



TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE CHICULOAPAN

INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

Comparación y Análisis Aerodinámico, de los Perfiles de Medialuna Y
NACA 0012 Utilizando Variaciones en la Configuración de
Alineamiento de Flujo y Rotores para una Turbina Bidireccional

TESIS

Que como requisito para Obtener el Título como Ingeniero en Energías
Renovables

PRESENTA

Nombre de los sustentantes:

Alma Delia López Salazar
Luis Gustavo García Zamora

Director de Tesis:

Mtro. José Miguel Ochoa Alva



"2022. Año del Quincentenario de la Fundación de Toluca de Lerdo, Capital del Estado de México"

FORMATO DE LIBERACIÓN DE PROYECTO PARA LA TITULACIÓN INTEGRAL

Chicoloapan de Juárez, Estado de México a 09 de diciembre de 2022

Oficio: 210C3701000102L/288/2022

Mtro. David Sanchez Luna

Jefatura de División de la Ingeniería en Energías Renovables
Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan

PRESENTE

Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la titulación integral como a continuación se indica:

Nombre de las/los sustentantes y numero de matrícula.	García Zamora Luis Gustavo, 17020045 López Salazar Alma Delia, 17020054
Carrera:	Ingeniería en Energías Renovables
Nombre del proyecto:	Comparación y Análisis Aerodinámico, de los Perfiles de Medialuna y NACA 0012, Utilizando Variaciones en la Configuración de Alineamiento de Flujo y Rotores para una Turbina Bidireccional
Producto:	Tesis Profesional

Sin otro particular me reitero a sus órdenes.

Atentamente,

"La Tecnología, Pilar del Progreso Integral"

Mtro. José Miguel Ochoa Alva
Asesor/a

Dr. Daniel Hernández Rivera
Revisor /a

Mtro. Juan Bernabé Trujano
Castro
Revisor /a

CP: Sustentantes
Archivo.



RSGC 1098



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN
SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR Y NORMAL
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR
TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE CHICOLOAPAN



DEDICATORIAS

El presente trabajo es dedicado:

A nuestros padres, por su gran amor incondicional y las grandes palabras de aliento que nos permitieron esforzarnos, pero sobre todo los valores inculcados que formaron lo que somos hoy.

A nuestros hermanos y hermanas, por su apoyo en el transcurso de esta gran etapa y por los bellos momentos.

A nuestras familias e incluso a las personas que nos ayudaron con un granito de arena para ser alguien mejor y hacer todo esto posible.



AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestra gratitud a Dios, quien con su bendición nos llena siempre de vida.

Nuestro profundo agradecimiento a todas las autoridades y personal que hacen la Unidad Educativa del TESCH, por confiar en nosotros, abrirnos las puertas y permitirnos realizar todo el proceso investigativo dentro de su establecimiento educativo.

A nuestro tutor el Mtro. José Miguel Ochoa Alva y al Mtro. Salvador Pérez Lule sin sus virtudes, su paciencia y constancia este trabajo no lo hubiésemos logrado. Sus consejos fueron siempre útiles cuando no salían los pensamientos, las dudas, las ideas claras para escribir o expresar lo que hoy hemos logrado. Ustedes formaron parte importante de esta historia con sus aportes profesionales que los caracterizan. Gracias por su orientación.

Y sobre todo a cada integrante de nuestra familia que han sido siempre el motor que impulsa nuestros sueños y esperanzas, quienes estuvieron siempre a lado de nosotros en los días y noches más difíciles durante las horas de estudio. Siempre han sido los mejores guías de vida. Hoy cuando concluyamos nuestros estudios, les dedicamos a ustedes este logro, amados padres, tíos y hermanos como una meta más conquistada. Orgullosos de haberlos elegido nuestros padres y tíos que estén a mi lado en este momento tan importante.

Gracias por ser quienes son y por creer en nosotros.



RESUMEN

En el actual trabajo se presentará el estudio de dos perfiles aerodinámicos empleados en una turbina que aprovecha un flujo de aire bidireccional, mediante esto se llevó a cabo un análisis comparativo con diferentes configuraciones en el rotor y alineamientos de flujo, anterior a esto se realizó el modelado en 2D para las configuraciones y posterior se realizaron las simulaciones correspondientes con el fin de observar el comportamiento del aire en los alabes del rotor de la turbina. Obteniendo resultados de velocidad y presión del aire al interceptar con alineamientos y los alabes del rotor.

ABSTRACT

The present work will present the study of two aerodynamic profiles used in a turbine that takes advantage of a bidirectional flow, by means of this a comparative analysis was carried out with different configurations in the rotor and flow alignments, prior to this the 2D modeling was performed for the configurations and later the corresponding simulations were carried out to observe the behavior of the air in the turbine rotor blades. Obtaining results of air velocity and pressure when intercepting with alignments and rotor blades.



ÍNDICE

DEDICATORIAS.....	3
AGRADECIMIENTOS.....	4
RESUMEN.....	5
ABSTRACT	5
ÍNDICE	6
Índice de figuras.....	9
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
JUSTIFICACIÓN	15
OBJETIVOS	16
Objetivo general.....	16
Objetivos específicos	16
CAPÍTULO I.....	17
1. INTRODUCCIÓN.....	17
1.1. Presentación	18
1.2. Energías Renovables.....	19
1.2.1. Definición.....	19
1.2.2. Marco Legal.....	20
1.2.2.1. Legislación Secundaria.....	21
1.2.2.2. Certificados de energía limpia.....	23
1.2.3. ¿Cuánta energía generada ampara un CEL?.....	23
1.2.3.1. Tecnologías que tienen derecho a recibir CEL	23
1.2.4. Energías Renovables en México	25
1.3. Energía Undimotriz	26
1.3.1. Energía undimotriz en Baja California	27
1.3.2. Convertidores de energía de las olas (WEC)	27
1.3.2.1. Aguas profundas (Off-shore).....	28
1.3.2.2. Aguas poco profundas (Near-shore).....	33
1.3.2.3. Costeros (On-Shore).....	35
1.4. Sistemas de Columna de Agua Oscilante (OWC).....	39
1.4.1. Cámara.....	40
1.4.2. Turbina	41
1.4.2.1. Turbina Wells	42
1.4.2.2. Turbinas de Impulso	50
1.4.2.2.1. Turbinas de impulso Axial	50
1.4.2.2.2. Turbinas de impulso radial	54



1.5. Proyectos relacionados con la energía undimotriz.....	55
1.5.1. Islay LIMPET	55
1.5.2. Escocia e Irlanda	57
1.5.3. Portugal (Pico Azores).....	58
1.5.4. Mutriku (Guipúzcoa).	59
CAPÍTULO II.....	61
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA UNA OWC.	61
2.1. Parámetros característicos	62
2.2. Mecánica de fluidos para sistemas OWC	66
2.2.1. Cinemática de Fluidos	66
2.2.2. Características físicas del estado fluido.	67
2.2.3. Líneas y Tubos de Flujo	68
2.3. Dinámica de fluidos.....	68
2.3.1. Ecuación de Continuidad.....	68
2.3.1.1. Ecuación de Continuidad en Fluidos Ideales.....	70
2.3.2. Equilibrio dinámico – Ecuaciones de Euler.....	70
2.3.3. Ecuación de Bernoulli	70
2.3.3.1. Aplicación de Bernoulli Orificio de un embalse (ecuación de Torricelli):	72
2.3.4. Tubo de Pitot y Tubo de Prandtl	73
2.3.5. Tubo de Venturi, Tobera y placa orificio.	74
2.4. Densidad.....	77
2.5. Flujos laminares y turbulentos.....	77
2.5.1. Flujo laminar.	79
2.5.2. Capas en flujos laminares.	80
2.5.3. Fluidos Newtonianos.	80
2.5.4. Flujo laminar en tubos (Ley de Poiseuille).....	81
2.5.5. Ley de Stokes.....	82
2.5.6. Flujo turbulento.....	83
2.5.7. Número de Reynolds.....	83
2.6. Capa limite	84
2.6.1. Capa límite sobre una placa plana.	85
2.6.2. Espesor de capa límite	87
2.6.3. Fenómenos de separación – Resistencia de forma.....	89
2.7. Vórtices	91
2.7.1. Propiedades.	91
2.7.2. Tipos de Vórtices.....	92
2.7.3. Resistencia de Superficie.	97
CAPITULO III.....	98
3. METODOLOGÍA.....	98



3.1. Perfiles aerodinámicos.....	99
3.2. Modelado 2D.....	100
3.2.1. Dimensionamiento.....	101
3.3 Parámetros	103
3.4. Simulación 2D	104
CAPITULO IV	105
4. Resultados.....	105
4.1. Análisis aerodinámico de rotores y alineamientos de las configuraciones de las turbinas	106
4.2. Interpretación de resultados de los alabes en movimiento	116
5. CONCLUSIONES	127
REFERENCIAS	129



Índice de figuras

Figura 1. Tipos de Energías Renovables (Secretaria de Energía (SENER), 2018).....	19
Figura 2. Artículos del marco regulatorio (Secretaria de Energía (SENER), 2018)	21
Figura 3. Principales leyes para la planeación energética y su regulación (Secretaria de Energía (SENER), 2018)	22
Figura 4. Objetivos de las leyes que promueven un mayor uso de las energías renovables (Secretaria de Energía (SENER), 2018)	22
Figura 5. Porcentaje de certificados de energías limpias 2020, 2021, 2022 (Secretaria de Energía (SENER), 2018)	23
Figura 6. Procedimiento para recibir el CEL (CEL, s.f.)	25
Figura 7. Evolución de la Generación Neta Renovable 2018-2020 (Secretaria de Energía (SENER), 2018)	26
Figura 8. Potencia de las olas de acuerdo con la zona de localización (Eco Wave Power, 2022)	28
Figura 9. Wave Dragon (Gridlines, 2019)	29
Figura 10. Sistema Pelamis (The European Marine Energy Centre LTD (EMEC), s.f.)..	29
Figura 11. PowerBouy. (Ocean Power Technologies , s.f.)	30
Figura 12. Modelo a escala de Salter´s Duck de la universidad de Edimburgo.....	31
Figura 13. Archimedes Wave Swing (AWS) (Teamwork, s.f.)	32
Figura 14. McCabe Wave Pump ubicada en la costa Kilbaha, Islandia.....	33
Figura 15. Wave Star energy ubicado en Brondby Dinamarca (Wavestarenergy, s.f.)..	33
Figura 16. Estructura de Aquamarine PowerOyster (REUK. co.uk, 2021).....	34
Figura 17. Ocean Swell Powered Renewable Energy (OPREY) situada en Dounreay, Escocia	35
Figura 18. Sistema TAPCHAN (Vega, 2014).....	36
Figura 19. Esquema del dispositivo Péndulo prototipo (Watabe, 2007)	37
Figura 20. Prototipo de Wave Roller (WAVEROLLER PLUG INTO WAVE ENERGY, s.f.).....	38
Figura 21. Seawave Slone-cone Generator (Vicanza, et al., 2015).....	38
Figura 22. Partes de una central OWC (Valdéz, 2013)	39
Figura 23. Operatividad de la cámara (Textoscientificos.com, 2009)	41
Figura 24. Turbina Wells Fuente: (Raghunathan & Watterson, 1996)	43
Figura 25. Triangulo de velocidades de una turbina Wells (Pereiras, 2008).....	43



Figura 26. Rendimiento de varias turbinas Wells (Setoguchi, et al., 2001).....	44
Figura 27. Turbina Wells con aletas directrices (Setoguchi, et al., 2001)	45
Figura 28. Influencia de aletas directrices y rendimiento de la turbina (Setoguchi, et al., 2001)	45
Figura 29. Esquema de una turbina Wells con doble rotor (Raghunathan, et al., 1987) 46	
Figura 30. Triángulo de velocidades para una turbina Wells biplano (Gato & Curran, 1996)	46
Figura 31. Interacción entre los dos rotores (Raghunathan, et al., 1987).....	47
Figura 32. Turbina Wells Biplano con Aletas Directrices (Setoguchi & Takao, 2006)....	48
Figura 33. Esquema de Turbina Wells Biplano Contrarrotante (Setoguchi & Takao, 2006)	49
Figura 34. Esquema de una turbina con aletas orientables (Kim, et al., 2001).....	49
Figura 35. Esquema de una turbina de impulso axial con aletas directrices fijas (Maeda, et al., 1999).....	50
Figura 36. Triangulo de velocidades para una turbina de impulso axial con aletas directrices fijas (Pereiras, 2008)	51
Figura 37. Comparación de rendimiento entre una turbina Wells y una turbina de impulso axial (Setoguchi, et al., 2001)	52
Figura 38. Esquema de la turbina de impulso axial con aletas orientables (Setoguchi & Takao, 2006)	52
Figura 39. Esquema de una turbina axial contrarrotante con aletas directrices (Setoguchi & Takao, 2006)	53
Figura 40. Esquema de turbina de flujo radial (Setoguchi, et al., 2002)	54
Figura 41. Esquema de una turbina de impulso radial con aletas orientables (Takao, et al., 2005).....	55
Figura 42. Costa de Escocia de la LIMPET OWC (Cuan B. Boake, 2002)	56
Figura 43. Sección Axial a través del colector (Cuan B. Boake, 2002).....	57
Figura 44. Turbina tipo Lånstrøm (Volvo TecVolución , 2021).....	58
Figura 45. Planta OWC en la isla Pico Azores Portugal (Falcão, et al., 2020)	59
Figura 46. Planta Mitriku (Ibarra, et al., 2017)	60
Figura 47. Energía de la ola (Duran & Vázquez, 2014)	62
Figura 48. Características de una onda senoidal pura (Eduambiental, s.f.)	63
Figura 49. Superposición de ondas de un estado típico del mar (Durán, 2017)	64
Figura 50. Periodo de duración del oleaje (Durán, 2017)	64



Figura 51. Representación esquemática de los tipos de olas respecto a su duración (Eduambiental, s.f.).....	65
Figura 52. Acción del viento sobre una zona determinada del mar (Eduambiental, s.f.)	65
Figura 53. Línea de corriente o impermeable (continuamente tiene igual dirección que el vector velocidad) (Modon, 2017)	67
Figura 54. Tubo de flujo (Modon, 2017).....	68
Figura 55. Tubo con masa de entrada y salida durante un periodo corto (Modon, 2017)	69
Figura 56. Continuidad en un fluido ideal (Modon, 2017)	70
Figura 57. Línea de carga hidrodinámica total (Modon, 2017)	71
Figura 58. Representación de orificio en un embalse (Modon, 2017)	72
Figura 59. Medición de velocidad, a) tubo Pitot y rendija piezométrica, b) tubo Pitot estático (Modon, 2017)	73
Figura 60. Tubo Pitot estático (Física, s.f.)	74
Figura 61. Tubo Venturi (Grupo SIE, s.f.)	74
Figura 62. Sección transversal de un tubo Venturi, donde se anotan las partes principales que lo integran (Rivas & IMTA, 2001)	75
Figura 63. Tobera de flujo (Instrumentación de, 2017).....	76
Figura 64. Orden de los átomos en la sustancia (Cidead, s.f.).....	77
Figura 65. Experimento de Reynolds (Jardón, s.f.)	78
Figura 66. Flujo transición (Jardón, s.f.)	78
Figura 67. Flujo turbulento (Jardón, s.f.).....	78
Figura 68. a) Flujo laminar permanente, b) turbulento permanente. Medición de V (Jardón, s.f.)	79
Figura 69. Flujo turbulento permanente, medición de V' con respecto a V (Jardón, s.f.).....	79
Figura 70. Flujo laminar (Guni hamburg, s.f.)	80
Figura 71. Velocidad de un fluido en un tubo cilíndrico (Giles, et al., 2005)	81
Figura 72. Velocidad terminal (Giles, et al., 2005)	82
Figura 73. Flujo turbulento. (Guni hamburg, s.f.)	83
Figura 74. Resultante de fuerzas horizontal y vertical sobre un perfil alar (Gherardelli, s.f.).....	84
Figura 75. Flujo alrededor de diferentes cuerpos (muestra el flujo alrededor de 3 cuerpos con distinta forma) (Gherardelli, s.f.).....	84



Figura 76. Flujo alrededor de una placa plana para diferentes Re (Gherardelli, s.f.)	85
Figura 77. Desarrollo de la capa límite sobre una placa plana (Gherardelli, s.f.)	86
Figura 78. Desprendimiento y flujo inverso en un cuerpo curvo (Gherardelli, s.f.)	87
Figura 79. Espesor de la capa límite δ (Gherardelli, s.f.).....	87
Figura 80. Espesor de desplazamiento δ^* (Gherardelli, s.f.)	88
Figura 81. Espesor de cantidad de movimiento θ (Gherardelli, s.f.).....	89
Figura 82. El flujo alrededor de una esfera. (Modon, 2017).....	90
Figura 83. Para un flujo real. (Modon, 2017)	90
Figura 84. Ejemplo de vórtices formados en un café cuando se vierten gotas de leche (i-Ciencias, 2014).....	92
Figura 85. Vórtice de irritación. (i-Ciencias, 2014).....	93
Figura 86. Vórtice de cuerpo rígido. (i-Ciencias, 2014)	94
Figura 87. Retroceso espiral geométrico, en la profundidad del fondo. (Dreamstime, s.f.)	96
Figura 88. Perfiles aerodinámicos a) Perfil NACA 0012 b) Perfil de Medialuna	99
Figura 89. Alineamiento para redireccionamiento de flujo.....	99
Figura 90. Parámetros de diseño a) Perfil de medialuna b) Alineamiento de flujo	100
Figura 91. Configuraciones en el rotor para ambos perfiles	101
Figura 92. Medidas del rectángulo que representa al rotor de la turbina Wells.....	101
Figura 93. Medidas del rotor y líneas de alineamientos la turbina Wells con alineamientos	102
Figura 94. Medidas del rotor y línea de alineamientos de la turbina de impulso.	102
Figura 95. Medidas del rotor y línea de alineamientos de la Bi-turbina Wells con alineamientos	102
Figura 96. Medidas del rotor y línea de alineamientos de la Bi-turbina de impulso	103
Figura 97. Simulación del rotor de la turbina Wells, a) velocidad b) presión	106
Figura 98. Simulación del rotor de la turbina de impulso a) velocidad b) presión.....	107
Figura 99. Simulación del rotor de la turbina Wells con alineamientos a) velocidad b) presión.....	108
Figura 100. Simulación del doble rotor de la Bi-turbina Wells con alineamientos a) velocidad b) presión.....	109
Figura 101. Simulación del doble rotor de la Bi-turbina de impulso axial a) velocidad b) presión.....	110



Figura 102. líneas de flujo en el rotor de la turbina tipo Wells.	111
Figura 103. Líneas de flujo en el rotor de la turbina de impulso.	112
Figura 104. Líneas de flujo en el rotor de la turbina Wells con alineamientos de flujo.	113
Figura 105. Líneas de flujo en una Bi-turbina Wells con alineamientos	114
Figura 106. Líneas de flujo en una Bi-turbina de impulso axial	115
Figura 107. Movimiento 1 de los alabes de la turbina tipo Wells	116
Figura 108. Movimiento 2 de los alabes de la turbina tipo Wells	117
Figura 109. Movimiento 3 de los alabes de la turbina tipo Wells	118
Figura 110. Movimiento 1 de los alabes del rotor de la turbina de impulso axial.....	118
Figura 111. Movimiento 2 de los alabes del rotor de la turbina de impulso	119
Figura 112. Movimiento 3 de los alabes del rotor de la turbina de impulso	120
Figura 113. Movimiento 1 de los alabes en una turbina Wells con alineamientos.....	120
Figura 114. Movimiento 2 de los alabes en una turbina Wells con alineamientos.....	121
Figura 115. Movimiento 3 de los alabes en una turbina Wells con alineamientos.....	122
Figura 116. Movimiento 1 de los alabes de la Bi-turbina Wells con alineamientos.....	123
Figura 117. Movimiento 3 de los alabes de la Bi-turbina Wells con alineamientos.....	123
Figura 118. Movimiento 4 de los alabes de la Bi-turbina Wells con alineamientos.....	124
Figura 119. Movimiento 1 de los alabes de la Bi-turbina de impulso axial.....	125
Figura 120. Movimiento 2 de los alabes de la Bi-turbina de impulso.....	125
Figura 121. Movimiento 3 de los alabes de Bi-turbina de impulso.....	126



PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Hoy en día hay varias problemáticas sobre el cambio climático en las cuales debemos generar un cambio, así como dar una solución eficiente a estos inconvenientes. La quema de combustibles fósiles genera una alta producción de CO₂, por lo que se debe hacer un cambio en las costumbres para la obtención de energía. Se ha optado por usar energías renovables, por ejemplo, la energía solar, la energía eólica, pero una de las energías menos aprovechada es la energía de los océanos, ya que consta con una gran oportunidad para utilizar su energía, debido al inmenso océano que se sitúa en el país.

Para aprovechar la energía mareomotriz debemos estudiar su comportamiento como mareas altas y mareas bajas, al igual que se considera los metros de amplitud de las mareas para que sea factible. A fin de utilizar los beneficios de la energía mareomotriz y otros tipos de energías que derivan de los océanos. Se necesita, de sistemas complejos que capten la energía y transformarla en energía eléctrica.

En la energía undimotriz o energía de las olas, se utilizan mecanismos diferentes para la captación de la energía, entre estos sistemas se encuentran Pelamis, Wave Dragón, TAPCHAN, OWC (por sus siglas en inglés Oscillating Wave Column), entre otros. Del que hablaremos en esta tesis son los sistemas OWC. Esta tecnología especializada en aprovechar la oscilación de las olas ha tenido varios inconvenientes a través del tiempo con problemas de rendimiento en las turbinas que utilizan para el accionamiento de esta tecnología por lo que nos enfocaremos en un análisis y compararemos el comportamiento de las turbinas ante el flujo y presión de aire.



JUSTIFICACIÓN

El problema abordado en este trabajo es el poco aprovechamiento de las energías del océano, las cuales son una gran fuente de energía limpia en el mundo. Este tipo de energía cuenta con gran capacidad de aprovechamiento y de implementación de dispositivos para beneficio del consumo eléctrico. Las plantas de OWC son un dispositivo WEC que aprovecha la oscilación de las olas para generar energía. Dicho esto, las turbinas son la parte principal de estos sistemas de generación las cuales en ocasiones no cuentan con el suficiente rendimiento para su operación.

Este estudio es importante debido a que lleva a cabo una investigación en donde se analizará el comportamiento aerodinámico de ciertos perfiles, los cuales son implementados en turbinas que aprovechan la energía de las olas y que mediante la oscilación que estas generan crean un flujo bidireccional de aire, el cual es aprovechado por estas turbinas.

Esto beneficia al sector energético, por lo que la generación de energía limpia es primordial en esta realidad, mediante el oleaje de los océanos nacionales, es un recurso viable donde en estudios se estima que en años futuros será una de las fuentes de energía más importantes y con mayor impacto.



OBJETIVOS

Objetivo general

- Analizar la aerodinámica de una turbina Bidireccional con los perfiles de Medialuna y NACA 0012, mediante la restructuración de las configuraciones en el rotor y alineamientos de flujo.

Objetivos específicos

- Modelar en 2D diferentes configuraciones en el rotor para el análisis aerodinámico.
- Estudiar el comportamiento del flujo con parámetros de velocidad y presión experimentados a la entrada y salida de la cámara OWC, para la turbina aplicada en este dispositivo.
- Determinar el flujo que pasa a través de los rotores y alineamientos de las turbinas y cómo influye en la turbina.
- Cotejar los resultados obtenidos al usar diferentes configuraciones en las turbinas.



CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN



1.1. Presentación

Uno de los factores más cruciales en el desarrollo económico y social que presenta la humanidad de manera global en la industria es la generación y distribución de energía. Hoy por hoy el régimen energético, es una de las incertidumbres más reiterativas que incluso son capaces de tener conflagración marcial entre países por el debate de este recurso.

Como sabemos en la actualidad los combustibles fósiles, por ejemplo, el carburante (oro negro) y sus refinerías, monopolizan el consumo de nuevas energías primarias; pero estos parajes solo se ubican en ciertas áreas del mundo. Numerosas investigaciones son contundentes y concluyen en que se agotarán a medio plazo, aunque no hay una fecha estimada con claridad. Por lo que antes de todo esto ocurra, se estima que el precio de los combustibles fósiles incremente, afectando a la economía de países en pleno desarrollo, donde la matriz energética tiene gran dependencia de estos quedando seriamente afectados. Los países desarrollados de igual manera se verán afectados, pero en menor medida.

Cuanto a convenios internacionales, se trabaja en que el modelo energético de cada país mitiga el consumo de energía procedente de fuentes secundarias, y así disminuir el impacto medioambiental que producimos día con día.

En esta tesis se engloba dentro de una línea de análisis, en primer lugar, recapitulando breves definiciones de los diferentes tipos de energías renovables contemplando el marco legal, finalizando con el tema más crucial que es la energía olamotriz describiendo los diferentes dispositivos que aprovechan dicha energía e introduciéndonos más a los sistemas OWC.



1.2. Energías Renovables

1.2.1. Definición

Las energías renovables son fuentes que se radican por causa de fenómenos naturales, elaborado mediante procesos y materiales que se pueden prever incluso disminuir el consumo eléctrico además de ayudar a potenciar el autoconsumo producido de manera natural, gratuita e inagotable, encontrándose de forma continua o periódica así mismo poder llegar a lugares aislados y que al ser originada disminuya el impacto medioambiental que producimos día con día mitigando el consumo de energía procedente de fuentes secundarias de acuerdo con la LTE (Ley de transición energética) en 3° fracción decimosexta.

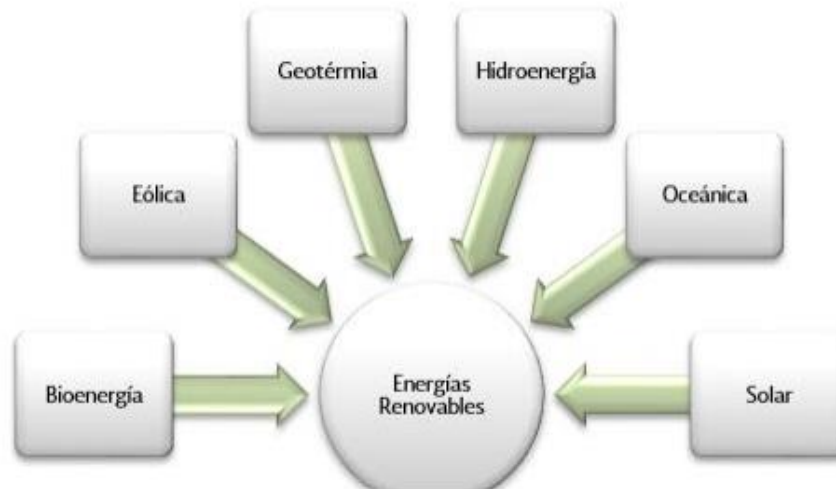


Figura 1. Tipos de Energías Renovables (Secretaría de Energía (SENER), 2018)

A continuación, se describen los tipos de energía (Figura 1):

- **Energía Solar:** Son aquellas energías obtenidas de la radiación solar también conocida como “rayos UV”. Que a través de SF (sistemas fotovoltaicos) solares que logran absorber los rayos UV transformándose en electricidad que puede ser almacenada en baterías o volcada a la red eléctrica. También existe la energía solar termoeléctrica, que es aquella que utiliza la radiación solar para calentar un fluido (que puede ser agua), hasta que genere vapor, y accione una turbina que genera electricidad.



- **Energía solar térmica:** consiste en el aprovechamiento de la energía del Sol para producir calor que puede aprovecharse para cocinar alimentos o para la producción de agua caliente destinada al consumo de agua doméstico, ya sea agua caliente sanitaria, calefacción o para producción de energía mecánica y, a partir de ella, de energía eléctrica.
- **Energía Eólica:** En el caso de la energía eólica la generación de electricidad se lleva a cabo con la fuerza del viento. Los molinos de viento que están en los parques eólicos son conectados a generadores de electricidad que transforma en energía eléctrica el viento por medio del movimiento de sus aspas.
- **Energía Hidráulica:** Es otra de las energías alternativas más conocidas. Utiliza la fuerza del agua en su curso para generar la energía eléctrica y se produce, normalmente en presas.
- **Biomasa:** Consiste en la combustión de residuos orgánicos de origen animal y vegetal. Con producto biodegradable como serrín, cortezas y todo aquello que pueda ir “al contenedor marrón”, se puede pensar un combustible que prenda el fuego a modo de yesca, siendo sustituible el carbón.
- **Biogás:** Es una energía alternativa producida biodegradando materia orgánica, mediante microorganismos, en dispositivos específicos sin oxígeno, así se genera un gas combustible que se utiliza para producir energía eléctrica.
- **Energía del Mar:** En estas energías se aprovecha la fuerza de las mareas o de las olas para producir energía eléctrica
- **Energía geotérmica:** Es aquella que aprovecha las altas temperaturas de yacimientos bajo la superficie terrestre (normalmente volcánicos) para la generación de energía a través del calor, pues suelen encontrarse a 100 o 150 grados centígrados.

1.2.2. Marco Legal

El marco constitucional para la implementación de proyectos de energías renovables está establecido en los siguientes artículos de acuerdo con la Constitución Política de Estados Unidos Mexicanos (Figura 2).

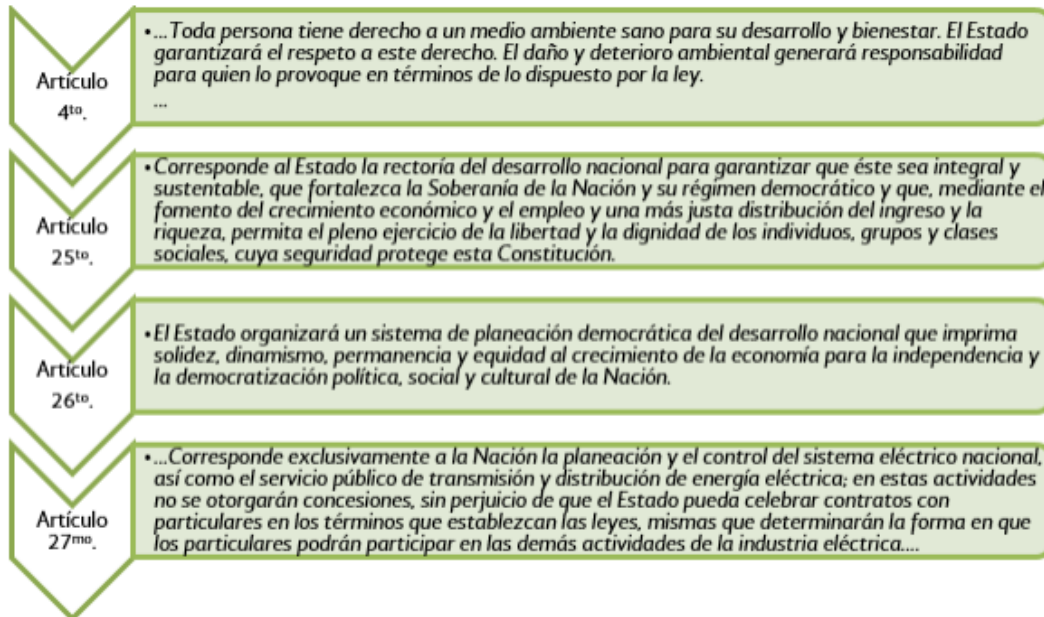


Figura 2. Artículos del marco regulatorio (Secretaria de Energía (SENER), 2018)

1.2.2.1. Legislación Secundaria

Su papel es garantizar el cumplimiento del mandato constitucional para brindar competencia con absoluta transparencia para lograr más producción y mejores costes en el mercado energético. Tal es el caso de la llamada “Ley orgánica” de la Administración Pública Federal (Figura 3), las cuales tienen su ordenamiento las disposiciones generales de la planeación del sector energético.

Para alcanzar los objetivos de la legislación secundaria es de suma importancia contar con órganos reguladores para un mercado de eficiente, de ahí la suma importancia de la Ley de los Órganos Reguladores Condicionados en la Materia Energética.

Gracias a los nuevos elementos jurídicos, se encuentra aquella legislación que promueve la participación de las energías renovables en la planeación del sector energético como la Ley General del Cambio Climático (LGCC), la LTE y la LIE (Figura 4), estas tres leyes buscan dar cumplimiento a la generación de electricidad con energías limpias, México implementa programas y estrategias en el marco jurídico (Secretaria de Energía (SENER), 2018).

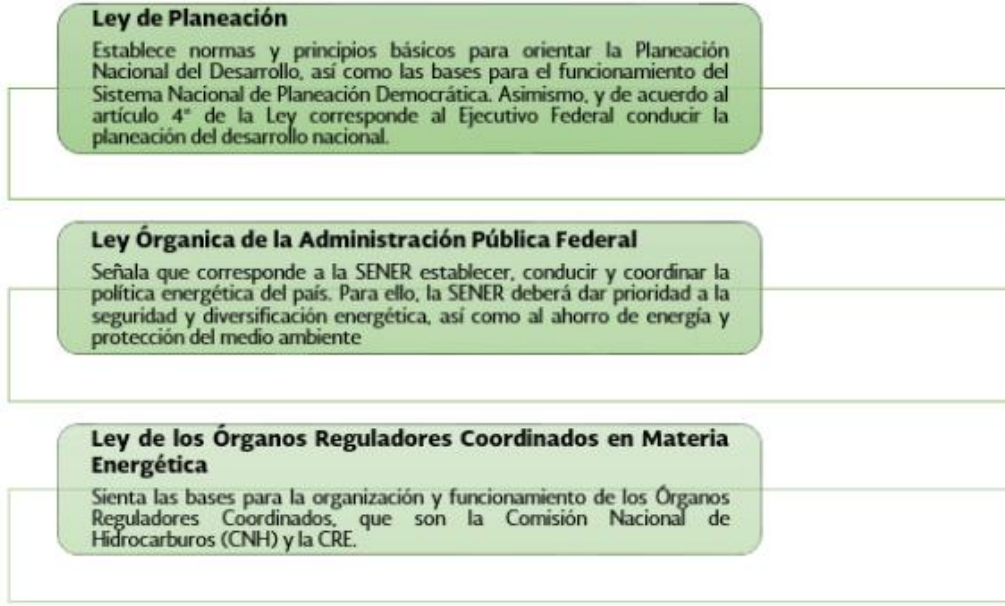


Figura 3. Principales leyes para la planeación energética y su regulación (Secretaría de Energía (SENER), 2018)

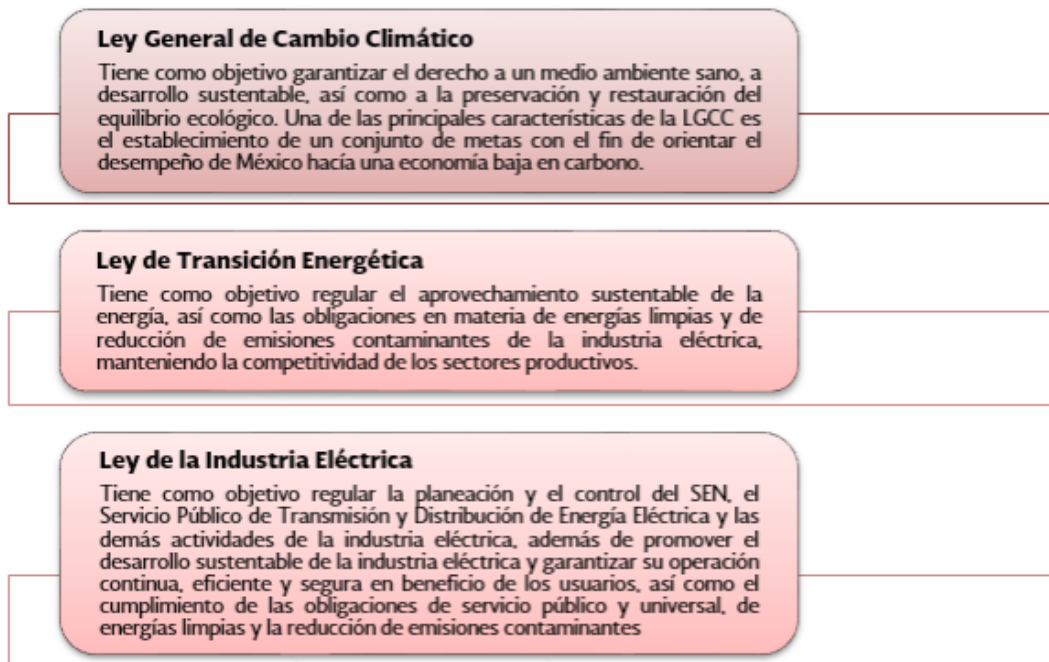


Figura 4. Objetivos de las leyes que promueven un mayor uso de las energías renovables (Secretaría de Energía (SENER), 2018)



1.2.2.2. Certificados de energía limpia

La Ley de la Industria Eléctrica (LIE) define en su artículo 3, fracción VIII, los CEL (Certificados de Energías Limpias) (Figura 5), emitida por la CRE (Comisión Reguladora de Energía) acreditando la producción de monto determinado de energía eléctrica a partir de Energías Limpias y sirve para cumplir los requisitos asociados al consumo de Centros de Carga.

El precio de estos certificados se fija en función de la demanda y oferta, publicados por la SENER y el periodo de obligación es el periodo comprendido entre el 1 de enero al 31 de diciembre de cada año (Secretaría de Energía (SENER), 2018).

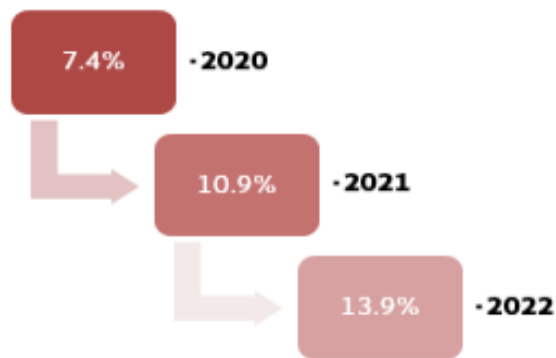


Figura 5. Porcentaje de certificados de energías limpias 2020, 2021, 2022 (Secretaría de Energía (SENER), 2018)

1.2.3. ¿Cuánta energía generada ampara un CEL?

Un CEL ampara la generación de 1 MWh de energía eléctrica limpia.

1.2.3.1. Tecnologías que tienen derecho a recibir CEL

Aquellas tecnologías que se consideren limpias según lo definido en el artículo 3, fracción XXII de la LIE, a saber:

- El Viento.
- La radiación solar, en todas sus formas.



- La energía oceánica en sus distintas formas, mareomotriz, maremotérmica, de las olas, de las corrientes marinas y del gradiente de concentración de sal.
- El calor de los yacimientos geotérmicos.
- Los bioenergéticos que se determinan en la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos.
- La energía generada por el aprovechamiento del poder calorífico del metano y otros gases asociados en los sitios de disposición de residuos, granjas pecuarias y en las plantas de tratamiento de aguas residuales, entre otros.
- La energía generada por el aprovechamiento del hidrógeno mediante su combustión o su uso en celdas de combustible, siempre y cuando se cumpla con la eficiencia mínima que establezca la CRE y los criterios de emisiones establecidos por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales en su ciclo de vida.
- La energía proveniente de centrales hidroeléctricas.
- La energía nucleoelectrica.
- La energía generada con los productos del procesamiento de esquilmos agrícolas o residuos sólidos urbanos (como gasificación o plasma molecular), cuando dicho procesamiento no genere dioxinas y furanos u otras emisiones que puedan afectar a la salud o al medio ambiente y cumpla con las normas oficiales mexicanas que al efecto emita la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- La energía generada por centrales de cogeneración eficiente en términos de los criterios de eficiencia emitidos por la CRE y de emisiones establecidos por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- La energía generada por ingenios azucareros que cumplan con los criterios de eficiencia que establezca la CRE y de emisiones establecidos por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- La energía generada por centrales térmicas con procesos de captura y almacenamiento geológico o bio-secuestro de bióxido de carbono que tengan una eficiencia igual o superior en términos de kWh-generado por tonelada de bióxido de carbono equivalente emitida a la atmósfera a la eficiencia mínima que

establezca la CRE y los criterios de emisiones establecidos por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

- Tecnologías consideradas de bajas emisiones de carbono conforme a estándares internacionales.
- Otras tecnologías que determinen la Secretaría y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, con base en parámetros y normas de eficiencia energética e hídrica, emisiones a la atmósfera y generación de residuos, de manera directa, indirecta o en ciclo de vida; (Madrigal, et al., 2022).

Para participar en ellos deben de contar con:

1. Solicitar la inscripción al Sistema.
2. Contar con la certificación por una unidad acreditada por la CRE de que la Central Eléctrica genera energía eléctrica a partir de energías limpias.
3. Pagar los derechos para registrados en el Sistema.

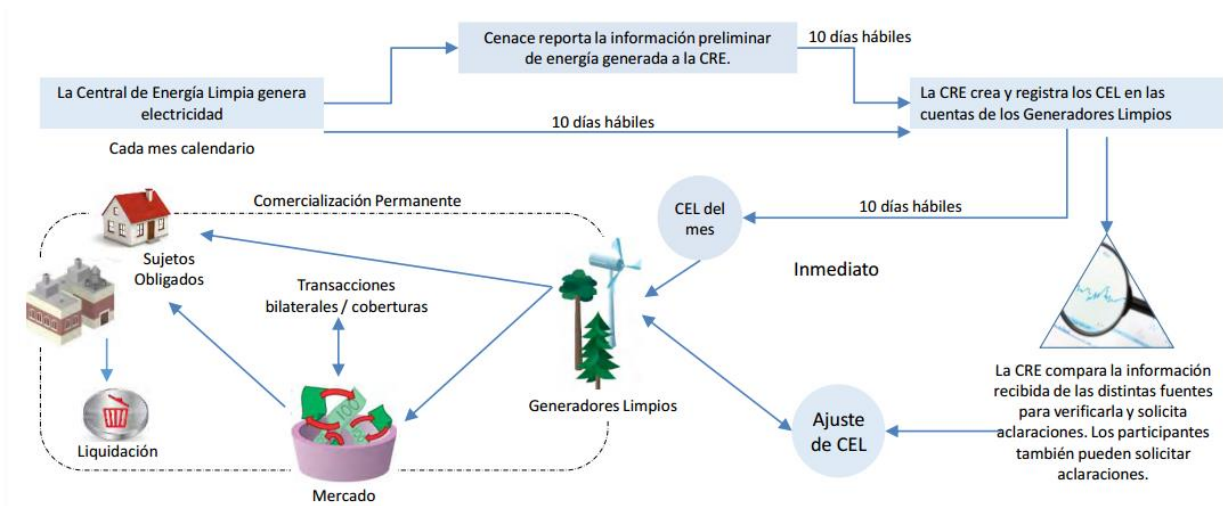


Figura 6. Procedimiento para recibir el CEL (CEL, s.f.)

1.2.4. Energías Renovables en México

De acuerdo con la agencia internacional de energías renovables (IRENA, por sus siglas en inglés), donde se da a conocer que generación de energía limpia renovable en México se integra por la generación de centrales hidroeléctricas, eololéctricas, fotovoltaicas y plantas que utilizan bioenergéticos.



La generación hidroeléctrica en el 2020 continúa representando el mayor porcentaje de las energías renovables con el 42.4%, seguida de la energía eoloeléctrica con 28.4%, la fotovoltaica con 20.77%, la geotérmica con 7.1% y, finalmente, la generación a partir de bioenergía, la cual representó el 1.3% de la generación renovable (Figura 7).

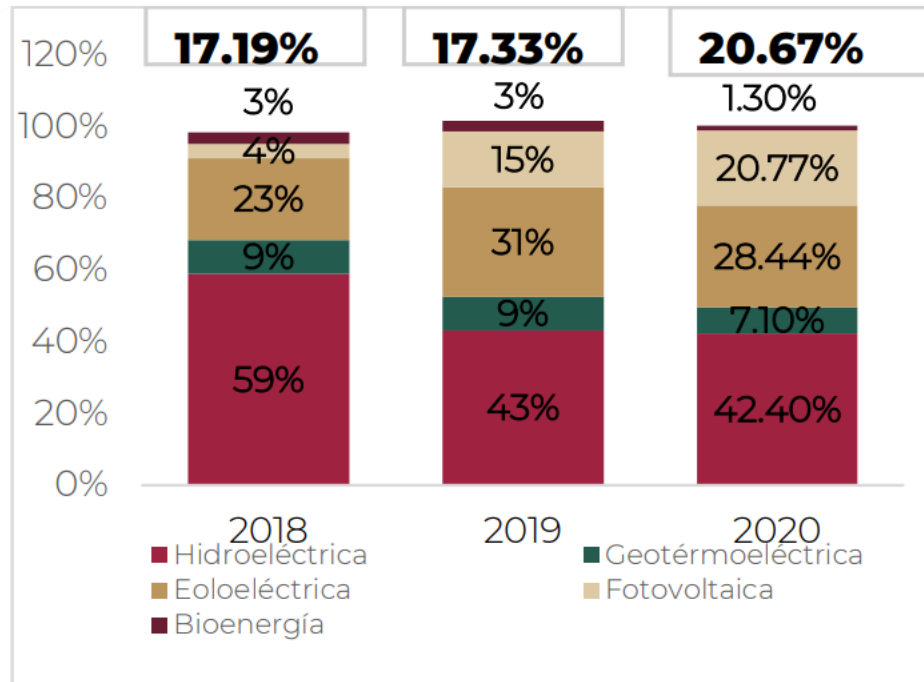


Figura 7. Evolución de la Generación Neta Renovable 2018-2020 (Secretaría de Energía (SENER), 2018)

1.3. Energía Undimotriz

Para lograr obtener dicha energía de la superficie del mar, primero es producir mediante el movimiento oscilaciones periódicas de las olas. Las cuales se forman por acción del viento además de descargar energía acumulada (combinación de energía cinética y energía potencial). Existen diferentes sistemas que convierten la energía undimotriz en energía eléctrica lo que se pueden catalogar en fijos o flotantes.

- Dispositivos de generación fijos:

Estos dispositivos son los que están edificados en la línea costera (en la rompiente de las olas) o adheridas al lecho marino en aguas poco profundas.

- Dispositivos de generación flotantes:



Estos sistemas se ubican flotando en el océano ya sea cerca o lejos de la costa equilibrio, que dependerán de las condiciones del viento (velocidad, tiempo y alcance). A manera de que toda oscilación periódica, las cuales se caracterizaran por su amplitud, longitud de onda y el periodo. Por lo que la potencia puede ser provocada por oscilación periódica, las olas se caracterizan por la amplitud, la longitud de onda y el periodo. Mejor dicho, su potencia puede reducirse hasta la mitad por efectos de fricción al disminuir la profundidad cerca de la costa.

1.3.1. Energía undimotriz en Baja California

De acuerdo con la publicación del periódico nombrado “El economista” se va a ubicar la primera planta de energía undimotriz en el país, más específico en Baja California entre las costas de Tijuana y Rosarito, por el momento, en aquella fecha y hasta la actualidad, no se ha dado a conocer la inversión del proyecto.

La planta se destinaba a estar ubicada frente a las costas de la Central Termoeléctrica presidente Juárez en Rosarito, Baja California, aproximadamente a 20 kilómetros al suroeste de Tijuana.

Se esperaba que la planta, tuviera una capacidad estimada de 3 MW y que estuviera en operación a finales del 2012, con el objetivo de distribuir la demanda futura de luz en esta zona, comentó el catedrático del Colegio de la Frontera Norte (Colef) y funcionario de la Secretaría de Energía, Alejandro Díaz Bautista.

Comentando que no se debe confundir la energía undimotriz con la mareomotriz y recalcando que en Europa ya existen plantas con buen rendimiento (Cervantes, 2012).

1.3.2. Convertidores de energía de las olas (WEC)

Existe una gran variedad de convertidores de energía de las olas, hasta el punto de que se han patentado miles de técnicas con el fin de aprovechar la energía oceánica (Soares, et al., 2012). Para una mejor comprensión de estos dispositivos los clasificaremos de acuerdo con su localización (Figura 8) aguas profundas (Off-shore), aguas poco profundas (Near-shore) y costeros (On-shore).

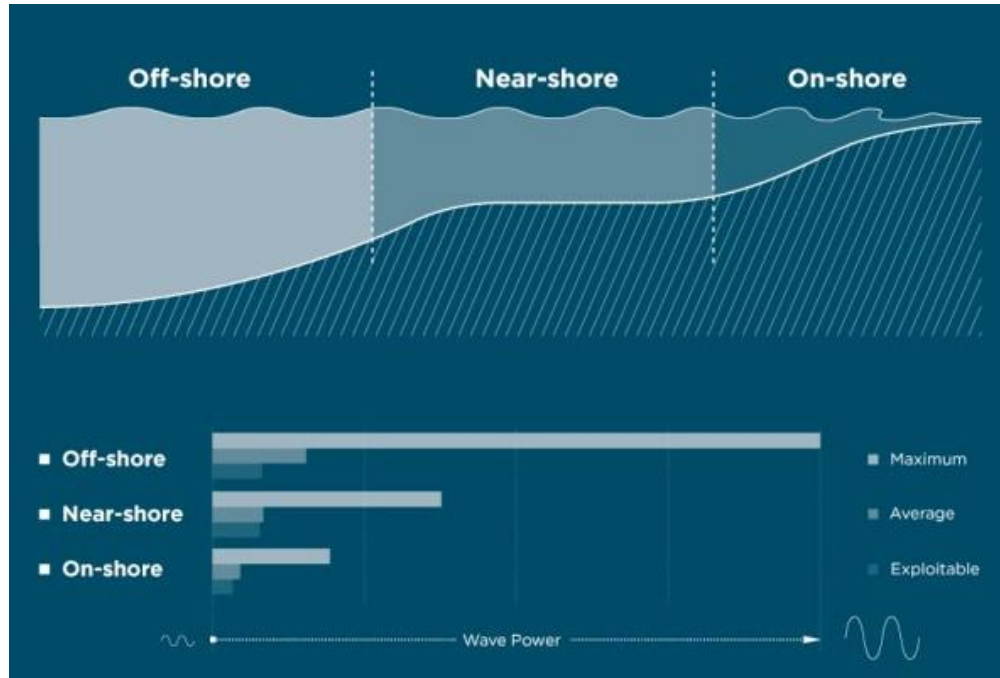


Figura 8. Potencia de las olas de acuerdo con la zona de localización (Eco Wave Power, 2022)

1.3.2.1. Aguas profundas (Off-shore)

Los dispositivos Off-shore son aquellos que están situados en aguas profundas, se considera de ese modo porque estos dispositivos se encuentran en marea alta a más de 40 m de profundidad o más de un tercio de ola. Estos mecanismos cuentan con una ventaja de acuerdo con su localización ya que se encuentran en una zona que cuenta con grandes cantidades de energía debido a un mayor contenido de las olas. Pero como desventaja tienen que son de difícil construcción y de mantenimiento, ya que deben diseñarse para soportar condiciones extremas debido a la altura y poder de las olas.

Los Wave dragón (figura 9) son dispositivos que ocupan un par de reflectores curvos, cuya función es recoger las olas y enfocarlas hacia una rampa donde fluyen hacia arriba, hasta llegar al embalse, donde el agua se desborda hasta llegar a una serie de turbinas low-head o de cabeza baja para aprovechar la energía cinética del agua, posterior a esto el agua regresa al mar (Drew & Plummer, 2009) (Drew & Li, 2018). En Dinamarca se ha empleado un dispositivo de prueba donde se lleva a cabo un extenso programa de medición (Soares, et al., 2012).



Figura 9. Wave Dragon (Gridlines, 2019)

Los sistemas Pelamis (figura 10) proyecto que se desarrolló en Inglaterra por Ocean Power Delivery (ahora conocida como Pelamis Wave Power), son un dispositivo compuesto por dos segmentos en forma cilíndrica de acero, (cuyo diámetro es de un aproximado de 3.5 m), conectados entre sí y están articuladas a dos grados de libertad. El movimiento que inducen las olas en estas articulaciones es resistido por cuatro cilindros hidráulicos que tienen la función de adaptarse tanto en movimientos horizontales como verticales. Los cilindros cumplen la función de una bomba ya que impulsan el fluido al motor, el cual acciona un generador eléctrico. Este sistema funciona con dos circuitos, dicho esto los acumuladores cumplen la tarea de desacoplar el circuito primario (bombas) del circuito secundario (motor), con la función de regular el flujo para una generación constante de energía.



Figura 10. Sistema Pelamis (The European Marine Energy Centre LTD (EMEC), s.f.)



Otro sistema es el PowerBouy (Figura 11) desarrollado por la empresa (Ocean Power Technologies , s.f.), este dispositivo actúa como una fuente de alimentación interrumpida la cual es recargada de manera constante aprovechando la energía de las olas. El PowerBouy se despliega al océano donde se encuentra sujeto y fijo en un punto. Además, cuenta con la característica de que puede operar a más 20 m de profundidad y puede llegar hasta una profundidad de 3000 m.



Figura 11. PowerBouy. (Ocean Power Technologies , s.f.)

El sistema Salter's Duck (Figura 12) es un absorbedor de olas, considerado uno de los más eficientes para la extracción de la energía oceánica. La estructura del rotor es diseñada de tal forma que la parte delantera es orientada en la dirección de la ola, lo cual provoca que el rotor suba y baje debido al movimiento de las olas del mar. La parte trasera tiene una forma circular con el fin de que las olas no se reflejen. Lo que hace especial al Duck es su forma circular, lo cual hace que absorba la energía de las olas con mayor eficiencia que otros dispositivos absorbedores (Kim, et al., 2019).

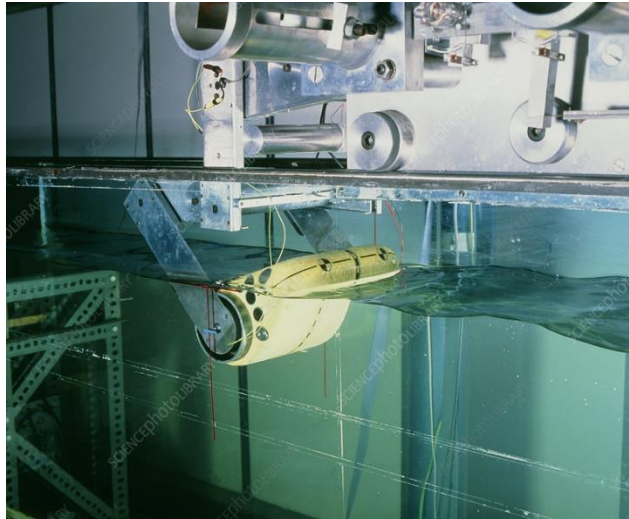


Figura 12. Modelo a escala de Salter's Duck de la universidad de Edimburgo

Otro dispositivo Off-shore son los Archimedes Wave Swing (AWS) (Figura 13), es un dispositivo submarino que se encuentra en la categoría de diferencial de presión sumergida, con lo que este dispositivo alcanza una profundidad de 43 m en alta mar. El AWS consiste en una cámara hidráulica anclada o fijada en el océano. Esta cámara hidráulica está cubierta sobre una tapa cilíndrica de aire. Cuando una cresta pasa por el dispositivo, la presión de agua comprime el aire que se encuentra dentro del cilindro provocando que se mueva el cilindro superior hacia abajo (Drew & Li, 2018) y a medida que pasan la cresta y los valles de la ola sobre el flotador, la altura de la columna de agua varia, lo que produce que el canal y la presión del agua en el dispositivo reduzca y entonces el cilindro superior vuelve a subir. Por último, en el interior del dispositivo el aire se comprime provocando un movimiento el cual accionara un generador eléctrico (Beirao, et al., 2007). Una de las ventajas que presenta estos dispositivos es que no presentan impacto ambiental, pero a la vez por estar sumergidas hacen que los costos por su mantenimiento sean demasiado elevados.

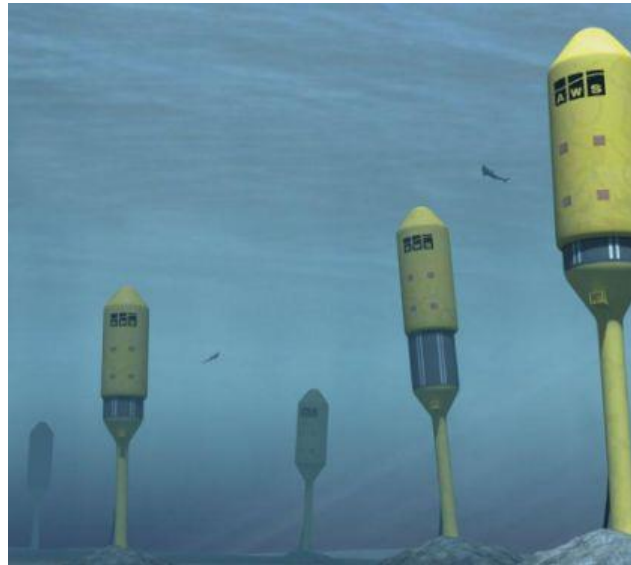


Figura 13. Archimedes Wave Swing (AWS) (Teamwork, s.f.)

El McCabe Wave Pump (Figura 14), es un dispositivo conformado por tres pontones de acero de forma rectangular estrechos (longitud de 40 m) los cuales se encuentran articulados. Alineados de tal forma que su dirección sea longitudinal a la ola. La parte esencial de este dispositivo es la placa amortiguadora que está unida al pontón central, lo cual aumenta su inercia y asegurar que con esto quede fija (Thorpe, 1999). Por lo tanto, los pontones Proa y Popa giran alrededor de la bisagra del pontón central, siendo la energía extraída de aquella rotación mediante los puntos de articulación a través de los puntos de las bisagras que, mediante arietes hidráulicos, los cuales están acoplados en el pontón central y las bisagras. La energía obtenida de estos dispositivos puede ser aprovechada de dos maneras, una es para la generación de energía eléctrica mediante una turbina hidráulica o bien para la producción de agua potable mediante un suministro de agua de mar a presión que sería utilizada en una planta de osmosis inversa. En 1996 se implementó un prototipo de este dispositivo de 40 m de largo frente a la costa de Kilbaha, Islandia.



Figura 14. McCabe Wave Pump ubicada en la costa Kilbaha, Islandia

El Wave Star (figura 15) es un dispositivo compuesto por dos conjuntos rectilíneos de flotadores, ubicados a ambos lados de una estructura de acero al cual se encuentran acoplados y alineados en la dirección que predomina el oleaje. Las oscilaciones de las boyas bombean aceite al sistema hidráulico (Soares, et al., 2012).



Figura 15. Wave Star energy ubicado en Brøndby Dinamarca (Wavestarenergy, s.f.)

1.3.2.2. Aguas poco profundas (Near-shore)

Estos dispositivos se definen así porque se encuentran cerca de la costa, por lo que cuentan con menos profundidad que los dispositivos off-shore. Los dispositivos de esta ubicación se unen a un lecho marino donde en ocasiones se aprovecha una buena



potencia de la marea. Solo que la desventaja que tienen estos dispositivos son los mismos que pueden tener los mecanismos on-shore, ya que a aguas poco profundas las olas provocan menos potencia.

Uno de los dispositivos que se ubican en esta zona es el Aquamarine PowerOyster (Figura 16) que es un convertidor de sobretensión de la onda oscilante (OWSC por sus siglas en inglés) Este mecanismo utiliza tecnología de energía de las olas ya que explota el movimiento horizontal de las partículas del fluido de las olas en la costa o cerca de la costa en una profundidad de 10 m o 20 m (Whittaker & Folley, 2012), a diferencia de otros mecanismos que su movimiento es vertical a las olas, por lo que este movimiento de oleaje garantiza una amplificación en aguas poco profundas debido a que se provoca un efecto llamado Shoaling effect induce por lo que hace la ola viaje sobre el gradiente de lecho marino (Soares, et al., 2012). Su ubicación cercana a la costa tiene la ventaja de que las cargas reduzcan con respecto a las costeras, pero la potencia de las olas igual reduce.



Figura 16. Estructura de Aquamarine PowerOyster (REUK. co.uk, 2021)

El Ocean Swell Powered Renewable Energy (OPREY) es un dispositivo que se sitúa en Dounreay, Escocia. En este mecanismo las olas ingresan a la base de la máquina donde son analizadas y redirigidos hacia una cámara. A medida que las olas oscilan, el aire entra y sale de la cámara, pasando por las turbinas para generar electricidad. Su estructura está diseñada con el propósito de generar 2 MW de electricidad los cuales son enviados a través de un cable submarino hacia la red Nacional. Este dispositivo se muestra en la figura 17.



Figura 17. Ocean Swell Powered Renewable Energy (OPREY) situada en Dounreay, Escocia

1.3.2.3. Costeros (On-Shore)

Los dispositivos On-shore cuentan con la ventaja de que se encuentran cerca de la red eléctrica ya que se encuentran en las costas, por lo que son de fácil instalación y mantenimiento, debido en aguas no profundas sufren menos daños. Pero estar ubicado en zonas costeras es una desventaja a la vez debido a que se produce una menor potencia del oleaje. Además, la zona de ubicación de estos dispositivos debe ser analizados previamente ya que deben de contar con ciertos parámetros para un buen aprovechamiento de la zona, tales parámetros pueden ser el rango de las mareas debido a que esta es el principal problema, otros parámetros son la geografía y geología de la costa.

Los sistemas TAPCHAN (Figura 18), consisten en un canal estrecho que alimenta un embalse que se encuentra construido en un acantilado. Este sistema se encuentra estrechado, lo cual hace que las olas eleven su amplitud cuando se encuentran cerca de la pared del acantilado. El dispositivo aprovecha la energía cinética de la ola convirtiéndola en energía potencial dentro del embalse, para que después pase por una turbina que acciona un generador eléctrico. Este sistema opera como una central hidroeléctrica en el mar. Una de las ventajas de los sistemas TAPCHAN es que son poco costosos para su instalación y mantenimiento. Pero como desventaja tienen que no se



pueden instalar en cualquier zona costera debido a ciertos parámetros que deben de cumplir, como el rango de la marea, producción de olas continuas, una ubicación apropiada para el embalse entre otros.

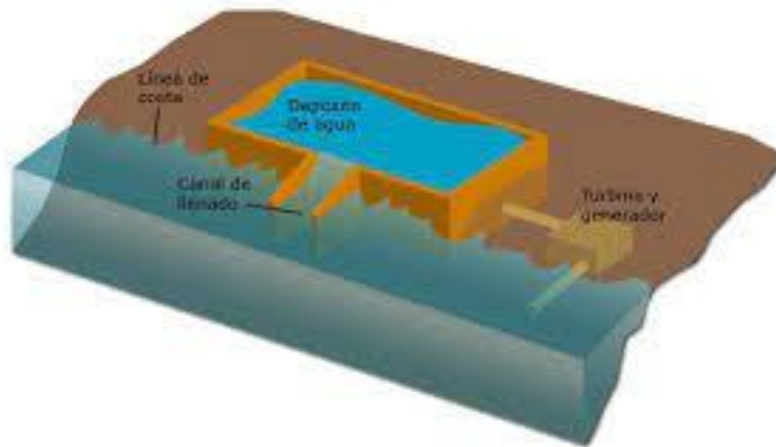


Figura 18. Sistema TAPCHAN (Vega, 2014)

Otro sistema On-shore es el Péndulo (Figura 19), dispositivo que aprovecha el empuje del oleaje que acciona el movimiento de una compuerta vertical capaz de girar en una serie de rodamientos. Con este giro se induce el movimiento de un pistón hidráulico conectado con un sistema mecánico que tienen la tarea de mover el generador eléctrico. Este dispositivo consta de tres partes primordiales, los cuales son el flotador, el péndulo y el amortiguador. Estos actúan sobre cuerpos de flotantes con el fin de aprovechar la potencia de las olas (Nam, et al., 2011).

La función de este dispositivo consiste en una aleta superior con bisagras el cual lleva a cabo la oscilación de las olas en un cajón de agua delimitado. En Japón el Instituto de Tecnología de Muroran, realizó pruebas de este dispositivo, donde los resultados mostraron que cuentan con buena eficiencia de entre un 40% hasta un 50%. Por lo que este dispositivo se vuelve una opción ideal para las costas japonesas, pero también se encuentran algunos inconvenientes para su implementación debido a que se deben corregir algunos arreglos técnicos entre la combinación del cajón y un sistema OWSC (Bakmeedeniya, et al., 2020).

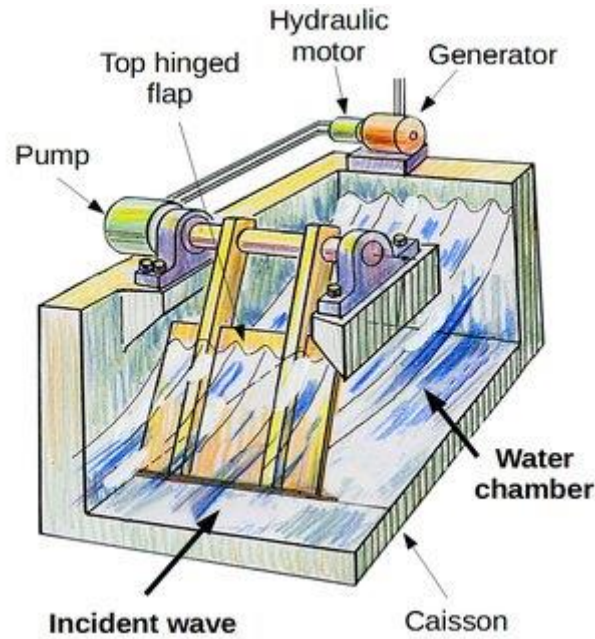


Figura 19. Esquema del dispositivo Péndulo prototipo (Watabe, 2007)

Un mecanismo costero más es el Wave Roller (Figura 20), este sistema se beneficia del movimiento transversal de la ola para convertirla en electricidad. El wave Roller consta de una placa plana conectada a dos pistones de doble efecto, el cual se encuentra sumergido en el agua para que aproveche el arrastre experimentado por la placa, con el fin de que puedan operar los pistones de doble efecto para enviar agua al sistema hidráulico y poder bombear agua al almacenamiento que se encuentra en el parte superior del sistema. Después el flujo pasa por una turbina que se encuentra en la parte inferior del sistema accionando el generador eléctrico. En Indonesia se ha implementado un prototipo del Wave Roller y sus resultados fueron positivos (Chehaze, et al., 2016).

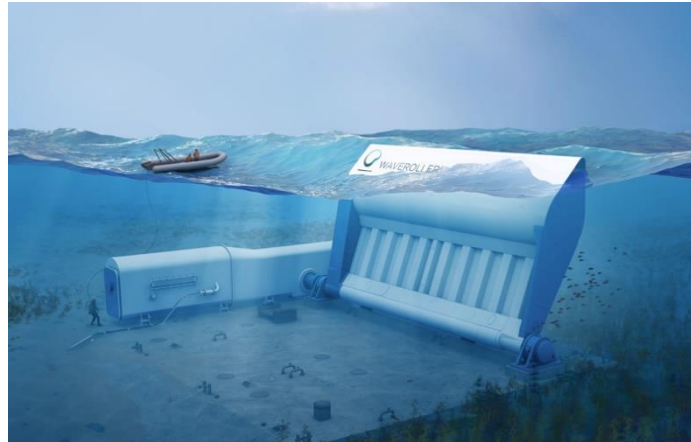


Figura 20. Prototipo de Wave Roller (WAVEROLLER PLUG INTO WAVE ENERGY, s.f.)

Entre otros dispositivos que también usan esta tecnología son el generador Seawave Slote-cone (SSG) (Figura 21). Este mecanismo utiliza el desbordamiento de las olas en múltiples yacimientos, los cuales se instalan a diferentes alturas, haciendo funcionar este mecanismo con una turbina de etapas múltiples para producir energía. Con el método utilizado el dispositivo es capaz de aprovechar la mayoría de las olas sin importar su tamaño y orientación, de las cuales se obtiene la energía potencial (Vicinanza, et al., 2009).



Figura 21. Seawave Slote-cone Generator (Vicinanza, et al., 2015)

En esta clasificación también se encuentra los sistemas OWC tema que desarrollaremos en el siguiente apartado

1.4. Sistemas de Columna de Agua Oscilante (OWC).

La incidencia que hay sobre la superficie de la Tierra logra causar irradiación solar la cual logra estimular el calentamiento desigual fabricando en la atmósfera zonas con diferentes presiones. Produciendo desplazamientos de aire de un lugar a otro, es decir generando vientos. Estos al desplazarse sobre la superficie del mar, transfiere la parte de su energía además de generar olas.

En cambio, las olas recolectan esa energía y la transportan de un lugar a otro hasta concluir en las costas. El desarrollo tecnológico de esta fuente de energía se basa en el principio de la columna de agua oscilante (OWC), tales dispositivos basados en este tipo de tecnología se logran de la oscilación natural del agua, se comienzan por las olas, para generar corriente de aire. Mencionada corriente de aire se hace circular por una turbina conectada a un generador eléctrico (Figura 22).



Figura 22. Partes de una central OWC (Valdéz, 2013)

La índole de las olas se fragmentan el sistema operativo de las OWC en dos semi ciclos. En primer lugar, cuando la ola transita en dirección a la cámara se comprime el aire que está dentro aumentando su presión lo que provoca una corriente de aire que acciona la turbina, posteriormente el aire se expelle a la atmósfera (denominada exhalación). Al momento que las olas regresan a la cámara se genera una depresión que aspira aire de la atmósfera y genera una nueva corriente de aire en sentido contrario que circula



nuevamente a través de la turbina (denomina inhalación), como se muestra en la figura 23.

En las zonas costeras (on-shore) se encuentran plantas OWC, brindando gran ventaja por su economía, simpleza en acceso para el mantenimiento incluso de un probable deterioro por condiciones meteorológicas insólitas, son inferiores en la infraestructura que la dispone; en compensación la energía libre de las olas es subalterno a las ubicadas en aguas abiertas (off-shore) (Valdéz, 2013).

Los elementos fundamentales que compone una planta OWC son:

- Cámara
- Turbina

1.4.1. Cámara

La cámara es un mecanismo despejado por la parte inferior y parcialmente inmersa en el mar, en el fragmento superior se encuentra enlazada a la atmósfera, accediendo al intercambio de aire en ambos sentidos. Encargándose de modificar la energía potencial de la ola en energía neumática, originando una corriente de aire bidireccional que traspasa la turbina.

Este elemento admite las olas y altera su energía en un diferencial de presión prevalecido en la turbina. El flujo de aire producido en la cámara por el oleaje no provoca el mismo tipo de comportamiento en ambos sentidos de flujo (Figura 23). Existe una gran cantidad de oscilaciones y rangos de velocidad las cuales pueden ir del régimen laminar a uno turbulento El manejo de la cámara condiciona el de la turbina y por lo tanto la energía alcanzada en el generador (Heath, et al., 2000).

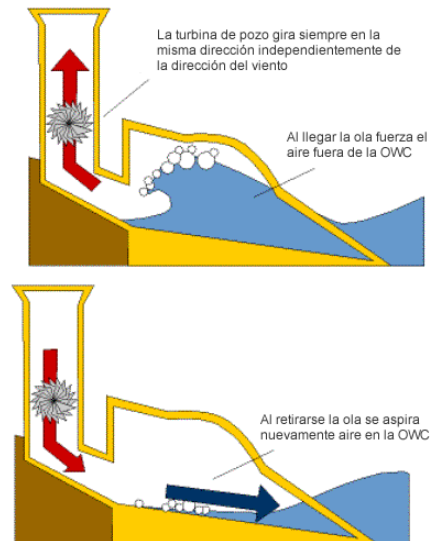


Figura 23. Operatividad de la cámara (Textoscientificos.com, 2009)

La geometría de la cámara ejecuta simultáneamente con la turbina. Donde la frecuencia de oscilación necesaria a las olas concuerda con ésta, obteniendo la amplitud máxima de oscilación de la columna de agua inclusive la energía neumática también es máxima (Castro, et al., 2012.).

Cada día se altera la frecuencia de las olas hasta especificar ciclos estacionarios en el paso de un año; debido a este fundamento es inexcusable analizar el comportamiento de la cámara y la turbina en los sistemas OWC, para acoplar las delimitaciones de la turbina según su geometría de cámara y de acuerdo con las condiciones de oleaje que se trate (Lopez, et al., 2012).

1.4.2. Turbina

La turbina es un elemento esencial de la central OWC también el más complicado de diseñar debido a que ejerce en condiciones muy desfavorables: flujo bidireccional, régimen no estacionario asimismo una extensa categoría de emplazamiento de operación ya que la naturaleza del oleaje es muy irregular. La optimización de la turbina es de suma importancia para prevalecer tanto el semi ciclo de inhalación como el de exhalación, (Anand, et al., 2007).



Para enmendar el tipo de flujo, el mecanismo original de una central OWC se basaba en turbinas unidireccionales intercaladas con sistemas de válvulas anti-retorno (McCormick, et al., 1992). De esta manera se contrarrestaban las problemáticas de la bidireccionalidad del flujo, sin embargo, el mantenimiento se volvía más complejo. Una vez dictaminando el problema sobre el flujo oscilante sin apelar a circuitos de corrección se forjaron las turbinas auto-rectificantes (Raghunathan, 1995).

Actualmente hay grandes grupos de turbinas auto-rectificantes, las características más importantes de este tipo de turbinas serán brevemente desarrolladas en los siguientes apartados.

1.4.2.1. Turbina Wells

Algunos de los problemas que se tuvieron con la generación de energía proveniente del océano, es que los materiales utilizados para las turbinas son corrosivos al contacto con el agua de mar. La solución a este inconveniente son los sistemas OWC debido a que utilizan aire comprimido que proviene del flujo y movimiento de las olas, provocando una oscilación que genera aire a presión dentro de la cámara. La turbina Wells (Figura 24) es una turbina bidireccional que aprovecha esta presión de aire utilizando perfiles aerodinámicos simétricos en el eje x y acomodados de forma perpendicular al flujo de aire. Esta turbina propuesta por Alan Wells de Queen's University, en 1976, determinó que con estos perfiles la turbina rotaría en una sola dirección sin importar la trayectoria del flujo de aire, siendo que, en las columnas de agua oscilante, se compone de dos ciclos los cuales son de inhalación y de exhalación, aprovechando ambos ciclos para la generación de energía, debido a los perfiles aerodinámicos simétricos logra que la turbina aproveche este flujo bidireccional. De acuerdo con esta característica se determina que el triángulo de velocidades es igual en inhalación tanto como en exhalación como se muestra en la figura 25.

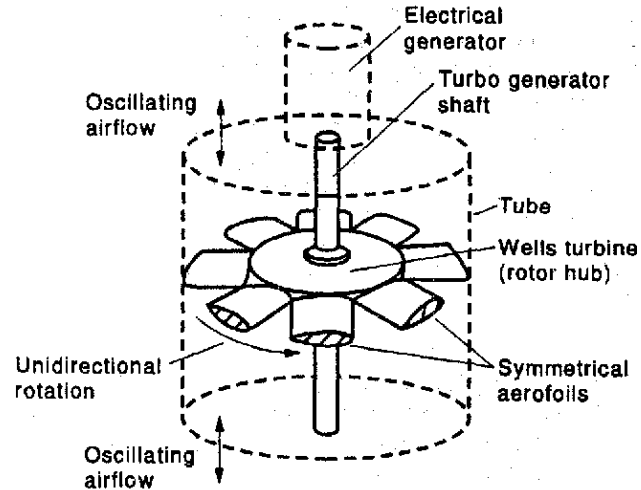


Figura 24. Turbina Wells Fuente: (Raghunathan & Watterson, 1996)

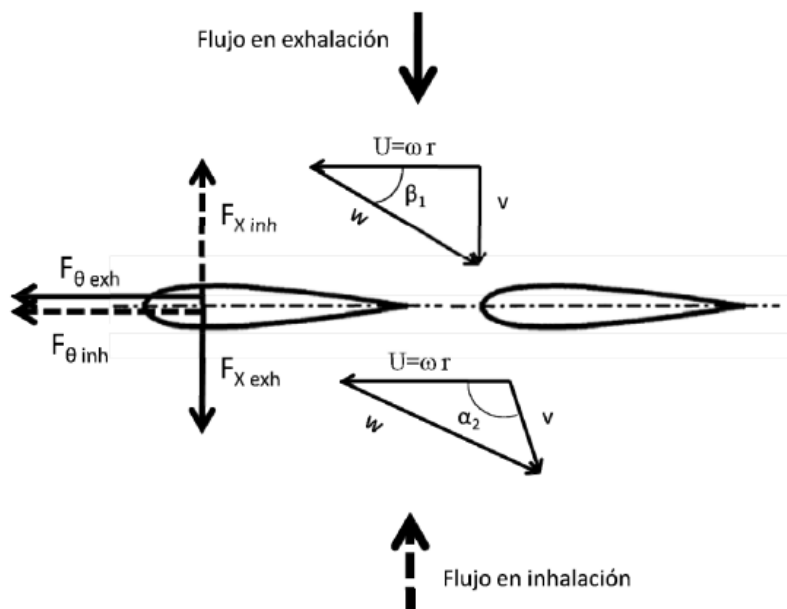


Figura 25. Triángulo de velocidades de una turbina Wells (Pereiras, 2008)

Debido a que el par de giro siempre es en el mismo sentido no necesita de dispositivos rectificadores de flujo como en el caso de las turbinas convencionales que si las necesitan, por lo que se considera una ventaja para aprovechar de mejor forma el flujo bidireccional.



Pero este tipo de turbinas al igual que las demás también tiene desventajas y es que tienen parámetros de caudal muy estrecho (figura 26) para que la turbina funcione en óptimas condiciones de eficiencia, esto debido al ángulo de ataque, por lo que con este dato determina el patrón de flujo con respecto a los alabes de la turbina.

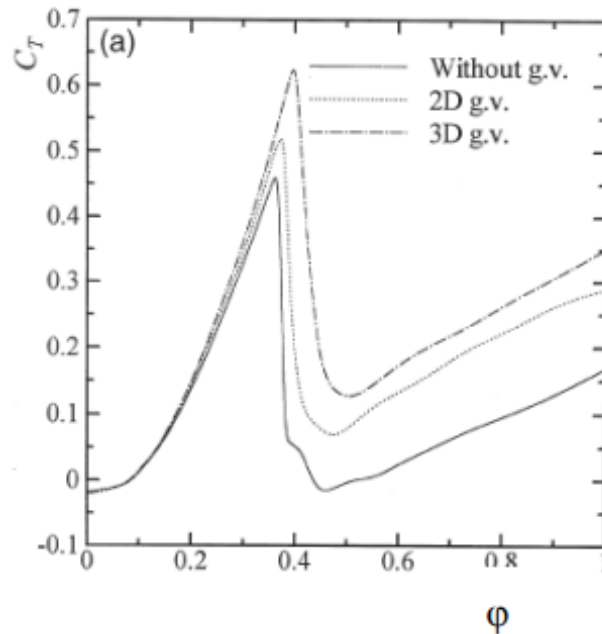


Figura 26. Rendimiento de varias turbinas Wells (Setoguchi, et al., 2001)

Para modificar estas inconvenientes se propusieron otro tipo de turbinas Wells, como: la turbina Wells con aletas directrices, WTGV (Wells Turbine with Guide Vanes), propuesta por Setoguchi en 1996.

En esta turbina se emplean dos coronas de aletas directrices en ambos lados del rodete (Figura 27). Con esta modificación en el rotor cambian los triángulos de velocidades, Debido a que el ángulo de ataque es superior a la posición de las coronas de aletas directrices y por ende de igual forma los triángulos a la salida cambian, lo que quiere decir que esta turbina solo sería aprovechable en un solo sentido por efecto del fluido, debido a que solo es eficaz con aguas arriba del rotor y las coronas directrices aprovechan ese sentido del fluido.

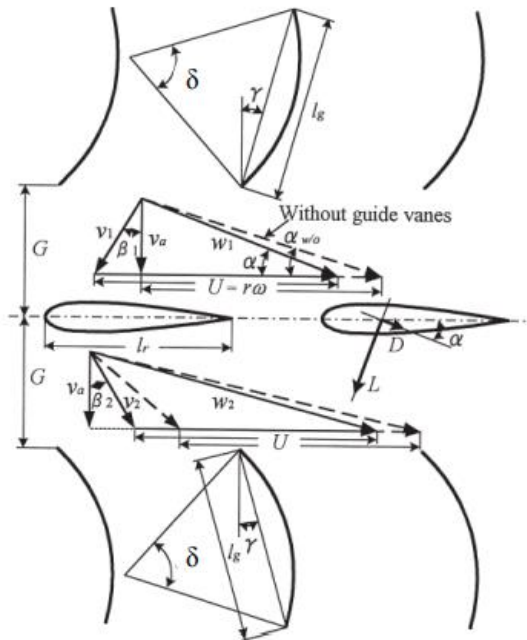


Figura 27. Turbina Wells con aletas directrices (Setoguchi, et al., 2001)

En un estudio hecho por (Setoguchi, et al., 2001), hicieron un análisis de las turbinas Wells con aletas directrices, donde compararon aletas 2D (Planas) y aletas 3D (Alabeadas), donde descubrieron que el ángulo de ataque es constante en todo el tramo del alabe, Por lo que la implementación de aletas directrices la turbina muestra una notable mejora, lo que quiere decir que hay un aumento de eficiencia en un 10% (Figura 28).

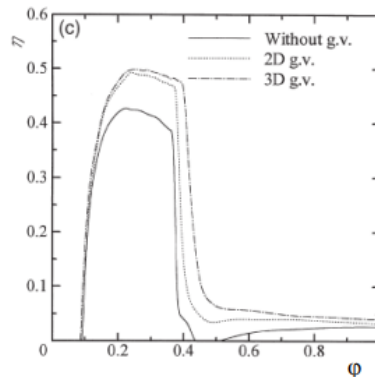


Figura 28. Influencia de aletas directrices y rendimiento de la turbina (Setoguchi, et al., 2001)

Por otro lado, también existen turbinas Wells con doble rotor debido a que el implemento de las turbinas multietapa necesitan aletas directrices en cada etapa por lo que su costo es excesivo para su implementación. Pero una forma más sencilla de diseño son las turbinas multiplano para más específico Turbinas Wells biplano que consta de un doble rotor con el mismo perfil alar ubicados en un mismo eje como se muestra en la figura 29.

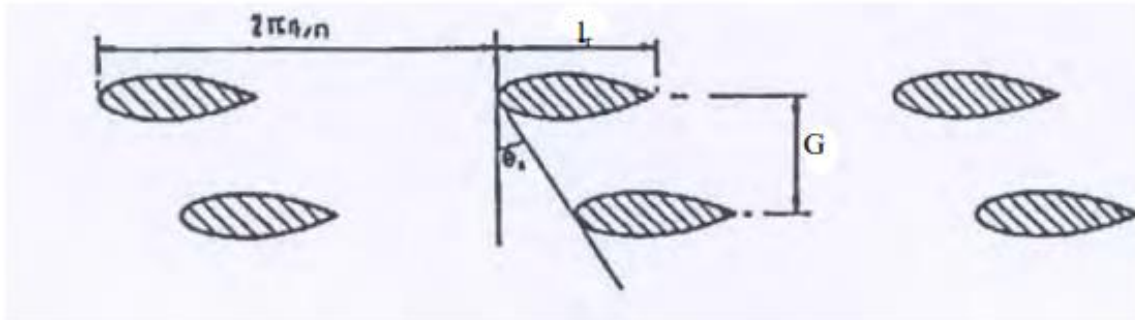


Figura 29. Esquema de una turbina Wells con doble rotor (Raghunathan, et al., 1987)

En esta turbina el triángulo de velocidades (figura 30) permanece igual en el primer monoplano, por lo tanto, este afecta al segundo porque altera el ángulo de incidencia de este perfil (Figura 31).

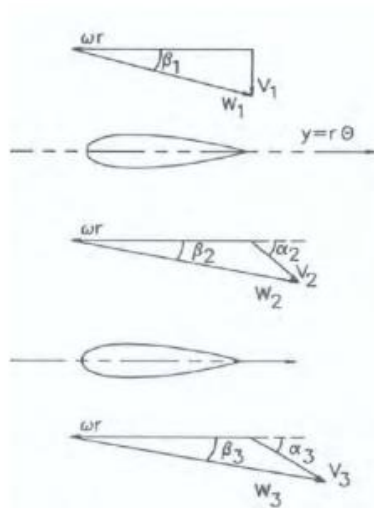


Figura 30. Triángulo de velocidades para una turbina Wells biplano (Gato & Curran, 1996)

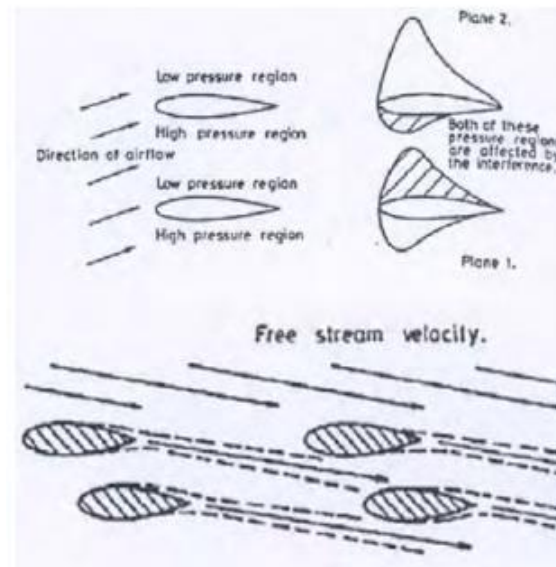


Figura 31. Interacción entre los dos rotores (Raghunathan, et al., 1987)

En la central LIMPET ubicada en Island Escocia utiliza turbinas Wells Biplanos con coronas directrices, y aunque en un principio las turbinas Biplano fueron pensadas en usar coronas directrices esto en un principio fue descartado, (Raghunathan, 1995), Pero sin embargo con su implementación en la central LIMPET se muestra que la turbina trabaja de una manera más óptima, donde incluso han arrojado buenos resultados por su implementación. La turbina Wells biplano con aletas directrices se denomina BWGV (Biplane Wells Guide Vanes) como se muestra en la figura 32.

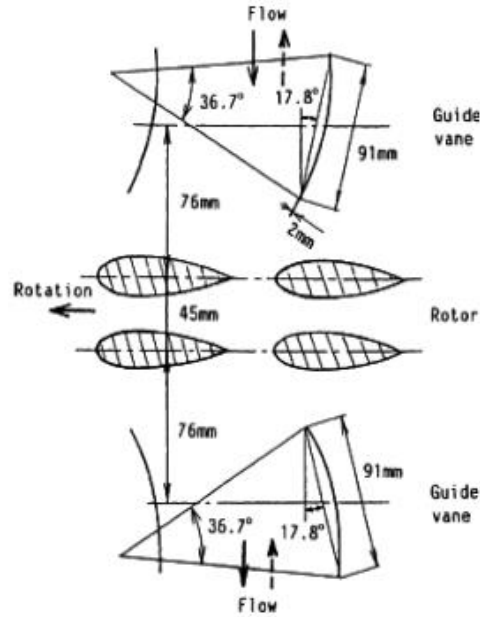


Figura 32. Turbina Wells Biplano con Aletas Directrices (Setoguchi & Takao, 2006)

Ahora bien, las turbinas Wells biplanos contrarrotantes, (Figura 33) en un principio fueron pensadas para implementarlas en la central LIMPET, esto en sus primeras etapas, sin embargo, no hay mucha información al respecto de estas turbinas.

La universidad de Belfast hizo un informe sobre las pruebas realizadas en la central acerca de esta turbina. En dicho informe se muestran resultados de rendimiento experimental, en donde se arroja un porcentaje de rendimiento para inhalación y para exhalación de un 44% y un 55% respectivamente, con este análisis experimental llegaron a la conclusión que el resultado está muy lejos de lo que se había previsto con los modelos numéricos (Pereiras, 2008).

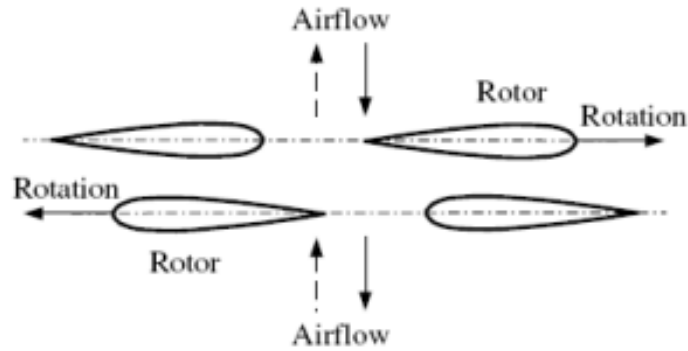


Figura 33. Esquema de Turbina Wells Biplano Contrarrotante (Setoguchi & Takao, 2006)

Las turbinas Wells con aletas orientables (denominada TSCB-Turbine with self-pitch-Controlled-Balled) (figura 34) tienen la característica de modificar el ángulo de incidencia del flujo relativo con la función de optimizar su rendimiento. Esto debido al pivoteo que ejerce el alabe orientable provocando la modificación del ángulo calado.

Al modificar el ángulo calado también se modifica el ángulo de incidencia del flujo por lo que por un lapso es posible retrasar el flujo que procede de la etapa de desprendimiento. Debido a que el alabe es orientable se logra conseguir un aumento de la eficiencia de la máquina, por lo que se logra un par de giro máximo con este alabe.

Por otra parte (Setoguchi, et al., 2001) propuso una turbina de aletas orientables combinada con coronas de aletas directrices, cuyo estudio resultó bueno, debido a que se obtuvo un aumento en el rendimiento considerable de la turbina.

En la planta OWC de PICO en las islas Azores se opera con una turbina con estas características y a su vez se ha consolidado como una de las turbinas más sobresalientes y prometedoras para un uso en avances futuros.

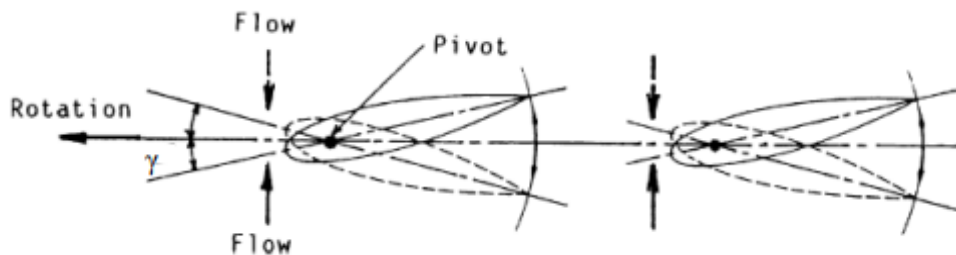


Figura 34. Esquema de una turbina con aletas orientables (Kim, et al., 2001)



1.4.2.2. Turbinas de Impulso

Las turbinas de impulso fueron propuestas como una diferente alternativa a las turbinas Wells en la década de los 90's. En este tipo de turbinas hay dos tipos y se dividen de acuerdo con el sentido del fluido que se lleva a cabo en la entrada y la salida del rotor. Estos dos tipos son turbina de impulso axial y turbina de impulso radial. La característica de la turbina axial es que el flujo de aire es igual sin importar su sentido de dirección, ya sea de inhalación o de exhalación mientras que en una turbina de impulso radial es diferente al sentido del flujo, por lo que sí es de inhalación es centrípeto y en exhalación es centrífugo.

1.4.2.2.1. Turbinas de impulso Axial

La primera turbomáquina de esta subfamilia se encuentra la turbina de flujo axial con aletas directrices fijas propuesta en 1988 por T.H. Kim (Thakker, et al., 2005). Esta turbina consta de un solo rotor y de dos coronas de aletas directrices fijas (Figura 35), cuyo funcionamiento es parecido a la de las turbinas Wells por su virtud de ser simétrica aprovecha el sentido del flujo de manera similar.

Esta turbina salió de una propuesta como una alternativa por las deficiencias de una turbina Wells

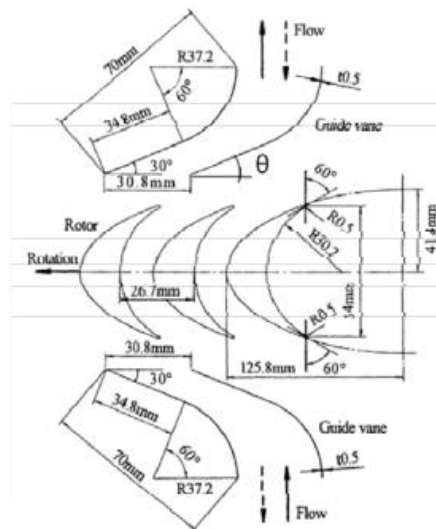


Figura 35. Esquema de una turbina de impulso axial con aletas directrices fijas (Maeda, et al., 1999)



Con respecto a su triángulo de velocidades (Figura 36) se representa para un sentido de flujo considerando que si lo invertimos obtenemos el mismo. Con ello se sabe que contamos con un flujo bidireccional, y es aquí donde nos encontramos con los primeros problemas de esta turbina, debido al funcionamiento de las coronas directrices, ya que la corona que se encuentra aguas arriba conduce el flujo redireccionándolo hacia el rodete para aprovechar la energía, pero en cambio, la corona directriz colocada aguas abajo es un impedimento para la salida del flujo.

Con lo antes dicho el rendimiento de esta turbina es inferior a la de una turbina Wells, ya que la turbina de impulso axial cuenta con un rendimiento de alrededor de un 15% (Figura 37). La ventaja es que la turbina de impulso axial junto con las aletas directrices cuenta con un rango mayor a caudales altos en comparación con la Wells, pero a caudales bajos cuenta con menor rango con respecto a la misma turbina. Las condiciones en donde podemos aprovechar mejor esta turbina es que los caudales sean variados para obtener un mejor rendimiento y aprovechar al máximo la turbina.

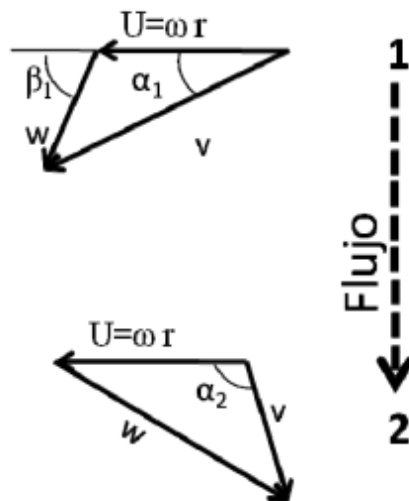


Figura 36. Triángulo de velocidades para una turbina de impulso axial con aletas directrices fijas
(Pereiras, 2008)

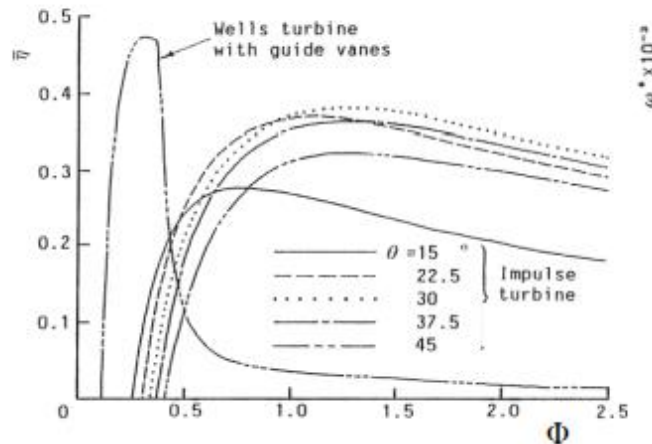


Figura 37. Comparación de rendimiento entre una turbina Wells y una turbina de impulso axial (Setoguchi, et al., 2001)

En cambio, con el fin de mejorar la turbina de impulso axial con aletas fijas (Setoguchi, et al., 1996), una turbina de impulso axial con aletas orientables denominada ISGV (Impulse Turbine Self-pitch Guide Vanes) (figura 38).

Esta turbina físicamente parecida a la IFGV, la diferencia es que en esta las aletas pivotean tal como la turbina Wells con aletas orientables. La mejora de estas aletas es que aprovechan el flujo sin importar su sentido mejorando así una de las problemáticas de la turbina anterior con sus aletas fijas. Por lo que la aleta orientable que se sitúa aguas abajo se sitúa en una posición correcta y óptima para redireccionar el flujo al rodete, y la aleta aguas arriba tiene la función de que el flujo llegue al rotor sin que se llegue a obstruir.

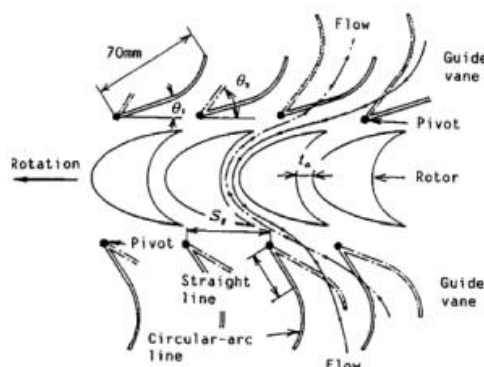


Figura 38. Esquema de la turbina de impulso axial con aletas orientables (Setoguchi & Takao, 2006)



Para concluir y basándonos en los resultados, la turbina de impulso axial con aletas orientables tiene mejor rendimiento en comparación con la turbina de impulso Axial con aletas fijas, superando de igual manera a la turbina Wells con aletas directrices. Considerando que la única turbina Wells que puede hacerle frente a la turbina de impulso con aletas orientables es la turbina Wells con aletas orientables de acuerdo con el rendimiento mostrado anteriormente.

La siguiente turbina se desarrolló en 1978 por McCormick debido al proyecto que se llevó a cabo en Japón “Kaimer”. Esta turbina de impulso axial consta de un doble rodete contrarrotante y cuenta con dos coronas de aletas directrices (Figura 39). Los rotores son coaxiales y se combinan por una sola conexión Como tal no existe mucha información acerca de esta turbina. Pero se sabe que alcanza un rendimiento del 36% información obtenida en un laboratorio OWC.

Otro motivo por el cual esta turbina no cuenta con muchos estudios es debido a su diseño aerodinámico, ya que es muy complejo debido al sistema de doble rodete contrarrotante y otro de sus problemas es que es muy costosa para su fabricación, razón por la cual no es viable comercialmente, al igual que su mantenimiento es elevado.

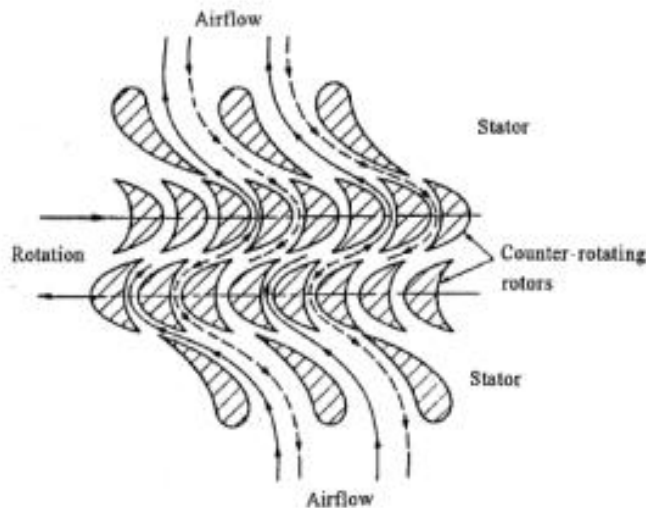


Figura 39. Esquema de una turbina axial contrarrotante con aletas directrices (Setoguchi & Takao, 2006)



1.4.2.2.2. Turbinas de impulso radial

La turbina de impulso radial con aletas directrices fijas, (McCormick & Cochran, 1993) se compone de dos estatores fijos con aletas direccionales y un rotor con alabes (figura 40), similares a los de una turbina de impulso axial. Considerando que el patrón de flujo en los semi ciclos de inhalación y exhalación los flujos son centrípetos y centrífugos respectivamente. Contrario a una turbina Wells o la turbina de impulso axial donde el flujo de aire no sufre un impulso axial adicional.

Esta turbina de impulso radial cuenta con dos coronas de aletas directrices y con un rotor, del cual cuenta con el mismo perfil que la turbina de impulso axial. El funcionamiento de esta turbina en los semi ciclos es diferente como antes se mencionó. Por lo que a la entrada del flujo (inhalación) a través del conducto de la OWC para llegar a la turbina pasa por la corona directriz interior de manera axial, hasta llegar al rotor, posterior a esto pasa por último por la corona directriz externa da salida al fujo de aire. En exhalación el sentido del flujo es radial por lo que este hace el mismo recorrido de manera inversa.

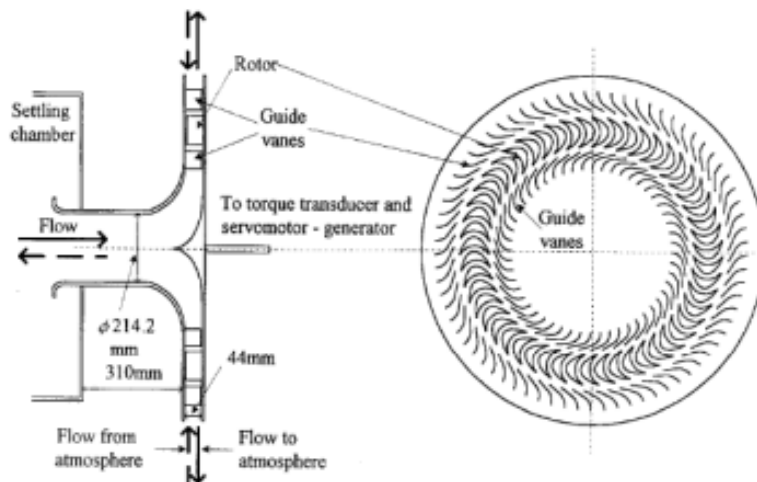


Figura 40. Esquema de turbina de flujo radial (Setoguchi, et al., 2002)

La turbina de impulso radial con aletas orientables (figura 41) (Takao, et al., 2005), cuenta con el mismo mecanismo de funcionamiento que la turbina Wells y axial en función para pivotar y conseguir que las aletas se coordinen de acuerdo con el flujo, ya sea en el ciclo de inhalación o exhalación.

En un estudio se demuestra que la turbina de impulso radial aumenta su rendimiento mostrando un incremento en un 10%. Pero a pesar de que se muestra mejoras en el rendimiento hay un inconveniente y es que al igual que en las turbinas de impulso axial su coste es demasiado elevado, haciendo difícil la instalación de la turbina al igual que el mantenimiento.

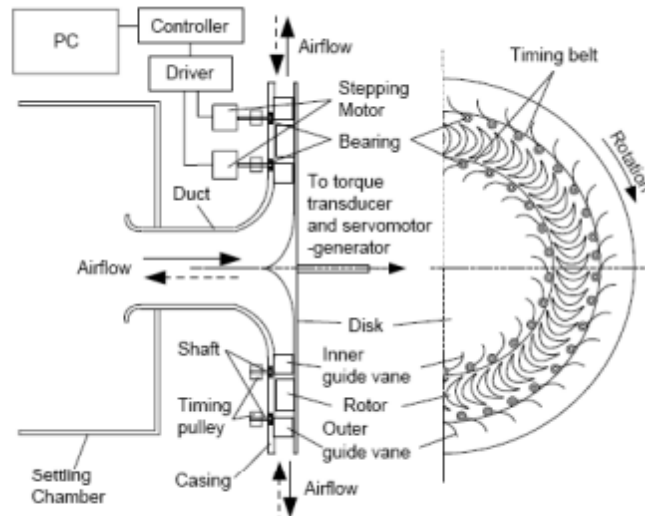


Figura 41. Esquema de una turbina de impulso radial con aletas orientables (Takao, et al., 2005)

1.5. Proyectos relacionados con la energía undimotriz

Hay varios diseños que se han planteado para la obtención de energías provenientes de los oleajes. Entre ellos se pueden destacar los siguientes proyectos que se han implementado.

1.5.1. Islay LIMPET

Es un dispositivo costero que se utiliza en una OWC inclinado rectangular que conduce el flujo de aire generando a través de dos turbinas de pozo que giran en sentido opuesto, acopladas a un generador de inducción de 250 kW que causa al dispositivo una potencia de salida máxima de 500 kW. Este dispositivo está situado en el Reino Unido de la isla de Islay Escocia (figura 42).



Figura 42. Costa de Escocia de la LIMPET OWC (Cuan B. Boake, 2002)

El LIMPET OWC cuenta con una inclinación en un ángulo de 40° con respecto a la horizontal (figura 43). Teniendo dos claras ventajas en relación con la columna de agua vertical de uno de sus prototipos, su columna inclinada y el labio frontal con un gran radio reduciendo a sí la turbulencia de entrada y el chapoteo interno. Verdaderamente particular en las costas en el cual los efectos de las aguas poco profundas aumentan los movimientos de las olas en relación con el oleaje.

Esto quiere decir que el plano de agua de las OWC para tener una sección transversal en la cámara dada. La masa de agua remolcada determina la resonancia de la columna de agua además se puede acoplar al período predominante de las olas entrantes (Cuan B. Boake, 2002).

Con sus pruebas de tanque ellos arrojaron que el rendimiento hidrodinámico mejorado de las columnas de agua inclinadas en comparación con sus contrapartes verticales.

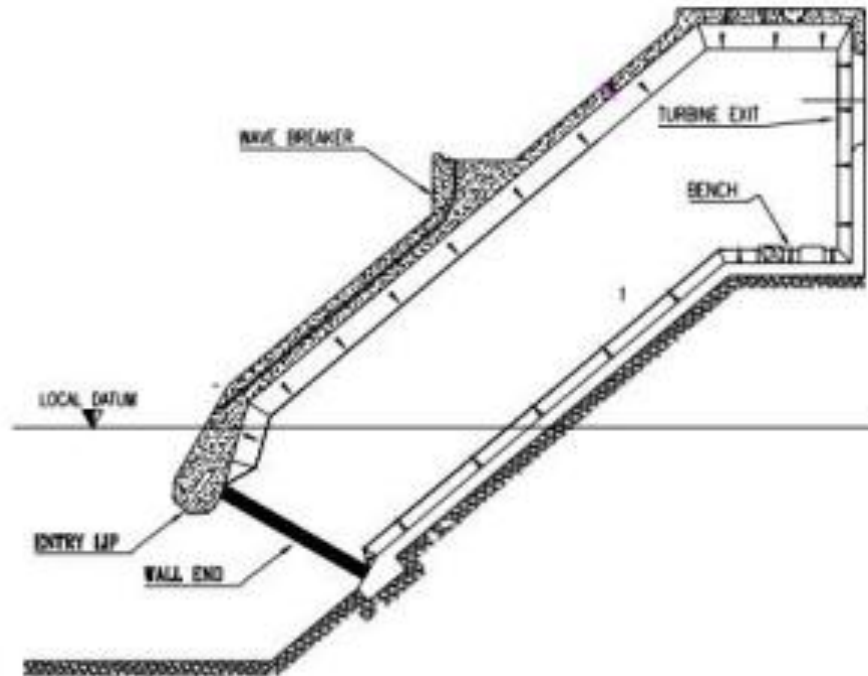


Figura 43. Sección Axial a través del colector (Cuan B. Boake, 2002)

El colector reduce la cantidad de agua que rebasa el colector agua que cae detrás del colector está muy aireada en lugar de ser de alta densidad (Cuan B. Boake, 2002).

Los objetivos iniciales del proyecto eran:

- Construir un OWC con una capacidad de 500 kW.
- Conectar la planta a la red eléctrica local y operar el central como prototipo de central eléctrica.
- Experimentar con diferentes configuraciones de control para optimizar la adaptación de la planta a diferentes estados del mar. Comparando el rendimiento a gran escala con las predicciones de modelos matemáticos y de tanques de olas.

1.5.2. Escocia e Irlanda

La empresa Orbital Marine Power, ha anunciado el lanzamiento del proyecto nombrado O², que trata de una turbina mareomotriz que zarpo de Dundee a finales de abril, instalada



en la isla Orcadas al norte de Escocia (Figura 44). Cuyo objetivo es aprovechar las fuertes oscilaciones de las olas para ejercer el giro en dos aspas gigantes y producir la electricidad.

El proyecto se enfoca en sumergir en cada una de las tres instalaciones situadas en las costas escocesas e irlandesas 20 turbinas de tipo Lånstrøm, este tipo de turbina se basa en los movimientos de las mareas propiciadas por la atracción gravitatoria que la Luna produce de forma natural. Fabricadas por la empresa noruega Hammerfest Strøm, capaces de funcionar a 100 metros de profundidad. Sus 30 metros de alto y sus palas de 20 metros de longitud permiten a esta turbina desarrollar un megavatio (MW) de potencia. Por lo que sus 60 MW totales podrían suministrar electricidad a 40.000 hogares.

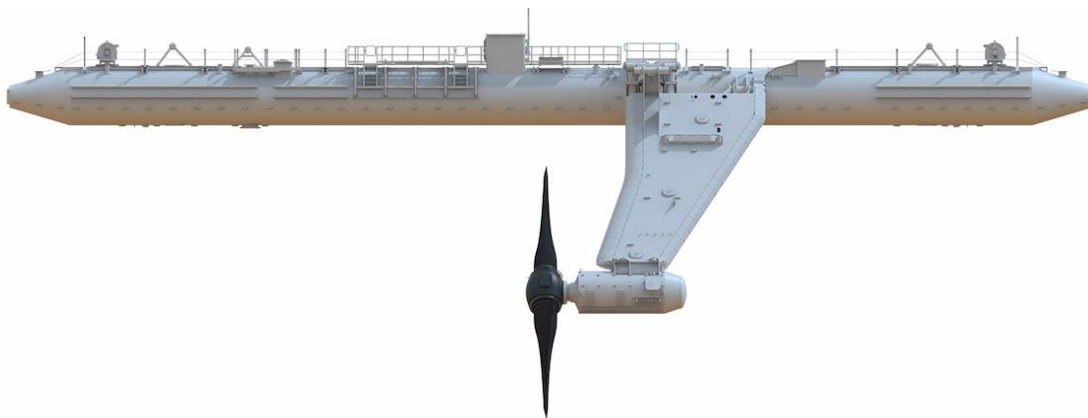


Figura 44. Turbina tipo Lånstrøm (Volvo TecVolución , 2021)

A diferencia de los demás proyectos que utilizan gigantescas barreras fijas con compuertas móviles, la O² utiliza 2 hélices que quedan por debajo de la superficie de agua (Volvo TecVolución , 2021).

1.5.3. Portugal (Pico Azores)

La construcción de la planta OWC en la isla de Pico Azores, Portugal, comenzó en 1996. La estructura de la cámara fue construida de hormigón de planta cuadrada y con dimensiones interiores de 12 m por el nivel medio del mar, construido en in-situ sobre un fondo rocoso. La parte superior de la cámara y el eje de la turbina estaban a 11.5 m y 9.8



m, respectivamente, por encima del nivel medio del agua. El volumen de la cámara de aire era de 1050 m^3 . El grosor de las paredes laterales de la cámara era de 1.0 m, y el grosor de la pared posterior era de 1.5 m. La parte superior de la pared frontal (inclinada en un ángulo de 28° con respecto a la vertical) tenía un grosor de 1.5 m, mientras que la parte vertical inferior tenía un grosor de 2 m. La inmersión de la pared frontal era de 3.7 m.

La planta OWC estuvo equipada con un grupo de turbina-generator de 400 kW, siendo que esta planta tenía un funcionamiento automatizado para suministrar energía eléctrica a la red de la isla.

La planta iba a estar equipada con una turbina Wells de eje horizontal que accionaba un generador eléctrico. Se dejó espacio para instalar un segundo grupo turbina-generator (Falcão, et al., 2020).



Figura 45. Planta OWC en la isla Pico Azores Portugal (Falcão, et al., 2020)

1.5.4. Mutriku (Guipúzcoa).

La planta de energía undimotriz de Mutriku (Gipuzkoa) (Figura 46) cumpliendo 5 años genero 1.3 GWh de electricidad, lo que constituye un “récord mundial” de generación de energía por este medio, tal y como ha destacado el lehendakari, Iñigo Urkullu. Esta central undimotriz se inauguró en julio de 2011 y es la primera planta de olas en Europa que comercializa la energía que genera. Cuenta con 16 turbinas de aire comprimido que generan una potencia de 296 KW. Las turbinas funcionan con una tecnología de "columna



de agua oscilante", basada en la creación de corrientes de aire mediante el cambio de nivel del agua en una cámara gracias al movimiento de las olas (Mitriku Turismoa, 2011). Además de producir energía, esta planta ofrece una oportunidad única para el ensayo de nuevos conceptos de turbinas de aire, estrategias de control y equipamiento auxiliar. Para ello pone a disposición de los desarrolladores las siguientes instalaciones:

- Cámara de aire fijada al dique
- Apertura circular de 750 mm de diámetro que conecta la cámara de aire con la turbina.
- Conexión a la red de distribución local
- Disponibilidad de datos de sensores: presión y nivel de agua dentro de la cámara, humedad y temperatura ambiental en la galería.



Figura 46. Planta Mitriku (Ibarra, et al., 2017)



CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA UNA OWC.



2.1. Parámetros característicos

Los vientos generan desplazamientos de corrientes de convección propagando estos fenómenos nombrados “vientos”. Los cuales alteran la superficie del mar por las oscilaciones de presión, además la energía presente en el interior transporta energía cinética y potencial del mar (Figura 47) en forma de movimiento oscilatorio designada “oleaje” (Durán, 2017). La transferencia de energía va a precisar del tiempo de esta, de la velocidad de los vientos incluso la superficie del mar que es afectada por los mismos.

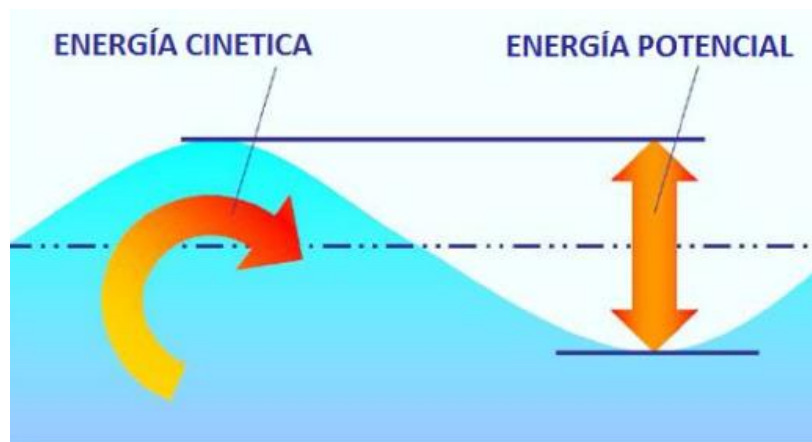


Figura 47. Energía de la ola (Duran & Vázquez, 2014)

Mediante el surgimiento de las oscilaciones de olas movidas por el viento que se encuentra permanentemente en los océanos. El movimiento de las olas genera energía undimotriz que es transformada en energía eléctrica obtenida a partir de energía mecánica (Durán, 2017).

Las olas incorporan tanto energía cinética como energía potencial. La potencia dependerá de la altura de la ola también el periodo y comúnmente dada en unidades de potencia entre unidades de longitud (W/m). Su correlación del viento con el mar causa una transferencia por parte de la energía del viento sobre la superficie marina, rectificando la energía y dando origen a las olas (Durán, 2017).

Caracterizándose de la siguiente manera (Figura 48):



- Longitud de onda (λ o L): distancia que puede hallarse entre dos picos consecutivos.
- Altura de onda (H): distancia de altura entre pico y valle.
- Periodo (T): periodo de tiempo dado en segundos que debe de tardar un valle o pico de la ola en recorrer su longitud de onda
- Frecuencia (F): frecuencia de la ola y se define como el número de oscilaciones pico a pico (también puede ser de valle a valle) de la superficie de la ola por segundos, y siendo el inverso del periodo.

Dependerá de tres factores el tamaño de las olas generadas por su campo de viento:

1. La velocidad del viento
2. Tiempo durante el cual se encuentre soplando
3. La distancia o alcance de la energía del viento que se transfiere al océano para formar olas.

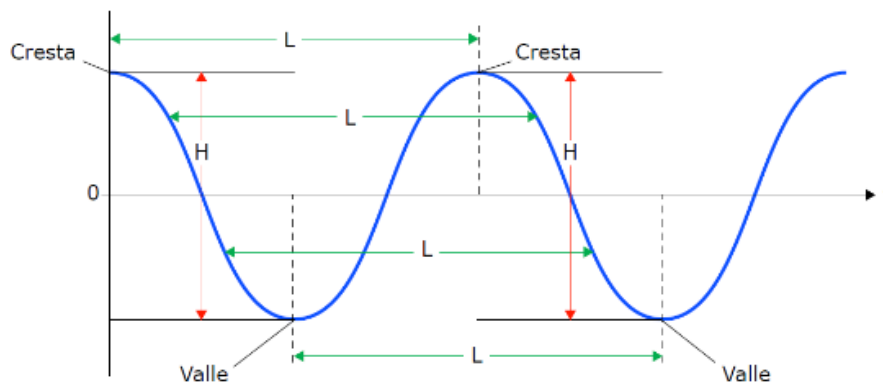


Figura 48. Características de una onda senoidal pura (Eduambiental, s.f.)

A decir verdad, el océano no se adecua mediante ondas senoidales debido a su comportamiento. El fenómeno de análisis espectral es cuya superficie puede ser estructurada como agregación de ondas de amplitud variable (figura 49). La superposición de ondas se compone por el estado peculiar del mar obteniendo características propias, es decir la velocidad, periodo, altura de onda y dirección. El vínculo de las ondas se logra observar cuando se mira la superficie del mar, su envolvente de estas olas permite que viajen a una velocidad distinta de las ondas individuales y es nombrada velocidad de grupo (Durán, 2017).



Figura 49. Superposición de ondas de un estado típico del mar (Durán, 2017)

Se logra observar que hay más cantidad de energía cuando las olas son accionadas por el viento, diversos parámetros afectan constantemente el comportamiento y su fisonomía de las olas en sus vastos mares y océanos, por ejemplo:

- Acción del viento
- Terremotos y tormentas
- Sol y luna.

Las olas también son analizadas por su tiempo de duración como se muestra en la Figura 50.

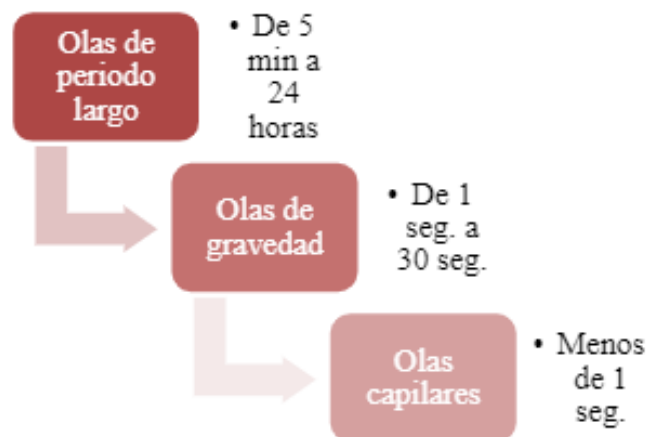


Figura 50. Periodo de duración del oleaje (Durán, 2017)



Cuando el oleaje se aleja de la zona que sopla el viento (figura 51 y 52) se logran ir propagando de acuerdo con su velocidad, en función de la longitud de onda λ u L . La longitud de onda se logra agrupar, formando así olas casi regulares, que dan lugar al mar, aprovechando para generar la energía. Hay olas con más amplitud que obtiene mayor energía por metro, y las olas pequeñas cuantifican la potencia de la ola y no su contenido de energía. Esto quiere decir que es importante el tamaño de la ola, todo esto dependerá de la velocidad del viento, de la duración, de la longitud expuesta a la acción del viento teniendo la gran ventaja de que las olas viajan a distancias grandes del punto de origen perdiendo el mínimo de energía (Durán, 2017).

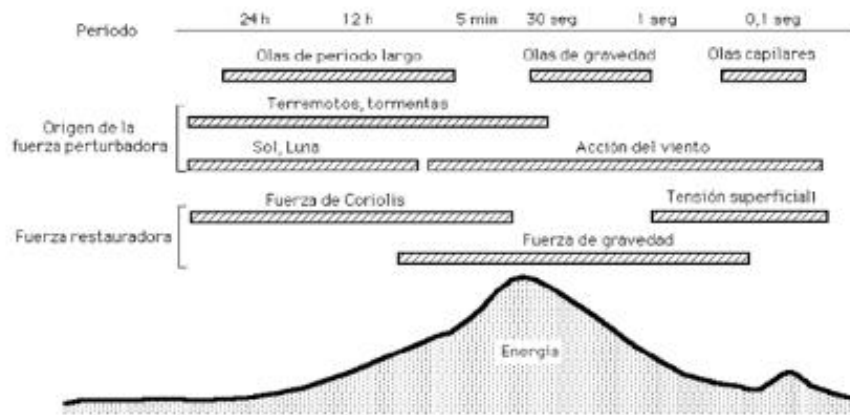


Figura 51. Representación esquemática de los tipos de olas respecto a su duración (Eduambiental, s.f.)

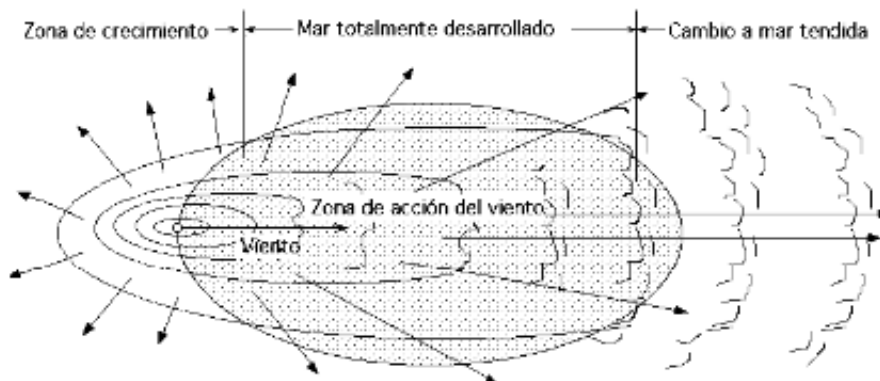


Figura 52. Acción del viento sobre una zona determinada del mar (Eduambiental, s.f.)



2.2. Mecánica de fluidos para sistemas OWC

Las propiedades de los fluidos, a la aplicación de leyes básicas de mecánica y termodinámica en una base experimental. Conocemos que dicha ciencia estudia los problemas de movimiento y desequilibrio de cuerpos materiales, así como sus interacciones mutuas. Dividiéndose en tres ramas:

1. Estática: estudia las leyes de composición de fuerza y desequilibrio.
2. Cinemática: trata las propiedades geométricas del movimiento de los cuerpos.
3. Dinámica: estudia las leyes de movimiento bajo la acción de fuerzas.

2.2.1. Cinemática de Fluidos

Dentro de la cinemática de fluidos tenemos dos enfoques:

Enfoque Lagrangiana (seguir una partícula o viajar en ella): este enfoque se emplea el paquete de fluido como un sólido donde cada partícula se mantendrá la misma posición relativa con el resto de las partículas. Por lo tanto, para un fluido cuyo movimiento es de manera irregular, las partículas se mezclan por lo que se hace necesario aprobar otro enfoque para hacer el análisis (Modon, 2017).

Enfoque Euleriano (observador en reposo): se observa como varían las propiedades en cierto punto del espacio. El fluido se irá removiendo continuamente, no interesa una partícula individual sino ver la variación de las condiciones del flujo en cierto punto (también podemos considerarlo como un volumen de control fijo).

Trayectoria: es el lugar geométrico de las distintas posiciones ocupadas por una partícula en su movimiento (Modon, 2017).

Línea de corriente: es una línea continua proyectada en el fluido, de tal modo que tenga la dirección del vector velocidad en cada punto. Por consiguiente, no puede haber flujo a través de una línea de corriente, por eso también se denomina línea impermeable (Figura 53).

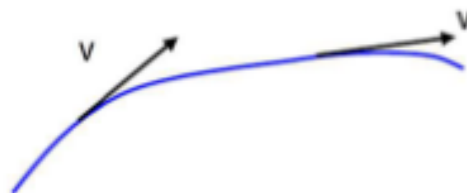


Figura 53. Línea de corriente o impermeable (continuamente tiene igual dirección que el vector velocidad) (Modon, 2017)

Las líneas de campo con 3 componentes especiales de la velocidad de acuerdo con los ejes correspondientes a (x, y, z), el campo de átomos tridimensional sigue a los tres componentes. La función de velocidad derivada del vector R de la partícula en función del tiempo, derivando a cada una con el tiempo por ser bidireccional. Igualando las derivadas parciales respecto al tiempo queda la ecuación de líneas de corriente:

$$\bar{v} = \frac{dx}{u} = \frac{dy}{v} = \frac{dz}{w}$$

2.2.2. Características físicas del estado fluido.

Continuo: es un medio hipotético que suple la estructura molecular real de un fluido, de tamaño grande respecto de la distancia intermolecular (Modon, 2017).

Fluido: es una sustancia que se amorfa continuamente cuando se somete a esfuerzos cortantes, sin importar que tan pequeños sean. Sabemos que un esfuerzo es la fuerza por unidad de área, y el esfuerzo de corte es la fuerza paralela a una superficie, distribuida en toda la superficie, dividido por dicha área (Modon, 2017):

$$\tau = \frac{F_{\parallel}}{A}$$

Características del fluido:

- Puede fluir
- Cambia de forma
- No resiste fuerzas tangenciales
- Puede ser líquido o gas



2.2.3. Líneas y Tubos de Flujo

Una línea de flujo es el trayecto que recorre la partícula individual en un fluido en actividad. En un flujo duradero (constante), esto sucede a cada elemento que pasa por un punto dado dirigido a la misma línea de flujo. Las líneas de flujo que pasan por el borde de un elemento de área imaginario forman un tubo denominado tubo de flujo (Figura 54) (Modon, 2017).

Por lo tanto, una línea de corriente es una curva cuya tangente en cualquier punto tiene la dirección de la velocidad del fluido en ese punto. Si el patrón de flujo cambia con el tiempo, las líneas de corriente no coinciden con las de flujo (Modon, 2017).

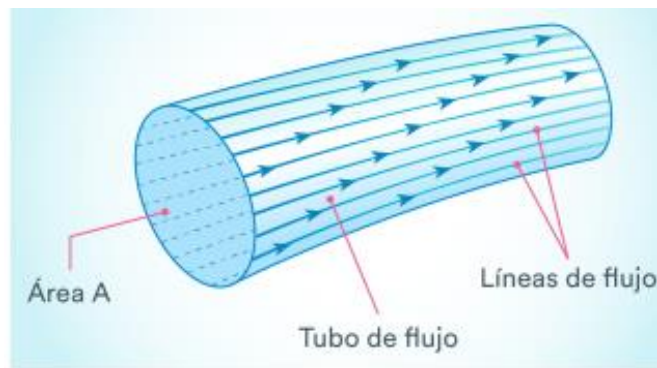


Figura 54. Tubo de flujo (Modon, 2017)

2.3. Dinámica de fluidos

2.3.1. Ecuación de Continuidad

Dicha ecuación es producto de la ley de conservación de la masa, que manifiesta que, en un conducto o tubería, sin importar su sección; mientras no existan derivaciones, la cantidad de fluido que entra por uno de sus extremos debe salir por el otro. Por lo tanto,



se conserva el fluido a través de la tubería. En caso de que no existan pérdidas de flujo dentro del tubo uniforme, la masa de fluido que accede es igual a la que sale del tubo en un tiempo, por ejemplo, en la figura 55, la masa (Δm_1) que entra y la masa (Δm_2) que sale en el tubo durante un tiempo corto (Δt) (Modon, 2017).

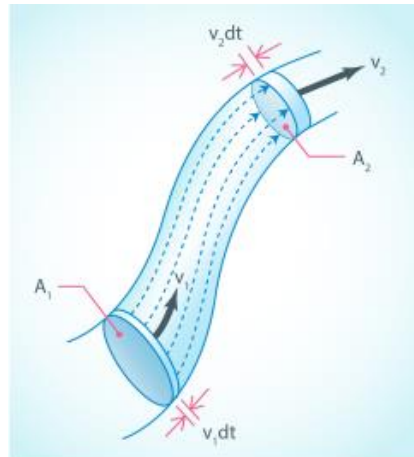


Figura 55. Tubo con masa de entrada y salida durante un periodo corto (Modon, 2017)

$$Q_1 = Q_2 \Rightarrow S_1(v_1) = S_2(v_2)$$

S es la superficie de las secciones transversales de los puntos 1 y 2 del conducto, v es la velocidad del fluido en los puntos 1 y 2 de la tubería.

Se puede decir que, puesto que el caudal debe mantenerse constante a lo largo de todo el conducto, cuando la sección disminuye, la velocidad del flujo aumenta en la misma proporción y viceversa.

En la figura 56 se puede ver como la sección se reduce de A1 a A2. Teniendo en cuenta la ecuación anterior:

$$v_2 = v_1 \left(\frac{A_1}{A_2} \right)$$

Es decir, la velocidad en el estrechamiento aumenta de forma proporcional a lo que se reduce la sección. Este resultado se denomina ecuación de continuidad.



2.3.1.1. Ecuación de Continuidad en Fluidos Ideales

Si un fluido es incompresible, su densidad ρ es constante, así que

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Donde dicho resultado se percibe como la ecuación de continuidad un fluido ideal. En cambio, la cantidad Av se conoce como caudal promedio Q y representa el volumen del fluido que pasa por un punto en el tubo por unidad de tiempo (Figura 56) (Modon, 2017).

$$Q \equiv \frac{dV}{dt}$$

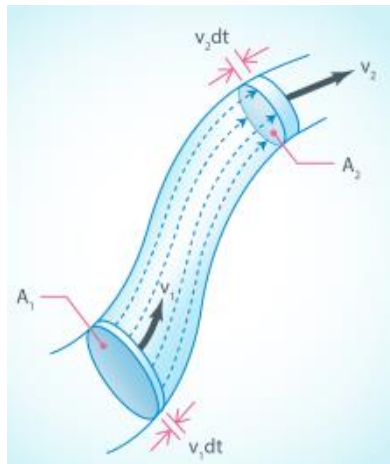


Figura 56. Continuidad en un fluido ideal (Modon, 2017)

2.3.2. Equilibrio dinámico – Ecuaciones de Euler

La ecuación fundamental de la hidrodinámica (Bernoulli) se deriva de la ecuación de Euler (Modon, 2017).

Para derivar las ecuaciones de Euler estudiamos:

- Fuerzas que participan en el movimiento del fluido: conjeturar un volumen de control que traspasa por un fluido ideal en régimen permanente y movimiento irrotacional, como resultado, las únicas fuerzas actuantes serán la de gravedad y la debida a una determinada presión.
- Componentes de la aceleración en un punto.

2.3.3. Ecuación de Bernoulli

La conservación de energía, o el teorema general trabajo-energía, lleva a otra relación muy general para el flujo de fluidos. El primero en deducir dicha relación fue el matemático



suizo Daniel Bernoulli en 1738. Consideramos un fluido circulando de modo estacionario a través de una tubería que no es horizontal. La presión variará de un punto a otro a lo largo de la tubería y debe realizarse cierto trabajo para que el fluido circule, la velocidad del fluido y la presión también variarán.

Inicialmente el fluido está entre los puntos 1 y 2. La totalidad del fluido se mueve en el tiempo Δt , pasando a estar entre el punto 1' ($1 + \Delta x_1$) y el punto 2' ($2 + \Delta x_2$).

El resultado de Bernoulli fue:

$$0 = \frac{dP}{\rho} + g dz + w dw$$

Se supone que esta la podemos obtener integrando directamente a partir de la ecuación de Euler.

La ecuación de Bernoulli establece la conservación de la energía mecánica entre cualquier par de puntos de una línea de corriente.

$$\int_1^2 \frac{dP}{\gamma} + \int_1^2 dz + \int_1^2 \frac{1}{2g} d(v^2) = 0 \rightarrow \frac{P_1 - P_2}{\gamma} + (z^2 - z^1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}$$

Por consiguiente, a lo extenso de una línea de corriente la suma de energías debidas a la presión, altura, incluso velocidad, en un punto 1 debe ser igual a la suma de estas en un punto 2, se conserve la energía, y si el fluido es ideal incompresible (o compresible) el balance debe ser nulo (si no se tiene en cuenta la fricción) (Modon, 2017).

A la suma $P/\gamma + z + v^2 / 2g = cte = H$, se le llama altura de carga hidrodinámica total (Figura 57) y se mide en energía por unidad de peso, por ejemplo, kgfm/kgf ó m.

Se representa la línea de carga ideal:

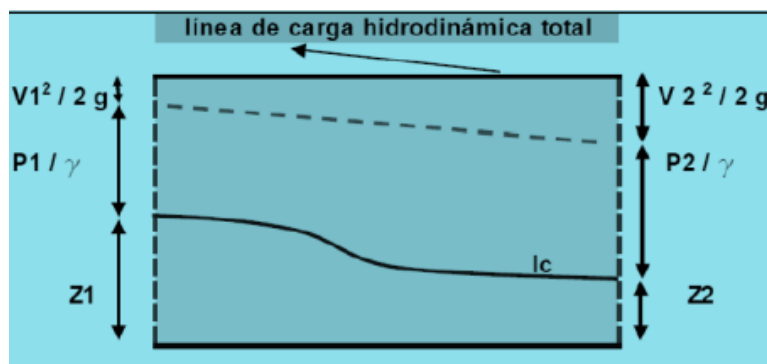


Figura 57. Línea de carga hidrodinámica total (Modon, 2017)

Debido a la viscosidad μ , la línea de carga de un fluido real no es horizontal.

2.3.3.1. Aplicación de Bernoulli Orificio de un embalse (ecuación de Torricelli):

Se maneja para medir el caudal de salida de un depósito, e indirectamente su velocidad, el orificio puede hacerse en la pared o en el fondo del depósito. En el orificio de bordes agudos el chorro de fluido se contrae a lo extenso de una corta distancia de alrededor de medio diámetro aguas debajo de la abertura (Figura 58). En una OWC la ecuación dados los orificios de descarga de la cámara de aire, el área de la sección transversal donde la contracción es máxima se conoce como vena contracta. Las líneas de corriente en esta sección son paralelas y la presión es la atmosférica. (Modon, 2017)

La cabeza H se mide desde el centro del orificio hasta la superficie libre. Se supone que la cabeza se mantiene constante. (Modon, 2017)

Aplicamos Bernoulli entre 1 y 2:

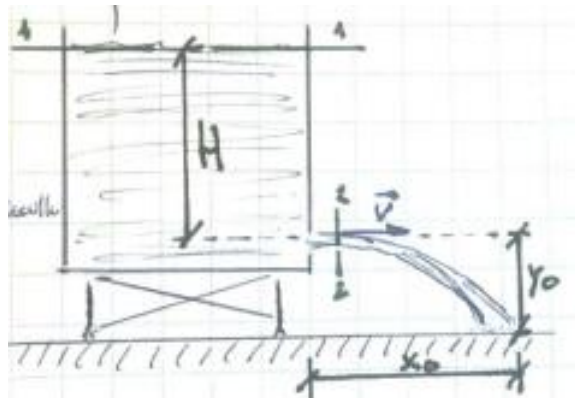


Figura 58. Representación de orificio en un embalse (Modon, 2017)

La ecuación de Torricelli establece que la velocidad del flujo de salida es igual a la velocidad de caída libre desde la superficie del embalse (Modon, 2017).

$$v_1 = \sqrt{2g(y_2 - y_1)} = \sqrt{2gh}$$

Donde el aire entra al generador con una cierta velocidad debida a la diferencia de alturas entre la parte superior de la presa y la salida de aire. Por tanto, la energía potencial del



aire se transforma en energía cinética y esta a su vez se emplea para mover las turbinas del generador que produce la electricidad.

2.3.4. Tubo de Pitot y Tubo de Prandtl

El tubo Pitot es un modo preciso y permanente para medir la velocidad (Figura 59). Se usa un tubo de vidrio a 90° donde el flujo se dirige hacia arriba de tal manera que el fluido fluye hacia la rendija hasta que la presión en el tubo alcanza valores suficientemente altos como para frenar el impacto de la velocidad contra él. Directamente sobre la rendija el fluido se encuentra en reposo, la línea de corriente que va de 1 a 2 (punto de estancamiento, pues allí en 2 el fluido está en reposo, y el resto de fluido se divide y circula alrededor del tubo) (Modon, 2017).

El tubo de Pitot (Figura 59) mide la presión de estancamiento la cual se conoce también como presión total, la cual está compuesta por dos partes, la presión estática h_0 y la presión dinámica Δh (Modon, 2017).

Aplicación: mide la velocidad de un fluido o la de un objeto que se traslade respecto de ese fluido.

Tubo de Pitot y Prandtl: intercalar las mediciones de la presión estática (tubo piezométrico) y la medición de la presión total (tubo de Pitot), se obtiene la cabeza de presión dinámica (Modon, 2017).

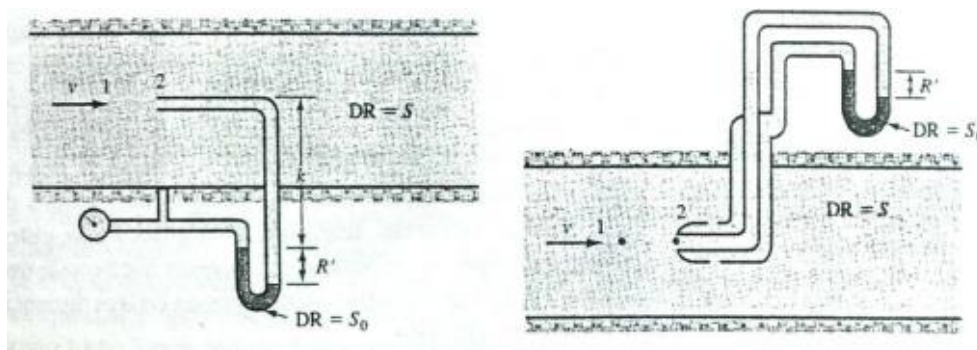


Figura 59. Medición de velocidad, a) tubo Pitot y rendija piezométrica, b) tubo Pitot estático (Modon, 2017)

$$v = \sqrt{2 g h_R \frac{\gamma'}{\gamma} - 1}$$



Esta combinación se suele llamar Tubo de Pitot Estático (Figura 60), con un diseño particular con tubo de nariz redondeada nombrada Tubo de Prandtl que elimina las perturbaciones debidas a la nariz y al brazo, y tiene idénticas expresiones:

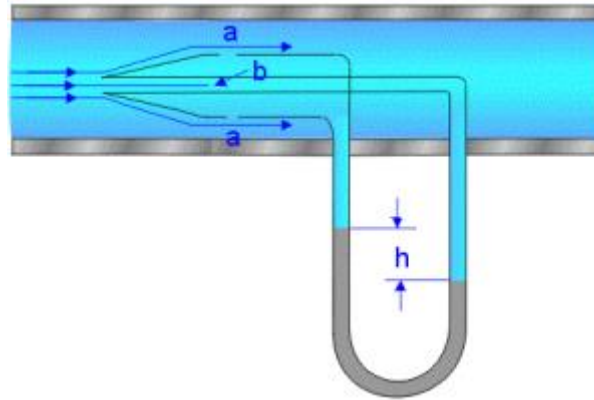


Figura 60. Tubo Pitot estático (Física, s.f.)

2.3.5. Tubo de Venturi, Tobera y placa orificio.

El tubo Venturi (figura 61) emplea la presión diferencial que la placa de orificio. Él tubo de Venturi usa una reducción propia en el volumen del tubo y no es usado en tuberías con mayor diámetro donde se vuelve pesado y extensamente difuso así mismo las ventajas del tubo Venturi es la capacidad para el manejo de grandes cantidades de solidos en suspensión, crea menos turbulencias y, por ende, menos perdidas de inserción que la placa de orificio. Las tomas de presión diferencial en el tubo ubicadas en el diámetro mínimo y máximo de la tubería (Grupo SIE, s.f.).

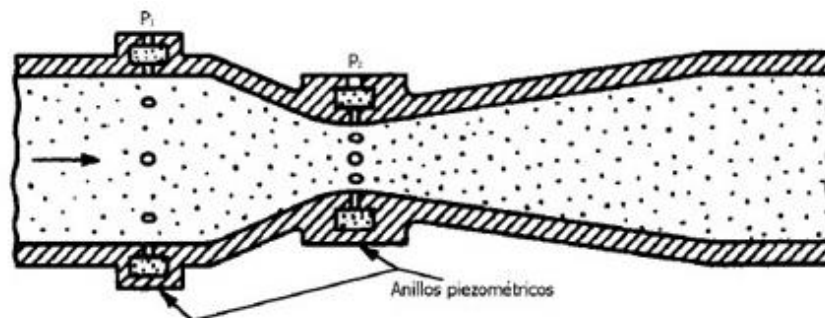


Figura 61. Tubo Venturi (Grupo SIE, s.f.)



El tubo Venturi se compone de tres secciones como se muestra en la figura 62:

1. Entrada
2. Garganta
3. Salida

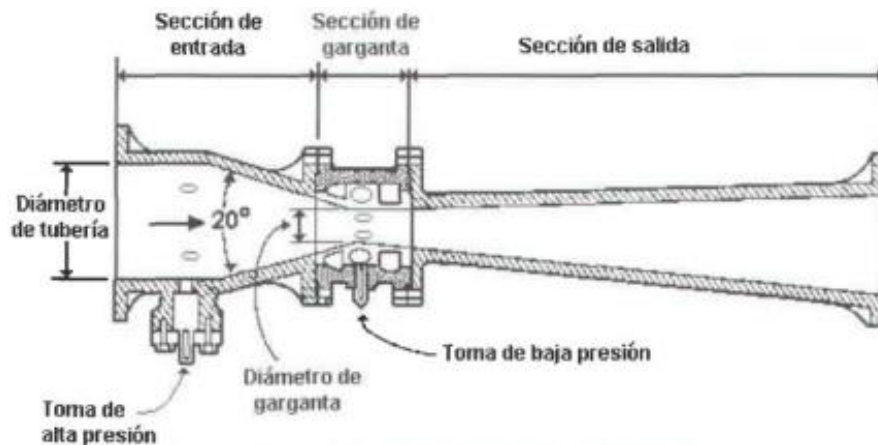


Figura 62. Sección transversal de un tubo Venturi, donde se anotan las partes principales que lo integran (Rivas & IMTA, 2001)

La sección de entrada tiene un diámetro inicial igual al diámetro de la tubería y una sección cónica convergente que termina con un diámetro igual al de la garganta: la salida consiste en una sección cónica divergente que concluye con el diámetro de la tubería (Rivas & IMTA, 2001).

Se utiliza para medir la tasa de flujo en una tubería. Generalmente es una pieza fundida que consta de las siguientes partes:

- 1- Una porción aguas arriba, la cual tiene el mismo calibre de la tubería, tiene un revestimiento en bronce y un anillo piezométrico.
- 2- Un régimen convergente
- 3- Una garganta cilíndrica con revestimiento de bronce que contiene un anillo piezométrico.
- 4- Una región cónica gradualmente divergente que desemboca en una sección cilíndrica del calibre de la tubería. Un manómetro diferencial empalmada los dos anillos piezométricos. El calibre del medidor Venturi se especifica por el tamaño del diámetro de la cañería y el diámetro de la garganta (por ej. "6x4"). Para obtener



resultados acertados el medidor debe ser precedido de una cañería recta de al menos 10 diámetros. En la garganta la velocidad aumenta y la presión disminuye, luego si el flujo es incompresible, $Q = fc (\Delta h man)$ (Modon, 2017).

$$Q_{2r} = Cd Ao \sqrt{\frac{2g c \left(\frac{\gamma'}{\gamma} - 1\right)}{\left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right]}}$$

Como se muestra en la figura 63 una tobera es una boquilla estrecha dispuesta en una tubería que sirve para modificar la presión del fluido en velocidad. Una tobera es un medidor Venturi en tramo divergente (más económica) pero al variar bruscamente la sección las pérdidas de energía son mayores. Se aplican las mismas ecuaciones del medidor Venturi, solo que ahora h (o sea "a") es nulo pues la tubería es horizontal (Modon, 2017).

$$Q_{2r} = Cd Ao \sqrt{\frac{2 \frac{\Delta P}{\rho}}{\left[1 - \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4\right]}}$$

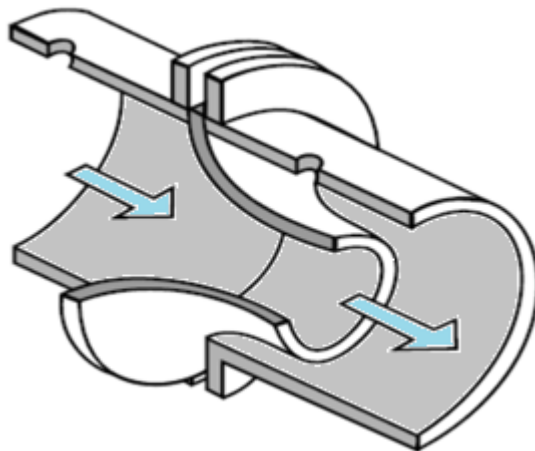


Figura 63. Tobera de flujo (Instrumentación de, 2017)



2.4. Densidad.

Es una propiedad característica de cada sustancia y da idea de lo pesado de los átomos que lo forman (Figura 64), así como de lo atraídos que están: una misma masa de distintas sustancias ocupa distinto volumen.

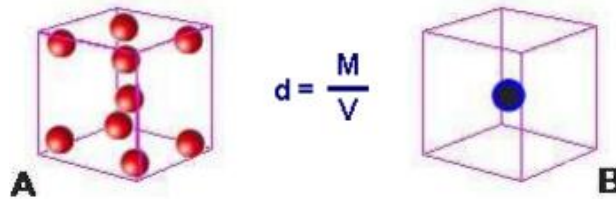


Figura 64. Orden de los átomos en la sustancia (Cidead, s.f.)

Se llama densidad ρ al cociente entre la masa y el volumen que ocupa:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Sus unidades son por lo tanto kg/m^3 .

2.5. Flujos laminares y turbulentos

La noción de flujo laminar con relación a la ley de viscosidad de Newton. Este flujo se describe por tener un patrón bien ordenado donde se supone que las capas de fluido se deslizan una sobre otra. Para ilustrar este flujo, examinamos el experimento de Reynolds sobre fluidos viscosos. Donde se establece un flujo de agua a través de un tubo de vidrio, como se muestra en la figura 65, en el que la velocidad se maneja mediante una válvula colocada a la salida. A la entrada de la tubería se inyecta una tinta que tiene un peso específico igual al del agua. Cuando la válvula de salida está ligeramente abierta, la tinta se desplazará a través del tubo de vidrio en formando un filamento, como se muestra en la figura 65.

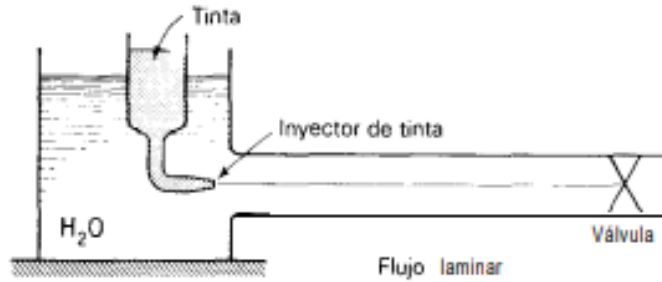


Figura 65. Experimento de Reynolds (Jardón, s.f.)

En la figura 66 se muestra una demostración indica el comportamiento natural de este flujo. De lo contrario, a medida que se abre la válvula alcanzando una condición en la cual la tinta asume un movimiento fluctuante a medida que avanza en la tubería. Tiene lugar una transición desde el flujo anterior bien ordenado, el cual puede considerar como flujo laminar, hacia un tipo de flujo inestable.

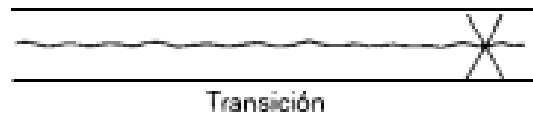


Figura 66. Flujo transición (Jardón, s.f.)

En la figura 67 se describe que al abrir más la válvula establece una condición en la cual se desarrollan fluctuaciones irregulares del flujo, de manera que la tinta se dispersa completamente antes de alcanzar una distancia importante a lo largo de la tubería a este flujo irregular se conoce como flujo turbulento.

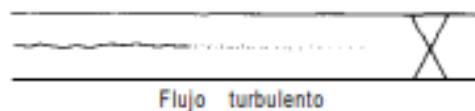


Figura 67. Flujo turbulento (Jardón, s.f.)

El experimento muestra la diferencia esencial entre el flujo laminar y el turbulenta (figura 68). El primero, aunque tiene movimientos moleculares irregulares, es un flujo



macroscópicamente bien ordenado. Aunque, en el caso de flujo turbulento existe el efecto de una fluctuación de velocidad pequeña pero macroscópica V' superpuesta al flujo bien ordenado V : Una gráfica de velocidad versus tiempo en una posición dada en el tubo del aparato de Reynolds aparecería como se muestra en la figura 68 A para flujo laminar, incluso para flujo turbulento en la figura 68 B.



Figura 68. a) Flujo laminar permanente, b) turbulento permanente. Medición de V (Jardón, s.f.)

En la figura 69 se muestra la gráfica donde indica la velocidad media temporal se denota como \bar{V} , debido a que dicha velocidad es constante con el tiempo, el flujo se designa como permanente. Un flujo turbulento debe considerarse como aquel campo de velocidad media temporal que cambia con el tiempo, como se ilustra en la figura. Cuando se analice con más detalle el flujo turbulento se dará una definición más precisa de la velocidad media temporal. Nótese que V' se mide a partir de v para el flujo turbulento permanente y para el flujo turbulento no permanente.

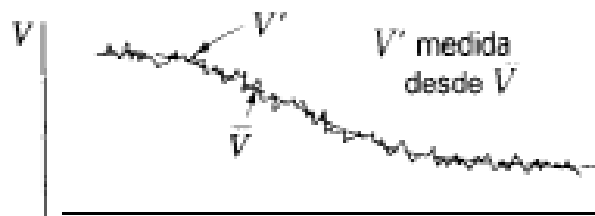


Figura 69. Flujo turbulento permanente, medición de V' con respecto a \bar{V} (Jardón, s.f.)

2.5.1. Flujo laminar.

Hay dos tipos de flujos permanentes en el caso de fluidos reales, que es necesario conocer y entender: flujo laminar y el flujo turbulento. Ambos flujos son gobernados por



distintas leyes. En resumen, la viscosidad hace que las distintas capas de un fluido se muevan con diferente rapidez en respuesta a un esfuerzo cortante. Este movimiento relativo de capas es conocido como flujo laminar y es característico del flujo estable de líquidos viscosos a baja velocidad. A velocidades más altas, el flujo se vuelve turbulento (Shames, 1995).

2.5.2. Capas en flujos laminares.

Un esfuerzo cortante hace que las capas de un fluido se desplacen unas sobre otras en un flujo laminar. La fuerza de corte, así como la tasa de flujo dependen de la viscosidad del fluido.

En otras palabras, el flujo laminar en tuberías (Figura 70), se desplazan partículas de fluido en paralelo en capas, sin mezclarse entre sí. Por lo tanto, división de la velocidad del fluido en la tubería es desigual. En la zona límite, el fluido es frenado como consecuencia de la fricción de tubería y se mueve más lento que en el centro de la tubería. La pérdida de carga es proporcional a la velocidad media del fluido. En la práctica, es poco común un flujo laminar totalmente desarrollado (Shames, 1995).

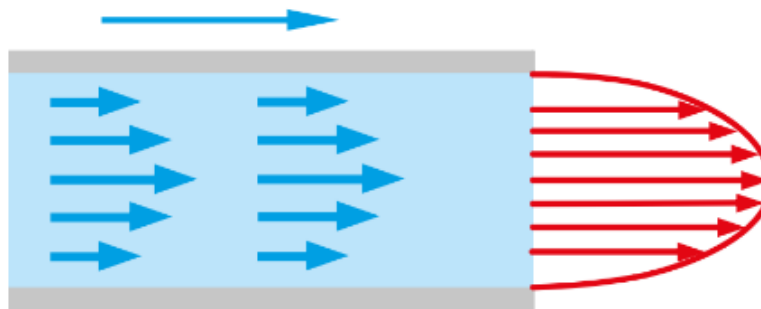


Figura 70. Flujo laminar (Guni hamburg, s.f.)

2.5.3. Fluidos Newtonianos.

Si se consideran dos placas paralelas de área A , separadas por una distancia D por un fluido con viscosidad esta entre ellas. Una de las placas la se mantiene fija y la otra se mueve (paralelamente) con velocidad v_0 . Newton experimentalmente encontró que para



muchos fluidos la magnitud de la fuerza que se debe aplicar para mantener la placa en movimiento es:

$$Fr = \eta A \frac{v_0}{D}$$

Los fluidos que cumplen con esta relación se llaman fluidos newtonianos.

En el caso de que el fluido circule por el interior de una tubería circular recta, el número de Reynolds viene dado por:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\mu}$$

V = Velocidad del fluido (m/s)

D = Diámetro de la tubería (m)

μ = viscosidad cinemática del fluido (m²/s)

2.5.4. Flujo laminar en tubos (Ley de Poiseuille).

Cuando un fluido viscoso se desplaza en un tubo, su velocidad de flujo es diferente en distintos puntos de una misma sección transversal. La capa más externa del fluido se adhiere a las paredes del tubo, y su velocidad es cero. Para el caso de un flujo laminar la velocidad es máxima en el tubo y disminuye hasta anularse en las paredes. Analizando las fuerzas que actúan sobre un elemento del fluido se puede mostrar que la velocidad del tubo en función de una distancia radial r es: (Giles, et al., 2005).

$$v(r) = \frac{p_1 - p_2}{4\eta L} (R^2 - r^2)$$

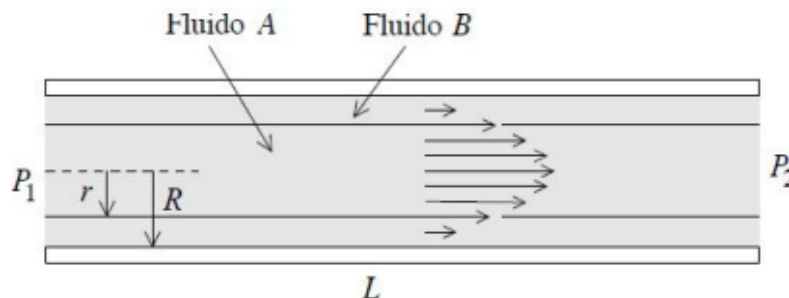


Figura 71. Velocidad de un fluido en un tubo cilíndrico (Giles, et al., 2005)



A partir de la ecuación de la velocidad de un fluido con viscosidad η en un tubo cilíndrico de radio R y longitud L se puede encontrar una expresión que permite determinar el volumen total por unidad de tiempo, en otras palabras, el caudal Q , dicha expresión se conoce como ley de Pouseuille.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{(p_1 - p_2) \pi R^4}{8\eta L} = \frac{1}{2} \pi R^2 v_m,$$

donde $(p_1 - p_2)$ es la diferencia de presiones en los dos extremos del tubo.

2.5.5. Ley de Stokes

Cuando un fluido laminar se mueve alrededor de una esfera de radio R , o viceversa una esfera se mueve por un fluido estacionario con viscosidad η , el fluido ejerce una fuerza viscosa (una fuerza de resistencia) sobre la esfera (Figura 72). La magnitud de dicha fuerza se le conoce como Ley de Stokes (Giles, et al., 2005).

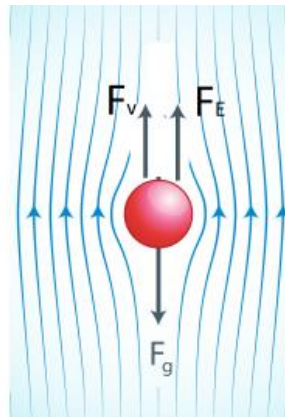


Figura 72. Velocidad terminal (Giles, et al., 2005)

Una esfera que cae en un fluido con viscosidad η llega a una velocidad terminal o límite v_T para la fuerza viscosa más el empuje es igual al peso de la esfera. Sean ρ_f la densidad del fluido, ρ y R la densidad además el radio de la esfera, la forma de la masa del fluido es $\frac{4}{3} \pi R^3 \rho$ a partir del análisis de fuerzas que actúan sobre dicha esfera que obtiene la velocidad terminal v_T de la esfera (Resnick, et al., 2013; Giles, et al., 2005).

$$v_T = \frac{2}{9} \frac{R^2 g}{\eta} (\rho - \rho_f)$$



2.5.6. Flujo turbulento

El flujo o corriente turbulenta (figura 73) al movimiento de un fluido que se da en forma caótica, o sea aquel flujo el que las partículas del fluido se mueven desordenadamente y las trayectorias de las partículas se encuentran formando pequeños remolinos aperiódicos, (no coordinados) como por ejemplo el agua en un canal de gran pendiente. Debido a esto, la trayectoria de una partícula se puede predecir hasta una cierta escala, a partir de la cual la trayectoria de esta es impredecible, más precisamente caótica (Giles, et al., 2005).

Esto quiere decir que las capas de fluido turbulento son individuales con remolinos que intercambian energía. El patrón de flujo generado se caracteriza por movimientos tridimensionales, impredecibles y no estacionarios de las partículas fluidas. Solo en la zona límite de la tubería se mantiene, parcialmente, una capa límite laminar. La distribución de la velocidad es casi constante en un amplio rango de la sección transversal de la tubería. Al contrario que con el flujo laminar, la pérdida de carga es proporcional al cuadrado de la velocidad media del fluido.

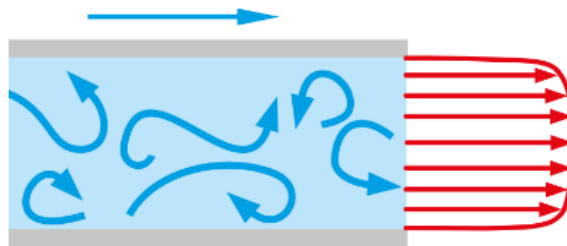


Figura 73. Flujo turbulento. (Guni hamburg, s.f.)

2.5.7. Número de Reynolds

El número de Reynolds (Re) relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión típica de un flujo en una expresión adimensional, que interviene en numerosos problemas de dinámica de fluidos. Dicha cantidad sirve para identificar si un flujo es laminar o turbulento (Giles, et al., 2005).

Para un fluido de viscosidad η que circula por el interior de una tubería circular recta de diámetro D , el número de Reynolds Re viene dado por:

$$Re = \frac{\rho v D}{\eta}$$



Gran variedad de experimentos ha demostrado que cuando el número de Reynolds es menor o igual a 2000, el régimen es laminar, mientras que por encima de 3000 el régimen es turbulento. En la zona de transición, entre 2000 y 3000 el régimen es inestable y puede pasar de un tipo a otro (Resnick, et al., 2013).

2.6. Capa limite

Un cuerpo que este sumergido en un flujo experimenta una fuerza resultante debido a la acción entre el flujo y el cuerpo (figura 74). Esta es la fuerza resultante de los esfuerzos de corte en la pared del cuerpo (τ_w) y de los esfuerzos normales a la superficie. La resultante de las fuerzas en dirección horizontal se nombra Arrastre (D) y las fuerza con dirección vertical se nombra Empuje o sustentación (L) (Gherardelli, s.f.).

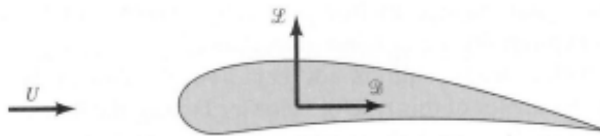


Figura 74. Resultante de fuerzas horizontal y vertical sobre un perfil alar (Gherardelli, s.f.)

en la figura 75 se muestra que la magnitud de estas fuerzas dependerá de la forma que tome el flujo alrededor del cuerpo entonces la forma del cuerpo, de las condiciones del flujo y de la posición relativa del cuerpo con respecto al flujo (Gherardelli, s.f.).

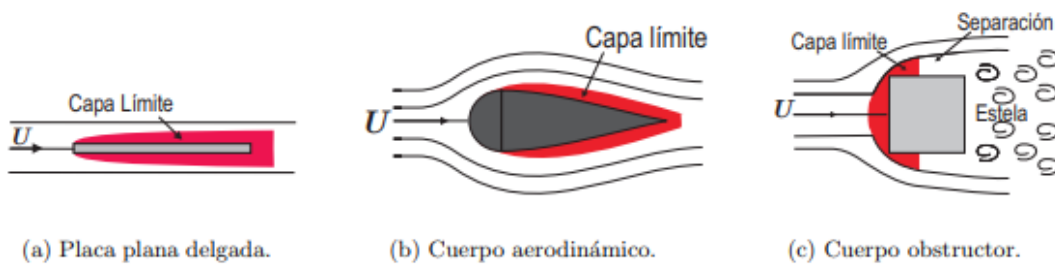


Figura 75. Flujo alrededor de diferentes cuerpos (muestra el flujo alrededor de 3 cuerpos con distinta forma) (Gherardelli, s.f.)

El dominio sobre el flujo para el suceso de la placa plana delgada paralela al flujo es mínima y las líneas de corriente tenderán a ser paralelas a la placa. Alrededor de un

cuerpo aerodinámico el flujo que se establece que las líneas de corriente se cierran detrás del cuerpo. Alrededor de un cuerpo obstructor, por el contrario, las líneas de corriente no son capaces de cerrarse detrás del cuerpo generando detrás de este lo que se conoce como estela. El flujo ubicado alrededor de una placa plana paralela al flujo para distintos números de Reynolds. Se puede ver que en la figura 76, que a medida que aumenta Re disminuye la región donde los efectos viscosos son importantes, así como su influencia en el flujo exterior (Gherardelli, s.f.).

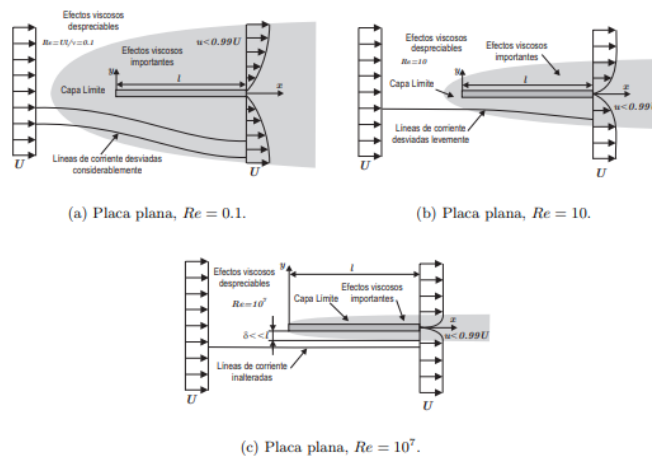


Figura 76. Flujo alrededor de una placa plana para diferentes Re (Gherardelli, s.f.)

Se nombra Capa límite a la región alrededor de un cuerpo en la cual los efectos viscosos (τ) no son despreciables. Como se observó anteriormente los esfuerzos de corte están agrupados a gradientes de velocidad por lo que en la capa límite los gradientes de velocidad no son despreciables. Se debe recordar que las partículas fluidas en contacto con un cuerpo tienen la misma velocidad del cuerpo. Lo anterior indica que existe una diferencia de velocidades entre el contorno del cuerpo y el flujo libre lejos del cuerpo. Fuera de la capa límite se puede considerar el flujo como ideal (Gherardelli, s.f.).

2.6.1. Capa límite sobre una placa plana.

El progreso de la capa límite sobre una placa plana inmersa en un flujo para un número de Reynolds elevado (Figura 77). δ es el espesor de la capa límite, es decir, es el límite



de la región donde los esfuerzos de corte no son despreciables. El número de Reynolds se define como:

$$Re = \frac{\rho U x}{\mu}$$

En la primera parte se desarrolla la capa límite laminar, esto se muestra en la figura 77, (x pequeño $\rightarrow Re$ pequeño). En esta región el flujo es laminar por lo que las partículas se encontrarán sometidas a esfuerzos de corte laminar y no existirá mezcla entre las capas. El espesor de la capa límite δ aumenta con x debido al flujo que entra en la región desde la corriente libre. Como Re es una función de la posición x sobre la placa, este aumenta con x . Lo anterior indica que para una placa dada y una velocidad de la corriente libre U dada siempre se alcanzará el régimen turbulento siempre y cuando la placa sea lo suficientemente larga. Por lo tanto, si la placa es lo suficientemente larga, existirá un punto de transición (en realidad existe una zona de transición) donde el régimen se torna turbulento. La aparición de un régimen turbulento está asociado a un aumento notable en el espesor de la capa límite. En esta región las partículas estarán sometidas a deformaciones en todas direcciones y existirá mezcla o difusión entre las distintas capas del fluido. (Gherardelli, s.f.)

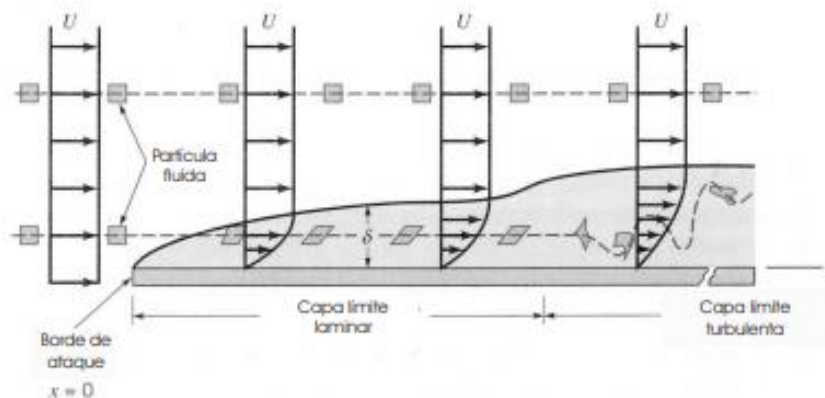


Figura 77. Desarrollo de la capa límite sobre una placa plana (Gherardelli, s.f.)

En la zona cercana a la placa las velocidades relativas entre el flujo, así como la placa son pequeñas generando una zona donde el flujo es laminar. Esta región se nombra subcapa laminar. Se puede observar en la figura que las partículas que pasan fuera de



la capa límite no se encuentran sometidas a imperfecciones y, por lo tanto, tampoco a esfuerzos de corte.

En cuerpos curvados hay una aceleración de las partículas fluidas en la parte anterior del cuerpo hasta el punto de mayor espesor (líneas de corriente se atraen). Pasado este punto el flujo se desacelera (líneas de corriente se abren) y aumenta la presión. Si la curvatura del cuerpo es muy grande, y dependiendo de las condiciones del flujo, se puede generar un flujo inverso y lo que se denomina desprendimiento de la capa límite (figura 79). Detrás del cuerpo se generará una zona denominada estela (figura 78) (Gherardelli, s.f.).

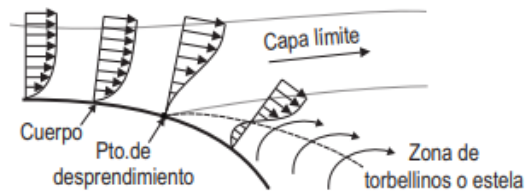


Figura 78. Desprendimiento y flujo inverso en un cuerpo curvo (Gherardelli, s.f.)

2.6.2. Espesor de capa límite

La aproximación de la velocidad del flujo entre el cuerpo y el flujo libre es asintótica, no existe en realidad un límite determinado para definir el espesor de la capa límite. Debido a lo anterior se ha definido (en forma arbitraria) el espesor δ como la distancia a la pared donde la velocidad es igual a un 99% la velocidad de la corriente libre (figura 79) (Gherardelli, s.f.).

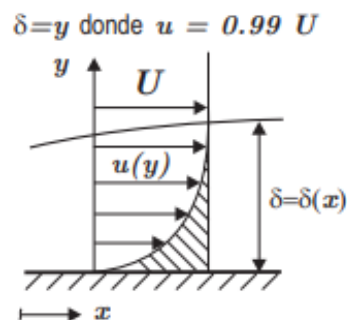


Figura 79. Espesor de la capa límite δ (Gherardelli, s.f.)

Otra forma de definir la capa límite es considerar el hecho de que la existencia de un gradiente de velocidades en la región cercana al cuerpo tiene como consecuencia una disminución tanto del caudal masico como de la cantidad de movimiento del flujo que pasa por esta región si se le compara con un flujo no viscoso. Este tipo de definición elimina la arbitrariedad de la definición anterior. Se define el espesor de desplazamiento δ^* como la distancia a la que habría que desplazar el contorno del cuerpo si se supone que no existe roce, pero se mantiene el caudal masico real (figura 80) (Gherardelli, s.f.).

$$\Delta q = \int_0^{\infty} (U - u) dy = \delta^* U$$

$$\delta^* = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{u}{U} \right) dy .$$

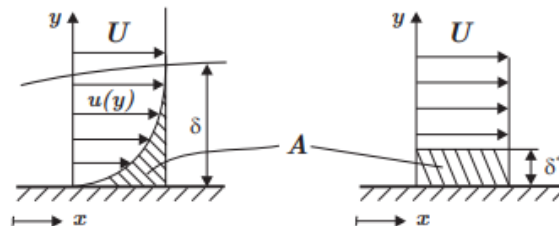


Figura 80. Espesor de desplazamiento δ^* (Gherardelli, s.f.)

Se denomina el espesor de cantidad de movimiento Θ como la distancia a la que habría que desplazar el contorno del cuerpo suponiendo que no hay roce, pero se mantiene el flujo de cantidad de movimiento del flujo viscoso (Figura 81), es decir: (Modon, 2017)

$$\rho U^2 \Theta = \rho \int_0^{\infty} u(U - u) dy$$

$$\Theta = \int_0^{\infty} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U} \right) dy .$$

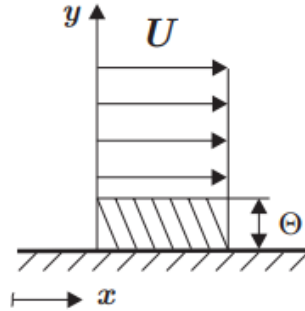


Figura 81. Espesor de cantidad de movimiento θ (Gherardelli, s.f.)

Tanto el espesor de la capa límite como el espesor de desplazamiento y el espesor de cantidad de movimiento son funciones de la coordenada $x \Rightarrow$

$$\delta = \delta(x)$$

$$\delta^* = \delta^*(x)$$

$$\theta = \theta(x)$$

2.6.3. Fenómenos de separación – Resistencia de forma

A lo extenso de una placa plana, la capa límite constante creciendo aguas abajo si $\nabla P = 0$; si la presión aminorar la capa límite tiende a reducir su espesor, y si la presión aumenta (gradiente adverso) la capa limite acrecentara su espesor aguas abajo. El gradiente adverso, y el esfuerzo de corte en la frontera disminuyen el momento en la capa límite y si ambos actúan sobre distancia suficiente la capa límite se separará. La línea de corriente de la frontera debe separarse de la frontera sólida en el punto de la separación y aguas abajo de este punto, el gradiente adverso produce un flujo hacia atrás. Esta zona de separación se llama “estela”.

El arrastre y la sustentación tienen dos componentes, el arrastre de forma y de fricción superficial o de arrastre viscoso. Si la separación del flujo sobre un cuerpo se pudiera evitar, la capa límite permanecerá delgada y evitaríamos la reducción de la presión en la estela (mínimo arrastre por presión) en suma es importante dar forma aerodinámica de manera que en la parte trasera del cuerpo la separación ocurra lo más lejos posible.

La naturaleza de la capa límite (laminar o turbulenta) también es crucial para influenciar la posición del punto de separación. La mayor transferencia de movimiento dentro de una



capa limite turbulenta requiere mayor ∇P adverso que si la capa limite fuese laminar para causar la separación (Modon, 2017).

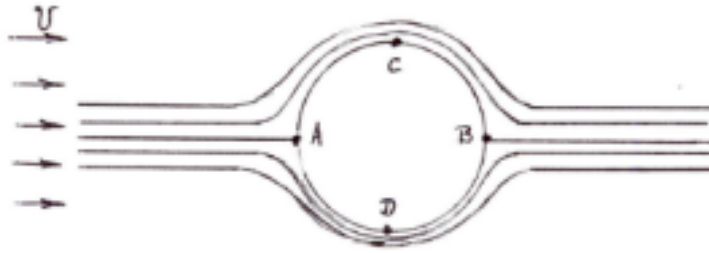


Figura 82. El flujo alrededor de una esfera. (Modon, 2017)

Flujo no turbulento en todas las partes; A-B son puntos de estancamiento, C-D son puntos con presión mínima (Figura 83).

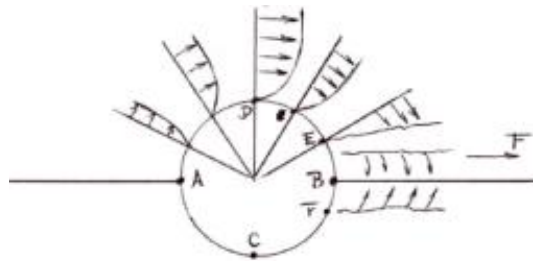


Figura 83. Para un flujo real. (Modon, 2017)

La capa limite se forma en el punto de estancamiento delantero, si la capa limite es laminar el gradiente de presión adverso produce una separación antes, que si la capa limite fuese turbulenta (Modon, 2017).

Analizamos por secciones: AC o AD: el fluido va de mayor a menor presión, por ende, tiende a acelerarse entonces la aceleración compensa los esfuerzos de corte y aumento de δ .

CB o DB: la presión aumenta en la dirección de la corriente entonces el desprendimiento de la capa limite ocurre en E y F donde la velocidad es nula, formándose remolinos y turbulencia en la zona de estela (flujo turbulento, si fuese laminar el desprendimiento se da en C y D) (Modon, 2017).



2.7. Vórtices

Los vórtices son parte de un fluido que rota en sentido de espiral, como un remolino también es semejante a la magnitud que cuantifica la rotación que ejerce un fluido y se emplea en el campo de mecánica de fluidos, estos giran alrededor de una línea del eje, que puede ser lineal o curvada. Se logran formar en los fluidos agitados y se pueden observar en los anillos de humo, remolinos en la estela de un bote, vientos que rodean un ciclón tropical y tornados o remolinos de polvo.

Se componen de un flujo turbulento debido a su distribución de la velocidad, la vorticidad (el rizo de la velocidad del flujo). En la mayoría la velocidad del flujo de fluido es mayor junto a su eje y disminuye en proporción inversa a la distancia desde el eje. Lo que quiere decir de manera propiamente, es la aceleración de Coriolis que se debe al movimiento de rotación apreciada sobre cualquier cuerpo que se mueve con respecto a él, y que se traduce en una desviación lateral de su trayectoria. Se trata de una fuerza de inercia en fluidos que se manifiesta en dirección opuesta en ambos hemisferios. En el hemisferio norte, la circulación general en la superficie del océano es en sentido de las manecillas del reloj, mientras que en el hemisferio sur ocurre en sentido contrario, trayendo consigo importantes consecuencias para el ecosistema.

En ausencia de fuerzas externas, la fricción viscosa dentro del fluido tiende a regularizar el flujo en una cohorte de vórtices de irritación, posiblemente superpuestos a flujos de mayor escala, abarcando vórtices de mayor escala. Una vez formados, los vórtices pueden desplazarse, estirarse, retorcerse e interactuar de formas complicadas. Un vórtice en movimiento lleva consigo cierto momento, energía y masa angular y lineal.

2.7.1. Propiedades.

La vorticidad es un vector que explica el movimiento rotatorio local en un punto del fluido, se puede apreciar el desplazamiento junto a él. Conceptualmente, la vorticidad se puede experimentar colocando una pequeña bola rugosa en el punto en cuestión, libre para moverse con el fluido, y observando cómo gira alrededor de su centro. El curso del vector de vorticidad se limita como la dirección del eje de rotación de esta bola imaginaria (según la regla de la mano derecha) mientras que su longitud es el doble de la velocidad angular de la bola. Matemáticamente, la vorticidad se define como el rizo (o rotacional) del campo



de velocidad del fluido, generalmente denotado por la fórmula de análisis por lo que vector de velocidad angular de esa porción del fluido con respecto al ambiente externo o a cualquier eje fijo y puede llegar a ser opuesto al vector de velocidad angular media del fluido con respecto al eje del vórtice.



Figura 84. Ejemplo de vórtices formados en un café cuando se vierten gotas de leche (i-Ciencias, 2014)

2.7.2. Tipos de Vórtices

Un vórtice puede variar con la distancia con la velocidad a las que viajan las partículas, dicho de otro modo, hay dos casos importantes:

1. Si el fluido gira como un cuerpo rígido, es decir, si la velocidad de rotación angular $\vec{\Omega}$ es uniforme, de modo que u aumenta proporcionalmente a la distancia r desde el eje, una pequeña bola transportada por el flujo también giraría alrededor de su centro como si fueran parte de ese cuerpo rígido. De tal modo en que flujo de vorticidad es la misma en todas partes: su dirección es paralela al eje de rotación y su magnitud es igual al doble de la velocidad angular uniforme Ω del fluido alrededor del centro de rotación.

$$\begin{aligned}\vec{\Omega} &= (0, 0, \Omega), & \vec{r} &= (x, y, 0), \\ \vec{u} &= \vec{\Omega} \times \vec{r} = (-\Omega y, \Omega x, 0), \\ \vec{\omega} &= \nabla \times \vec{u} = (0, 0, 2\Omega) = 2\vec{\Omega}.\end{aligned}$$



2. Si la velocidad de la partícula u es inversamente proporcional a la distancia r desde el eje, entonces la bola de prueba imaginaria no rotaría sobre sí misma; mantendría la misma orientación mientras se mueve en un círculo alrededor del eje del vórtice. En este caso la vorticidad $\vec{\omega}$ es cero en cualquier punto que no esté en ese eje, y se dice que el flujo es irrotacional
- **Vórtices de irritación:** Los vórtices de irritación (figura 85) también denominados vórtices libres, donde su circulación es cero a lo largo de cualquier contorno cerrado que no encierre el eje del vórtice; y tiene un valor fijo, Γ , para cualquier contorno que encierre el eje una vez. El flujo de vórtice de irritación ideal en el espacio libre no es físicamente afectable, ya que implicaría que la velocidad de las partículas (y, por lo tanto, la fuerza necesaria para mantener las partículas en sus trayectorias circulares) aumentaría sin límites a medida que uno se acerca al eje del vórtice.

Cuando el flujo de irritación implica disipación viscosa en todos los fragmentos, pero no se encuentre presente la fuerza viscosa neta, solo la tensión de viscosidad. Debido a su disipación, esto significa que sujeta un vórtice viscoso irritante precisando una entrada de trabajo en el núcleo (por ejemplo, cuando gira de manera constante un cilindro en el núcleo). En espacios independientes no hay entrada de energía en el núcleo, por lo tanto, la vorticidad compacta contenida en el núcleo y se propaga naturalmente hacia afuera, convirtiendo el núcleo en un flujo de cuerpo rígido que se ralentiza gradualmente así del mismo modo crece, contorneado por el flujo de irritación original. Este vórtice en separación tiene una solución exacta de viscosidad con las ecuaciones de Navier-Stokes, conocidas como vórtice de Lamb-Oseen (Jaque, 2013).

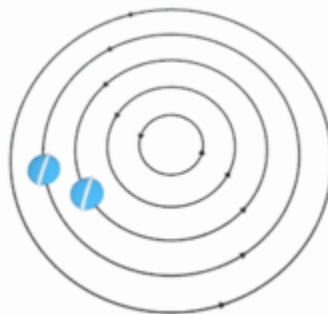


Figura 85. Vórtice de irritación. (i-Ciencias, 2014)

- **Vórtices rotacionales:** un vórtice rotacional gira de la misma forma que un cuerpo rígido (figura 86) solo con la diferencia de que se aplican fuerzas adicionales que no se generan por el movimiento de fluidos en sí. Teniendo una vorticidad distinta de cero en todas sus porciones afuera del núcleo, por lo que se denominan vórtices rígidos o forzados (Sansón, 2021).

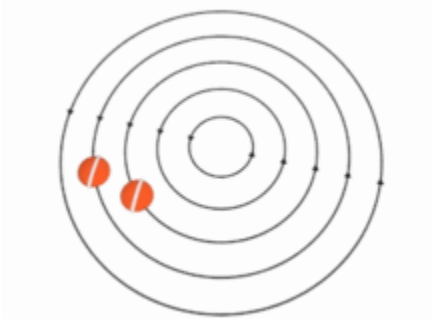


Figura 86. Vórtice de cuerpo rígido. (i-Ciencias, 2014)

Por ejemplo, si colocamos agua en un vaso de licuadora a una velocidad angular constante w alrededor de su eje vertical, el agua eventualmente rotará en forma de cuerpo rígido. Entonces, las partículas se moverán a lo largo de círculos, con una velocidad u igual a wr . En ese caso, la superficie libre del agua asumirá una forma parabólica.

- **Formación de vórtices en los límites:** se puede formar a través del fenómeno denominado separación de capa límite, que se presenta cuando un fluido se mueve sobre una superficie aparte de experimentar una velocidad de aceleración del fluido incluso cero debido a su condición de no deslizamiento. Su rápida aceleración negativa crea una capa límite que incita una rotación local del fluido en la pared (es decir, vorticidad) donde se denomina la velocidad de cizallamiento de la pared. El espesor de esta capa límite es proporcional a \sqrt{vt} (donde v es la velocidad del fluido de la corriente libre y t es el tiempo). Si el diámetro o el grosor del recipiente o del fluido es menor que el grosor de la capa límite, la capa límite



no se separará y no se formarán vórtices. De lo contrario, cuando la capa límite crece más allá de este grosor crítico de la capa límite, se producirá una separación que generará vórtices.

Otra forma de originar el vórtice en un límite es cuando el fluido fluye perpendicularmente hacia una pared y produce un efecto de salpicadura. En consecuencia, las líneas de corriente de velocidad se desvían además de eso desaceleran inmediatamente de tal modo que la capa límite se separa formando un anillo de vórtice toroidal.

- **Geometría de vórtice:** En un vórtice estacionario, la línea de corriente típica (una línea que está en todas partes tangente al vector de velocidad de flujo) es un circuito cerrado que circunda el eje; y cada línea de vórtice (una línea que está en todas partes tangente al vector de vorticidad) es aproximadamente paralela al eje. Una superficie que está en todas partes tangente tanto a la velocidad del flujo como a la vorticidad se llama tubo de vórtice. En general, los tubos de vórtice están anidados alrededor del eje de rotación, el eje en sí es una de las líneas de vórtice, un caso límite de un tubo de vórtice con diámetro cero.

De acuerdo con los teoremas de Helmholtz, una línea de vórtice no puede comenzar ni terminar en el fluido, excepto momentáneamente, en un flujo no estable, mientras el vórtice se está formando o disipando. En general, las líneas de vórtice (en particular, la línea del eje) son bucles cerrados o terminan en el límite del fluido. Un remolino es un ejemplo, es decir, que un vórtice de masa de agua cuyo eje termina en la superficie libre. En cambio, con un tubo de vórtice del cual las líneas de vórtice están todas cerradas será una superficie cerrada.

Por consiguiente, un vórtice recién creado se ampliará y se doblará rápidamente para eliminar cualquier línea de vórtice abierta. Particularmente, cuando se enciende el motor de un avión, generalmente se forma un vórtice delante de cada hélice o del turboventilador de cada motor a reacción. Entre un extremo de la línea del vórtice se encuentra unido al motor, mientras que el otro extremo generalmente se estira y se dobla hasta que llega al suelo.



Cuando un vórtice se presente de manera visible por el humo o rastros de tinta, se puede analizar que tienen líneas de trayectoria en espiral o líneas de corriente. No obstante, esta apariencia es a menudo una ilusión y las partículas de fluido se mueven en caminos cerrados. Las rayas espirales que se toman como líneas de corriente son de hecho nubes del fluido marcador que originalmente se extendía por varios tubos de vórtice y se estiraron en formas espirales por la distribución no uniforme de la velocidad del flujo (Figura 87).

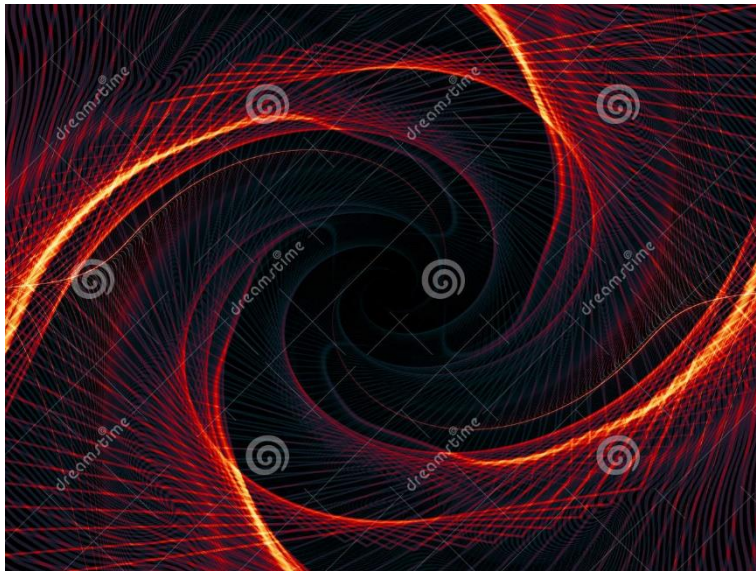


Figura 87. Retroceso espiral geométrico, en la profundidad del fondo. (Dreamstime, s.f.)

- **Presión de un vórtice:** El movimiento del fluido en un vórtice genera una presión dinámica (además de cualquier presión hidrostática) que es más baja en la región del núcleo, más cercana al eje, y aumenta a medida que uno se aleja de ella, de acuerdo con el principio de Bernoulli. Se puede decir que es el gradiente de esta presión lo que obliga al fluido a seguir una trayectoria curva alrededor del eje. En el caso de que cuerpo rígido de un fluido con densidad constante, la presión dinámica es proporcional al cuadrado de la distancia r desde el eje. En el caso de que el campo de gravedad sea persistente, la superficie libre del líquido, si está presente, es un paraboloides cóncavo.



La presión dinámica varía en un vórtice de irritación con una densidad de fluido constante y una simetría cilíndrica, donde:

$$P_{\infty} - Kr^2$$

P_{∞} = presión límite infinitamente alejada al eje.

Esta fórmula proporciona otra restricción para reducir a menores límites del núcleo, ya que la presión no puede ser negativa. La superficie expendida (si está presente) declina bruscamente cerca de la línea del eje, con una profundidad inversamente proporcional a r^2 . Quedando la forma de la superficie libre llamada hiperboloide o "Cuerno de Gabriel" (por Evangelista Torricelli).

Esto es visible cuando el vapor de agua se condensa a medida que baja la presión del núcleo provocando un enfriamiento adiabático logrando evaporar el agua que reside en el aire, un claro ejemplo durante la línea de vórtice concluya en una superficie límite, su presión reducirá lo mismo puede atraer materia de la superficie del núcleo. Un claro ejemplo es la formación de remolinos que termina en una superficie libre de un cuerpo de agua formados en desagües de una bañera. También lo podemos visualizar desde un motor a reacción de un avión estacionado puede succionar agua y piedras pequeñas hacia el núcleo y luego hacia el motor.

2.7.3. Resistencia de Superficie.

Ahora tomamos en cuenta que el fluido está pasivo y el cuerpo desplazándose en él, se crea una estela muy grande que da como resultado un arrastre de presión grande, que se puede reducir con una superficie rugosa sobre el cuerpo (la estela turbulenta es menor). La impotencia de avanzar se conoce como resistencia de forma y como dijimos será menor cuanto más alejados estén los puntos de separación C' y D' .

$$R_f = C_f A_p \frac{\rho v^2}{2} \text{ Siendo } A_p \text{ el área proyectada vertical.}$$

Resistencia total al avance queda como: $R_t = R_s + R_f$

$$R_s = C_s A_b \frac{\rho v^2}{2} \text{ estando } A_b \text{ el área bañada por el fluido.}$$



CAPITULO III

3. METODOLOGÍA



3.1. Perfiles aerodinámicos

Para el análisis de este trabajo nos basaremos en los parámetros de las turbinas empleadas en la planta LIMPET situada en Islay, Escocia, de donde consideramos el perfil aerodinámico NACA 0012 (Figura 88 a), el cual es utilizado en esta misma planta y debido a sus características simétricas comparando su funcionalidad con una turbina de impulso axial que cuenta con el perfil de Medialuna el cual es propuesto debido a que consideramos que puede aprovechar de mejor manera el flujo de aire (Figura 88 b).

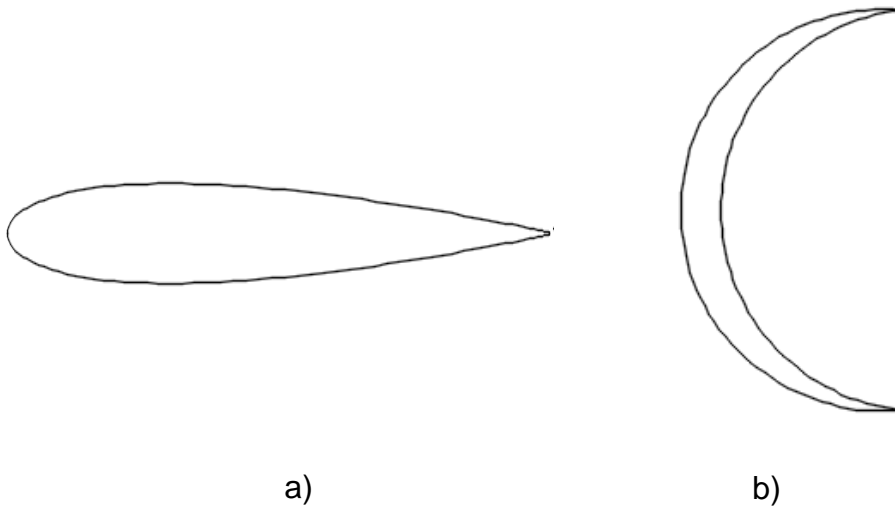


Figura 88. Perfiles aerodinámicos a) Perfil NACA 0012 b) Perfil de Medialuna

En ambos casos se implementarán alineamientos (Figura 89), los cuales se encargan de redirigir el flujo hacia el alabe.

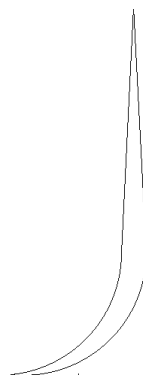


Figura 89. Alineamiento para redireccionamiento de flujo

En la figura 90 se muestran los parámetros de diseño del perfil de medialuna, en donde se consideraron dos circunferencias separadas desde el centro a una cierta distancia, también se muestra el ángulo de ataque, y en el caso del alineamiento de flujo se considera la longitud de la entrada del fluido y el ángulo de salida.

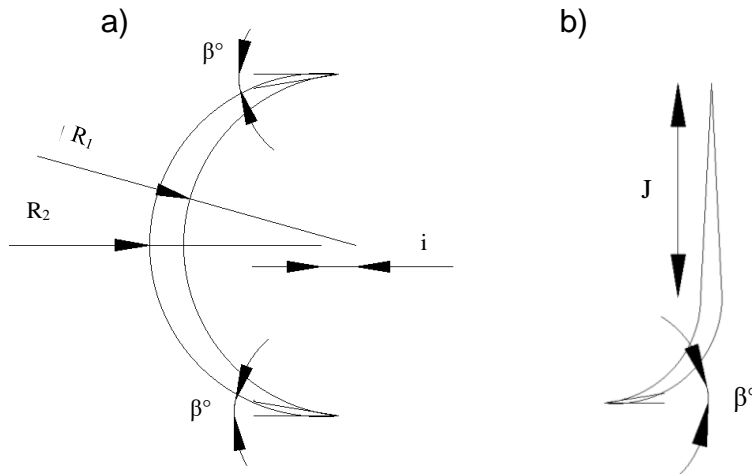


Figura 90. Parámetros de diseño a) Perfil de medialuna b) Alineamiento de flujo

Con lo anterior se realizaron configuraciones en el rotor en dibujo 2D, con la finalidad observar su comportamiento en un flujo bidireccional como lo sería dentro de la cámara OWC. Con este estudio se analizará el comportamiento de un flujo de aire que pasa a través del rotor de las turbinas, con la respectiva configuración.

3.2. Modelado 2D

Para el modelado en 2D consideramos 5 configuraciones para realizar el estudio aerodinámico. El primero de ellos consiste en la turbina tipo Wells sin ningún cambio en su configuración (Figura 91 a), para el segundo caso de la turbina Wells se le implementaron alineamientos de redireccionamiento de flujo (Figura 91 b) y ver las ventajas que esto tiene y para la tercera configuración de la turbina Wells consiste en un doble rotor con alineamientos fijos (Figura 91 c). Para el caso de la turbina de impulso su perfil es de Medialuna con alineamientos para aprovechar el flujo bidireccional (Figura 91 d) y para la última configuración de esta turbina cuenta con un doble rotor con alineamientos (Figura 91 e).

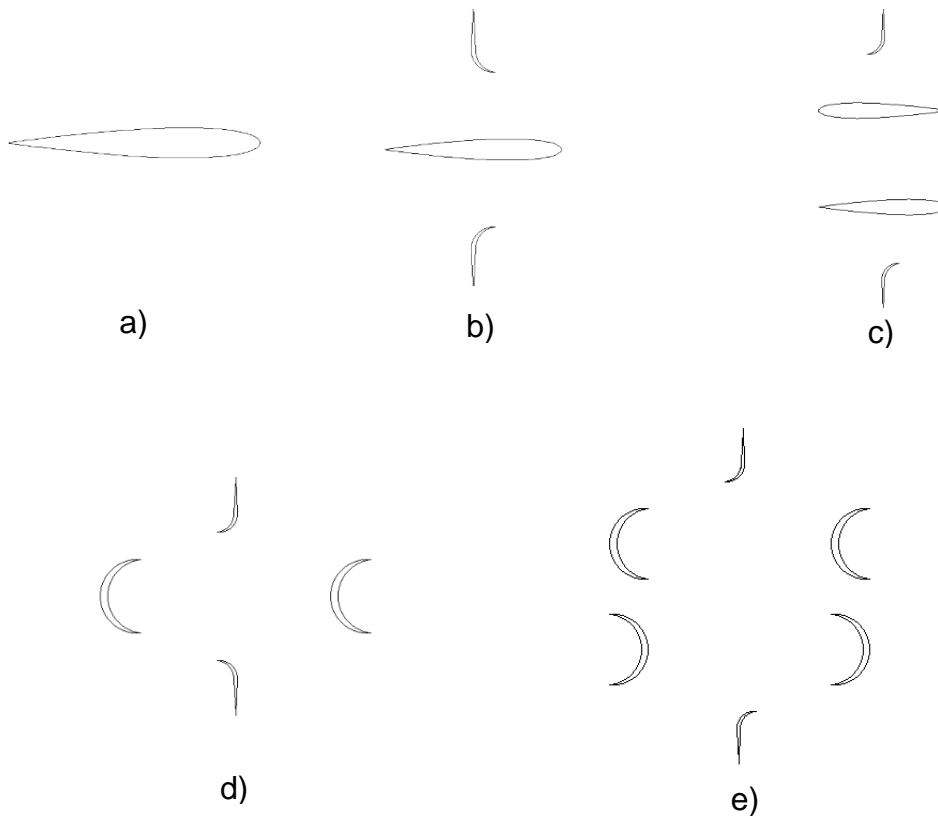


Figura 91. Configuraciones en el rotor para ambos perfiles

3.2.1. Dimensionamiento

En cada uno de los rotores consideramos un diámetro exterior de 2.1 m, un diámetro interior de 1.6 m, un espesor de 0.3 m y un total de 8 alabes.

Considerando

$$D_i = 1.6 \text{ m}$$

Para obtener el largo del rotor para plasmarlo en un rectángulo por lo que consideramos:

$$L = \pi D_i = 5.02 \text{ m}$$

Obteniendo las medidas del rectángulo que representa al rotor son 5.02 m de largo y 0.3 m de ancho (Figura 92).

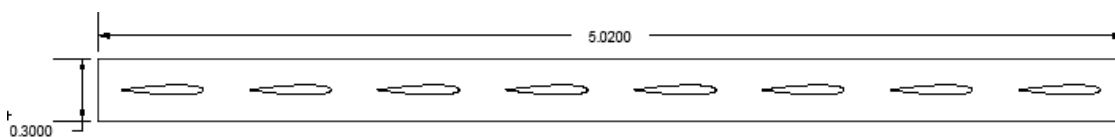


Figura 92. Medidas del rectángulo que representa al rotor de la turbina Wells



En la figura 92 se puede observar la representación del rotor en 2D, que es para la turbina Wells convencional sin alineamientos de flujo.

Para los siguientes rotores se modifica el ancho para implementar la línea de los alineamientos a ambos lados del alabe por lo que el espesor aumenta a 0.7 m, con una medida de 0.2 m por cada línea como se muestra en la figura 93.

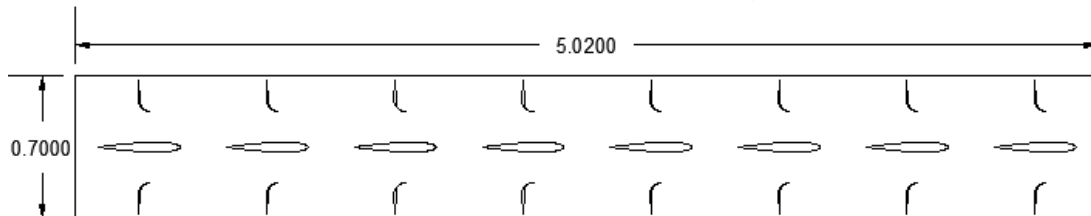


Figura 93. Medidas del rotor y líneas de alineamientos la turbina Wells con alineamientos

Para el caso de la turbina de impulso las medidas son las mismas que la configuración anterior, debido a que se cuentan con dos líneas de alineamientos y un rotor como se muestra en la figura 94.

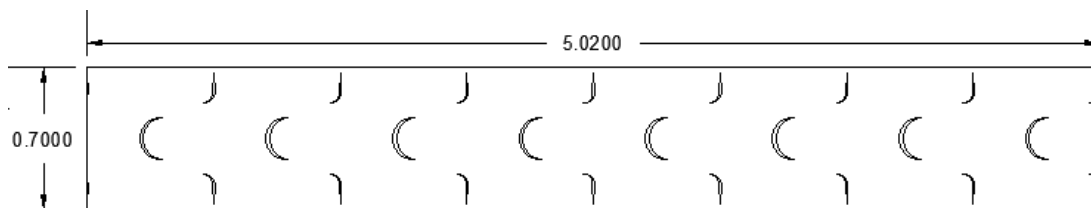


Figura 94. Medidas del rotor y línea de alineamientos de la turbina de impulso.

Entonces para las siguientes configuraciones, sabiendo que están compuestas por un doble rotor y dos líneas de alineamientos el espesor del rotor aumenta a 1 m, considerando 0.3 m más por el otro rotor implementado, como es el caso de la Bi-turbina Wells con alineamientos (figura 95) y la Bi-turbina de impulso (figura 96)

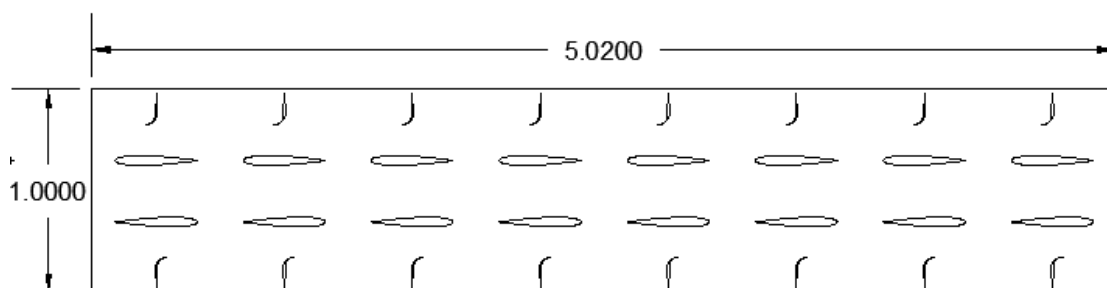


Figura 95. Medidas del rotor y línea de alineamientos de la Bi-turbina Wells con alineamientos

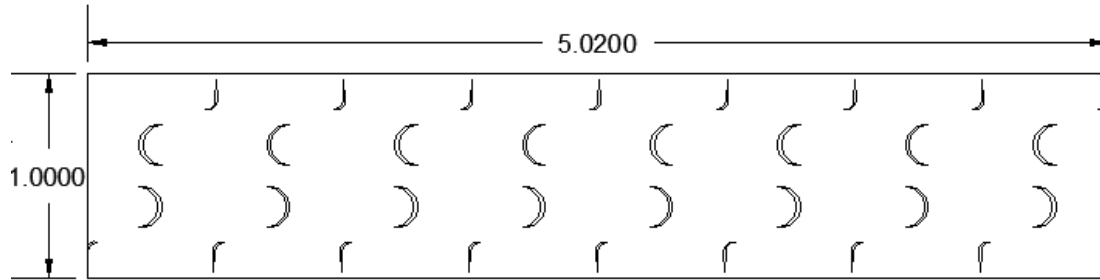


Figura 96. Medidas del rotor y línea de alineamientos de la Bi-turbina de impulso

3.3 Parámetros

Para determinar la velocidad estimada del aire consideramos sus parámetros iniciales como lo son la densidad, viscosidad cinemática y número de Reynolds. Por lo que tenemos:

$$\rho_{aire} = 1225 \frac{kg}{m^3}$$

$$\nu = 1.74 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

$$Re = 2.6 \times 10^6$$

Para continuar se necesita los parámetros de los orificios de descarga por lo que el valor de los diámetros son los siguientes:

$$D_1 = 2.6 \text{ m}$$

$$D_2 = 1.5 \text{ m}$$

Considerando la siguiente ecuación para obtener la velocidad del aire estimada en la cámara:

$$V = \frac{Re \nu}{D_1 \rho_{aire}} = 14.2 \frac{m}{s}$$

Utilizando 14.2 m/s como la velocidad media del aire para el análisis aerodinámico de las configuraciones antes mostradas.



3.4. Simulación 2D

De acuerdo con los parámetros mencionados anteriormente, se realizaron las simulaciones en el programa **COMSOL multiphysics 5.3**, con las diferentes configuraciones para obtener resultados y observar el comportamiento del fluido con respecto a los alabes dentro de la cámara OWC y con ello realizar un análisis aerodinámico más a detalle de cada una.

Para la simulación realizada insertamos propiedades del fluido, que en este caso es aire, al igual que el material del cual son fabricados los alabes de la turbina. Posterior a esto seleccionamos los parámetros del aire, definiendo cual sería la entrada y salida, a una velocidad de 14.2 m/s, generando después el mallado para empezar hacer el cálculo de la simulación, para que al final tengamos los resultados en graficas de velocidad y presión. Posterior realizar el análisis mencionado.



CAPITULO IV

4. Resultados



4.1. Análisis aerodinámico de rotores y alineamientos de las configuraciones de las turbinas

Dados los parámetros anteriores se inició la simulación de las configuraciones de este proyecto, obteniendo los factores de velocidad y presión para la comparación aerodinámica de ambos perfiles.

Para la turbina Wells convencional se presenta la Figura 97.

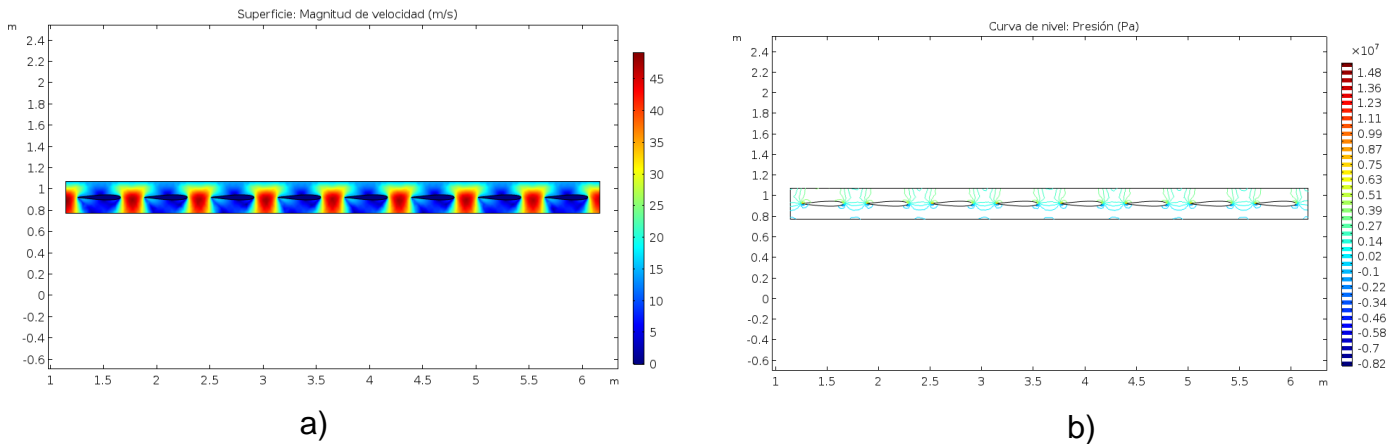


Figura 97. Simulación del rotor de la turbina Wells, a) velocidad b) presión

En ambas figuras se puede notar el flujo másico que pasa a través del perfil NACA 0012 así mismo, de cómo afecta el fluido en la rotación de la turbina, apreciada en la figura 97 a, es decir el aire entra topando en la zona de extradós del perfil, entre el borde de ataque y borde de salida, aprovechando el sentido del flujo para el giro del rotor. Para la figura 97 b, se contempla la presión a la que es sometido el perfil alar, considerando que las partes donde hay más presión son en el Borde de ataque y en el borde de fuga (la punta del perfil), mientras que la presión no es alta en dichas áreas mencionadas, por ende, no puede favorecer a la turbina con forme a la potencia que podría ofrecer.



En el segundo caso se muestra la turbina de impulso en la figura 98, así como la turbina Wells. Señalando el perfil de velocidad y de presión para su análisis.

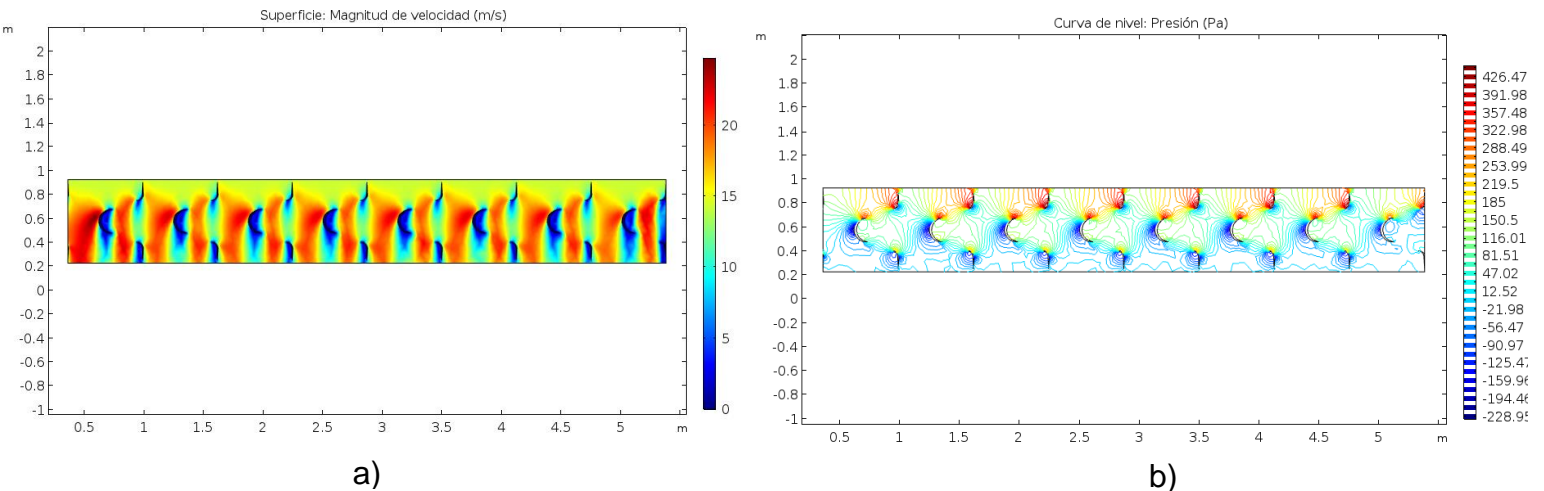


Figura 98. Simulación del rotor de la turbina de impulso a) velocidad b) presión

En esta figura, podemos ver el perfil de medialuna para la turbina de impulso, en donde en la figura 98 a, se registra el comportamiento de la velocidad del aire en los alineamientos y en el perfil de medialuna, al principio se puede notar cómo los alineamientos redirigen el flujo hacia el álabe, esto para dar el giro al rotor, esto se observa a la entrada del flujo de aire. Mientras que en la figura 98 b, se logra ver los alineamientos superiores, los cuales son sometidos a mayor presión al igual que la parte superior del perfil esto debido a que el aire entra (debido al proceso de inhalación), por lo que pasaría lo mismo en la exhalación, es decir si la entrada de aire sería por la parte inferior, la cual se mira que el perfil beneficia la dirección de flujo para rotar. La turbina de impulso fue pensada para obtener mayor potencia que la turbina Wells y como se manifiesta en la simulación, esto quiere decir que es cierto, ya que se puede ganar mayor flujo con este tipo de turbinas.



Para la tercera configuración, la cual ya se ha mencionado anteriormente es la turbina Wells con alineamientos como se presenta en la figura 99, se tomaron en cuenta los mismos factores de velocidad y presión del fluido para observar el comportamiento del aire en los alabes, incluso como afectan los alineamientos en su funcionamiento.

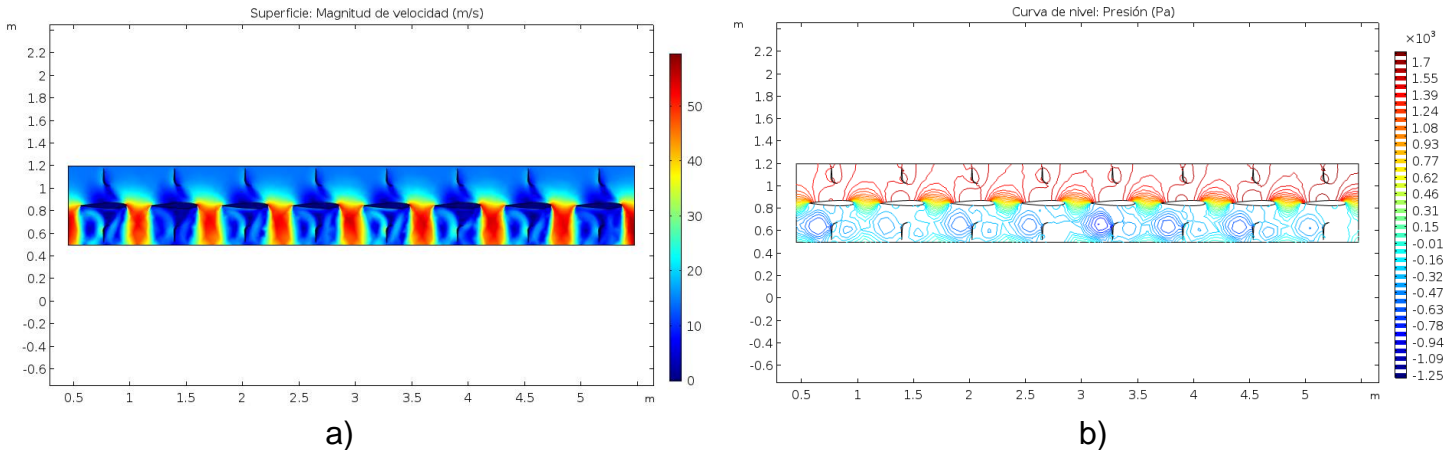
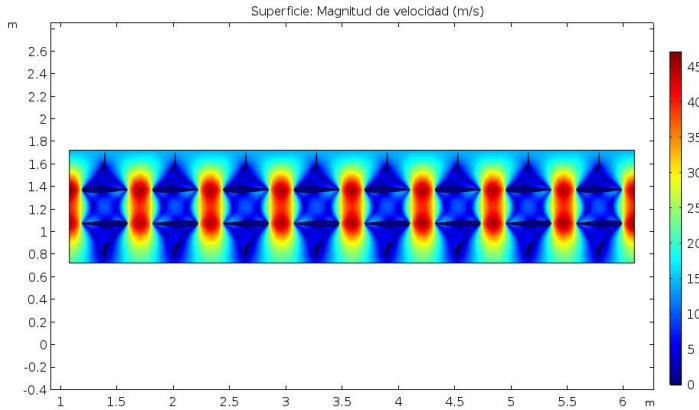
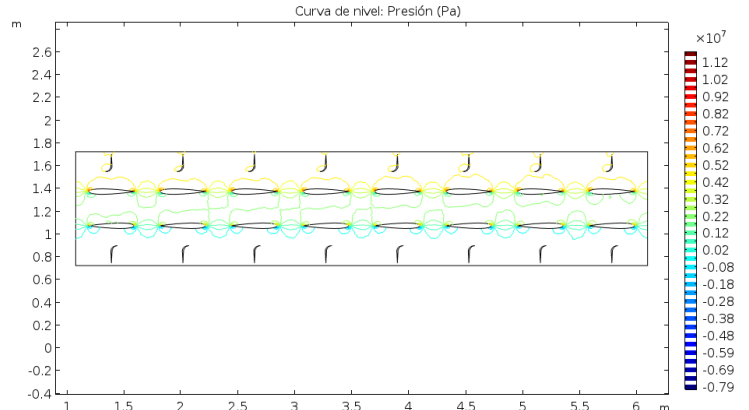


Figura 99. Simulación del rotor de la turbina Wells con alineamientos a) velocidad b) presión

En la figura 99 a, podemos ver como los alineamientos redirigen el flujo hacia el perfil NACA, del mismo modo que la turbina Wells sin alineamientos, chocando el aire con el alabe justo en el extradós del perfil, por ende, la velocidad del aire es benéfica para el giro de la turbina. Cabe mencionar que la presión aumenta en la configuración mostrada en la figura 99 b, la presión más alta actúa en los alineamientos superiores y en las partes superiores del perfil aerodinámico provocando también la formación de vórtices a la salida del aire, dichos vórtices dependerán de la velocidad, siguiendo una trayectoria espiral circular y se presentan cuando el flujo a alta velocidad se ha enfrentado a un obstáculo. Para la Bi-turbina Wells (figura 100), se muestran los perfiles de velocidad y presión, su análisis aerodinámico determina como actúa al aire con un doble rotor, además la función de los alineamientos que tiene su configuración.



a)



b)

Figura 100. Simulación del doble rotor de la Bi-turbina Wells con alineamientos a) velocidad b) presión

Como se observa en las figuras el flujo de aire sobre el doble rotor afecta de la misma manera que en el rotor de las turbinas Wells anteriores, esto se contempla debido a que aún no vemos movimientos de los alabes, por esa razón aún no se muestra cómo afecta esto al segundo rotor, de igual manera los alineamientos redirigen el flujo hacia el alabe y en el caso de la figura 100 b, advierte que la presión es menor a la anterior, se infiere a que aún no hay movimientos de los rotores, lo que significa que el segundo rotor termina siendo tapado por el primer rotor, en tanto las presiones disminuyen con respecto a la turbina Wells con alineamientos.

Por último, tenemos la Bi-turbina de impulso axial donde presentamos como actúa el flujo de aire en los perfiles de medialuna y en los alineamientos, presentada en la figura 101, donde se hará un análisis aerodinámico de esta turbina.

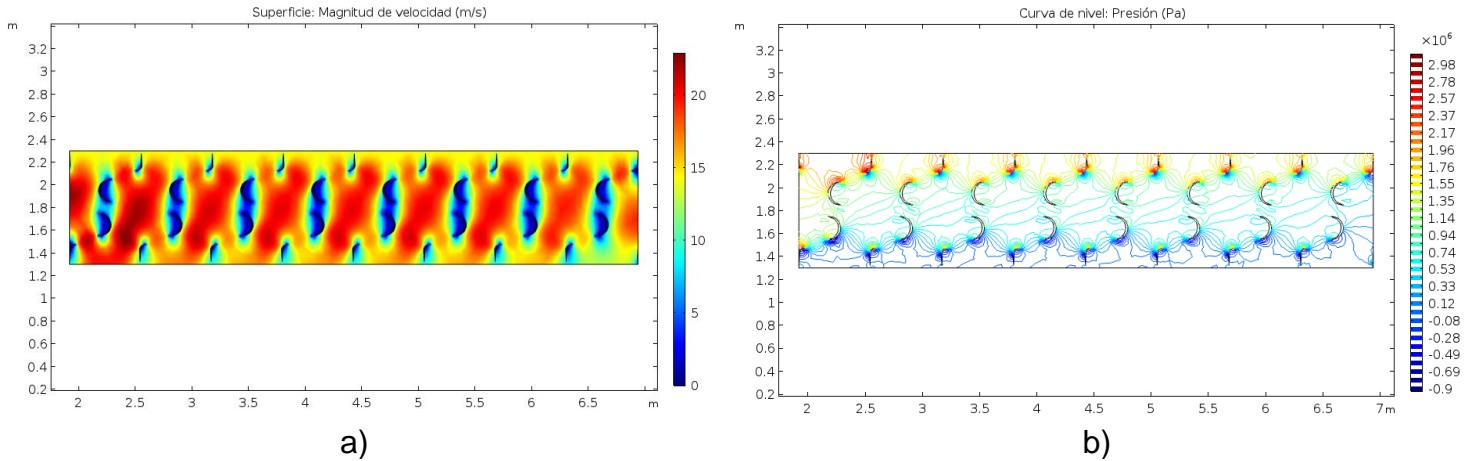


Figura 101. Simulación del doble rotor de la Bi-turbina de impulso axial a) velocidad b) presión

En la figura 101 a, podemos mirar que el alineamiento redirige el flujo hacia el perfil de medialuna aprovechando la velocidad de aire para el giro del rotor, se puede observar que a la entrada de aire el primer rotor aprovecha más el flujo que en el segundo rotor, al igual que las presiones a la entrada serán mayores que a la salida (figura 101 b) lo mismo sucede con la velocidad del aire, es más pasa lo mismo a la inversa. De igual manera se mira que el perfil del primer rotor se somete a mayor presión en la parte superior.

Como se pudo contemplar en este primer análisis de las configuraciones, se examina que tiene ventajas de usar doble rotor, entonces obtenemos un doble giro el cual es un beneficio. El uso de los alineamientos en las turbinas Wells mejoran un poco en el funcionamiento de este tipo de turbinas, aunque no es mucho la mejora, ya que comparada con la turbina de impulso axial muestra más ventaja en comparación a las turbinas Wells, también se prueba que en las turbinas Wells hay mayor presión que en las turbinas de impulso.



Para la siguiente simulación observamos como el flujo actúa en los alabes del rotor por lo que mediante líneas de flujo veremos la trayectoria de fluido. Como se muestra en la figura 102.

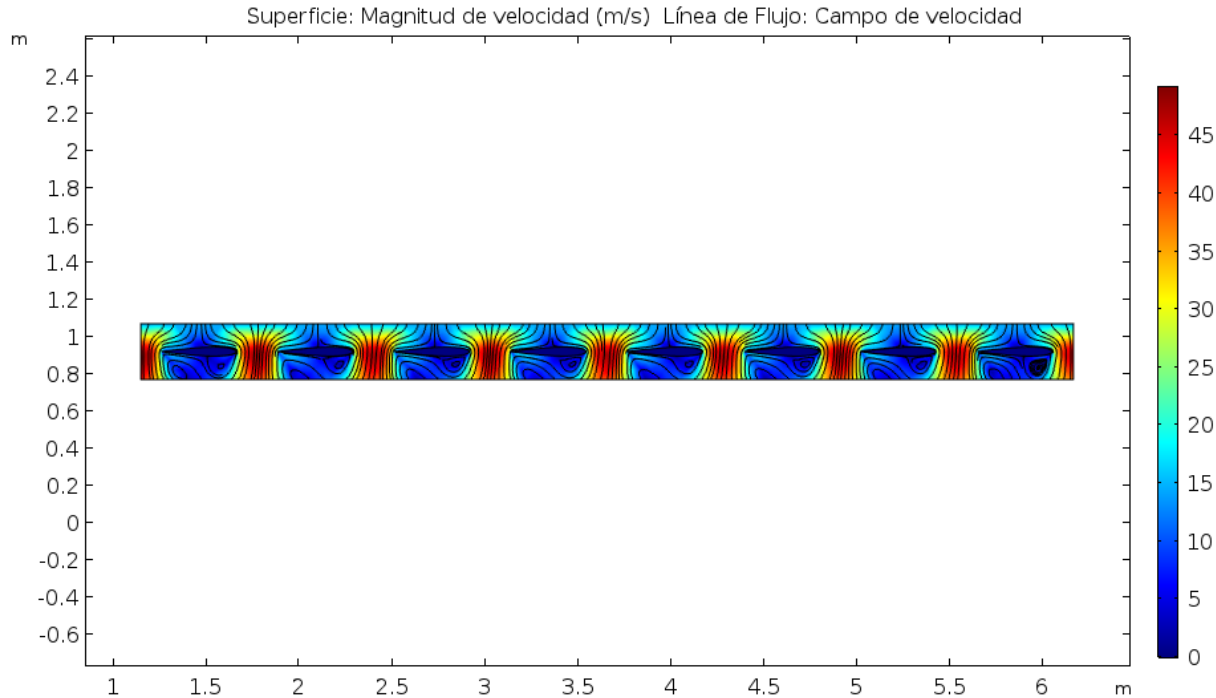


Figura 102. líneas de flujo en el rotor de la turbina tipo Wells.

Aquí podemos apreciar más a detalle el sentido del aire en el rotor de la turbina, mostrando la característica de la capa límite en un perfil aerodinámico, zona donde el movimiento es perturbado por la presencia de un sólido con el que está en contacto, provocando la disminución de la velocidad inicial y favoreciendo al giro funcional del rotor. Como se mencionó antes el aire choca con el perfil justo en el extradós, lo cual lo hace rotar en la dirección estimada. En la parte de intradós del perfil no se han formado vórtices debido a que no se ha presentado algún desprendimiento de la capa límite, debido a que observamos un flujo más estable y sin turbulencias.

En el siguiente caso comparamos el rotor de la turbina Wells con la turbina de impulso, la cual mostramos en la siguiente figura 103.

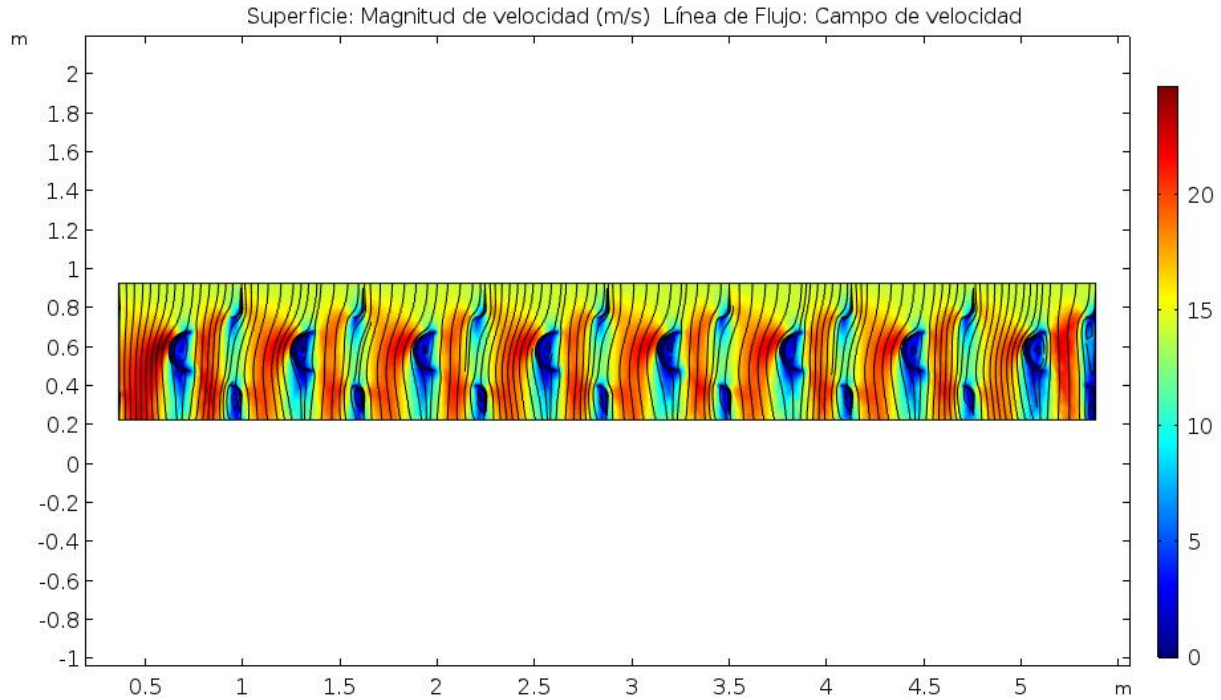


Figura 103. Líneas de flujo en el rotor de la turbina de impulso.

Para este rotor tenemos los alineamientos o redireccionamientos de flujo, de los cuales el flujo másico choca con los alineamientos para redirigirlo hacia el perfil de medialuna, donde podemos apreciar a más detalle como inicia la formación de vórtices justo en el centro de este perfil, en consecuencia, favorece al giro del rotor, debido a que se puede considerar como un factor de impulso de la magnitud vectorial que relaciona dicha fuerza con el tiempo que dura su actuación.

Ahora bien, en comparación con esta turbina de impulso y la turbina Wells con alineamiento de flujo, muestra algunos detalles relevantes para su funcionamiento esto se mira en la figura 104 a continuación.

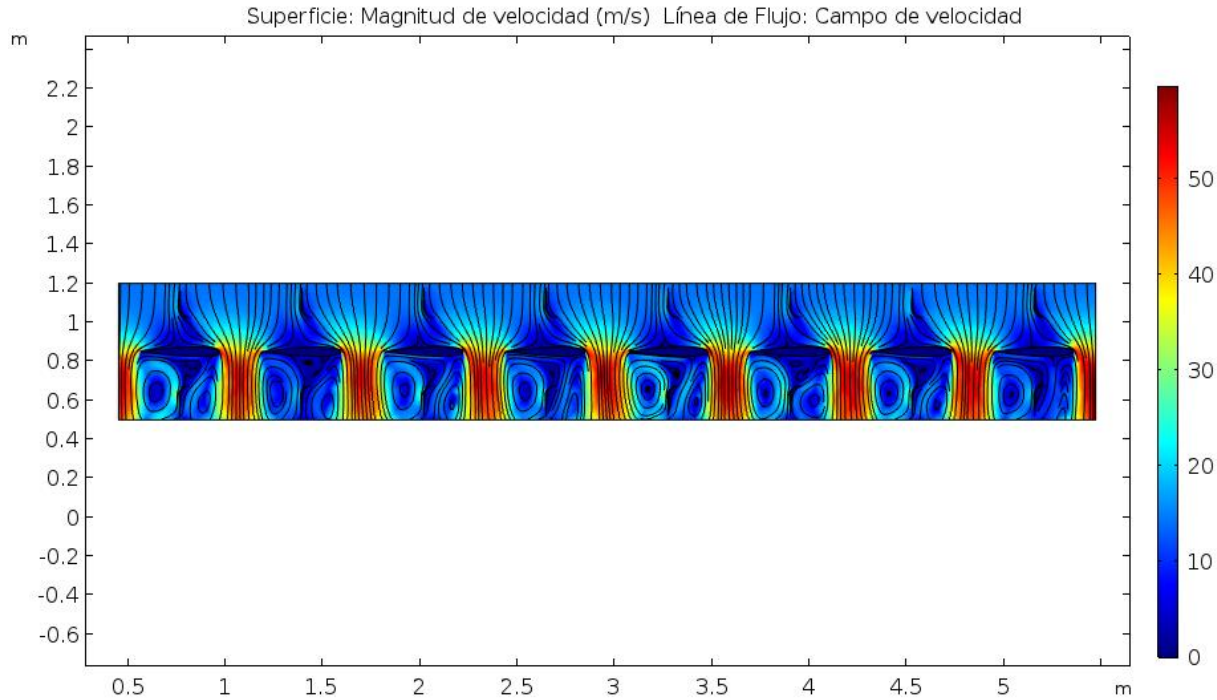


Figura 104. Líneas de flujo en el rotor de la turbina Wells con alineamientos de flujo.

En comparación con la turbina de impulso se ve la formación de la capa límite, ubicada en el intradós del perfil, justo en el borde de ataque y borde de salida, mostrando una capa límite laminar debido a su flujo ordenado. Debajo de la capa límite se localizan más vórtices, los cuales podemos ver que se encuentran en forma ordenada a causa de su flujo laminar, mostrando esfuerzos en la punta del alabe. Por el contrario, esto no significa que sea una desventaja considerable, por esta razón solo bajaría una proporción de la velocidad de giro.

Para el caso de la Bi-turbina Wells con alineamientos que se presenta en la figura 105, donde analizamos el comportamiento del flujo masico en este rotor.

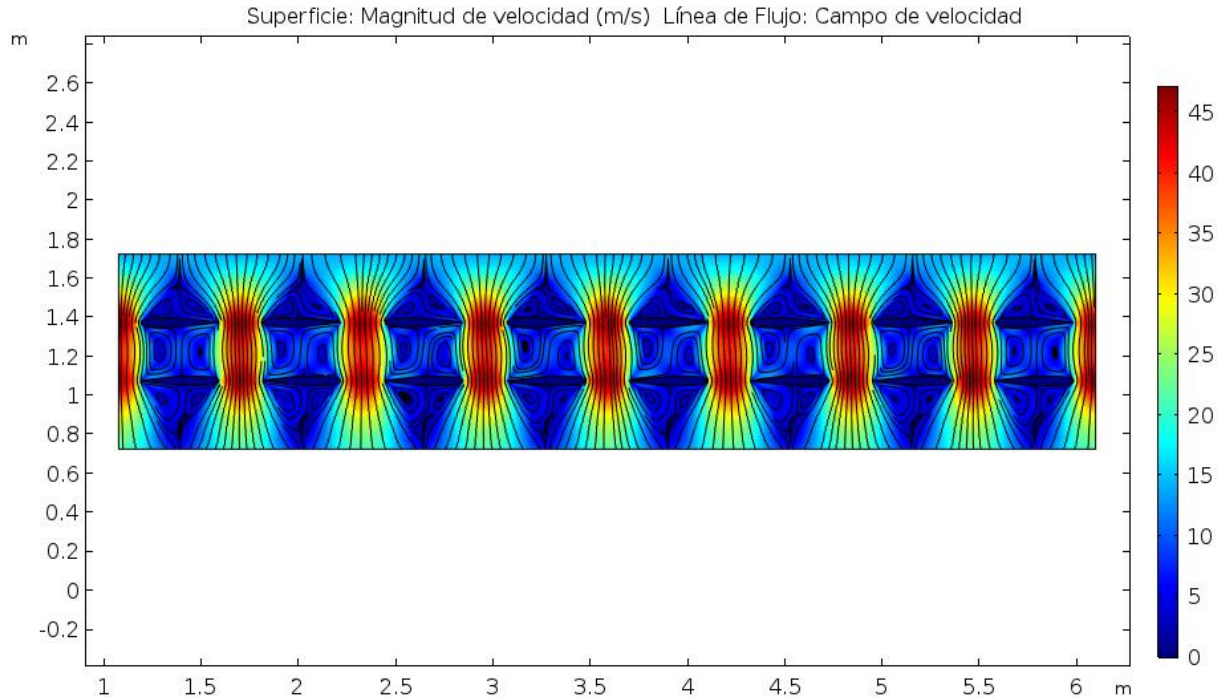


Figura 105. Líneas de flujo en una Bi-turbina Wells con alineamientos

En esta configuración podemos contemplar el flujo másico que traspasa a los alabes y alineamientos, vale decir que redirigen el flujo hacia el alabe. Se observó la formación de vórtices tanto en el extradós e intradós de los alabes, esto se observa en ambos rotores. Estos vórtices pueden significar un aumento en la potencia de la turbina ya que los perfiles aerodinámicos lo aprovechan para un mayor impulso, en este caso se puede ver que el primer rotor se beneficia más, debido a que recibe el primer impulso. Aumentando la posibilidad de desprendimiento de la capa límite como se muestra.

Ahora para la Bi-turbina de impulso podemos fijarnos que en la figura 106, se ve cómo actúa el flujo con respecto a los alabes de la misma manera que en las anteriores configuraciones.

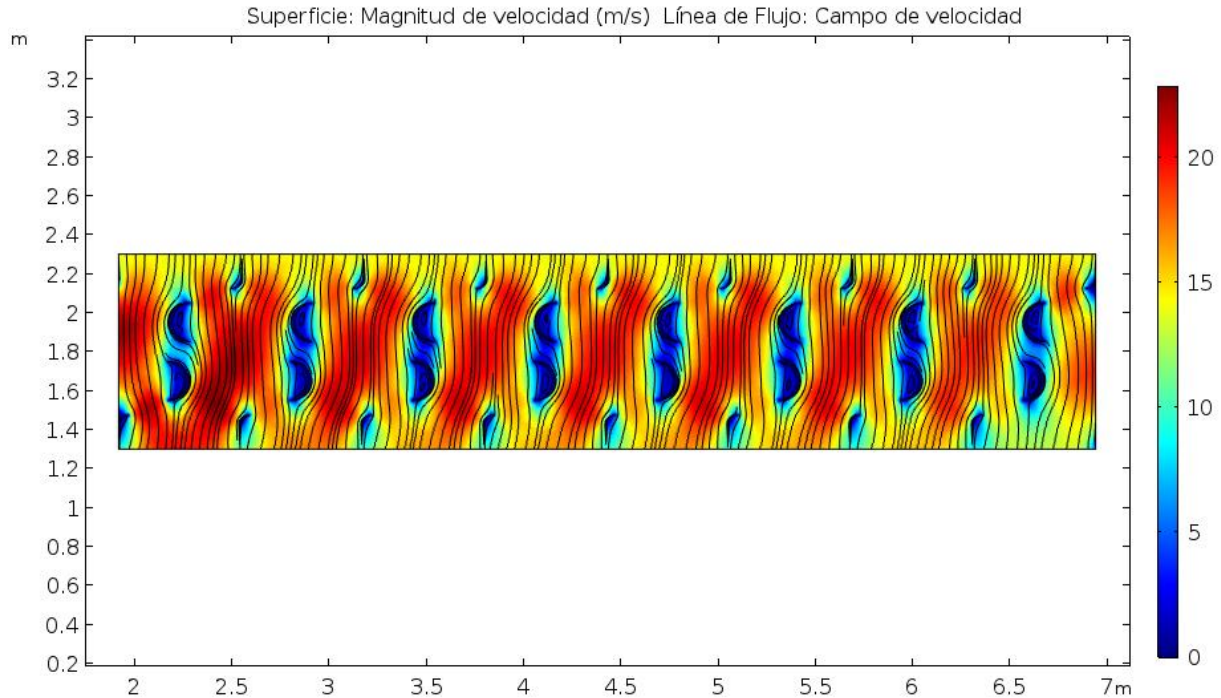


Figura 106. Líneas de flujo en una Bi-turbina de impulso axial

En esta imagen examinamos el campo de velocidad de la Bi-turbina de impulso lo que nos lleva a que el flujo choca con los alineamientos dirigiéndolos al perfil de medialuna, con objeto de mirar la formación de vórtices entre el perfil, aprovechándolos para el giro de ambos rotores, al igual que la Bi-turbina Wells registramos que el primer rotor obtiene más ventajas con respecto al segundo rotor.

Como ya mostramos en los anteriores análisis, la velocidad entre los orificios de descarga es un factor importante, que a su vez pasan por los alineamientos y el rotor de la turbina, por ende, se presenta la simulación del movimiento de los alabes para mostrar de manera más detallada el comportamiento de este tipo de turbinas y en donde compararemos la formación de vórtices y la actuación del flujo másico que pasa dentro del dispositivo.



4.2. Interpretación de resultados de los alabes en movimiento

Para la parte del análisis se realizaron 6 movimientos de los alabes, los cuales se utilizaron el movimiento 1, 2 y 3 para una turbina Wells, donde se muestran aspectos relevantes. A continuación, presentaremos la figura 107.

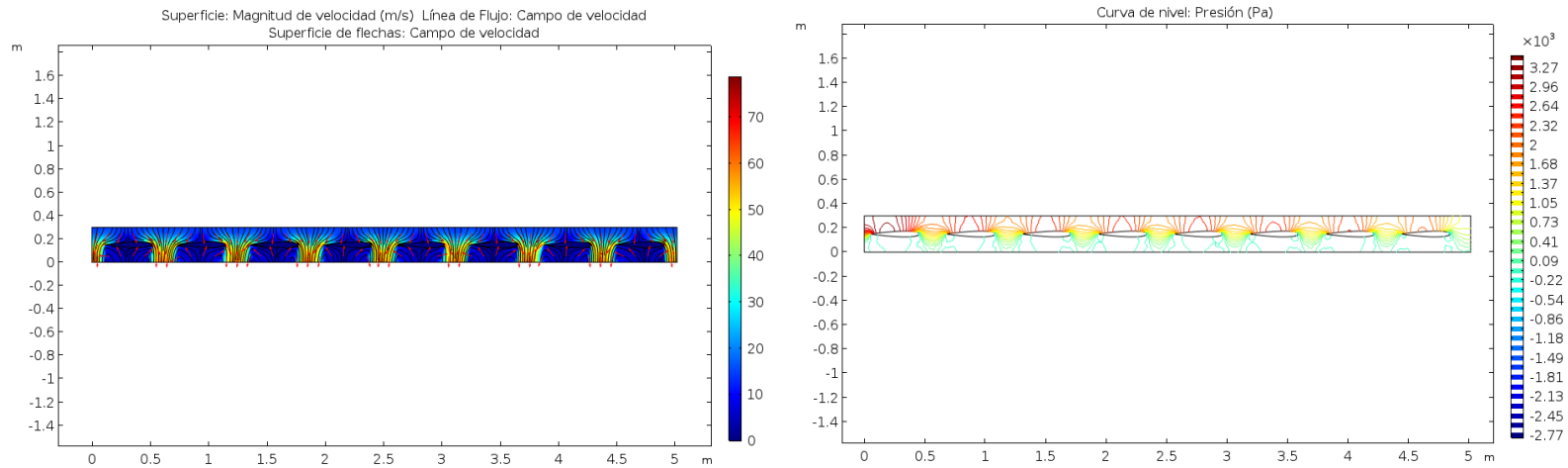


Figura 107. Movimiento 1 de los alabes de la turbina tipo Wells

En la figura 107, podemos apreciar en las líneas de flujo la formación de la capa límite que aparece en la superficie de los organismos viscosos, debido a que el fluido se pega a su superficie, en la zona más cercana. Por lo tanto, su velocidad tiende a cero como lo muestra el color azul oscuro, a esto se le conoce como la condición de no-deslizamiento. También en el punto inicial del giro del rotor en donde apreciamos el choque del aire con los perfiles se manifiesta la presión ejercida sobre el rotor, proporcionando la energía necesaria para el empuje de inicio para la rotación de este. En la parte de intradós se logra apreciar la capa límite, donde no se muestra el desprendimiento de esta, lo que indica que no hay formación de vórtices y se observa la estabilidad del flujo.

Para las curvas de presión se logra ver que la presión del flujo a la entrada que choca en el extradós es mayor, pero debajo del intradós del alabe su presión al salir es menor.

Sobre la simulación del movimiento 2, observamos un comportamiento diferente al movimiento de los alabes, como se muestra en la figura 108.

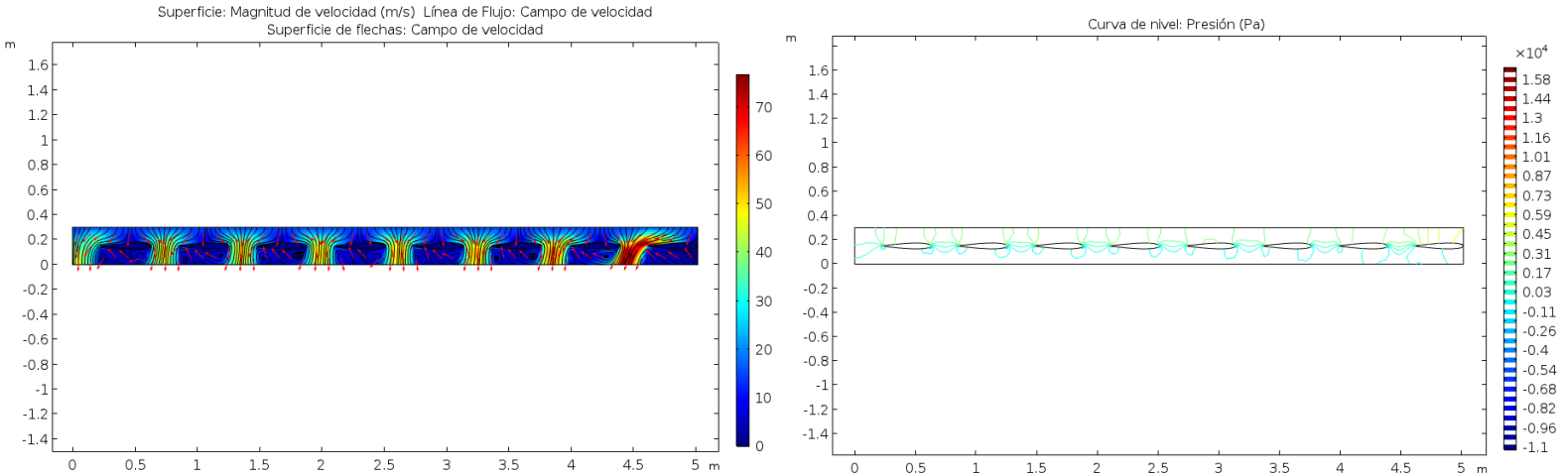


Figura 108. Movimiento 2 de los alabes de la turbina tipo Wells

Se logró apreciar en la simetría del lado izquierdo un ligero cambio de tonalidad, la cual nos refleja disminución de velocidad hasta llegar a al borde de salida del alabe para continuar con su peculiar color azul oscuro, por ende, significa que dicha velocidad tiende a cero. Formando primero la capa límite y después los vórtices debajo del intradós del alabe. Para después dirigarnos al lado derecho del rotor donde se manifiesta de nuevo una coloración que indica mayor velocidad a la entrada y salida.

En consecuencia, se logra mirar más cantidad de curvas de nivel con presiones bajas, justo en la parte que se ubicó mayor velocidad a la entrada y salida del rotor.

Respecto al movimiento 3 que se muestra en la figura 109, se observó otro comportamiento diferente con respecto al factor de velocidad.

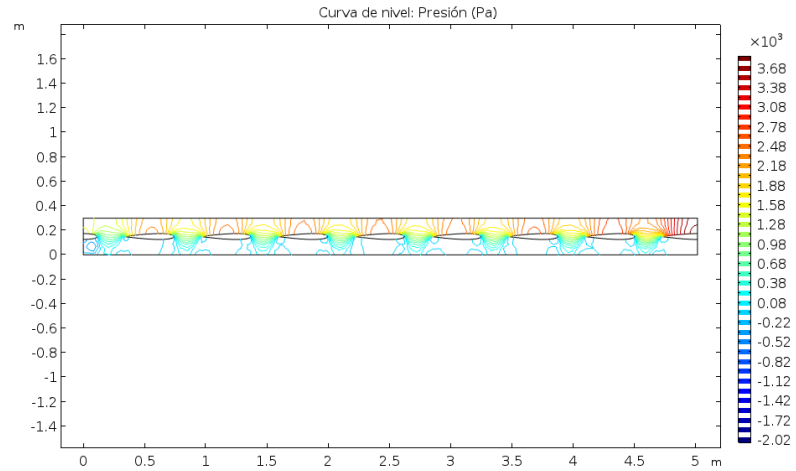
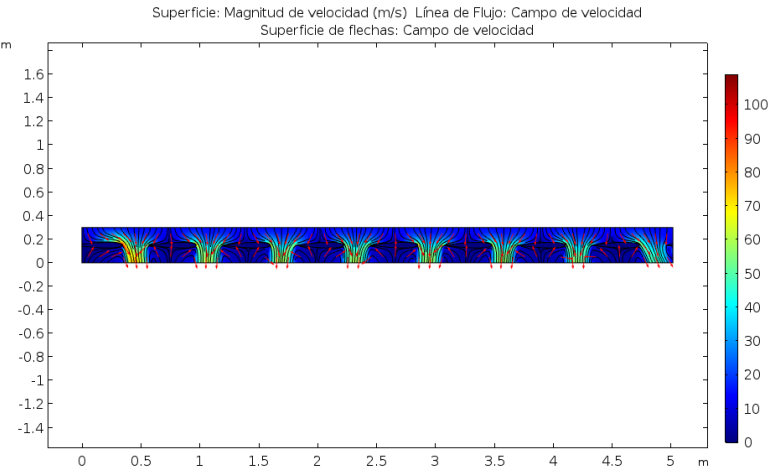


Figura 109. Movimiento 3 de los albes de la turbina tipo Wells

Para el caso de la figura 109, se logra apreciar que la velocidad tiende a cero, por ende, significa que el alabe está en reposo o bien moviéndose a velocidad constante, sin frenar o acelerar. Esto se puede demostrar por su gran cantidad de tonalidad azul, lo que resalta que hay una buena potencia mecánica.

Para la turbina de impulso se realizaron la misma cantidad de movimientos en los albes de los cuales mostramos tres donde se presentan datos más relevantes.

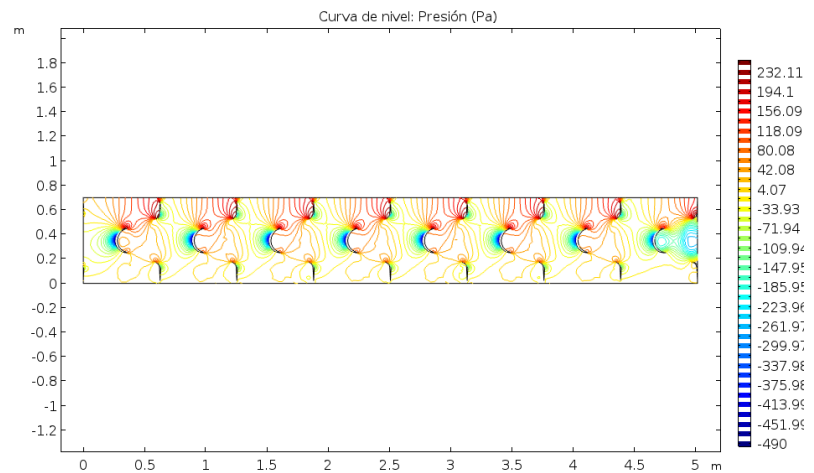
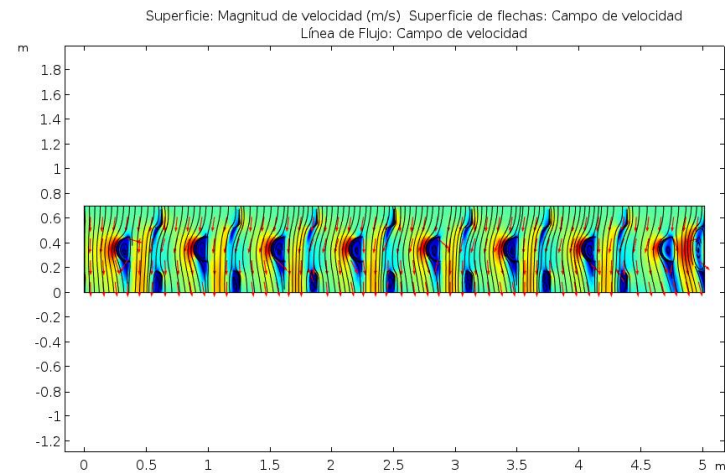


Figura 110. Movimiento 1 de los albes del rotor de la turbina de impulso axial



En la figura 110, corresponde al inicio de rotación de este rotor en donde observamos que el flujo másico interactúa con los alineamientos dirigiendo el flujo hacia el perfil, apreciamos que hay mayor presión en los alineamientos y en la parte superior del perfil, lo que puede significar que podemos tener la energía suficiente para la rotación de este rotor. Se observa también la formación de vórtices en el centro del perfil de medialuna lo cual en esta posición los vórtices favorecen al giro por lo que son benéficos en este caso.

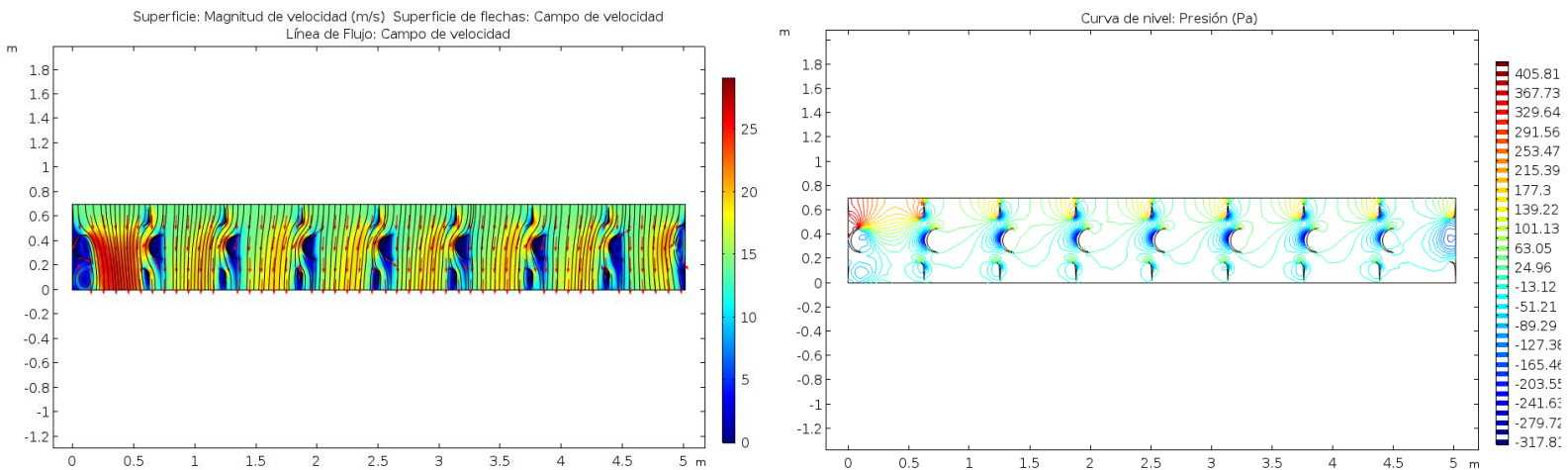


Figura 111. Movimiento 2 de los alabes del rotor de la turbina de impulso

En esta parte del movimiento del rotor (Figura 111) podemos notar que la energía sobre los alineamientos y los perfiles se nota más estable debido a que notamos menos presión en los alabes superiores respecto al movimiento anterior, con excepción del primer alineamiento a la izquierda donde parece concentrar mayor presión al igual que el primer perfil del lado izquierdo, la zona de tonalidad roja en dicho perfil se presenta un rango de mayor velocidad lo que pudo haber provocado que esta zona manifieste más presión en la parte superior que en las demás.

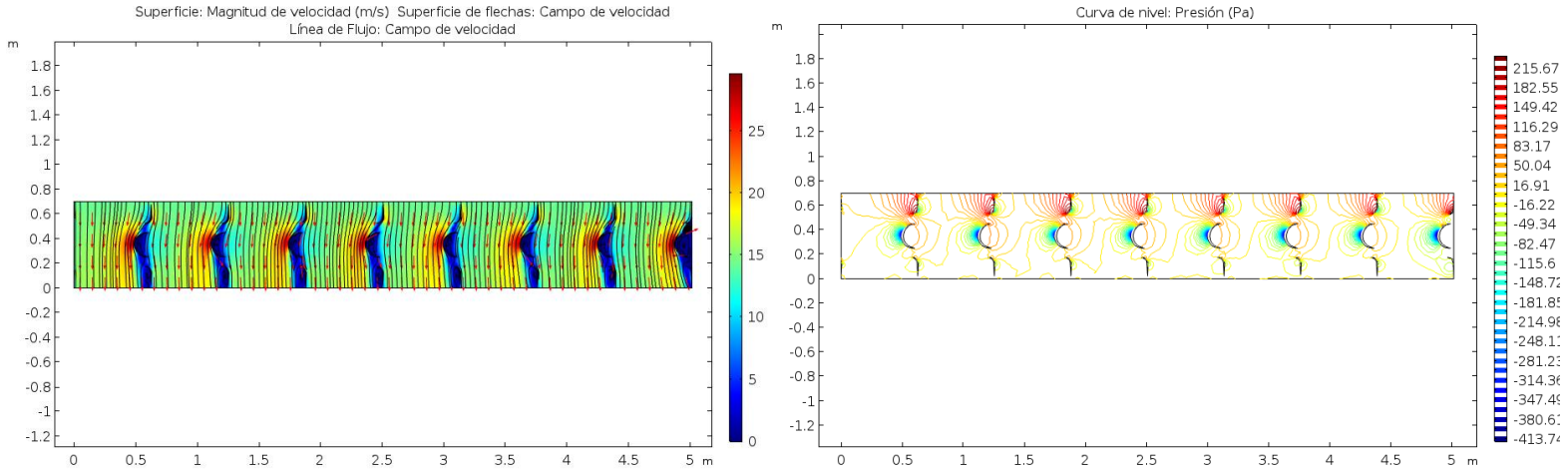


Figura 112. Movimiento 3 de los alabes del rotor de la turbina de impulso

Referente al movimiento 3 del rotor (Figura 112) vemos que la presión en la parte superior vuelve a ser mayor en los alineamientos superiores pero esta vez en la parte superior del perfil la presión es menor que en el inicio, esto podría indicar que la energía no fluye de manera correcta para seguir con el giro del rotor o un buen funcionamiento lo que puede indicar que puede haber indicios de un frenado o disminución de velocidad del rotor.

En la turbina Wells con alineamientos se tomaron en cuenta los movimientos 1, 2 y 4, debido a su relevancia con las demás simulaciones.

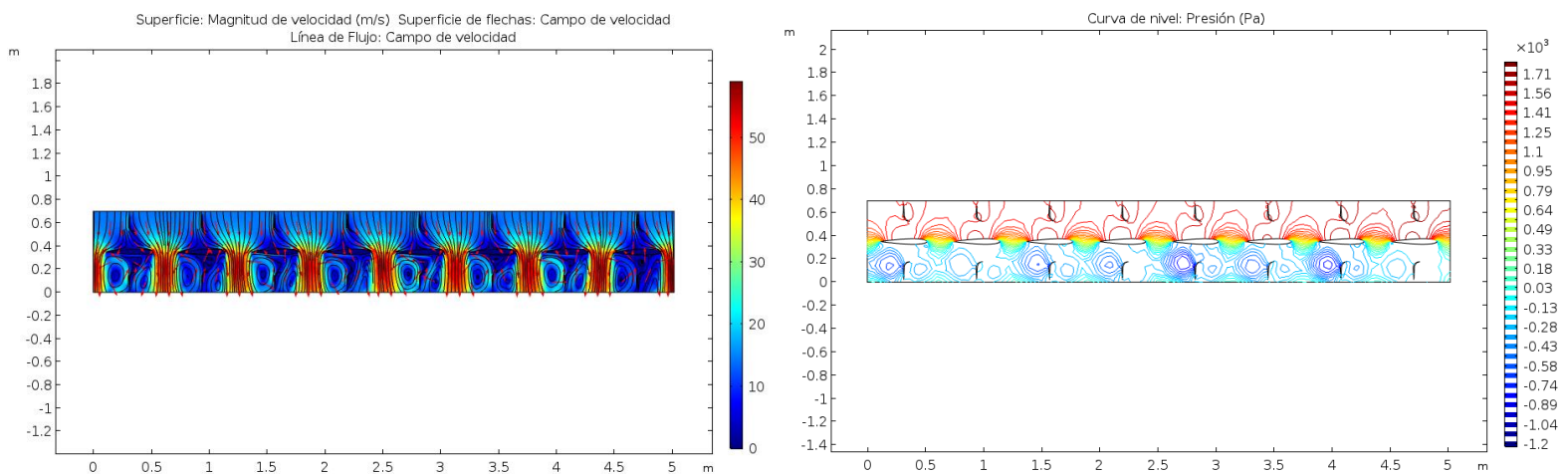


Figura 113. Movimiento 1 de los alabes en una turbina Wells con alineamientos.



Como se muestra en la figura 113, presenta un rango de color azul que nos indica que la velocidad se mantiene constante y no presenta un obstáculo que lo frene. Por ende, podemos visualizar que la teoría de sustentación parte de que, en un perfil alar simétrico el extradós e intradós poseen la misma longitud. Esto pasa por que las líneas de flujo superior pasan por el extradós a una alta velocidad, pero con baja presión en cambio cuando las líneas de flujo superior pasan por el intradós del perfil provocan una baja velocidad con presiones altas, generando ambas una fuerza de sustentación. También se muestra que se está empezando a formar varios vórtices, formándose justo en el intradós de los perfiles NACA, los cuales dichos vórtices son favorables para el inicio del giro del rotor.

Para la figura 114 del movimiento 2, analizamos una pequeña reacción de velocidad y presión.

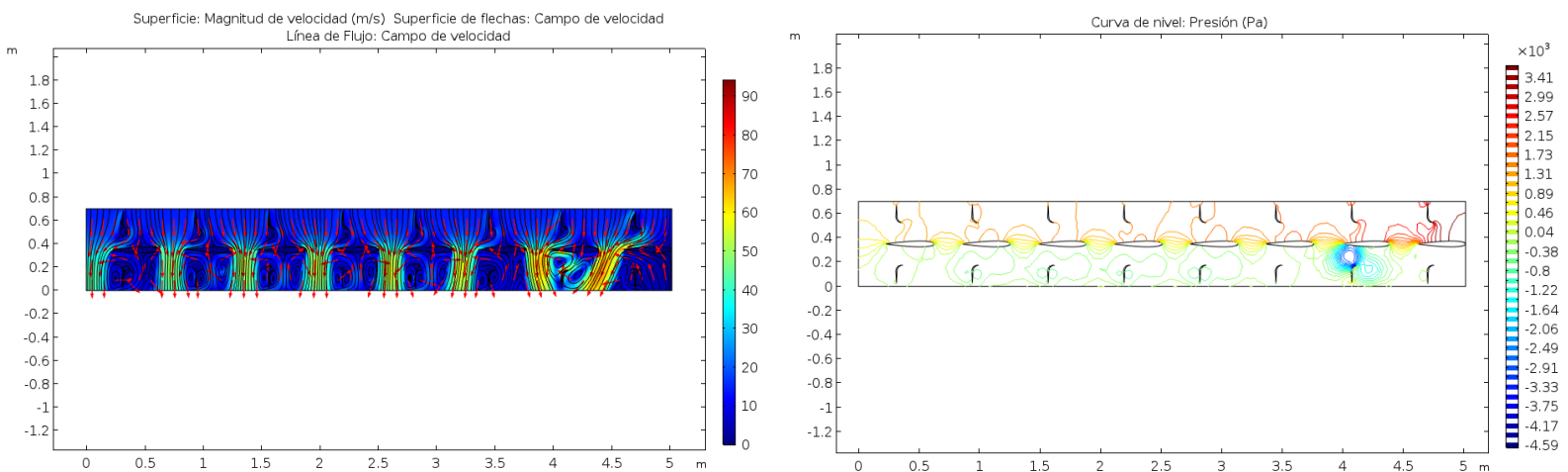


Figura 114. Movimiento 2 de los alabes en una turbina Wells con alineamientos.

La cual se logra ver por su cambio de colores a partir del borde de ataque y el borde de salida del alabe, este fenómeno logra aumentar la velocidad del fluido enfrentando un obstáculo y formando vórtices. Esto significa que en el extradós hay mayor presión a la entrada, mientras que el intradós la presión es baja, creando resistencia por vórtices causada por la diferencia de presión existente entre el intradós y extradós, en la punta del ala crea un flujo de aire de la zona de mayor presión a la de menor presión, dando lugar a la generación de un vórtice de aire.



En el movimiento 3 de la figura 115, se logra apreciar más a detalle el análisis del fenómeno de vórtices como se muestra a continuación.

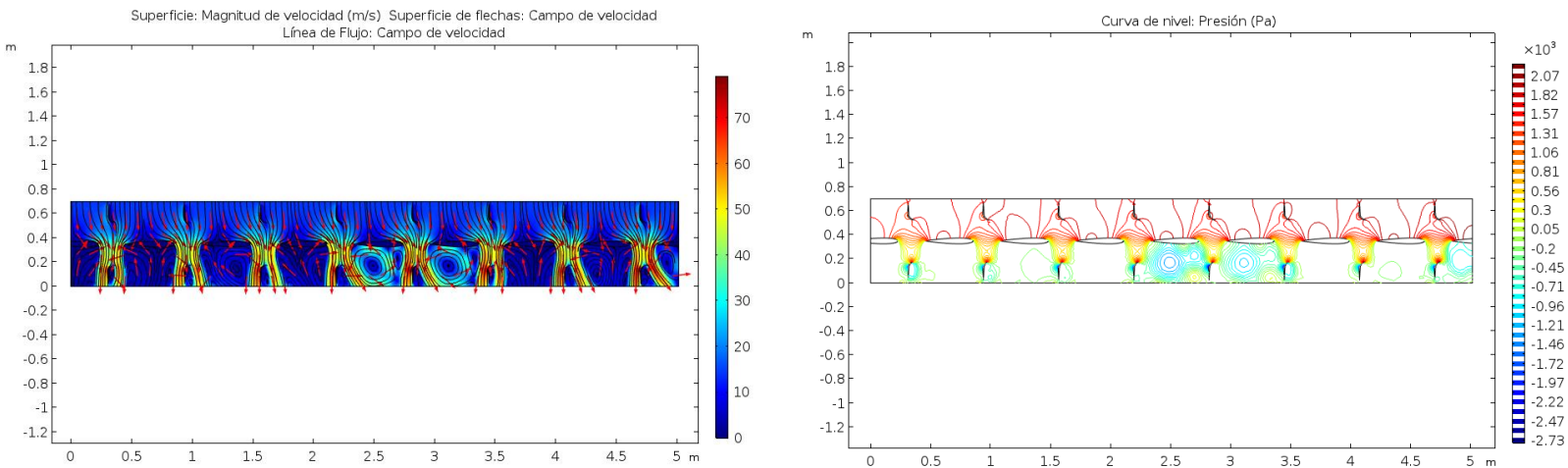


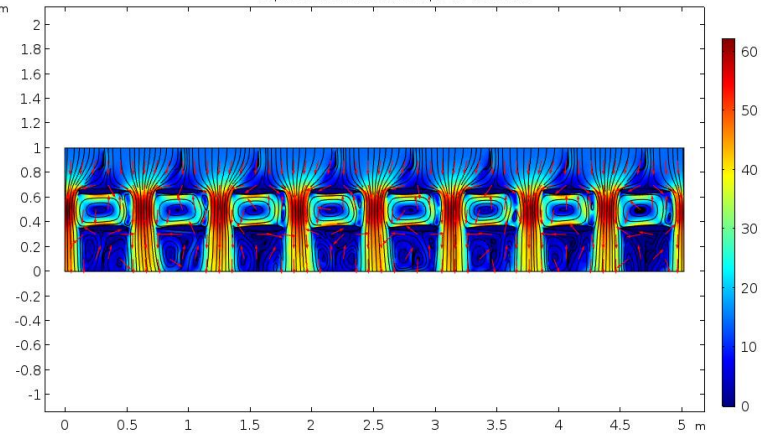
Figura 115. Movimiento 3 de los alabes en una turbina Wells con alineamientos.

En la imagen 115 podemos observar la formación de vórtices, los cuales actúan en el intradós del perfil alar como se muestra para este punto se han formado 3 vórtices de mayor energía favorables para el movimiento mecánico del rotor, esto debido a que no se encuentran en zonas donde podrían provocar un efecto de frenado, y de igual manera se puede manifestar la formación de vórtices pequeños que se encuentran en el borde de ataque en dos de los perfiles, los cuales de ser más grandes podrían presentar desventajas para el movimiento del rotor. También se puede notar que de nuevo se empiezan a formar vórtices con forme los álabes avanzan y la mayoría son buenos para que el rotor siga en movimiento.

En el siguiente caso tenemos la turbina Wells de doble rotor como se presenta en la figura 116.



Superficie: Magnitud de velocidad (m/s) Línea de Flujo: Campo de velocidad
Superficie de flechas: Campo de velocidad



Curva de nivel: Presión (Pa)

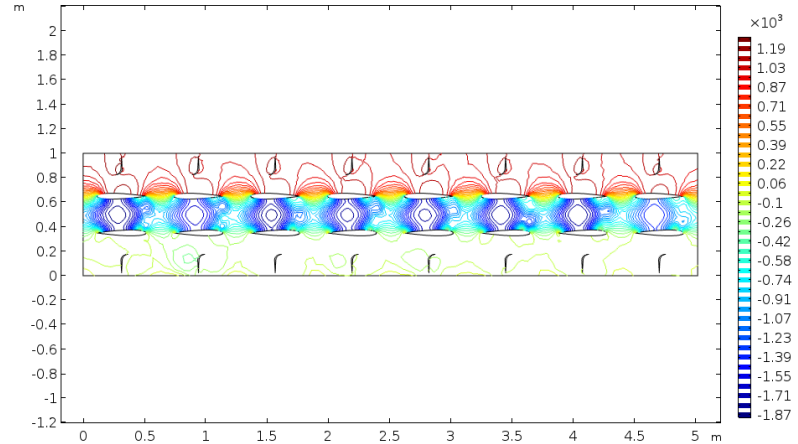
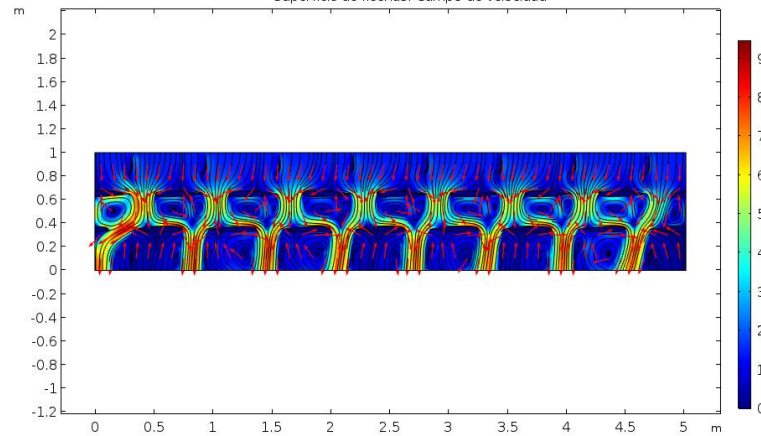


Figura 116. Movimiento 1 de los alabes de la Bi-turbina Wells con alineamientos

En la figura 116 mostramos el punto de inicio de la rotación de este doble rotor y observamos que hay más presión a la entrada que a la salida por lo que afecta más esto al primer rotor por lo que podemos decir que aprovecha más energía que el segundo rotor. De igual manera podemos visualizar la formación de vórtices entre el intradós de los alabes del primer rotor y el extradós de los alabes del segundo rotor y por la posición de estos vórtices favorece a ambos rotores para inducir movimiento mecánico. Incluso también se ve que se empiezan a formar algunos vórtices en el intradós en los perfiles del segundo perfil.

Superficie: Magnitud de velocidad (m/s) Línea de Flujo: Campo de velocidad
Superficie de flechas: Campo de velocidad



Curva de nivel: Presión (Pa)

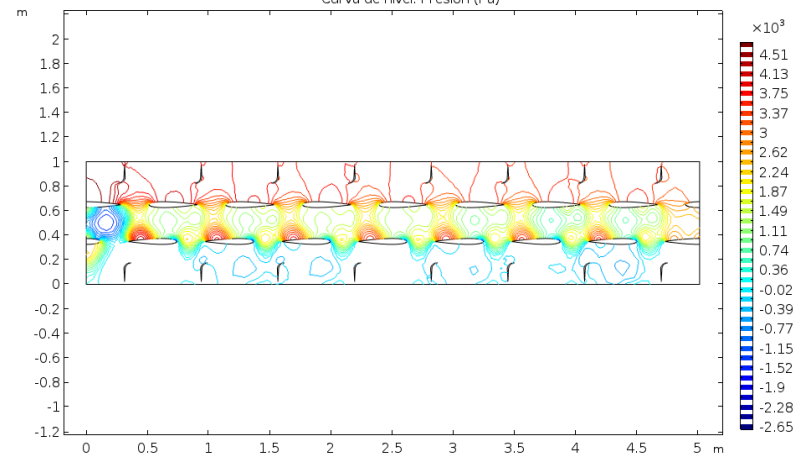


Figura 117. Movimiento 3 de los alabes de la Bi-turbina Wells con alineamientos

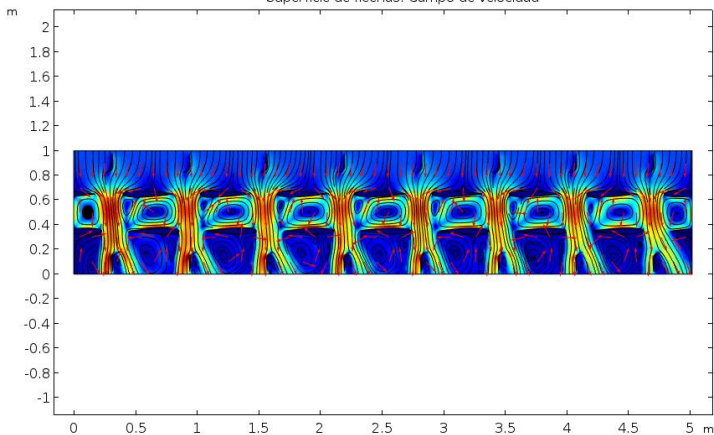


Para el movimiento 3 se logró analizar el proceso de sustentación aerodinámica debido a que el rotor es más pesado que el aire, superando obstáculos. Uno de esos obstáculos es la resistencia al movimiento llamada fuerza de arrastre, dicha fuerza se presenta en objetos que se mueven a través de un fluido. Actuando en la dirección del movimiento relativo al fluido. Formando un vórtice determinado por su peso, velocidad la cual nos indica que es alta, continuando con la formación de vórtices pequeños.

Obteniendo presiones altas en los primeros alabes y poco a poco bajando el nivel de presión hasta lograr ver que la segunda fila de los perfiles presenta presiones negativas por debajo de la presión atmosférica estándar.

Otro de los movimientos más relevante fue el 4, presentado a continuación en la figura 118.

Superficie: Magnitud de velocidad (m/s) Línea de Flujo: Campo de velocidad
Superficie de flechas: Campo de velocidad



Curva de nivel: Presión (Pa)

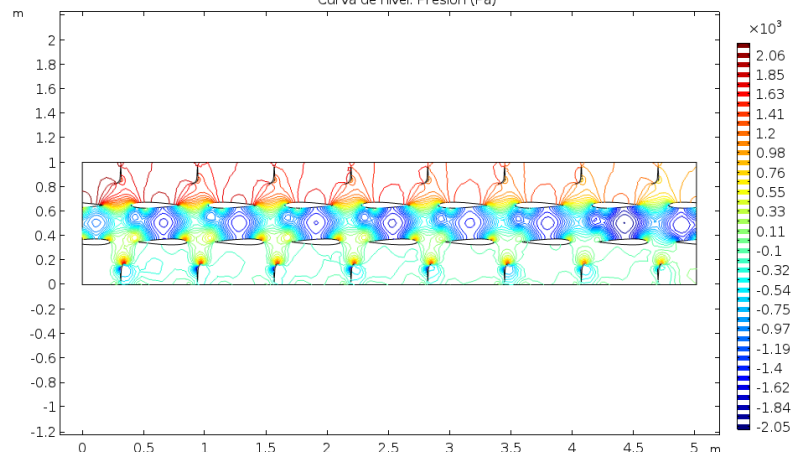


Figura 118. Movimiento 4 de los alabes de la Bi-turbina Wells con alineamientos

En ella podemos visualizar que dichos vórtices mencionados anteriormente crean velocidades altas. Además de que en un ala se genera sustentación, la presión sobre la superficie inferior del ala es más alta que la presión sobre la superficie superior del ala. indicándonos que hay buen aprovechamiento de la potencia para ambos rotores.

Para concluir presentamos el movimiento de los alabes de la Bi-turbina de impulso axial.

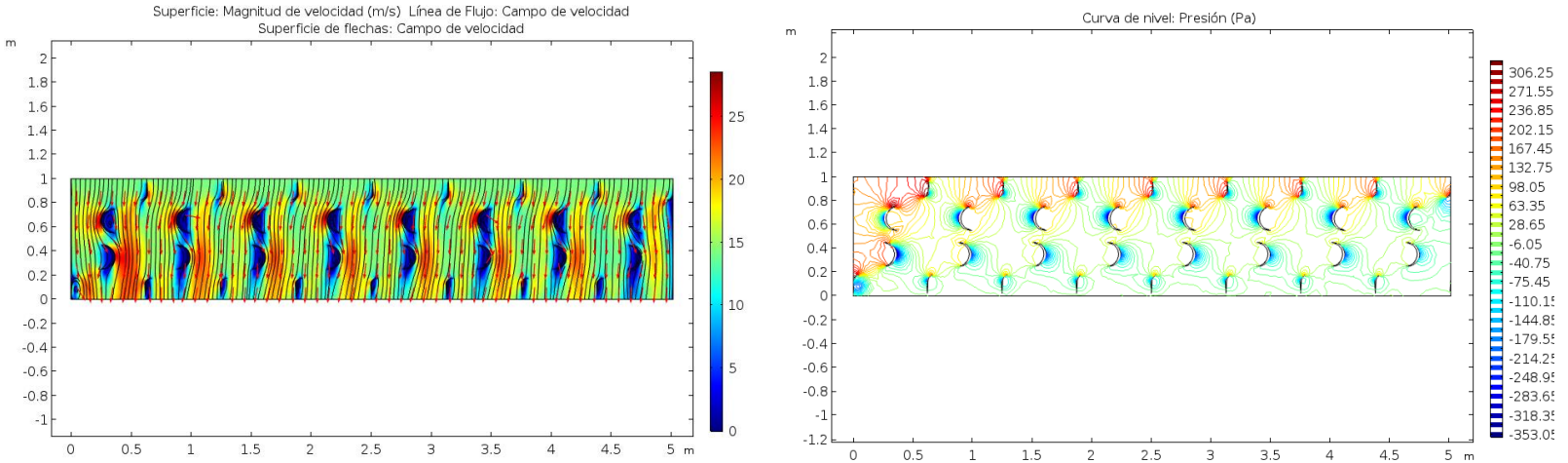


Figura 119. Movimiento 1 de los alabes de la Bi-turbina de impulso axial.

En la figura 119 representa al punto de inicio del giro de los rotores donde empieza la interacción del aire con los alineamientos redirigiendo el flujo hacia los alabes de los rotores, donde se puede observar que se empiezan a formar algunos vórtices en los alabes, aprovechables para el giro de los rotores. También se muestra una característica parecida al funcionamiento de una tobera en la cual se muestra que la presión disminuye conforme el aire se dirige a la salida, y la velocidad aumenta a la salida.

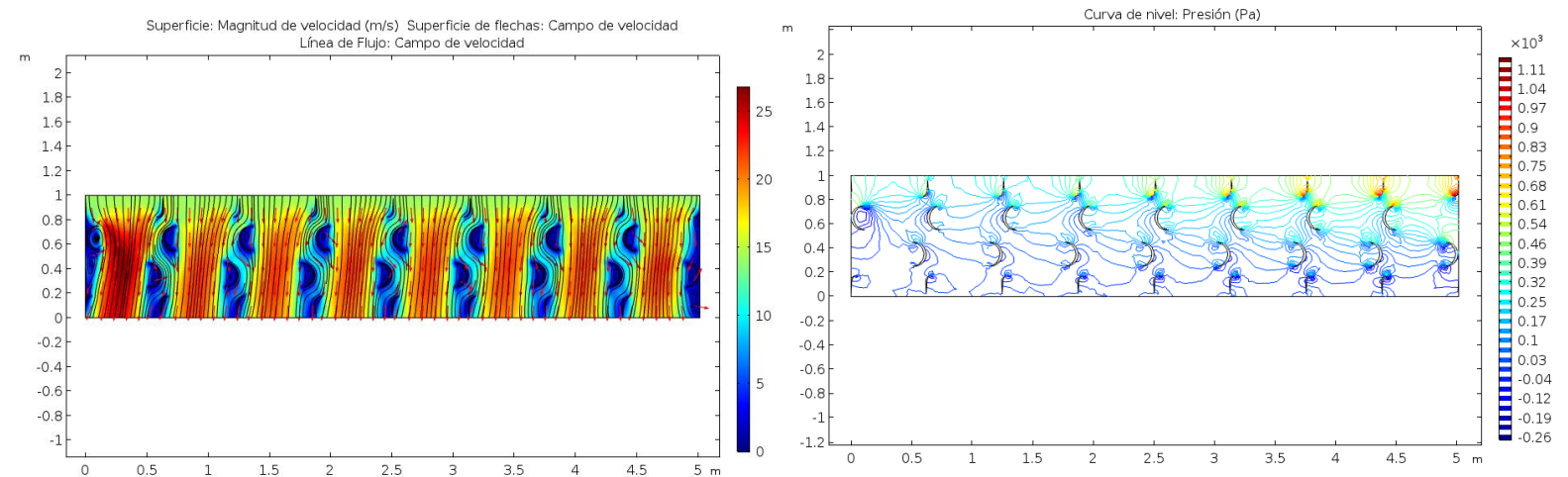


Figura 120. Movimiento 2 de los alabes de la Bi-turbina de impulso



Para el siguiente movimiento (Figura 120) podemos observar que la energía fluye de manera más equilibrada y esto lo podemos observar en las curvas de presiones que aumentan en comparación al movimiento anterior, pero se muestra un flujo más uniforme en los alineamientos y alabes, esto debido a que la energía aumenta a favor de la rotación de los rotores e indica un desplazamiento que no presenta dificultades al giro. De igual forma se manifiestan vórtices en los perfiles de medialuna en el centro, zona donde es favorable para una rotación correcta.

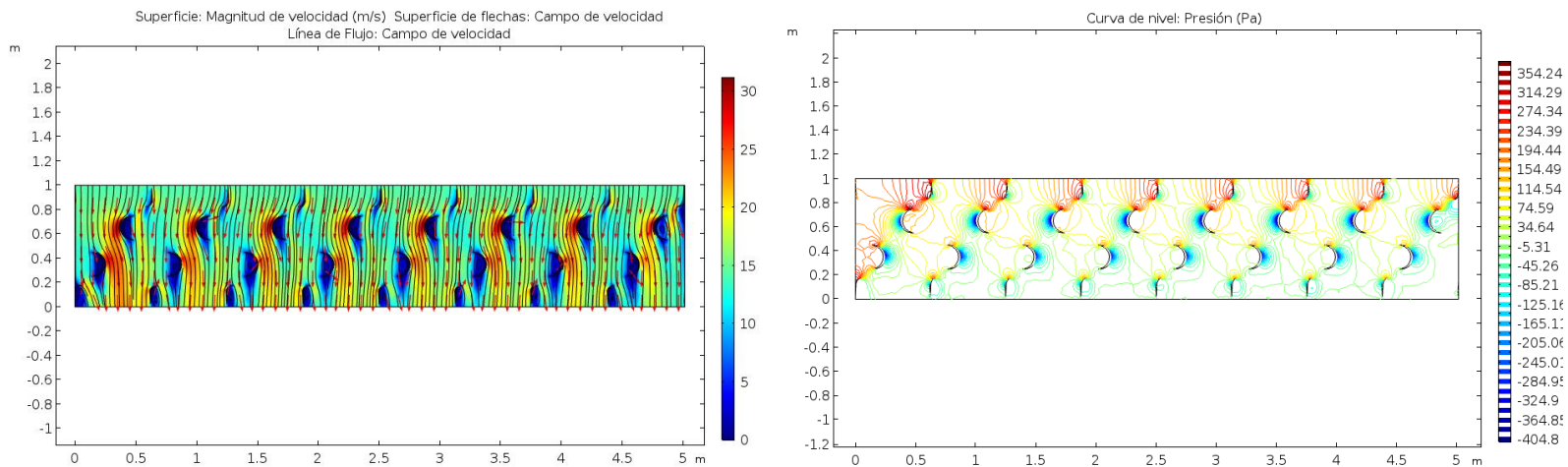


Figura 121. Movimiento 3 de los alabes de Bi-turbina de impulso

A pesar de que en el movimiento anterior se presentaban ventajas de un aprovechamiento de energía, aquí (Figura 121), se muestra un aumento de presión de nuevo en los alineamientos y en la zona superficial del perfil de medialuna del primer rotor, se logra observar que se forman nuevos vórtices en los perfiles pero también se muestra un esfuerzo en la parte trasera, lo cual puede perjudicar el giro de los rotores lo que indica que a partir de este movimiento la presión interactuara de igual manera con forme a su desplazamiento ya sea beneficiando al giro o provocando el frenado de los rotores.



5. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó un análisis aerodinámico de distintas configuraciones en el rotor para una turbina bidireccional, en donde observamos como interactúa el flujo con los álabes y alineamientos, para los perfiles NACA 0012 y de Medialuna, entre ambos perfiles se muestran comportamientos diferentes algunos aprovechando la formación de vórtices más que otros. Igual conforme a la observación se muestra que las configuraciones que más relevancia presentan son la Bi-turbina Wells con alineamientos y la Bi-turbina de impulso, debido a que aprovechan de mejor manera el flujo de aire y pueden generar mayor potencia que las demás configuraciones.

La generación de vórtices en la Bi-turbina de impulso, se aprovecha de mejor manera que en las demás configuraciones. Se muestra que la capa límite varía en medida que el flujo se desarrolla en la superficie en un inicio la capa límite es laminar donde el fluido se mueve en capas o láminas lisas con velocidades pequeñas y grandes luego pasa por un periodo de inestabilidad que son las curvas u ondas.

Mediante parámetros de velocidad y de presión observamos como afecta a cada configuración, se puede observar siempre que a la entrada hay menos velocidad y más presión esto debido a que el flujo de aire aún no ha interceptado con alineamientos y alabes del rotor, conforme se va desplazando el flujo de aire, la presión va disminuyendo y la velocidad aumenta en la salida. Tanto en las configuraciones de la turbina Wells como en las configuraciones de la turbina de impulso se observa este comportamiento.

En las simulaciones realizadas en el actual trabajo se muestra el comportamiento de flujo de aire ante estas configuraciones, en donde se observa que en la primera configuración de la turbina Wells, el flujo se mantiene más estable y con menos turbulencias, y en la segunda configuración de esta turbina empieza a manifestarse más turbulencias e incluso se empiezan a formar vórtices los cuales son mostrados en la simulación y benefician al giro del rotor de esta. En cambio, en la tercera configuración de la turbina Wells el flujo de aire tiene un comportamiento más turbulento en donde incluso se forman más cantidad de vórtices. Para el caso de las configuraciones de la turbina de impulso, para la primera configuración se muestra que el flujo de aire muestra más velocidad en comparación con las turbinas Wells y sucede lo mismo con la segunda configuración de la turbina de impulso con respecto a la tercera configuración de la turbina Wells.



Al comparar los resultados de las simulaciones se muestra que turbina es la que aprovecha más el flujo de aire. En la primera comparación se muestra la turbina Wells, la turbina Wells con alineamientos y la turbina de impulso, en donde se muestra que la turbina de impulso es superior a la turbina Wells en el aprovechamiento de flujo en cambio en comparación con la turbina Wells con alineamientos es ligeramente superior la turbina de impulso ya que muestran características similares pero la turbina de impulso aprovecha mejor el flujo de aire con el perfil de medialuna. En el caso de la Bi-turbina Wells y la Bi-turbina de impulso son dos turbinas que presentan buenas características para aprovechar este flujo, ya que las dos pueden generar mayor potencia de rotación lo cual es bueno para la generación de electricidad en una planta OWC, considerando también que la Bi-turbina de impulso continua teniendo un mejor comportamiento ante el flujo de aire porque con esta configuración en el rotor se aprovechan de mejor manera los vórtices generados para darle mayor impulso a la turbina.



REFERENCIAS

Anand, S. y otros, 2007. *Turbines for wave energy plants*. s.l.:s.n.

Arroyo, J., s.f. *Energía procedente de los océanos y mares, Temarios formativos profesionales..* s.l.:s.n.

Bakmeedeniya, I. V., Gunawardane, S. D. G. S. P., Kim, B. H. & Lee, Y. H., 2020. Primary energy conversion performance of “Pendulor” wave energy device with bottom gap. *한국마린엔지니어링학회지*, 44(4), pp. 338-343.

Beirao, P., Mendes, M. J. G. C., Valério, D. S. & da Costa, J., 2007. Control of the archimedes wave swing using neural networks. *European Wave and Tidal Energy Conference. 2007.*, Issue 7.

Castro, F. y otros, 2012.. An Alternative Approach to Match the Turbine to the Characteristics of an OWC Wave Power Plant.. *The Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference* .

CEL, s.f. *Gobierno de México*. [En línea]
Available at: <https://www.gob.mx/cre/articulos/preguntas-frecuentes-sobre-los-certificados-de-energias-limpias>

Cervantes, S., 2012. BC tendrá primera planta de energía generada con olas. *El Economista*, 12 Agosto, p. 1.

Chehaze, W., Chamoun, D., Bou-Mosleh, C. & Rahme, P., 2016. Wave roller device for power generation. *Procedia Engineering*, Volumen 145, pp. 144-150.

Cidead, s.f. *Fuerza y presión de los fluidos*. [En línea]
Available at:
<http://recursostic.educacion.es/secundaria/edad/4esofisicaquimica/4quincena4/impresos/quincena4.pdf>
[Último acceso: 8 Agosto 2021].

Cruz, R. C., Monreal, M. A. & Nikolaevich, S., 2008. Efectos de los vórtices en sistemas acuáticos y su relación química, biología y geología.. *Interciencia*, 33(10), pp. 742-746.

Cuan B. Boake, T. J. W. M. F., 2002. *Overview and Initial Operational Experience of the LIMPET Wave Energy Plant*. Escocia: Dept. of Civil Engineering, Queens University Belfast,.

Docplayer, s.f. *Presión y fluidos*. [En línea]
Available at: <https://docplayer.es/32350133-Que-es-un-fluido-se-denomina-fluido-a-aquellos-cuerpos-que-pueden-fluir-y-adoptan-la-forma-del-recipiente-que-los-contiene.html>
[Último acceso: 1 Agosto 2022].



Dreamstime, s.f. *Vórtice geométrico*. [En línea]

Available at: <https://es.dreamstime.com/imagen-de-archivo-v%C3%B3rtice-geom%C3%A9trico-image27749601>

[Último acceso: 28 Julio 2022].

Drew, B. & Li, H., 2018. Ocean wave energy converters: Status and challenges. *Energies*, XI(5), p. 1250.

Drew, B. & Plummer, A. S. M. N., 2009. *A review of wave energy converter*. Bath, UK, University of Bath.

Durán, A., 2017. *Propuesta de instalación de una central undimotriz en México*. Tesis de Maestría ed. México: Instituto Politécnico Nacional Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad profesional “Adolfo López Mateos”.

Duran, A. & Vázquez, E., 2014. *Generación de energía eléctrica a través de la energía cinética y potencial de las olas en una central undimotriz localidad de Pascuales Colima, México*. (Tesis de grado) ed. Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional.

Eco Wave Power, 2022. *Why Onshore/Nearshore?*. [En línea]

Available at: <https://www.ecowavepower.com/our-technology/why-onshore-nearshore/>

[Último acceso: 8 Agosto 2022].

Eduambiental, s.f. [En línea]

Available at:

<http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/curso/contenidos/docpdf/capitulo22.pdf>

Física, F. y. T., s.f. *TUBO DE PITOT*. [En línea]

Available at: <https://davidrodriguez2206.wordpress.com/tubo-de-pitot/>

[Último acceso: 31 Julio 2022].

Gato, L. & Curran, R., 1996. Performance of biplane Wells turbine. *Journal of Offshore Mechanics and Art Engineering (OMAE)*, Issue 118, pp. 210-215.

Gherardelli, C., s.f. *Capa Límite*. [En línea]

Available at: <file:///C:/Users/JulioCesar/Downloads/Capa%20%C3%ADmite.pdf>

[Último acceso: 02 Agosto 2021].

Giles, R. V., Evett, J. B. & Liu, C., 2005. *Mecánica de los Fluidos e Hidráulica*. Madrid: McGraw–Hill/Interamericana.

Gridlines, 2019. *Gridlines*. [En línea]

Available at: <https://www.gridlines.com/podcasts/podcast-4-is-there-a-future-for-wave-power/>

[Último acceso: 28 Julio 2022].

Grupo SIE, s.f. *Tubo venturi*. [En línea]

Available at:

[http://www.sapiensman.com/tecnoficio/docs/doc17.php#:~:text=El%20tubo%20Venturi%](http://www.sapiensman.com/tecnoficio/docs/doc17.php#:~:text=El%20tubo%20Venturi%20)



20se%20utiliza,y%20p%C3%A9rdidas%20de%20presi%C3%B3n%20comparables.
[Último acceso: 31 Julio 2021].

Guni hamburg, s.f. *Fundamentos mecánica de fluidos*. [En línea]
Available at: <https://elearn-hm250-es.gunt.de/flujo-en-tuber%C3%ADa/flujo-laminar-y-turbulento>
[Último acceso: 02 Agosto 2021].

Heath, T., Whittaker, T. J. T. & Boake, C. B., 2000. *The Design, Construction and Operation of the LIMPET Wave Energy Converter*. Islay - Scotland.: s.n.

Ibarra, G. y otros, 2017. Diario Renovable. *Ocean Engineering*, Volumen 147, pp. 20-29.

i-Ciencias, 2014. *Vórtice*. [En línea]
Available at: <https://www.i-ciencias.com/pregunta/14580/yo-revolviendo-el-liquido-que-hierve>
[Último acceso: 28 Julio 2021].

Intrumentación de, 2017. *Tobera de Fujo*. [En línea]
Available at: <https://instrumentacionuc.wixsite.com/facultad-ingenieria/copia-de-flujo-1>
[Último acceso: 31 Julio 2021].

Jaque, R. D. S., 2013. *Método de vórtice en celda tridimensional para el estudio de vórtices sinfin*. Tesis ed. Baja California: Programa de posgrado en ciencias en oceanografía física.

Jardón, A., s.f. *Hidrostática, Hidrodinámica*. 4 ed. s.l.:Dpto. de Física.

Kim, D. y otros, 2019. Numerical and experimental study on linear behavior of salter's duck wave energy converter. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, II(33), pp. 116-122.

Kim, T. y otros, 2001. Performance comparison of turbines for wave energy conversion. *Int. J Thermal Sciencie*, Issue 40, pp. 681-689.

Lopez, I. y otros, 2012. Turbine-Chamber Coupling in an OWC Wave Energy Converter. *COASTAL ENGINEERING*, p. 2.

Madrigal, M. y otros, 2022. *SEGOB*. [En línea]
Available at:
https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5434788&fecha=27/04/2016#gsc.tab=0
[Último acceso: 21 Julio 2022].

Maeda, H. y otros, 1999. Performance of an impulse turbine with fixed guide vanes for wave energy conversion. *Renewable Energy*, pp. 533-547.

McCormick, M. & Cochran, B., 1993. A performance study a bidirectional radial turbine. En: *Proceedings of the European wave*. Edimburgh: s.n., pp. 443-448.



McCormick, M., Rehak, J. & Williams, B., 1992. An experimental study of a bidirectional radial turbine for pneumatic wave energy conversion.. *OCEANS 92 Proceedings @ m_Mastering the Oceans Through Technology. IEEE*, Volumen 2, pp. 866-870.

Mitriku Turismoa, 2011. *Planta undimotriz de Mutriku*. [En línea]
Available at: <https://www.mutriku.eus/es/turismo/mutriku/planta-olas>
[Último acceso: 25 Julio 2022].

Modon, A., 2017. *Teoría de mecanica de los fluidos*. Argentina : Univercidad Nacional de Cuyo.

Nam, B. M. y otros, 2011. Nominal analysis of wave-induced motion of floating pendulor wave energy converter. *Journal of Ocean Engineering and Technology* , XXV(4), pp. 28-35.

Ocean Power Technologies , s.f. *PB3 Power Bouy*. [En línea]
Available at: <https://oceanpowertechnologies.com/platform/opt-pb3-powerbuoy/>
[Último acceso: 30 07 2022].

Pereiras, B., 2008. *Estudio de una turbina de impulso radial para el aprovechamiento de la energía del oleaje*. (Tesis doctoral) ed. Valladolid : Universidad de Valladolid .

QWERTY.WIKI, 2021. *Turbina de Mareas*. [En línea]
Available at: <https://es.frwiki.wiki/wiki/Hydrolienne>
[Último acceso: 25 Julio 2022].

Raghunathan, S., 1995. The Wells air turbine for wave energy conversion. *Progress in Aerospace Sciences*, 31(4), pp. 335-386.

Raghunathan, S., Eves, A., Whittaker, T. & Long, A., 1987. The biplane Wells Turbine. *Prceedings of OMAE conference*, Volumen Houston, pp. 475-479.

Raghunathan, S. & Watterson, J., 1996. Investigation of Wells turbine performance using 3-D CFD. *Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, Volumen 31.

Resnick, R., Halliday, D. & Krane, K., 2013. *Física*. 5ta ed. México: Editorial Patria.

REUK. co.uk, 2021. *Oyster Wave Power*. [En línea]
Available at: <http://www.reuk.co.uk/wordpress/wave/oyster-wave-power/>
[Último acceso: 31 07 2022].

Rívas, I. & IMTA, 2001. *Tubos Venturi, Dall y Tobera*. Ciudad de México: Comisión Nacional del Agua.

Sansón, L., 2021. *Turbulencia*. Versión beta 8 ed. Baja California: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

Secretaria de Energía (SENER), 2018. *Prospectiva de Energias Renovables 2018-2032*, México : s.n.



SENER, 2020. *Marco Jurídico del Reporte de Avance de Energías Limpias, México*: SENER.

Setoguchi, T. y otros, 1996. Impulse turbine with self-pitch-controlled guide vanes for wave power conversion: guide vanes connectec by links. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Issue 6, p. 1.

Setoguchi, T., Santhakumar, S., Takao, M. & Kaneko, K., 2002. A performance study of a radical impulse turbine for energy conversion. *Journal of power and energy*, pp. 15-22.

Setoguchi, T., Santhakurmar, S., Takao, M. & Kim, T., 2001. Effect of guide vane shape on the performance of a Wells turbine. *Renewble Energy*, Issue 23, pp. 1-15.

Setoguchi, T. y otros, 2001. A review of impulse turbines for wave energy conversion. *Renewable Energy*, Issue 23, pp. 261-292.

Setoguchi, T. & Takao, M., 2006. Current status of self rectifying air turbines for wave energy conversion. *Energy Conversion and Management* , pp. 2382-2396.

Shames, I. H., 1995. *Mecánica de Fluidos*. 3 ed. Bogotá: McGRAW-HILL, Inc..

Soares, C. G., Bhattacharjee, J., Tello, M. & Pietra, L., 2012. Review and calasification of wave energy converter . En: *Maritime Engineering and Technology*. London, UK: Taylor and Francis Group , pp. 585-594.

Takao, M., Fujioka, Y. & Setoguchi, T., 2005. Effect of pith-controlled guide vanes on the performance of a radial turbine for wave energy conversion. *Ocean Ingenieering* , pp. 2079-2087.

Teamwork, s.f. *Archimedes Wave Swing*. [En línea]
Available at: <https://teamwork.nl/front-page/twt/projects-2/aws-2/>
[Último acceso: 30 07 2022].

Textoscientificos.com, 2009. *Dispositivo de generaciòn de energía a través de las olas*. [En línea]
Available at: <https://www.textoscientificos.com/energia/dispositivos-generacion-energia-olas>
[Último acceso: 15 julio 2022].

Thakker, A. y otros, 2005. Desing and performance analysis of impulse turbine for a wave energy power plant. *International Journal of Energy Research* , Issue 29, pp. 13-16.

The European Marine Energy Centre LTD (EMEC), s.f. *Pelamis Wave Power*. [En línea]
Available at: <https://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/pelamis-wave-power/>
[Último acceso: 30 07 2022].

Thorpe, T. W., 1999. An overview of wave energy technologies: status, performance and costs. *ave power: moving towards commercial viability*, Volumen XXVI, pp. 50-120.



Valdéz, P., 2013. *Estudio de Flujo en un Grupo Turbinado de Dos Turbinas Axiales Unidireccionales Para Centrales OWC..* (Tesis Doctoral) ed. Valladolid, España : Universidad de Valladolid .

Vega, E. R., 2014. *Sistema Hidráulico Mecánico para la obtención de energía eléctrica aprovechando la energía del oleaje.* (Trabajo de fin de grado) ed. Granada: Universidad de Granada.

Vicanza, D., Dentale, F., Salerno, D. & Buccino, M., 2015. Structural Response of Seawave Slot-cone Generator (SSG) from Random Wave CFD Simulations. *International Ocean and Polar Engineering Conference*, pp. 984-991.

Vicinanza, D., Margharatini, L., Contestabile, P. & Kofoed, J., 2009. Seawave Slot-cone Generator: an innovative caisson breakwaters for energy production. *Coastal Engineering 2008*, Volumen 5, pp. 3694-3705.

Volvo TecVolución , 2021. *La turbina maremotriz más poderosa del mundo ya está instalada en Escocia y genera 2 MW de energía limpia y renovable.* [En línea] Available at: <https://tecvolucion.com/turbina-maremotriz-poderosa-escocia-energia-limpia-y-renovable/> [Último acceso: 25 07 2022].

Watabe, T., 2007. *Utilization of the Ocean Wave Energy.* Muroran, Japón: Fuji Print Company Ltd.:

WAVEROLLER PLUG INTO WAVE ENERGY, s.f. *Wave Roller.* [En línea] Available at: <https://aw-energy.com/waveroller/> [Último acceso: 1 Agosto 2022].

Wavestarenergy, s.f. *Wave star.* [En línea] Available at: <http://wavestarenergy.com/contact-us> [Último acceso: 31 07 2022].

Whittaker, T. & Folley, M., 2012. Nearshore oscillating wave surge converters and the development of Oyster. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 370(1959), pp. 345-364.