA

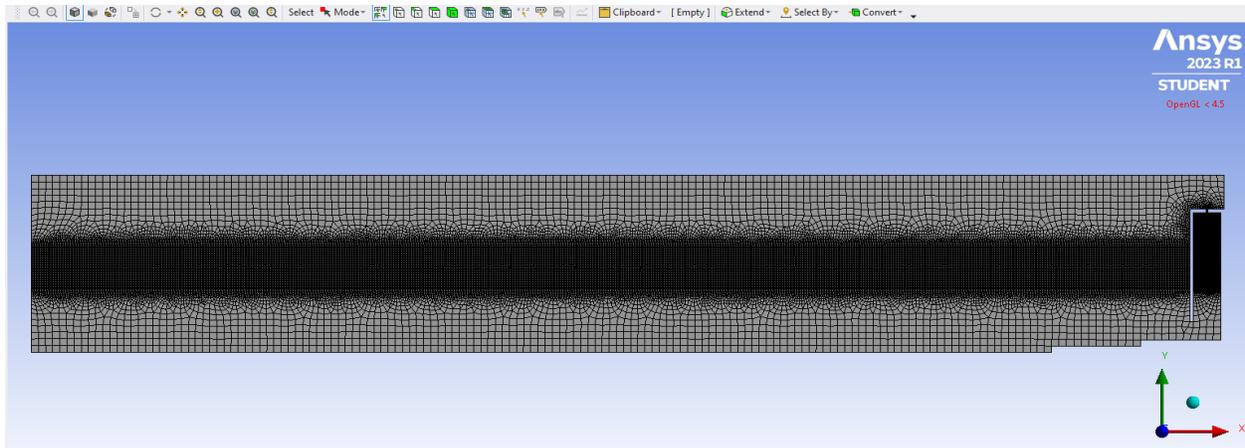
En ANSYS para la creación de la geometría se hace en ANSYS Workbench en la cual tiene un sistema tipo CAD para elaborar el diseño, tiene los mismos detalles que el diseño original con la única diferencia que en este caso al no contar con el dato del ancho de la pared frontal se le asigno uno igual al orificio de la boquilla de salida de aire de 15 mm. El modelo se desarrolla en 2 dimensiones (X, Y).



**Figura 72:** geometría del diseño original para la validación numérico-físico.

##### 4.3.2 4.4.2 MALLADO

Para esta parte en ANSYS Workbench está la sección de Meshing donde se generará la malla y se utilizó un mallado tipo Sizing rectangular que es el más adecuado ya que la geometría es rectangular y para no elevar demasiado el número de celdas solo se refino las partes más importantes como se observa en la figura 77.



**Figura 73:** mallado para el sistema numérico para calibración.

Todo el diseño tiene un mallado de 0.06 metros. Las zonas de interés donde se hará un mejor refinamiento de malla son:

- 1) Zona a nivel del mar: Esta parte es lo largo del canal donde se generan y transportan las olas, es importante ya que en esta zona está el límite agua-aire. Tiene un mallado refinamiento de 0.01 metros.
- 2) Dentro de la cámara: Esta parte es la más importante donde el modelo tiene validación en la que la columna de agua y columna de aire interactúan. Esta parte tiene un refinamiento de 0.006 metros.
- 3) Boquilla de salida: Es la parte donde sale e ingresa el caudal de aire con diámetro de 15 milímetros. Tiene un refinamiento de 0.002 metros.

Todo esto es para minimizar el impacto tanto de los límites que permite el programa de mallado como para el tiempo de simulación ya que entre más mallado más costo computacional y esa es una de las limitantes más importantes ya que la versión del programa solo permite utilizar un máximo de 2 núcleos del procesador. Al final la malla tiene 59481 nodos y 59298 elementos.

### **4.3.3 MODELO Y CONFIGURACION EN ANSYS FLUENT**

Definiendo los parámetros definidos en la tabla 11 vamos a ingresarlos a ANSYS FLUENT. En la página principal de tareas definimos la gravedad y el tipo de simulación que para nuestro caso es transitorio. En el apartado de modelos a simular, figura 75, elegimos multifásico VOF abriendo los submodelos de OCF y OCW BC y un coeficiente de tensión superficial en la pestaña de Phase Interacción de 0.072 que es la del agua. Al mismo tiempo configuraremos el modelo de turbulencia ya definido en la validación física–numérica como se muestra en la figura 76.

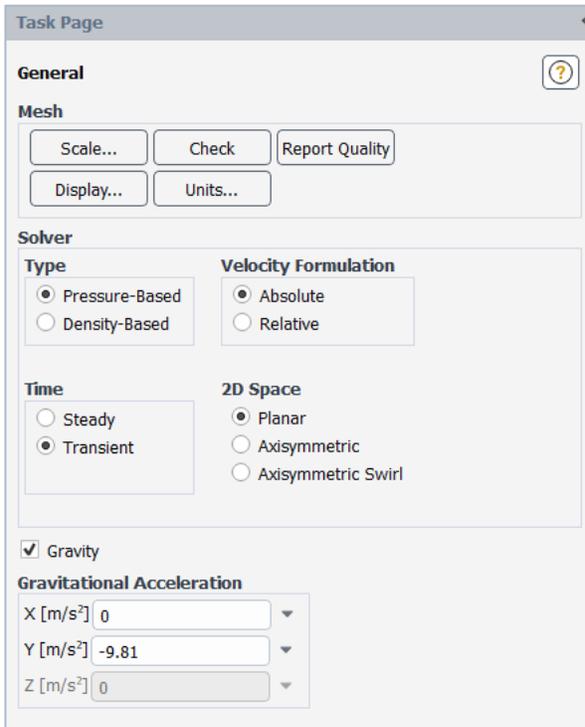


Figura 76: página de tareas.

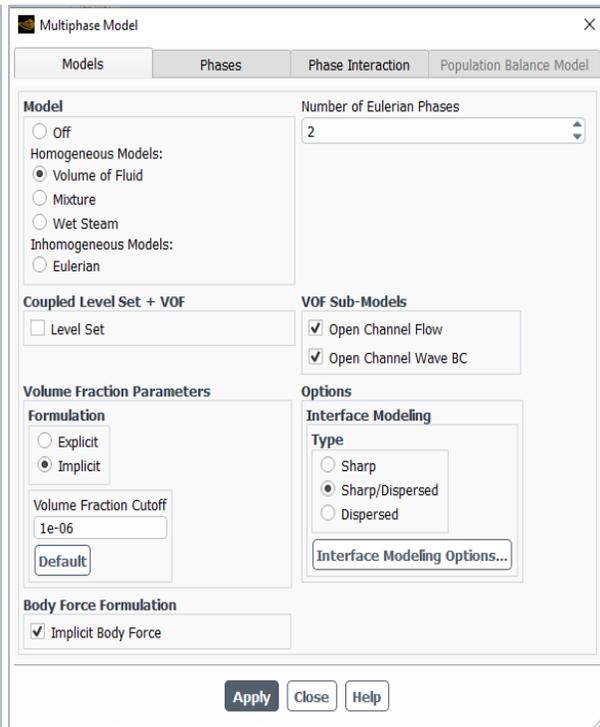


Figura 75: ventana de modelos multifásicos.

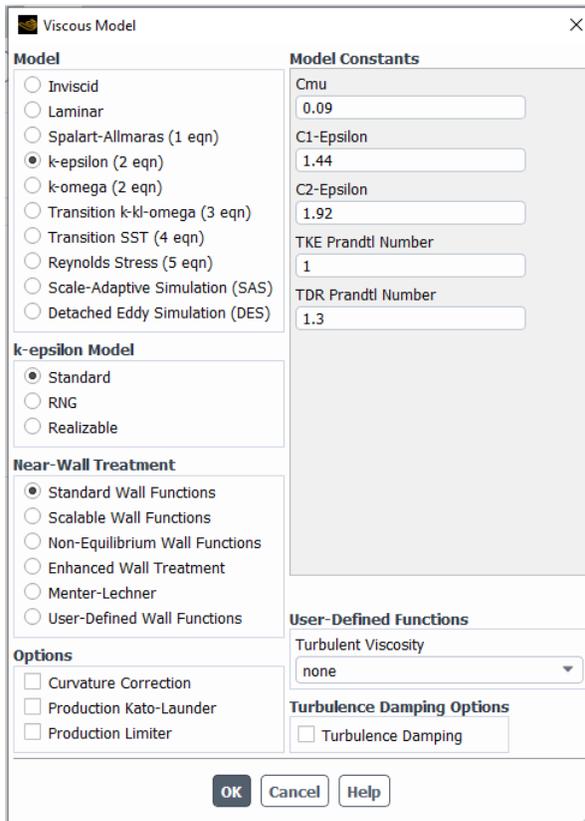


Figura 77: modelo de turbulencia.

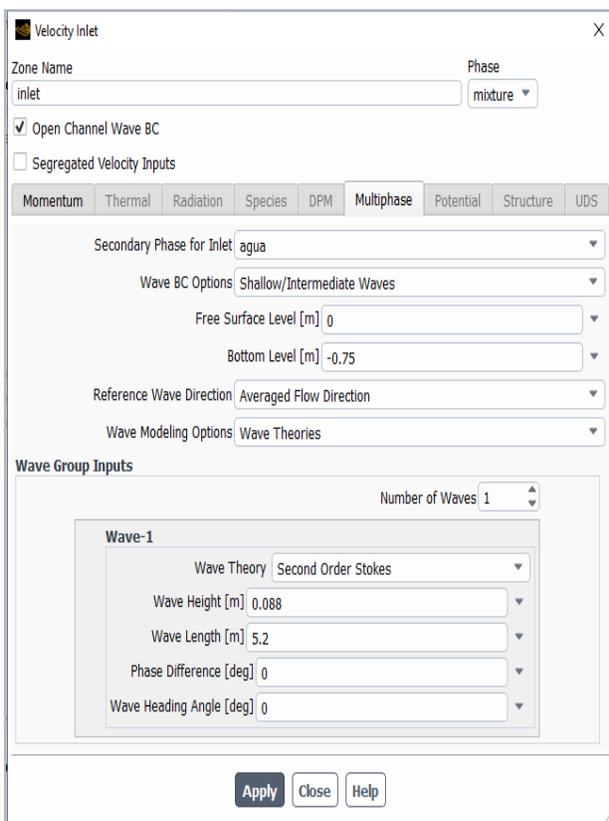


Figura 74: ingresando parámetros de diseño y olas en la condición de entrada de las olas.

Luego ingresamos las condiciones de frontera para nuestro modelo la cámara, línea de profundidad y la zona derecha serán paredes fijas, el movimiento será en el lado izquierdo en INLET que es donde serán generadas las olas (figura 77).

Con la siguiente línea de comando podemos dar una aprobación rápida del modelo a utilizar, se ingresa en la consola del programa. Los resultados se muestran en la figura 78.

```

Checks for selected wave theory within wave breaking and stability limit
-----
Relative height check
H/h = 0.1173 , Min : 0.0000 , Max : 0.5000
Relative height check : successful

Wave Steepness check
H/L = 0.0169 , Min : 0.0000 , Max : 0.0432
Wave steepness check : successful

Ursell Number check
Ur = 5.6295 , Min : 0.0000 , Max : 25.0000
Ursell number check : successful

Wave regime check
h/L = 0.1444 , Min : 0.0600 , Max : 10000.0000
Wave regime check : successful

Summary
-----
Checks : passed
Selected wave theory is appropriate for application.
    
```

**Figura 78:** validación de los parámetros de la ola y teoría que se aplica.

La selección de la teoría de olas ha sido validada por el programa por el programa, solo queda definir el método de solución y los factores de relajación que son por defecto que trae el programa ANSYS.

Solution Methods	Solution Controls
<b>Pressure-Velocity Coupling</b> Scheme: PISO Skewness Correction: 1 Neighbor Correction: 1 <input checked="" type="checkbox"/> Skewness-Neighbor Coupling	<b>Under-Relaxation Factors</b> Pressure: 0.3 Density: 1 Body Forces: 1 Momentum: 0.7 Volume Fraction: 0.5 Turbulent Kinetic Energy: 0.8 Turbulent Dissipation Rate: 0.8 Turbulent Viscosity: 1
<b>Spatial Discretization</b> Gradient: Least Squares Cell Based Pressure: PRESTO! Momentum: Second Order Upwind Volume Fraction: Compressive Turbulent Kinetic Energy: First Order Upwind Turbulent Dissipation Rate: First Order Upwind	

**Figura 79:** métodos de solución y factores de relajación.

Ahora solo queda inicializar y establecer el tiempo de simulación, que ya está definido para 20 segundos con pasos de tiempo de 0.02 segundos. Originalmente el tiempo de simulación en la validación física-numérica es de 17.2 segundos, pero no toman en cuenta el tiempo que la primera ola se tarda en chocar con la pared frontal por lo que se decidió hacerlo con 20 segundos para simular al menos 6 periodos de los 8 que tiene el ensayo.

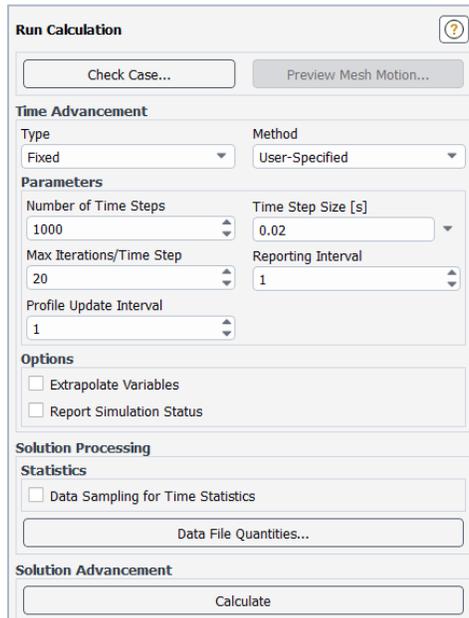


Figura 80: ajustes de tiempo para la simulación.

#### 4.3.4 RESULTADOS

El dato de interés en lo que se fundamenta la validación es en la elevación de la columna de agua dentro de la cámara del OWC, para comprender el fenómeno en el tiempo cero el oleaje entra por la zona de la izquierda y se desarrolla a lo largo del canal con una velocidad o celeridad de  $L/T$  de 2.42m/s. En este punto no hay movimiento de la cámara y entre 3 y 4 segundos o en  $t/T$  de 1.2 la primera ola alcanza la cámara impactando en la pared frontal.

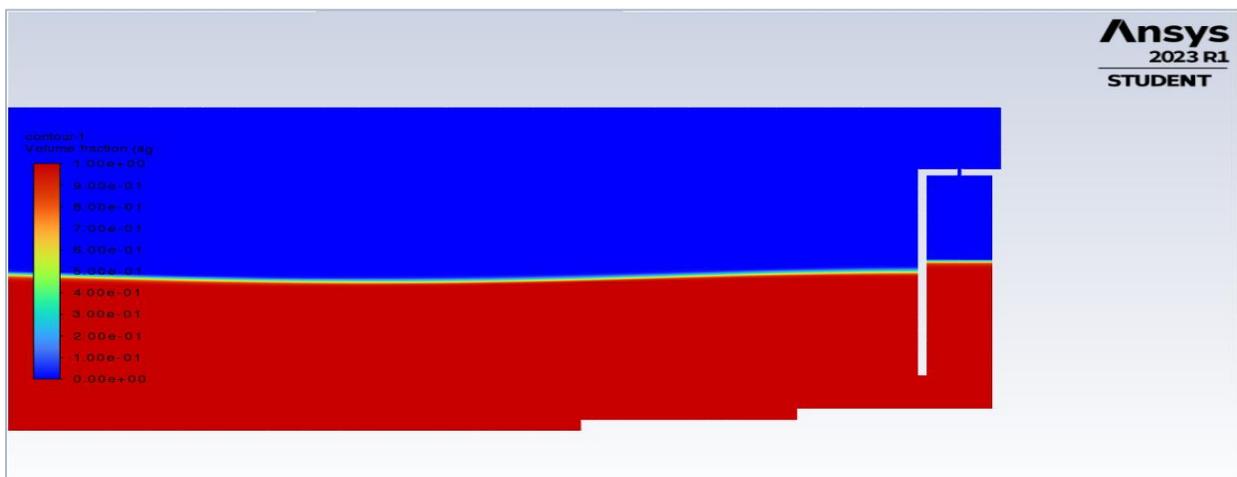


Figura 81:  $t/T$  de 3.2

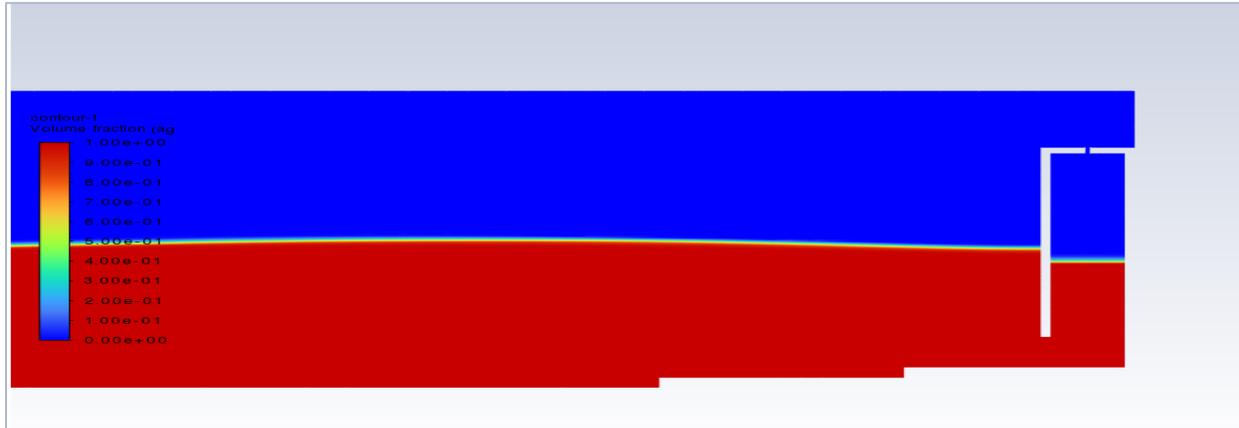


Figura 82:  $t/T$  de 3.8

Para el tiempo  $t/T$  de 3.2 aproximadamente la columna de agua alcanza su primer máximo y en el tiempo  $t/T$  de 3.8 alcanza su primer mínimo. Finalmente, los resultados de la elevación dentro de la cámara se observan en la figura 83.

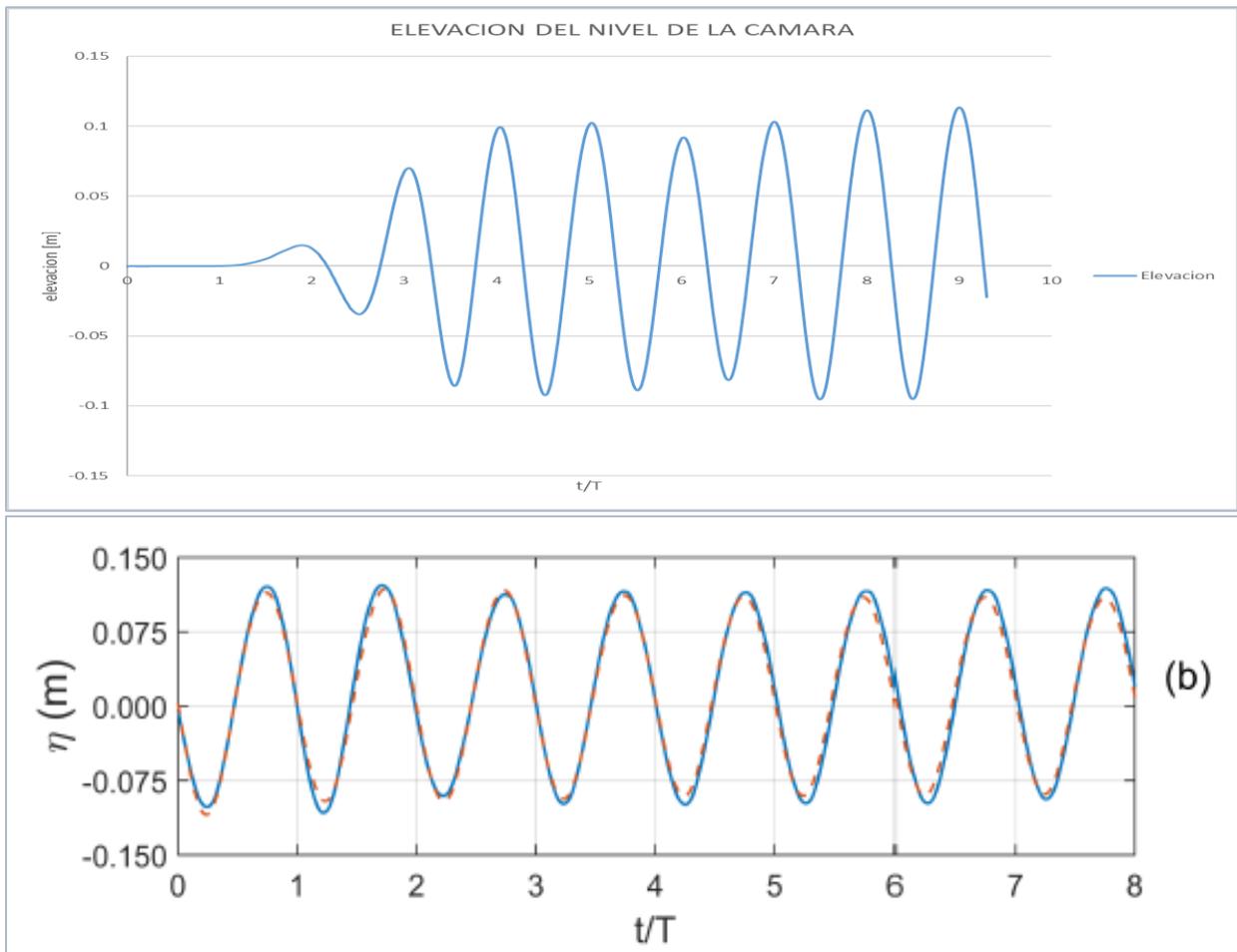


Figura 83: resultados y comparación del modelo en ANSYS y OpenFOAM.

Los resultados en ANSYS en comparación con OPENFOAM se muestra en la figura 84 donde a pesar de tener ciertos errores busca mantener el nivel entre -0.1 a 0.1 metros dentro de la cámara como se ve en los resultados del modelo numérico-físico original. Esto se debe a que en el documento original no se dan datos que pueden ser importantes como la densidad del agua, la viscosidad y principalmente el mallado ya que estamos hablando de una malla con alrededor de un millón de elementos contra una de alrededor de 50 mil elementos. Hay que destacar que en el documento original no se percibe el tiempo en el que la ola se transporta hasta chocar con la pared frontal por lo que la onda esta recortada.

**CAPÍTULO CINCO**  
MODELO NUMÉRICO DE UN OWC UTILIZANDO DATOS REALES DE  
OLEAJE EN LITORAL SALVADOREÑO

## INTRODUCCIÓN.

Este capítulo se enfocará en utilizar un modelo para estimar el potencial de generación de energía eléctrica basado en un dispositivo OWC como lo hemos venido tratando en el capítulo 4. Se utilizó el mismo modelo dentro de Fluent el cual se desarrolló y calibró con un modelo de referencia con validación física en la sección 4.4.0. El modelo se configuró para simular las condiciones de una instalación OWC específicamente en la playa Santa María Mizata, Kilómetro 87.5, carretera El Litoral, departamento La Libertad, de donde se obtuvieron los datos.

### 5.1.0 MODELO NUMERICO DE UNA PLANTA OWC EN EL LITERAL SALVADOREÑO

En esta sección se realizará el modelo utilizado en la etapa anterior de calibración para simular el comportamiento del oleaje real tomado de la tesis de ingeniería mecánica. Nuevamente se utilizará el programa ANSYS FLUENT y se configurará ahora para un dispositivo OWC en el sitio de estudio.

#### 5.1.1 DATOS DEL OLEAJE A UTILIZAR PARA GEOMETRIA DEL CANAL DE OLAS

Tomando de base los datos proporcionados por la tesis de ingeniería mecánica vamos a tomar los datos más característicos para realizar la simulación como se muestra en la tabla 12 en el que tomaremos el promedio de los eventos ocurridos en los resultados del estudio.

DATOS DE OLEAJE	
Hs	Tp
0.77	12.98

Tabla 12: datos de oleaje para la simulación.

Para ingresar los datos a ANSYS FLUENT necesitamos la longitud de onda de la ola la cual utilizamos la ecuación 4. La altura  $h$  del sistema se determina para hacer valer el valor adimensional de Ursell utilizando la ecuación que indica la no linealidad de extensas ondas de superficie de gravedad en una capa de fluido. En la validación de la sección 4.4.0 el número de Ursell fue de 5.63 (figura 82 de la consola), para nuestro caso contamos con Hs y Tp por lo que se pretende buscar un valor cercano a la validación numérica llegando a un valor de 5.78 significando un error del 2.66% dejando una altura de fondo de 14 metros.

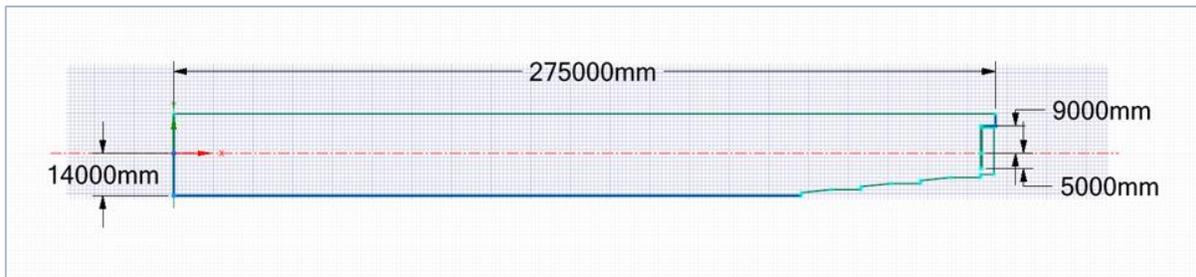
$$L = \frac{g \cdot T^2}{2\pi} \cdot \tanh\left(\frac{2\pi \cdot h}{L}\right) \quad (Ec. 27)$$

$$\lambda = \frac{9.81 \cdot 12.98^2}{2\pi} \cdot \tanh\left(\frac{2\pi \cdot 14}{L}\right) = 143.604m \quad (Ec. 28)$$

$$U = \frac{Hs \cdot L^2}{h^3} = \frac{0.77 \cdot 143.604^2}{14^3} = 5.78 \quad (Ec. 29)$$

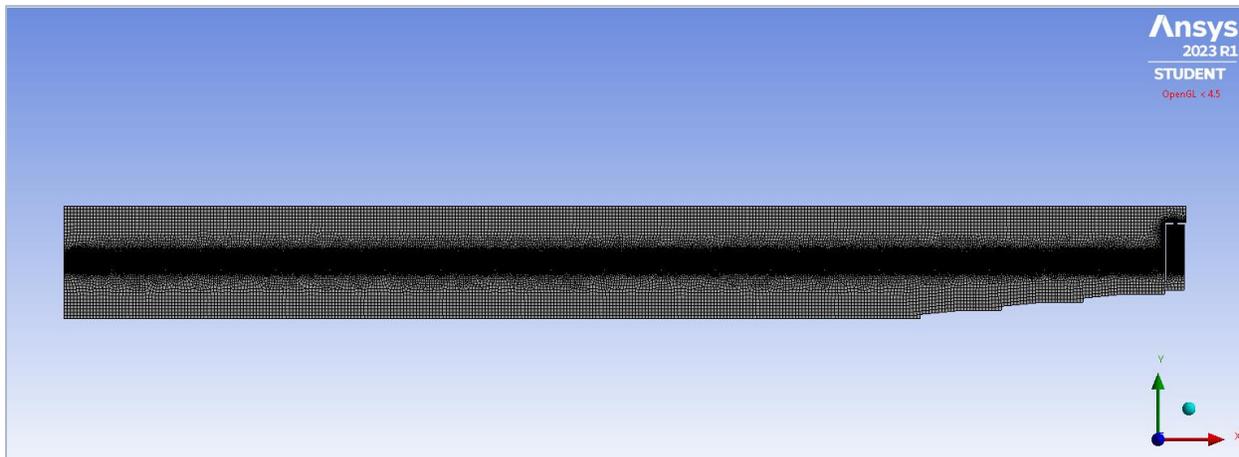
Teniendo un número de Ursell similar podemos afirmar que existe una similitud entre el frente de ondas de la validación numérica y el frente de ondas de los parámetros del presente trabajo que son datos que están en el rango de mayor frecuencia en los 2 meses que se recolectaron datos en la investigación de ingeniería mecánica.

El programa ANSYS FLUENT tiene un límite de 25 para el valor de Ursell, pero el aumentar el valor arriba de 10, los datos no son 100% fiables en los resultados. Además, se está considerando una resolución intermedia para disminuir el costo computacional hasta donde sea posible, recordemos que se está utilizando una versión de estudiante y se tiene límites tanto de malla como de análisis. Después de estos pequeños cálculos se procede a la creación del diseño como se muestra en la figura 84.



**Figura 84:** diseño del canal de olas con la estructura OWC. ANSYS Workbench.

El diseño debe ser tal que la onda se tiene que desarrollar en todo su recorrido y ser capaz de interactuar con una segunda ola, de esta forma el canal tiene casi el doble de la longitud de onda. El diámetro del conducto es de 0.75m que es donde el aire sale y entra de la cámara hacia la turbina.



**Figura 85:** mallado del canal de olas.

Para esta ocasión el mallado tiene un tamaño de celda de 0.8m, la zona del nivel del mar en las que están interactuando el agua y aire tiene un tamaño de celda de 0.2m, la zona dentro de la cámara de 0.06m. y para los resultados que más se necesita refinamiento en el la salida de aire de la boquilla y tiene un tamaño de celda de 0.01m.

Los datos más importantes que se ingresan para la simulación se resumen en la tabla 13.

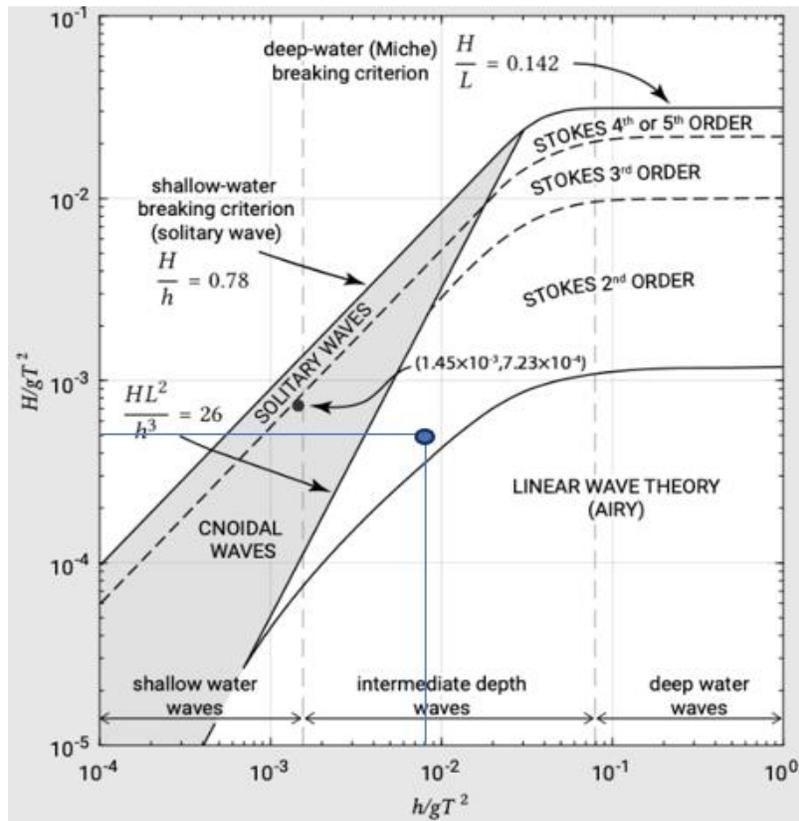
DATOS	VALORES
Altura de la ola	Hs=0.77m
Periodo de la ola	Tp=12.98s
Longitud de onda	λ=143.604m
Mallado	71740 nodos y 71471 elementos
Profundidad	h=14m
Densidad del agua	ρ=998.2 Kg/m3
Gravedad	g=9.81 m/s2
Espacio	2D (X, Y)
Presión	Nivel del mar

**Tabla 13:** datos importantes para simulación.

Para determinar la teoría nos basaremos en el gráfico de Le Mehaute en el que están involucradas las variables de gravedad, altura de la ola, periodo y altura de fondo. Resolviendo para graficar:

$$\frac{H}{g \cdot T^2} = \frac{0.77}{9.81 \cdot 12.98^2} = 0.00046 \cong 0.0005 \text{ (Ec. 30)}$$

$$\frac{h}{g \cdot T^2} = \frac{14}{9.81 \cdot 12.98^2} = 0.0084 \cong 0.008 \text{ (Ec. 31)}$$



**Figura 86:** Grafico de Le Mehaute.

Donde se intersecan las líneas indican que la teoría que más se adecua para nuestros datos es la segunda orden de Stokes. En la tabla 14 están los diferentes modelos a configurar en ANSYS para la simulación.

DATOS	VALORES
Teoría	Stokes 2do Orden
Condición	Intermediate/Shallow
Modelo	VOF
Sub modelos	OCF y OCW BC
Modelo de turbulencia	K-epsilon C <sub>μ</sub> =0.09; C1=1.44; C2=1.92; σ=1.30
Método de solución	PISO

**Tabla 14:** modelos de configuración.

Utilizando la ecuación 1 del número de courant (C=1) para determinar los pasos de tiempo tenemos:

$$C = \frac{L}{T} = 11.06 \text{ m/s}$$

$$C = \frac{\Delta t \cdot v}{\Delta x} \rightarrow \Delta t = \frac{C \cdot \Delta x}{v} = \frac{1 \cdot 0.2}{11.06} = 0.018 \cong 0.02$$

A partir de este dato quiere decir que para una simulación de 180 segundos se necesitan 9000 pasos de tiempo.

### 5.2.0 RESULTADOS DE LA SIMULACION

Para los resultados finales se eligió una turbina tipo perfil NACA0015, las características principales tanto del sistema como de la turbina están en la tabla 15.

PARAMETRO	SIMBOLO	VALOR
Perfil		NACA0015
Densidad del aire	ρ	1.19 Kg/m <sup>3</sup>
Anchura del alabe	b	0.2m
Longitud del alabe	lt	0.125m
Numero de alabes	n	8
Radio de la turbina	rt	0.3m
Velocidad	v	2000 RPM máx.

**Tabla 15:** características de turbina NACA0015.

Como dato para el generador síncrono se utilizará uno de 2 polos por lo que la velocidad de rotación sería de 1800 RPM o 188.5 rad/s. Esto con el fin de obtener de manera teórica el potencial que se generaría. Los resultados de la velocidad del sistema se presentan en el grafico 90 donde se obtiene un calor de 4.5m/s. Cabe destacar que no se puede utilizar los máximos y mínimos de la gráfica de velocidad ya que en los picos de velocidad no entra en el rango de operación para la turbina como se muestra en la figura 87.

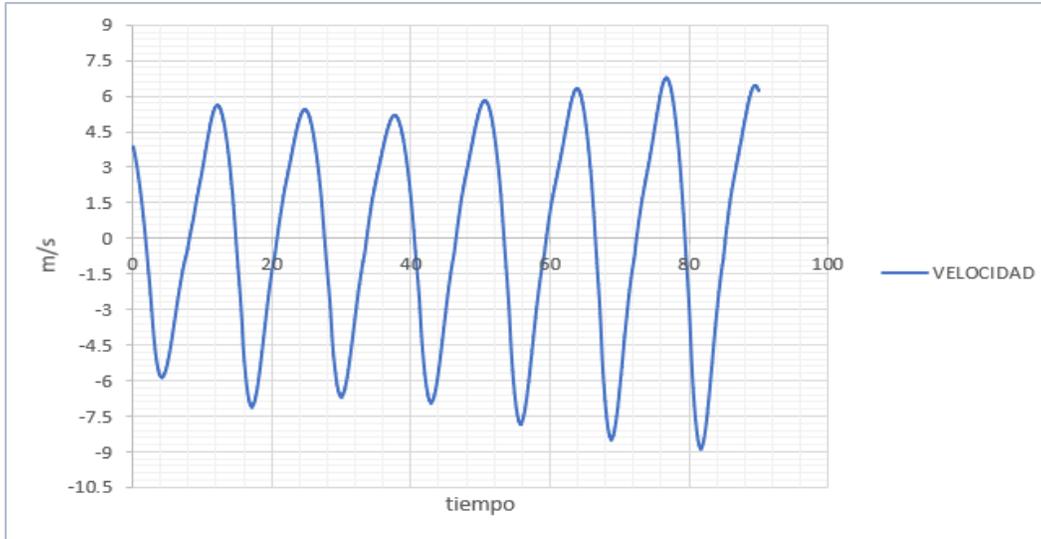


Figura 87: resultados de velocidad del sistema.

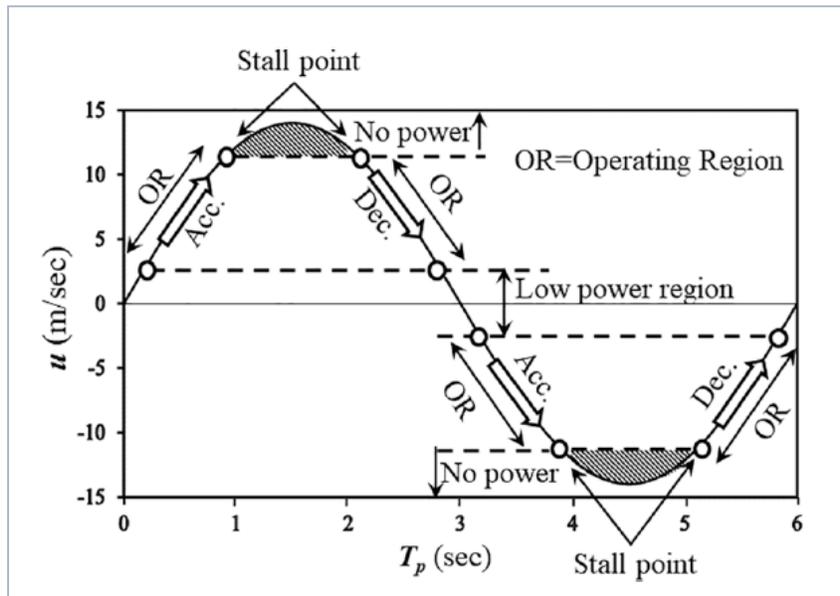


Figura 88: rango de operación de la gráfica de velocidad (Das, y otros, 2022).

El rendimiento de la turbina Wells se caracteriza por cuatro parámetros adimensionales de la siguiente manera:

Coefficiente de Flujo

$$\varphi = \frac{u}{r_t \cdot \omega_r} \quad (\text{Ec. 32})$$

$$\varphi = \frac{4.5}{0.375 \cdot 188.5} = 0.06$$

Para poder obtener los coeficientes necesarios para el cálculo final será en base a gráficos obtenido en laboratorio especialmente el de Currant y Gato en 1997 (Hamed, Nawar , Mohamed, & Hamed, 2017).

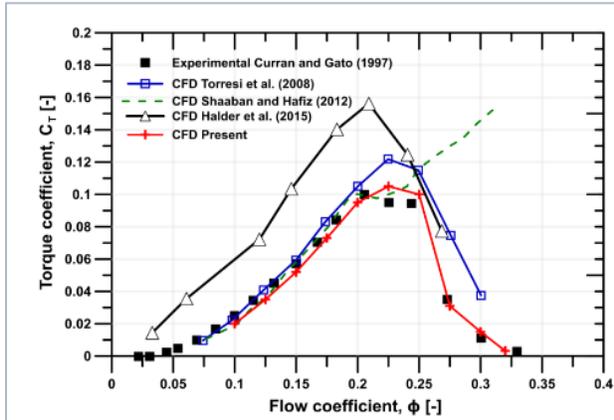


Figura 90: diversos resultados para la obtención del coeficiente de torque según coeficiente de flujo.

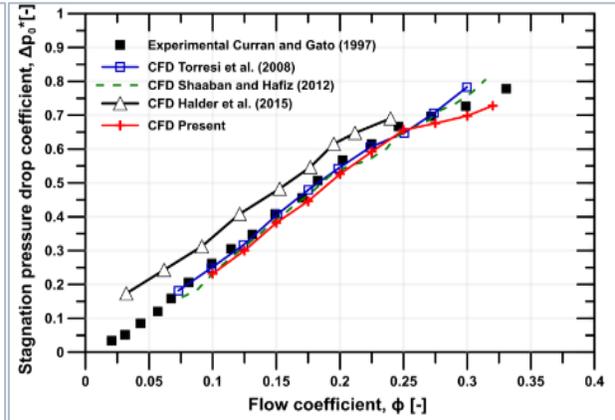


Figura 89: diversos resultados para la obtención del coeficiente de presión según coeficiente de flujo.

Coeficiente de Flujo	Coeficiente de Torque	Coeficiente de caída de Presión
0.06	0.01	0.11

Con todos estos coeficientes ya podremos calcular la eficiencia de la turbina y la potencia que entrega al generador. Como se puede observar al no contar con la base de datos de las gráficas se necesita estimar los coeficientes por lo que llevar cierto porcentaje de error.

Coeficiente de Torque

Tomando de base el coeficiente de flujo, el coeficiente de torque se obtiene de la gráfica 92.

$$Ct^* = \frac{T}{\rho \cdot \omega_r^2 \cdot r_t^5} \rightarrow T = 3.135 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Coeficiente de caída de presión

$$\Delta P_o^* = \frac{\Delta P_o}{\rho \cdot \omega_r^2 \cdot r_t^2} \rightarrow \Delta P_o = 654.071 \text{ Pa}$$

Caudal de aire Volumétrico

$$Q = v * A = 1.988 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (\text{Ec. 33})$$

Eficiencia

$$\eta = \frac{T \cdot \omega_r}{\Delta P_o \cdot Q} = 45.45\%$$

Tal como se mencionó en la sección 4.2.1 las turbinas Wells tiene una ventaja en la eficiencia a pesar de tener bajos valores de coeficiente de flujo. La turbina entrega una potencia mecánica al generador de  $T \cdot w$  de 591W que es un valor muy bajo considerando otras centrales undimotrices.

Por lo tanto, para una central OWC para las condiciones planteadas el potencial de generación capaz de entregar en el modelo de este trabajo y asumiendo un generador síncrono de 2 polos con velocidad rotacional de 1800RPM o 188.5 rad/s y eficiencia teórica de 0.9 es:

$$P = T \cdot \omega_r \cdot \eta_g \cong 532W$$

Considerando la central Mutriku en España en la que tiene 16 turbogeneradoras operando en un frente de aproximadamente 80 metros quedaría la potencia total de 8.5kW que se estarían generando con el modelo presentado en este trabajo.

## CONCLUSIONES

- Las centrales undimotrices a pesar de tener diversidad de sistemas de captación se mantienen en constante desarrollo. De todas las opciones que existen actualmente el sistema OWC es el que tiene más profundidad y de relativamente fácil desarrollo con todas las ventajas que conlleva como su armado, su mantenimiento y un alto número de optimización sin perder de vista el esquema base. Como se observó en este trabajo las 3 partes que se unen para formar la central (Cámara, turbina y generador) pueden estudiarse por separado haciendo que su análisis según el planteamiento que se desea pueda ser estudiado de tal forma que las tres partes se unan sin ningún problema.
- El potencial de generación basado en el modelo presentado en este trabajo puede ser no adecuado para los datos de oleaje presentado por la tesis de Ingeniería Mecánica, estamos hablando de un modelo que tiene validación física y numérica, pero eso no significa que sea el que se necesite. Como vimos a través del coeficiente de Ursell se hizo el sistema lo más parecido posible al modelo original tanto que solo es un error del 2.66%. Debido a que el país no cuenta con un sistema de generación de olas para laboratorio se tomó como base la propuesta en la sección 4.3.0 y desarrollándolo a escala real como se observó en el capítulo 5 se obtuvieron resultados de velocidad cuando la cámara estaba en estado estable, cuando el tren de olas impacta y se obtienen los valores máximos de elevación en la cámara, tomando un valor representativo de 4.5 m/s. Es de tener en cuenta que el modelo original tiene una abertura de 2 metros para que ingrese la velocidad con la que vienen empujando las olas cuando impactan con la pared frontal y en base a otras estructuras diseñadas actualmente tienen aberturas entre 4 y 6 metros. Aun así, se obtuvo un valor de potencial de generación que la energía de olas entrega al sistema de 532W lo cual nuevamente es muy bajo comparado con el costo-beneficio y asumiendo una central completa como Mutriku en España de 16 turbogeneradores una potencia total de 8.5kW que si bien es cierto no es despreciable, pero asumiendo los costos no es apropiado el modelo que esta propuesto en este trabajo.
- Para obtener mejores resultados en cuanto a la potencia de generación, aparte de un cambio en el modelo, no que decir que se necesite un nuevo sistema que permita aumentar significativamente la velocidad en la boquilla de entrada en la turbina. En la figura 90 sobre el coeficiente de torque, que es el que está relacionado directamente con la potencia de salida de la turbina, si aumentamos la velocidad, que es directamente proporcional al coeficiente de flujo de aire, aumentara también el coeficiente y en la figura 92 observamos que para un flujo de aproximadamente 0.2 llega a un pico de rendimiento en el que a partir de ahí empieza a bajar, esto se debe a que la relación entre la velocidad de flujo de aire y la velocidad de rotación de la turbina superan el valor umbral.

## RECOMENDACIONES

Para análisis posteriores y continuación del caso de estudio a modo de recomendación, se propone el análisis los siguientes temas:

- Crear un sistema OWC que se adapte a las condiciones de los datos sobre el oleaje en El Salvador. Tanto la cámara como turbina deber tener los puntos de operación más estables posibles para la generación de energía eléctrica.
- Comprendiendo cómo funciona una OWC el siguiente paso es crear un diseño de control para la turbina para que tenga una velocidad angular ideal para que se puede conectar al generador y de esta forma integrarlo al turbogenerador para finalmente interconectarlo a la red.

## BIBLIOGRAFIA

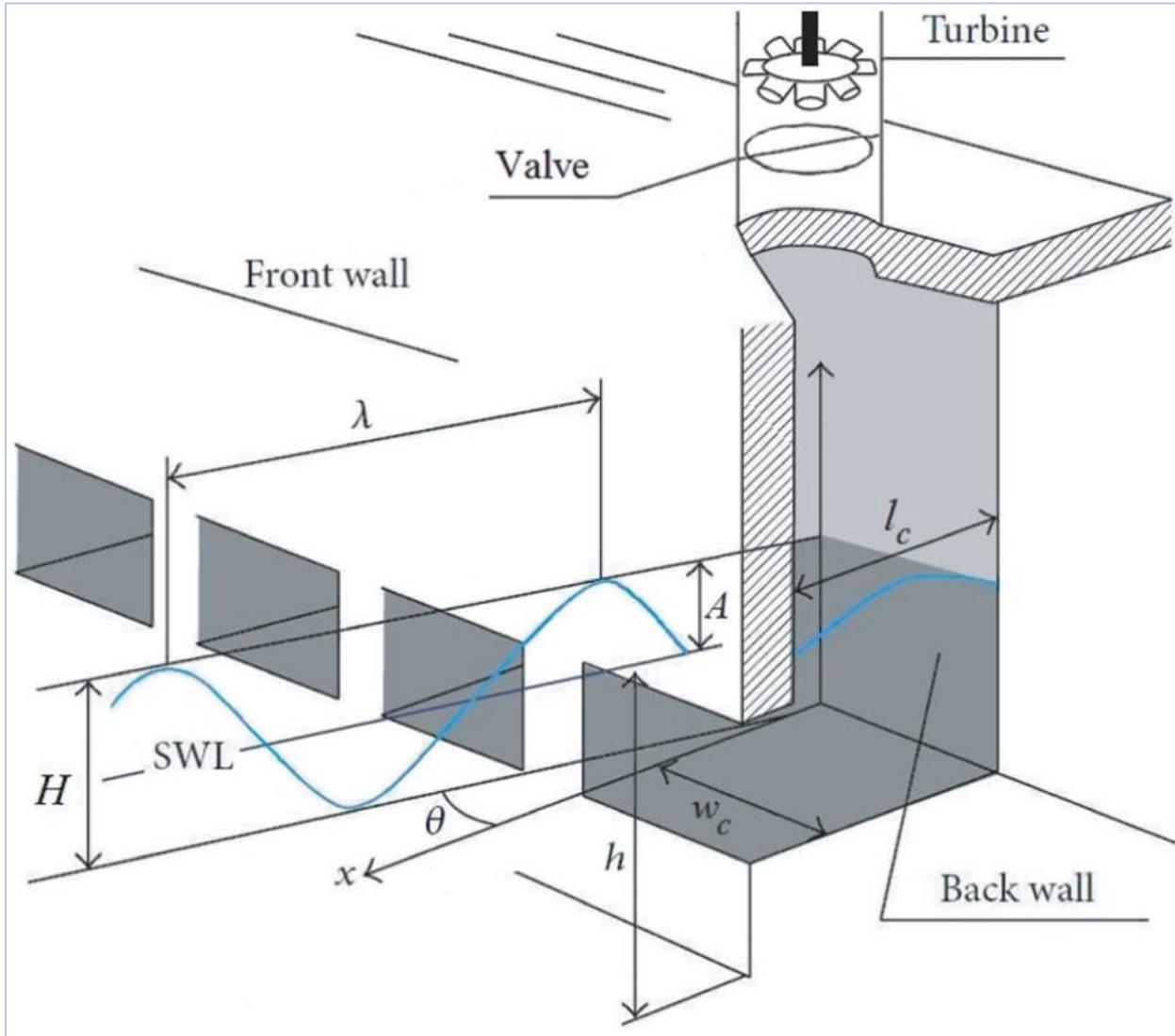
- Alemán, U. (17 de enero de 2023). Obtenido de Diario El Mundo:  
<https://diario.elmundo.sv/economia/la-generacion-renovable-cubrio-el-76-de-la-demanda-de-energia-en-2022>
- Amer, C. M. (2015). *Evaluación Del Potencial De La Energía Del Oleaje En Las Costas De Marruecos*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/76875/Tesina.pdf>
- Anónimo. (s.f.). *EcuRed*. Obtenido de C.H. 15 de septiembre:  
[https://www.ecured.cu/Central\\_Hidroel%C3%A9ctrica\\_15\\_de\\_Septiembre](https://www.ecured.cu/Central_Hidroel%C3%A9ctrica_15_de_Septiembre)
- ANSYS. (29 de enero de 2009). *Manual De Usuario*. Obtenido de  
<https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node1.htm>
- Arteaga, E. (30 de abril de 2019). Obtenido de Prensa gráfica.
- Bnamericas. (16 de enero de 2022). *Comunicado De Prensa*. Obtenido de  
<https://www.bnamericas.com/es/noticias/el-salvador-contempla-el-impulso-de-las-principales-energias-renovables-en-virtud-de-una-nueva-asociacion-con-irena>
- C., M. (9 de agosto de 2019). *Energía Undimotriz*. Obtenido de Lifeder:  
<https://www.lifeder.com/energia-undimotriz/>
- CEL. (2019-2020). *Memoria de labores*. Obtenido de [https://www.cel.gob.sv/wp-content/uploads/2022/05/Memoria\\_de\\_Labores\\_2019-2020a.pdf](https://www.cel.gob.sv/wp-content/uploads/2022/05/Memoria_de_Labores_2019-2020a.pdf)
- Central geotérmica Ahuachapán*. (s.f.). Obtenido de LAGEO:  
<http://lageo.com.sv/CentralAhuachapan.html>
- Central hidroeléctrica Guajoyo*. (s.f.). Obtenido de El Salvador mi país:  
<https://www.elsalvadmipais.com/central-hidroelectrica-guajoyo>
- Connor, N. (18 de septiembre de 2019). *Thermal Engineering*. Obtenido de <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-ecuacion-de-navier-stokes-definicion/>
- Das, T. K., Kerikous, E., Venkatesan, N., Janiga, G., Thevenin, D., & Samad, A. (2022). Performance improvement of a Wells turbine through an automated. *Energy Conversion and Management: X*, 3-5.
- Días, P. F. (2000 - 2023). Obtenido de Libros sobre ingeniería energética:  
<https://pfernandezdiez.es/es/libro?id=5>
- Economía. (15 de febrero de 2017). *Noticias de última hora*. Obtenido de <https://ultimahora.sv/central-hidroelectrica-cerron-grande-cumple-41-anos-de-funcion/>
- economía, R. (26 de febrero de 2020). *Diario el mundo*. Obtenido de  
<https://diario.elmundo.sv/Econom%C3%ADa/planta-solar-en-sonsonate-tendra-beneficios-fiscales>

- Falcao, A., & Henriques, J. (2016). *Oscillating-Water-Column Wave Energy Converters And Air Turbines*.
- Fernández, L. M. (2018). *Estudio Computacional y Experimental del prototipo OWC Para El Aprovechamiento De La Energía Undimotriz*. Obtenido de <https://addi.ehu.es/handle/10810/29294?locale-attribute=es>
- Flores, U. (2018). *Tesis, Modelado y Simulación de una Central de Generación Undimotriz Columna Oscilante*. Obtenido de Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo.
- Garrido, A. J., Otoala, E., Garrido, I., Lekube, J., Mesada, F. J., Liria, P., & Mader, J. (2015). *Mathematica, Modeling Of Oscillating Water Columns Wave-Structure Interaction in Ocean Energy Plants*.
- González, J. R. (junio de 2018). *Caracterización Del Oleaje En El Salvador*. Obtenido de Trabajo de graduación: <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/20112/1/19201111.pdf>
- Gutiérrez, S. A. (2018). *Tesis, Incremento En La Potencia De Una Columna De Agua Oscilante Por Un Recolector De Fondo Cosenoidal*. Obtenido de [http://www.tese.edu.mx/documentos2004/8745\\_RXENNQU.pdf](http://www.tese.edu.mx/documentos2004/8745_RXENNQU.pdf)
- Guzmán R., Juan de Dios, Mejía F., Orlando I., Menjívar P., & Pedro J. (agosto de 2007). *Universidad de El Salvador*. Obtenido de Sistema bibliotecario: <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/1737/>
- Hamed, H. S., Nawar, M. A., Mohamed, R., & Hamed, M. S. (2017). A New Operating Concept to Enhance Wells Turbine Performance. *AEROSPACE SCIENCES & AVIATION TECHNOLOGY*, 10.
- IRENA. (diciembre de 2020). *Evaluación del estado de preparación de las energías renovables*. Obtenido de [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA\\_RRA\\_El\\_Salvador\\_summary\\_2020\\_ES.pdf?la=en&hash=0B09731773C6F3418B8E7531BD83D03F74DBC9D8](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_RRA_El_Salvador_summary_2020_ES.pdf?la=en&hash=0B09731773C6F3418B8E7531BD83D03F74DBC9D8)
- Kimerius. (s.f.). *Energía Del Oleaje*. Obtenido de <https://www.kimerius.com/app/download/5785622426/Energ%C3%ADa+del+oleaje.pdf>
- López, I., & López, H. (2014). *Ondas superficiales en el Mar*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/profile/Hugo-Tinoco/publication/263443211\\_Ondas\\_Superficiales\\_en\\_el\\_Mar\\_Review/links/0deec53ad6fc9312eb000000/Ondas-Superficiales-en-el-Mar-Review.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Hugo-Tinoco/publication/263443211_Ondas_Superficiales_en_el_Mar_Review/links/0deec53ad6fc9312eb000000/Ondas-Superficiales-en-el-Mar-Review.pdf)
- Mercado eléctrico de El Salvador*. (abril de 2021). Obtenido de <https://www.siget.gob.sv/wp-content/uploads/2021/05/Mercado-Elctrico-de-El-Salvador-2020-2.pdf>
- Número de Courant-Friedrichs-Levy*. (2 de febrero de 2022). Obtenido de [https://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero\\_de\\_Courant-Friedrichs-Levy](https://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero_de_Courant-Friedrichs-Levy)
- Pereiras, B. (2011). *Optimización De Una Turbina De Impulso Radial Para El Aprovechamiento De La Energía Del Oleaje*. Obtenido de Universidad de Oviedo: [https://www.researchgate.net/publication/40646287\\_Optimizacion\\_de\\_una\\_turbina\\_de\\_impulso\\_radial\\_para\\_el\\_aprovechamiento\\_de\\_la\\_energia\\_del\\_oleaje](https://www.researchgate.net/publication/40646287_Optimizacion_de_una_turbina_de_impulso_radial_para_el_aprovechamiento_de_la_energia_del_oleaje)
- Roca, J. A. (15 de julio de 2021). *Planta Nejapa*. Obtenido de AES El Salvador.

- Segovia, C. (21 de octubre de 2015). Obtenido de [elsalvador.com](https://historico.elsalvador.com/historico/164219/planta-aes-moncagua-abastece-de-energia-a-ocho-mil-familias.html):  
<https://historico.elsalvador.com/historico/164219/planta-aes-moncagua-abastece-de-energia-a-ocho-mil-familias.html>
- SIGET. (2020). *Boletín de estadísticas eléctricas No.22*. Obtenido de Junta de direcciones:  
[https://estadisticas.cne.gob.sv/wp-content/uploads/2022/08/boletin\\_siget\\_2020.pdf](https://estadisticas.cne.gob.sv/wp-content/uploads/2022/08/boletin_siget_2020.pdf)
- The Indian Face*. (10 de febrero de 2021). Obtenido de  
<https://theindianface.com/blogs/news/clasificacion-olas-tipos-de-olas-outbreak>
- Toledo, G. (8 de agosto de 2018). *Energía geotérmica*. Obtenido de SCRIBD:  
<https://es.scribd.com/presentation/385744107/Energia-Geotermica#>
- UT. (s.f.). *Reportes estadísticos públicos*. Obtenido de <https://www.ut.com.sv/home>
- Úveda, L. I., & López, T. H. (27 de junio de 2014). *Ondas Superficiales En El Mar*. Obtenido de  
[https://www.researchgate.net/profile/Hugo-Tinoco/publication/263443211\\_Ondas\\_Superficiales\\_en\\_el\\_Mar\\_Review/links/0deec53ad6fc9312eb000000/Ondas-Superficiales-en-el-Mar-Review.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Hugo-Tinoco/publication/263443211_Ondas_Superficiales_en_el_Mar_Review/links/0deec53ad6fc9312eb000000/Ondas-Superficiales-en-el-Mar-Review.pdf)
- Uveli, A. (27 de noviembre de 2020). *AES El Salvador*. Obtenido de Noticias de El Salvador y el mundo:  
<https://diario.elmundo.sv/Econom%C3%ADa/planta-solar-en-sonsonate-tendra-beneficios-fiscales>
- Valdez, P. P. (abril de 2015). *Simulación Computacional De Fluidos con CFD1 Para El Aprovechamiento de la Energía Undimotriz en Sistemas OWC2*. Obtenido de  
<https://ria.utn.edu.ar/bitstream/handle/20.500.12272/5626/Proyecciones%20%20Abril%202015%20Valdez-convertido.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vyzikas, T. (octubre de 2016). *Numerical study of fixed Oscillating*. Obtenido de  
[https://www.researchgate.net/publication/309448986\\_Numerical\\_study\\_of\\_fixed\\_Oscillating\\_Water\\_Column\\_with\\_RANS-type\\_two-phase\\_CFD\\_model](https://www.researchgate.net/publication/309448986_Numerical_study_of_fixed_Oscillating_Water_Column_with_RANS-type_two-phase_CFD_model)

## ANEXOS

A.1. FIGURA PARA ELABORACIÓN DE CÁMARA DE CAPTACIÓN



## A.2 CONFIGURACION DE PROGRAMA ANSYS



# Ansys Fluent Simulation Report

<b>Analyst</b>	rboni
<b>Date</b>	7/6/2023 03:28 PM

### Table of Contents

- [1 System Information](#)
- [2 Geometry and Mesh](#)
  - [2.1 Mesh Size](#)
  - [2.2 Mesh Quality](#)
  - [2.3 Orthogonal Quality](#)
- [3 Simulation Setup](#)
  - [3.1 Physics](#)
    - [3.1.1 Models](#)
    - [3.1.2 Material Properties](#)
    - [3.1.3 Cell Zone Conditions](#)
    - [3.1.4 Boundary Conditions](#)
    - [3.1.5 Reference Values](#)
  - [3.2 Solver Settings](#)
- [4 Run Information](#)
- [5 Report Definitions](#)
- [6 Contours](#)

### System Information

<b>Application</b>	Fluent
<b>Settings</b>	2d, double precision, pressure-based, VOF, standard k-epsilon, transient
<b>Version</b>	23.1.0-10208
<b>Source Revision</b>	c5ccf97574
<b>Build Time</b>	Nov 28 2022 09:52:55 EST
<b>CPU</b>	Intel(R) Core(TM) i5-4570
<b>OS</b>	Windows

### Geometry and Mesh

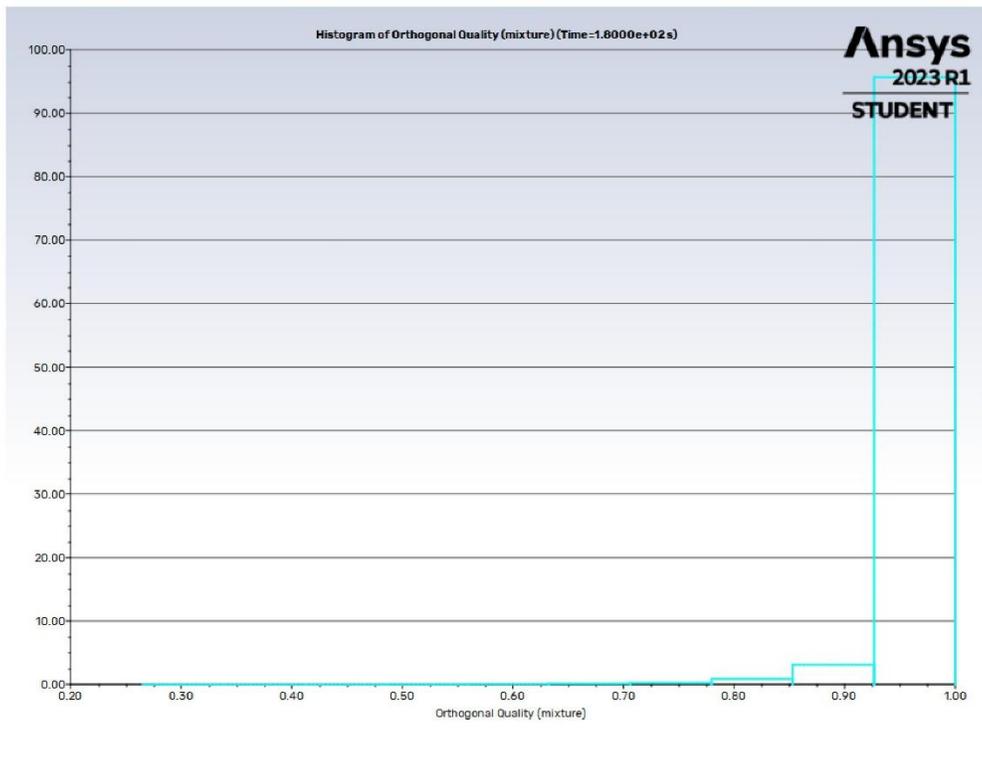
#### Mesh Size

Cells	Faces	Nodes
71471	143211	71740

## Mesh Quality

Name	Type	Min Orthogonal Quality	Max Aspect Ratio
solid-geom-1_surface	Mixed Cell	0.26508721	7.1582628

## Orthogonal Quality



## Simulation Setup

### Physics

### Models

Model	Settings
Space	2D
Time	Unsteady, 1st-Order Implicit
Viscous	Standard k-epsilon turbulence model

Model	Settings
Wall Treatment	Standard Wall Functions
Multiphase	Volume of Fluid

## Material Properties

— Fluid	
— water-liquid	
Density	998.2 kg/m <sup>3</sup>
Cp (Specific Heat)	4182 J/(kg K)
Thermal Conductivity	0.6 W/(m K)
Viscosity	0.001003 kg/(m s)
Molecular Weight	18.0152 kg/kmol
— air	
Density	1.19 kg/m <sup>3</sup>
Cp (Specific Heat)	1006.43 J/(kg K)
Thermal Conductivity	0.0242 W/(m K)
Viscosity	1.7894e-05 kg/(m s)
Molecular Weight	28.966 kg/kmol
— Solid	
— aluminum	
Density	2719 kg/m <sup>3</sup>
Cp (Specific Heat)	871 J/(kg K)
Thermal Conductivity	202.4 W/(m K)

## Cell Zone Conditions

— Fluid	
— solid-geom-1_surface (mixture)	
Specify source terms?	no
Specify fixed values?	no
Frame Motion?	no
Mesh Motion?	no
Laminar zone?	no
Porous zone?	no
Numerical Beach	no
— solid-geom-1_surface (aire)	
Specify source terms?	no
Specify fixed values?	no
— solid-geom-1_surface (agua)	
Specify source terms?	no
Specify fixed values?	no

## Boundary Conditions

— Inlet	
— inlet (mixture)	

Open Channel Wave BC	yes
Segregated Velocity Inputs	no
Reference Frame	Absolute
Averaged Flow Specification Method	Magnitude, Normal to Boundary
Averaged Flow Velocity Magnitude [m/s]	0
Secondary Phase for Inlet	agua
Wave BC Options	Shallow/Intermediate Waves
Free Surface Level [m]	0
Bottom Level [m]	-14
Reference Wave Direction	Averaged Flow Direction
Wave Modeling Options	Wave Theories
— Wave Group Inputs	
theory	1
Turbulent Specification Method	Intensity and Viscosity Ratio
Turbulent Intensity [%]	5
Turbulent Viscosity Ratio	10
Note: Rejected particles do not change their injection association	116261936
inlet (aire)	
inlet (agua)	
— Outlet	
— top (mixture)	
Open Channel	yes
Outlet Group ID	1
Pressure Specification Method	Free Surface Level
Free Surface Level [m]	0
Bottom Level [m]	-14
Density Interpolation Method	From Neighboring Cell
Backflow Direction Specification Method	From Neighboring Cell
Turbulent Specification Method	Intensity and Viscosity Ratio
Backflow Turbulent Intensity [%]	5
Backflow Turbulent Viscosity Ratio	10
Note: Rejected particles do not change their injection association	2001659024
Backflow Pressure Specification	Total Pressure
top (aire)	
top (agua)	
— Wall	
— bottom (mixture)	
Wall Motion	Stationary Wall
Shear Boundary Condition	No Slip
Wall Roughness Height [m]	0
Wall Roughness Constant	0.5
bottom (aire)	
bottom (agua)	
— right (mixture)	
Wall Motion	Stationary Wall

Shear Boundary Condition	No Slip
Wall Roughness Height [m]	0
Wall Roughness Constant	0.5
right (aire)	
right (agua)	
— left (mixture)	
Wall Motion	Stationary Wall
Shear Boundary Condition	No Slip
Wall Roughness Height [m]	0
Wall Roughness Constant	0.5
left (aire)	
left (agua)	
— column (mixture)	
Wall Motion	Stationary Wall
Shear Boundary Condition	No Slip
Wall Roughness Height [m]	0
Wall Roughness Constant	0.5
column (aire)	
column (agua)	

## Reference Values

<b>Area</b>	1 m <sup>2</sup>
<b>Density</b>	1.225 kg/m <sup>3</sup>
<b>Depth</b>	1 m
<b>Enthalpy</b>	0 J/kg
<b>Length</b>	1 m
<b>Pressure</b>	0 Pa
<b>Temperature</b>	288.16 K
<b>Velocity</b>	1 m/s
<b>Viscosity</b>	1.7894e-05 kg/(m s)
<b>Ratio of Specific Heats</b>	1.4
<b>Yplus for Heat Tran. Coef.</b>	300
<b>Reference Zone</b>	solid-geom-1_surface

## Solver Settings

— Equations	
Flow	True
Volume Fraction	True
Turbulence	True
— Numerics	
Absolute Velocity Formulation	True
— Unsteady Calculation Parameters	
Number of Time Steps	9000

Time Step Size [s]	0.02
Max Iterations/Time Step	20
<b>— Under-Relaxation Factors</b>	
Pressure	0.3
Density	1
Body Forces	1
Momentum	0.7
Volume Fraction	0.5
Turbulent Kinetic Energy	0.8
Turbulent Dissipation Rate	0.8
Turbulent Viscosity	1
<b>— Pressure-Velocity Coupling</b>	
Type	PISO
Skewness-Neighbour Coupling	True
Skewness Correction	1
Neighbour Correction	1
<b>— Discretization Scheme</b>	
Pressure	PRESTO!
Momentum	Second Order Upwind
Volume Fraction	Compressive
Turbulent Kinetic Energy	First Order Upwind
Turbulent Dissipation Rate	First Order Upwind
<b>— Solution Limits</b>	
Minimum Absolute Pressure [Pa]	1
Maximum Absolute Pressure [Pa]	5e+10
Minimum Temperature [K]	1
Maximum Temperature [K]	5000
Minimum Turb. Kinetic Energy [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	1e-14
Minimum Turb. Dissipation Rate [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]	1e-20
Maximum Turb. Viscosity Ratio	100000

## Run Information

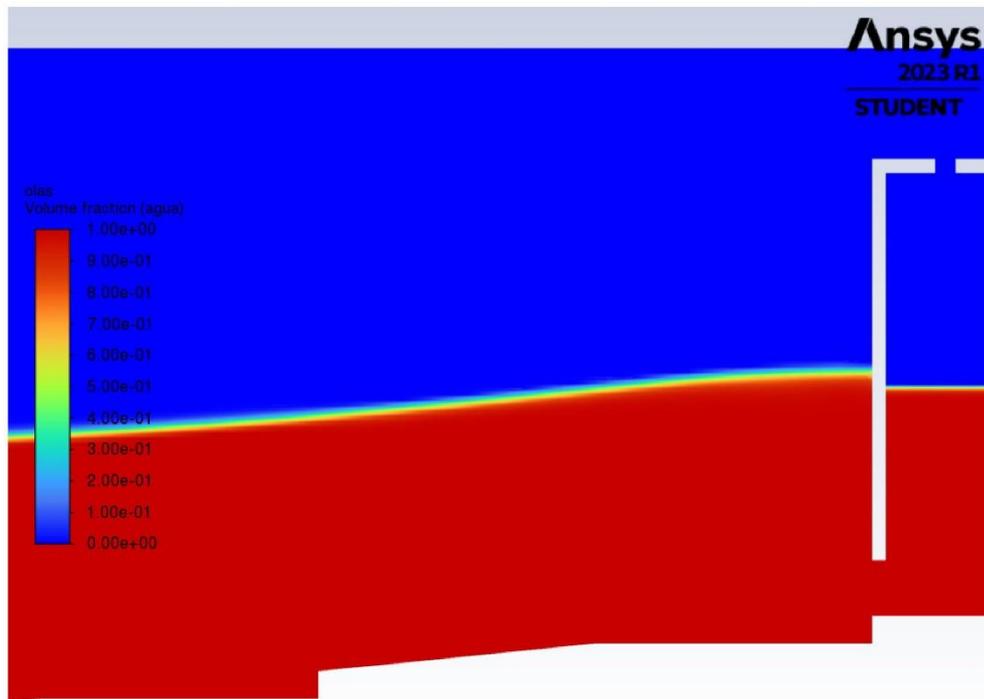
<b>Number of Machines</b>	1
<b>Number of Cores</b>	2
<b>Case Read</b>	5.795 seconds
<b>Data Read</b>	0.376 seconds
<b>Virtual Current Memory</b>	0.605412 GB
<b>Virtual Peak Memory</b>	0.923634 GB
<b>Memory Per M Cell</b>	3.70112

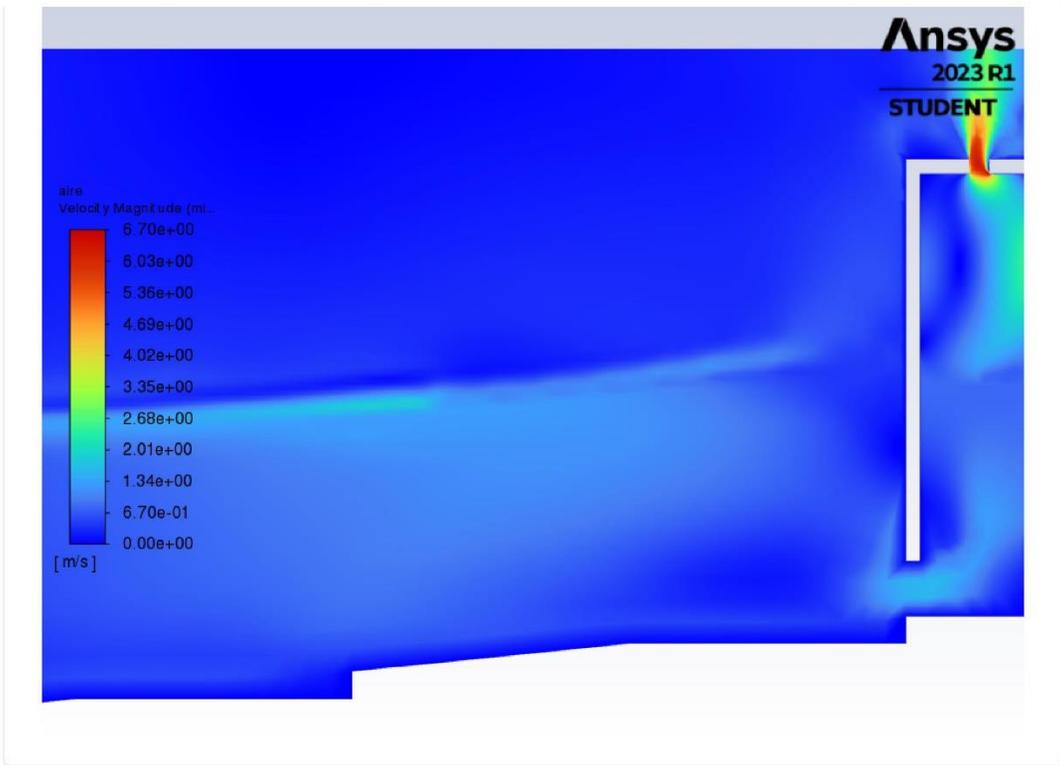
## Report Definitions

elevacion-camara	1.23601	m
presion	101348.3	Pa
velocidad	6.230608	m/s
delta-time	0.02	s
iters-per-timestep	0	
flow-time	180	s

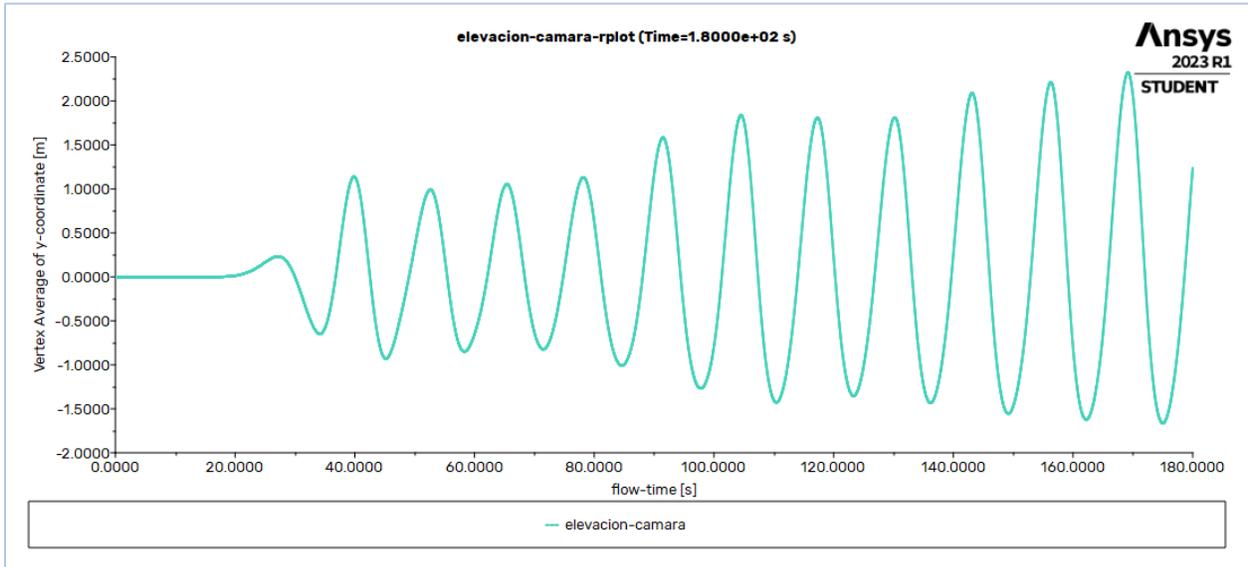
## Contours

olas

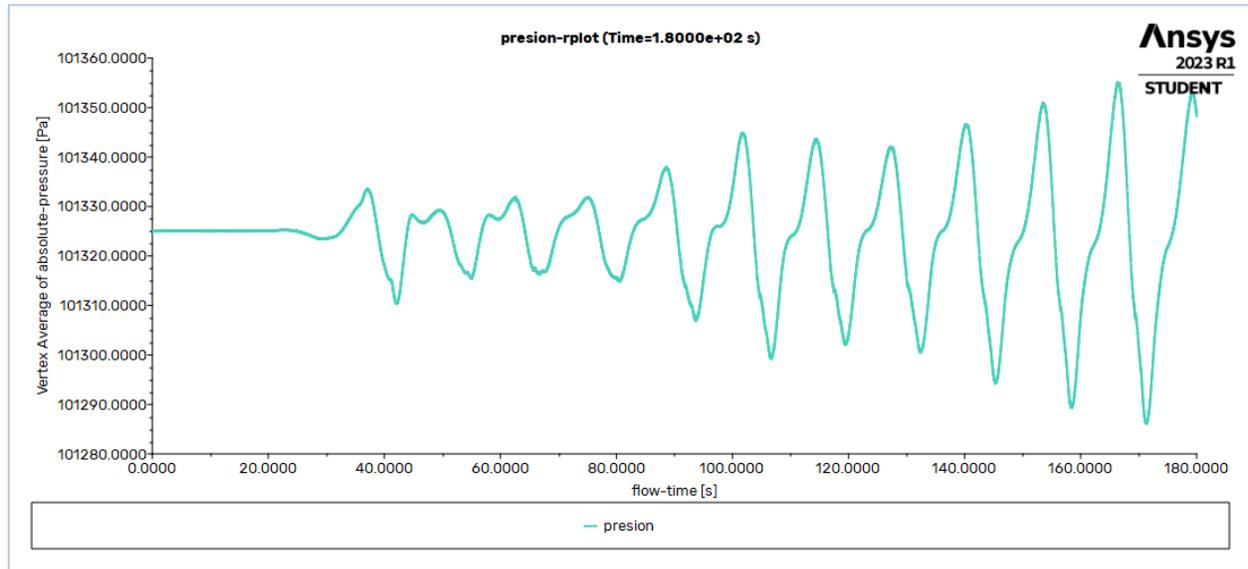




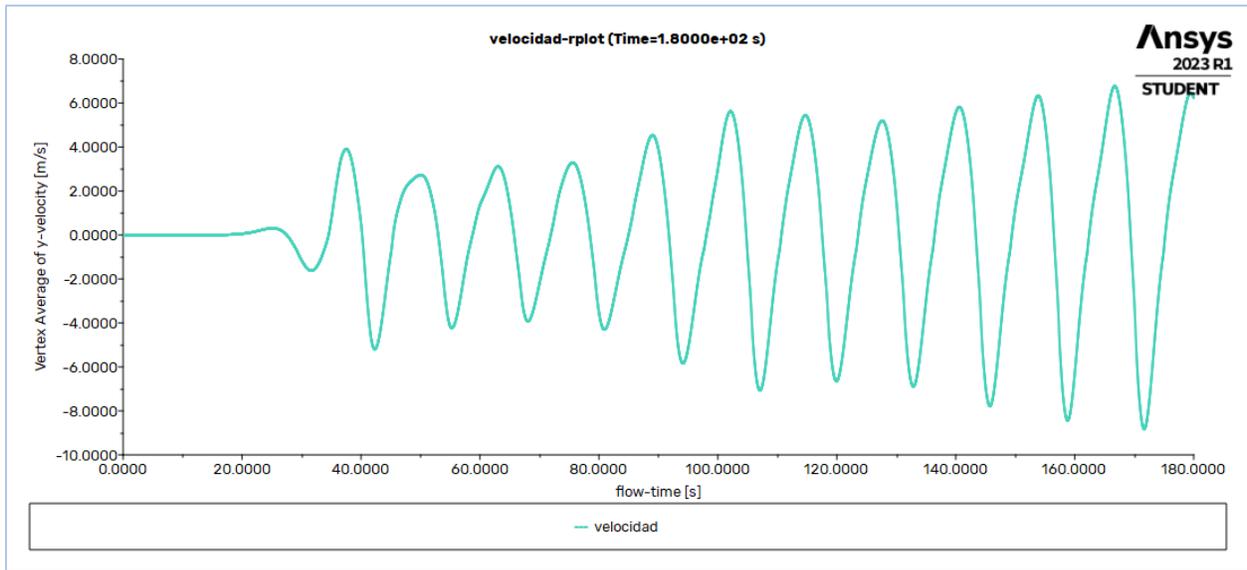
### A.3 GRAFICOS CAMARA CON OLEAJE REAL ANSYS FLUENT.



F.A. 1 Grafico de Elevación.

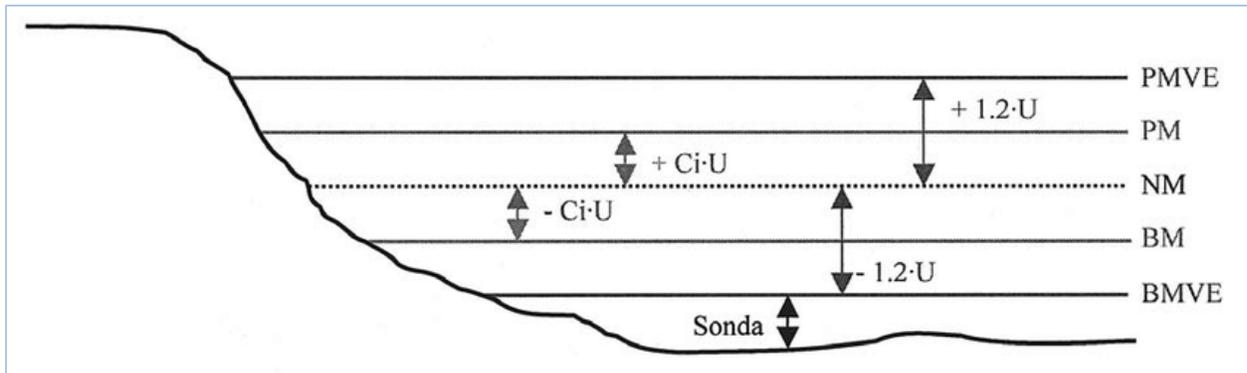


F.A. 2 Grafico de Presión.



F.A. 3 Grafico de Velocidad.

#### A.4 VALORES EXTREMALES DE MAREA



Cálculo clásico de los valores extremales de la marea (NM: nivel medio del mar; PMVE: pleamar máxima viva equinoccial; BMVE: bajamar máxima viva equinoccial; Ci: coeficiente de marea; U: unidad de altura) / Tradition al calculation of extreme tide values (NM: Mean sea level; PMVE: High water equinoctial springs; BMVE: Low water equinoctial springs; Ci: Tide coefficient; U: unit height).

## A.5 TABLA DE ECUACIONES TEORIA DE AIRY

Fase	$\theta = kx - \omega t$	Aguas profundas $d/L \geq 0,5$	Aguas intermedias $0,04 < d/L < 0,5$	Aguas someras $d/L \leq 0,04$
Profundidad relativa	$d/L$			
Potencial de velocidad	$\phi$	$\frac{H_o g}{2\omega} e^{kz} \text{sen}\theta$	$\frac{H_o g}{2\omega} \frac{\cosh(k(z+d))}{\cosh(kd)} \text{sen}\theta$	$\frac{H_o g}{2\omega} \text{sen}\theta$
Elevación de la superficie	$y$	$\frac{H_o}{2} \cos\theta$	$\frac{H_o}{2} \cos\theta$	$\frac{H_o}{2} \cos\theta$
Presión dinámica	$p_d = -\rho \frac{\delta\phi}{\delta t}$	$\frac{\rho g H_o}{2} e^{kz} \cos\theta$	$\frac{\rho g H_o}{2} \frac{\cosh(k(z+d))}{\cosh(kd)} \cos\theta$	$\frac{\rho g H_o}{2} \cos\theta$
Velocidad de las partículas				
- Horizontal	$u = \frac{\partial\phi}{\partial x}$	$\frac{H_o}{2} \omega e^{kz} \cos\theta$	$\frac{H_o}{2} \omega \frac{\cosh(k(z+d))}{\sinh(kd)} \cos\theta$	$\frac{H_o}{2} \omega \frac{1}{kd} \cos\theta$
- Vertical	$v = \frac{\partial\phi}{\partial z}$	$\frac{H_o}{2} \omega e^{kz} \text{sen}\theta$	$\frac{H_o}{2} \omega \frac{\cosh(k(z+d))}{\sinh(kd)} \text{sen}\theta$	$\frac{H_o}{2} \omega \left(1 + \frac{z}{d}\right) \cos\theta$
Aceleración de las partículas				
- Horizontal	$\dot{u} = \frac{\partial u}{\partial t}$	$\frac{H_o}{2} \omega^2 e^{kz} \cos\theta$	$\frac{H_o}{2} \omega^2 \frac{\cosh(k(z+d))}{\sinh(kd)} \cos\theta$	$\frac{H_o}{2} \omega^2 \frac{1}{kd} \cos\theta$
- Vertical	$\dot{v} = \frac{\partial v}{\partial t}$	$-\frac{H_o}{2} \omega^2 e^{kz} \text{sen}\theta$	$-\frac{H_o}{2} \omega^2 \frac{\cosh(k(z+d))}{\sinh(kd)} \text{sen}\theta$	$-\frac{H_o}{2} \omega^2 \left(1 + \frac{z}{d}\right) \cos\theta$
Celeridad de onda	$C = \frac{\omega}{k} = \frac{L}{T}$	$C_o = \sqrt{g/k_o} = g/\omega$	$C = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kd)}$	$C = \sqrt{gd}$
Velocidad de grupo	$C_{gr} = d\omega/dk$	$C_{gr} = \frac{C}{2} = g/2\omega$	$C_{gr} = \frac{C}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)}\right]$	$C_{gr} = C = \sqrt{gd}$
Frecuencia angular	$\omega = 2\pi/T$	$\omega = \sqrt{k_o g}$	$\omega = \sqrt{kg \cdot \tanh(kd)}$	$\omega = k\sqrt{gd}$
Longitud de onda	$L = 2\pi/k$	$L_o = \frac{g}{2 \cdot \pi} T^2$	$L = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{L}\right)$	$L = T\sqrt{gd}$
Número de onda	$k = 2\pi/L$	$k_o = \omega^2/g$	$k \cdot \tanh(kd) = \omega^2/g$	$k = \omega/\sqrt{gd}$
Desplazamiento de las partículas				
- Horizontal	$\xi$	$-\frac{H_o}{2} e^{kz} \text{sen}\theta$	$-\frac{H_o}{2} \frac{\cosh(k(z+d))}{\sinh(kd)} \text{sen}\theta$	$-\frac{H_o}{2} \frac{1}{kd} \text{sen}\theta$
- Vertical	$\eta$	$\frac{H_o}{2} e^{kz} \cos\theta$	$\frac{H_o}{2} \frac{\sinh(k(z+d))}{\sinh(kd)} \cos\theta$	$\frac{H_o}{2} \left(1 + \frac{z}{d}\right) \cos\theta$
Trayectoria de las partículas		Orbitas circulares	Orbitas elípticas	Orbitas elípticas

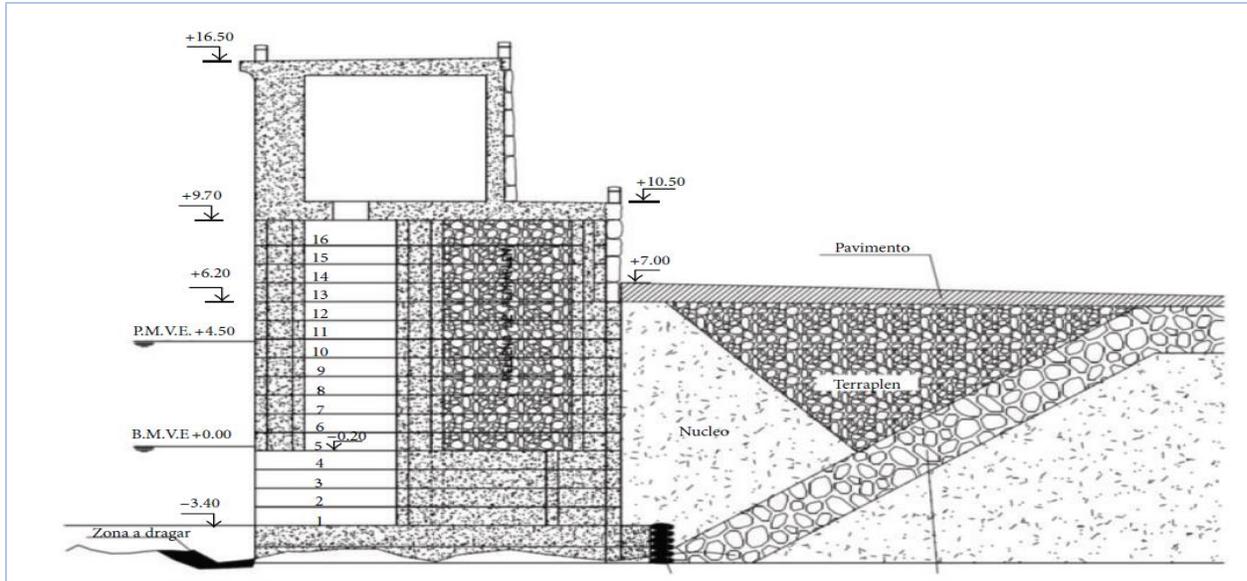
## A.6. CENTRAL UNDIMOTRIZ MUTRIKU ESPAÑA



F.A. 4 Central Undimotriz Mutriku, España.



F.A. 5 Parte turbina-generador



**F.A. 6. Dimensiones de la central**



**F.A. 7 Turbina Well**

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	2015
$a_{max}$	3.61	2.89	1.95	1.56	2.86	1.04	1.00	1.64	1.38	1.43	2.62	1.32	1.94
$a_{med}$	1.19	1.31	1.00	0.61	0.68	0.58	0.54	0.64	0.64	0.69	0.92	0.67	0.79
$T_{max}$	19.57	17.57	18.30	18.93	14.61	14.93	15.20	16.68	16.37	19.71	16.46	17.96	17.18
$T_{med}$	13.44	11.56	12.01	11.13	10.85	9.52	7.89	9.40	8.96	10.58	12.46	13.92	11.98

**F.A. 8 Oleaje en 2015**