

UNIVERSIDAD NACIONAL TECNOLÓGICA DE LIMA SUR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



“ENERGÍA UNDIMOTRIZ EN EL PERÚ”

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR EL BACHILLER

SANCHEZ ALVARADO, MANUEL ANTONY

Villa El Salvador
2015

DEDICATORIA

A mis padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy, inculcándome valores que me ayudan a ser mejor persona cada día.

AGRADECIMIENTOS

A Maria Alvarado Sanchez y Manuel Sanchez Sanchez por el gran apoyo que me brindaron, estando en los momentos más difíciles.

A Vanessa Sanabria Alca, persona que conocí en el camino de mi vida profesional y se convirtió en el complemento perfecto para seguir adelante, dándome su apoyo incondicional y así poder conseguir cosas importantes.

A la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú, por brindarme el acceso a su biblioteca para obtener información que se detallan en el presente trabajo.

Y un agradecimiento muy especial a profesores y compañeros en general, quienes han convertido estos años de estudio, en una época llena de buenos recuerdos.

ÍNDICE

INTRODUCCION	1
CAPITULO I.....	3
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.1. Descripción de la Realidad Problemática.....	3
1.2. Justificación de la investigación	4
1.2.1. Metodológica:	5
1.2.2. Tecnológica:.....	5
1.2.3. Epistemológica:.....	5
1.2.4. Económica:	5
1.3. Delimitación de la investigación.....	5
1.3.1. Espacial	5
1.3.2. Temporal.....	5
1.4. Formulación del problema.....	5
1.4.1. Problema Principal	5
1.4.2. Problemas Específicos	6
1.5. Objetivos.....	6
1.5.1. Objetivos Generales.....	6
1.5.2. Objetivos Específicos	6
CAPITULO II.....	7
MARCO TEORICO	7
2.1. Antecedentes	7
2.2. Bases teóricas.....	9
2.2.1. Origen	9
2.2.2. Tormentas	12
2.2.3. Distancias.....	13
2.2.4. Movimiento de una ola.....	16
2.2.5. Fenómenos de una ola.	17
2.2.6. Potencial.....	21
2.2.7. Tecnología.....	27
2.2.8. Costos.....	36
2.2.9. Impacto Ambiental	38
2.3. Marco conceptual	40
CAPITULO III.....	42
DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA	42

3.1. Análisis del Modelo o Caso	42
3.1.1. Costos estimados para una generación proporcional a 0.1Mw:	44
3.1.2. Comparación entre la generación eléctrica Undimotriz y generación eléctrica Convencional:	45
3.1.3. Cuadro comparativo de “Un antes” y “Un después” de implantar el sistema.....	47
3.2. Detalle de la turbina Wells	48
3.3. Diseño del modelo mejorado.	49
3.4. Revisión y consolidación de resultados.....	61
CONCLUSIONES	62
RECOMENDACIONES	63
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	64
ANEXOS	66
ANEXO 1 Matriz energética del Perú 2012.....	67
ANEXO 2 Esquema del sistema de las corrientes marinas frente al litoral de Perú.	67
ANEXO 3 Principales parámetros de una ola.....	68
ANEXO 4 Registro de campo de las alturas de olas	69
ANEXO 5 Tabla de olas para Ilo – Febrero 2015	70
ANEXO 6 Tabla de olas para Chimbote – Febrero 2015.....	71
ANEXO 7 Tabla de olas para Callao – Febrero 2015	72
ANEXO 8 Tabla de olas para Paita – Febrero 2015.....	73
ANEXO 9 Tabla de olas para Bayovar – Febrero 2015.....	74
ANEXO 10 Generación de Energía Eléctrica con Turbinas Wells	75
ANEXO 11 Encuesta de opinión	84
ANEXO 12 Tablas y gráficos de los resultados obtenidos en la encuesta de opinión	85

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1.	Generación de electricidad en el Perú 2008.....	4
Figura 2.1.	Olas marinas en el mar peruano.....	10
Figura 2.2.	Características de una onda sinusoidal pura.....	11
Figura 2.3.	Superposición de diferentes ondas.....	12
Figura 2.4.	Tormentas que producen olas hacia nuestra costa.....	14
Figura 2.5.	Interacción entre ondas.....	16
Figura 2.6.	Generación de una onda en una soga.....	16
Figura 2.7.	Movimiento de las moléculas de agua en las olas.....	17
Figura 2.8.	Divergencia y convergencia de las olas en la costa.....	18
Figura 2.9.	Esquema del rompimiento de las olas en la costa.....	19
Figura 2.10.	Fenómeno de reflexión.....	20
Figura 2.11.	Fenómeno de difracción.....	20
Figura 2.12.	Dispositivos de medida de oleaje.....	23
Figura 2.13.	Satélite usado para medir características del oleaje.....	23
Figura 2.14.	Altura significativa de las olas.....	24
Figura 2.15.	Distribución global de la energía de las olas en KW/m2.....	25
Figura 2.16.	Franja donde se encuentra la energía de una ola.....	25
Figura 2.17.	Diferentes tecnologías para extraer la energía de las olas..	28
Figura 2.18.	Instalaciones de columna oscilante de agua (OWC).....	29
Figura 2.19.	Columna oscilante de agua con sistema de válvulas.....	30
Figura 2.20.	Convertidor propuesto por NEL.....	30
Figura 2.21.	Dispositivo Pendulor.....	31
Figura 2.22.	Rectificador Russell.....	33
Figura 2.23.a.	Dragón de olas.....	34
Figura 2.23.b.	Esquema de funcionamiento del Dragón de olas.....	34
Figura 2.24.a.	Wave Plane.....	34
Figura 2.24.b.	Canales de recogida de las olas.....	34
Figura 2.24.c.	Esquema de captación y almacenamiento de la ola.....	35
Figura 2.25.	Palto Salter.....	35
Figura 2.26.	Dispositivo denominado Pelamis.....	36
Figura 2.27.	Evolución prevista del coste de la energía producida.....	38
Figura 3.1.	Esquema del Sistema Undimotriz.....	43
Figura 3.2.	Detalle Turbina Wells.....	49

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.	Tabla de olas para febrero en Bayovar.....	50
Tabla 2.	Tabla de olas para febrero en Paíta.....	51
Tabla 3.	Tabla de olas para febrero en Callao.....	52
Tabla 4.	Tabla de olas para febrero en Chimbote.....	53
Tabla 5.	Tabla de olas para febrero en Ilo.....	54

INTRODUCCION

El presente trabajo de investigación lleva por título “ENERGÍA UNDIMOTRIZ EN EL PERÚ”, para optar el título de: Ingeniero Mecánico Electricista, presentado por el bachiller Sanchez Alvarado, Manuel Antony, en la cual se detalla la generación de energía limpia haciendo uso de un recurso abundante e inagotable: “Las Olas”.

Una fuente que ha sido poco explorada en Perú es la Energía Undimotriz. Esta fuente depende de factores como el efecto gravitacional de la luna y el sol, fuentes que están aseguradas por muchos millones de años más. Además, las energías no renovables se están encareciendo cada día más, por lo que se espera que algún día estas nuevas fuentes de energías sean rentables. Por esto es importante estudiar el recurso de las olas en nuestro país, y prepararse para cuando eso suceda.

En este estudio se investiga acerca del fenómeno de las olas y se estudia este recurso en Perú, haciendo así un diagnóstico del potencial Undimotriz que existe en este país. Además, se analizan los lugares más propicios para el desarrollo de las diversas formas de explotar este recurso en Perú.

Se exponen distintas tecnologías para aprovechar el potencial energético de las olas, ya que la disponibilidad de la energía ha sido siempre esencial para la humanidad que cada vez demanda más recursos energéticos para cubrir sus necesidades de consumo y bienestar.

Las energías renovables que provienen de fuentes inagotables como el Sol y no emiten gases de efecto invernadero, entre otros beneficios, son una de las piezas clave en la construcción de un sistema de desarrollo sostenible.

Esto ha provocado la necesidad de cambios drásticos en la forma de generar energía, y por lo tanto, en la búsqueda de nuevas formas de solucionar el problema de cómo desarrollar nuevas tecnologías para el aprovechamiento de energías renovables. Los recursos marinos de energía renovable como es la energía Undimotriz, eran técnicamente difíciles y caros de desarrollar hasta hace

poco tiempo atrás, pero la situación actual los ha convertido cada vez en una solución más interesante.

Por estos motivos se realizó este trabajo, para que de alguna forma poder solucionar los problemas antes mencionados.

Por tanto, utilizar fuentes de energía renovable es el desafío para el mundo civilizado del siglo XXI.

La estructura que hemos seguido en este proyecto se compone de 3 capítulos. El Primer Capítulo comprende el planteamiento del problema, el Segundo Capítulo el Desarrollo del marco teórico y el Tercer Capítulo corresponde al desarrollo del proyecto.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la Realidad Problemática

El actual sistema energético a nivel mundial está basado en la generación de energía a partir de combustibles fósiles como el petróleo, el carbón mineral y el gas. La generación de energía a partir de estas materias está siendo ampliamente replanteada por varias razones: son recursos limitados que se encuentran en puntos concretos del planeta, su uso a gran escala está provocando graves efectos sobre el medio ambiente y la salud de los seres humanos, y se están agotando las reservas naturales comprometiendo el futuro de las nuevas generaciones.

La ciudadanía está cada vez más concientizada sobre la necesidad de proteger el medio ambiente y emplear métodos no contaminantes de producción de energía.

El cambio climático, producto del impacto de la actividad humana en el ambiente es uno de los mayores problemas a nivel global. ⁽¹⁾

El Perú ha sido tradicionalmente un país cuya generación eléctrica se ha sustentado en fuentes renovables. Esto significa que nuestro desarrollo energético contribuye desde tiempo atrás a la reducción del efecto invernadero que hoy agobia al planeta, con un desarrollo que se sustenta mayoritariamente en fuentes limpias de energía. Hasta el año 2002, la electricidad generada con centrales hidroeléctricas representó el 85% del total de energía generada en el país. Con la llegada del Gas de Camisea la participación de las centrales hidroeléctricas disminuyó hasta llegar al 61% en el año 2008, tal como se muestra en la Figura 1.1.

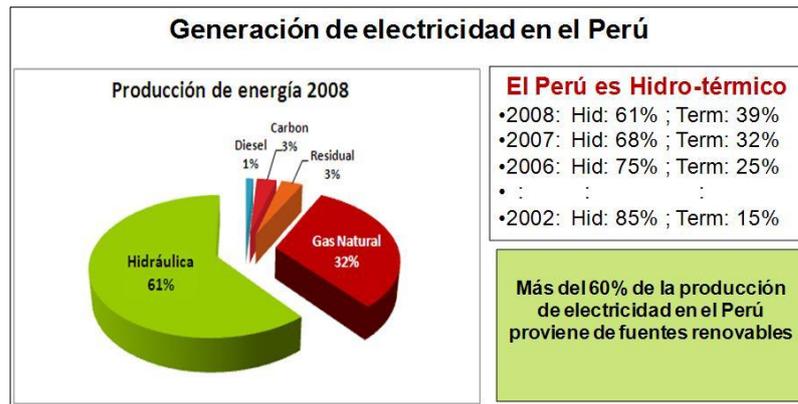


Figura 1.1. Generación de electricidad en el Perú 2008. (2)

En la actualidad, cuando la disponibilidad de recursos fósiles juega un rol determinante en el suministro energético global y nacional, y cuando los factores medio ambientales aparecen entre las preocupaciones principales de la sociedad contemporánea, las Energías Renovables resurgen con éxito creciente en todas las latitudes del planeta, alentadas por los apremios del suministro energético y la presencia de marcos normativos favorables.

En este contexto, en mayo de 2008, el Estado Peruano emitió el Decreto Legislativo 1002 que promueve la inversión para la generación de electricidad con el uso de Recursos Energéticos Renovables, tales como la energía eólica, solar, geotérmica, mareomotriz, la biomasa y las pequeñas hidroeléctricas con una capacidad instalada de hasta 20MW.(2)

Justamente teniendo un área geográfica de 1 140 646,8 km² de mar aproximadamente, veremos si es posible generar energía haciendo uso de las olas y poder satisfacer las necesidades de la población que residen cerca al mar. (3)

1.2. Justificación de la investigación

El presente trabajo quiere aportar, a la difusión así como a la aplicación de la Energía Undimotriz, en países como el nuestro que están en vía de desarrollo y aportar unos granos de arena en la resolución de los problemas energéticos que nos han afectado. En el Perú tenemos los recursos necesarios para aplicar este tipo de energía.

La presente tesina tiene las siguientes justificaciones:

1.2.1. Metodológica:

La presente tesina se justifica metodológicamente porque aplica el procedimiento de selección de alternativas buscando la mejor opción de diseño y su posible aplicación, comparando con los diseños existentes dentro de otros países.

1.2.2. Tecnológica:

Se justifica tecnológicamente, porque en el desarrollo del diseño aplica un modelamiento que ya han sido aplicados en otros países, contrastando las diferentes tecnologías referidas a la generación de Energía Undimotriz.

1.2.3. Epistemológica:

La presente tesina se justifica porque permitirá conocer en detalle el diseño y su posible implementación de poder generar energía eléctrica haciendo uso el mar peruano.

1.2.4. Económica:

Considerando el diseño que se realizara, se evaluara la posible implementación y puesta en servicio más económica comparado con otros modelos del mercado.

1.3. Delimitación de la investigación

1.3.1. Espacial

El trabajo se realizará en la Universidad Nacional Tecnológica de Lima sur (UNTELS) y su posible implementación será aplicada en nuestro país.

1.3.2. Temporal

Esta investigación comprende una duración desde abril del 2014 hasta enero del 2015.

1.4. Formulación del problema

1.4.1. Problema Principal

- ¿Es posible la generación de energía eléctrica en el mar peruano?

1.4.2. Problemas Específicos

- ¿Cómo se podrá implementar la generación de energía eléctrica en el mar peruano?
- ¿Cuál debería ser el criterio de la elección del tipo de tecnología para poder generar energía eléctrica en el mar peruano?
- ¿Esta tecnología es conveniente para nuestro país?

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivos Generales

- Determinar de qué manera se podría generar de energía eléctrica en el mar peruano.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Implementar una tecnología que permita la generación de energía eléctrica en nuestro mar peruano.
- Analizar los criterios de elección de una tecnología que se adapte a nuestro mar peruano.
- Realizar cálculos para demostrar que esta tecnología es conveniente para nuestro país.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes

La idea de aprovechar la energía del oleaje es bastante antigua. En el Pacífico, la gente tiene una larga tradición en el uso de tablas, donde las olas han sido usadas como “propulsores”.

Los primeros testimonios sobre la utilización de la energía de las olas se encuentran en China, en donde en el siglo XIII empiezan a operar molinos por acción del oleaje.

La posibilidad de obtener energía de las olas se ha estudiado desde la época de la Revolución Francesa.

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

No se conoce si esta máquina fue alguna vez construida, pero existen muchas dudas. De hecho, la mayoría de las ideas surgidas en el siglo XIX nunca se llevaron a cabo.

A principios del siglo XX, el francés Bouchaux-Pacei suministra electricidad a su casa en Royan, mediante un sistema neumático, parecido a las actuales columnas oscilantes de agua. En esta misma época se prueban sistemas mecánicos en California, y en 1920 se ensaya un motor de péndulo en Japón.

Desde 1921 el Instituto Oceanográfico de Mónaco, utiliza una bomba accionada por las olas para elevar agua a 60m con una potencia de 400W. En 1958, se proyecta una central de 20MW en la isla Mauricio, que no llegó a construirse, consistente en una rampa fija sobre un arrecife, a través de la cual subía el agua a un embalse situado a 3m por encima del nivel del mar. Los franceses construyeron en Argelia en los años cuarenta dos plantas piloto tipo con canal convergente. En 1975 se construye un sistema similar en Puerto Rico, con el fin de alimentar con agua un puerto deportivo.

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

En los años 70 se construye en Japón una plataforma flotante, de 80m de largo y 12m de ancho, llamada Kaimei, que alberga 11 cámaras para ensayos de turbinas de aire.

La investigación a gran escala del aprovechamiento de la energía de las olas se inicia a partir de 1974 en varios centros del Reino Unido, estudiándose sofisticados sistemas para grandes aprovechamientos, actividad que se abandona casi totalmente en 1982, por falta de recursos económicos. A mediados de los ochenta entran en servicio varias plantas piloto de distintos tipos en Europa y Japón. Sin embargo, es a partir de los años 90 cuando un cierto número de empresas en varios lugares del mundo comienzan a involucrarse en el diseño y desarrollo de aparatos para el aprovechamiento de la energía de las olas. Entre estas empresas pueden señalarse: Aqua Energy Group (USA), Archimedes Wave Swing (Países Bajos), Energetech Australia (Australia), Ocean Power Delivery (Reino Unido), Wavegen (Reino Unido), WavePlane Internacional (Dinamarca) y Wave mil Energy (Canadá).

En Chile Jordi Sebastian Dagá Kunze realiza una tesis llamada “APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO DE LAS MAREAS Y SU POSIBLE DESARROLLO EN CHILE”.

En Argentina el Departamento de Ingeniería Mecánica - Facultad Regional Buenos Aires de la Universidad Tecnológica Nacional presenta un trabajo sobre el “Aprovechamiento de la Energía Undimotriz”.⁽⁴⁾

En Perú Jorge Egúsqiza Loayza a partir del 2008 empieza a realizar prototipos para poder aprovechar la energía de los mares utilizando tecnología del tipo OWC.⁽⁵⁾

Por lo tanto, los antecedentes en nuestro país son muy escasos.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Origen

Todo tipo de oscilación en la superficie de agua que sea periódica se le denomina ola. Las olas de los océanos son originadas por diversas causas. Entre estas causas se pueden señalar el viento, las fuerzas de atracción gravitacional que ejercen la Luna y el Sol sobre las masas oceánicas, los maremotos, las tormentas, etc. Sin embargo, de todas ellas, el viento constituye el agente que genera las olas más comunes y de mayor densidad energética. Por ello, se suele decir que la energía que poseen las olas el mar son un derivado terciario de la energía solar, ya que el viento se origina como consecuencia del desigual calentamiento que el Sol produce en la superficie terrestre, y el viento, al actuar sobre el agua del mar le transmite energía y la pone en movimiento, produciendo ondulaciones en las capas superficiales que constituyen el oleaje que se observa en todas las aguas de los océanos y que golpean las costas de los continentes (Figura 2.1). En este sentido, se podría concluir que la energía de las olas oceánicas constituye una forma de almacenar en la superficie de los océanos, con una densidad relativamente alta, la energía solar.⁽¹⁰⁾



Figura 2.1. Olas marinas en el mar peruano

Los mecanismos que intervienen en la interacción entre el viento y la superficie del mar son complejos y aún no se explican en su totalidad.

En principio, el proceso puede resumirse de la siguiente forma:

Cuando el viento sopla a través de la superficie del mar las moléculas de aire interactúan con las moléculas de agua que están en contacto. La fuerza que se genera entre el aire y el agua modifica la superficie del océano, dando lugar a pequeños rizos, conocidos como olas de capilaridad. Las olas de capilaridad dan lugar a una mayor superficie de contacto, la cual incrementa la fricción entre agua y viento. Ello da lugar al crecimiento de la ola que, cuando ha alcanzado un cierto tamaño, facilita que el viento pueda ejercer una mayor presión sobre ella con el consiguiente incremento de la misma. Las olas se caracterizan por su longitud de onda, L , altura de onda, H , y el periodo, T (ver Figura 2.2). La longitud de onda es la distancia entre dos picos consecutivos; la altura de onda es la diferencia en altura entre un pico y un valle; y el periodo es el tiempo en segundos que tarda un valle o un pico de la ola en recorrer su longitud de onda. La frecuencia f de la ola se define como el número de oscilaciones pico a pico (o valle a valle) de la superficie de la ola por segundo, visto por un observador fijo, y es el inverso del periodo, Es decir:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

La velocidad c de propagación de una ola viene dada por el cociente entre la longitud L y el periodo T , es decir:

$$c = \frac{L}{T} \quad (2)$$

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

En realidad, el océano no se compone de ondas sinusoidales puras como se han representado en la Figura 2.2, sino más bien son una superposición de muchas de ellas, cuya superficie puede ser reconstruida como suma de ondas de amplitud variable, llamada análisis espectral.

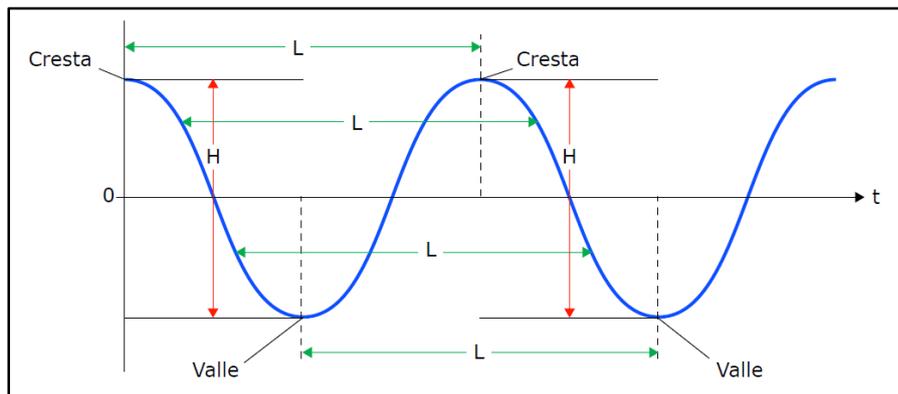


Figura 2.2. Características de una onda sinusoidal pura. ⁽¹⁰⁾

Por tanto, un estado típico del mar se compone de una superposición de ondas, cada onda con características propias, es decir, su propia velocidad, periodo, altura de onda, y dirección como se muestra en la Figura 2.3. Es la combinación de estas ondas lo que se observa cuando se mira la superficie del mar. La envolvente de estas olas viaja a una velocidad distinta de la de las ondas individuales, y se la denomina velocidad de grupo, c_g .

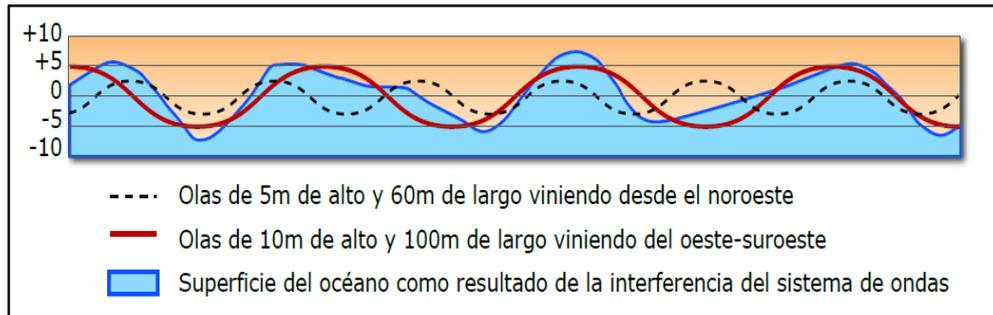


Figura 2.3 Superposición de diferentes ondas. ⁽¹⁰⁾

Las olas situadas dentro o cerca de las áreas donde fueron generadas se denominan olas tormentosas. Estas forman un mar irregular y complejo. Sin embargo, las olas pueden viajar desde estas áreas con pequeñas pérdidas energéticas para producir grandes olas, a miles de kilómetros del punto donde se originaron. Por tanto, es posible que existan olas en determinadas zonas del mar con ausencia de viento.

2.2.2. Tormentas

Ahora que sabemos que las olas se originan por acción del viento y mayormente por la acción de las tormentas, el siguiente paso será explicar cómo se forma una tormenta. Para tal propósito debemos considerar que nuestra atmósfera es dinámica, es decir, que el aire que rodea nuestro planeta está en constante movimiento debido a la rotación de la tierra y a los cambios de temperatura generados por las estaciones.

De esta manera comprendemos que en los trópicos el aire es caliente y húmedo, mientras que cerca de los polos el aire es frío y seco. Cuando estas distintas masas de aire se encuentran, el aire caliente, que es más liviano, se eleva, y genera una zona de baja presión (es decir una especie de vacío) que hace que el aire frío sea aspirado y cubra su lugar. Este hecho permite que más aire caliente se eleve y más aire frío en su reemplazo, generándose fuertes vientos en esta interacción. En otras palabras, a mayor diferencia de presiones atmosféricas, más fuertes serán los vientos. ⁽⁸⁾

Un sistema de baja presión que se encuentra en medio del Océano Pacífico Sur puede ser tan grande como la superficie de todo el Perú, y

cuando interactúa con un sistema de alta presión puede generar vientos de hasta 70 nudos (130 k/h) por más de dos días, así como las olas de más de 10 metros de alto en el centro de la tormenta. Sin embargo, una tormenta típica abarca un área de 1,000 a 1,500 kilómetros de diámetro y genera vientos de 35 a 45 (65 a 80 km/h) por aproximadamente 36 horas.

El tamaño de las olas no puede crecer infinitamente porque la tormenta seguirá transfiriendo energía a las olas sólo hasta que la velocidad de este alcance la velocidad de los vientos. La velocidad de los vientos más fuertes será la que determine la altura y el periodo máximo que tendrán las olas.

En síntesis, la diferencia de temperaturas genera alrededor del mundo áreas de alta y de bajo viento, el cual supla desde el as zonas de alta presión hacia las zonas de baja presión y sobre la superficie del océano creando inicialmente pequeños tumbos. Luego el viento continúa soplando sobre estos tumbos logrando una mayor adherencia y transfiriéndoles más energía. El resultado son tumbos más grandes. Si el viento sigue soplando en la misma dirección y con gran intensidad, los tumbos serán cada más grande.

A medida que los tumbos dejan las zonas de tormenta, pierden tamaño, pero incrementan su longitud para transferir su energía a mayor profundidad. Esta energía submarina se conserva muy bien y permite que las olas viajen miles de kilómetros y lleguen a costas lejanas con gran parte de su fuerza original.

2.2.3. Distancias

La distancia que han de recorrer los tumbos desde su origen hasta nuestras costas definitivamente afectara el tamaño final de las olas. Si hay dos tormentas de igual intensidad y con vientos en la misma dirección, aquella que se encuentre más cerca de nuestras costas generará las olas más grandes.

Al salir de la tormenta, los tumbos pierden muy rápidamente su tamaño en los primeros mil kilómetros de viaje. Los tumbos que sobrevivan este primer tramo continuaran viajando varios miles de kilómetros adicionales, pero perdiendo altura en forma mucho más lenta. Esta particularidad se explica porque en mar abierto los tumbos se esparcen, tal como sucede con las pequeñas ondas que se expanden y empequeñecen luego de arrojar una piedra en una piscina.

La costa peruana recibe oleajes de tormentas que se ubican entre 13,000 kilómetros de distancia (tormentas más lejanas) y 3,000 kilómetros de distancia (tormentas más cercanas) (tal como se muestra en la Figura 2.4). El sistema de tormentas del Pacífico Norte es el más alejado y sus olas deben recorrer entre 8,000 y 13,000 kilómetros antes de llegar a nuestras costas. Este corredor se activa con la llegada del invierno en el hemisferio norte, generando tormentas entre octubre y marzo.⁽⁶⁾

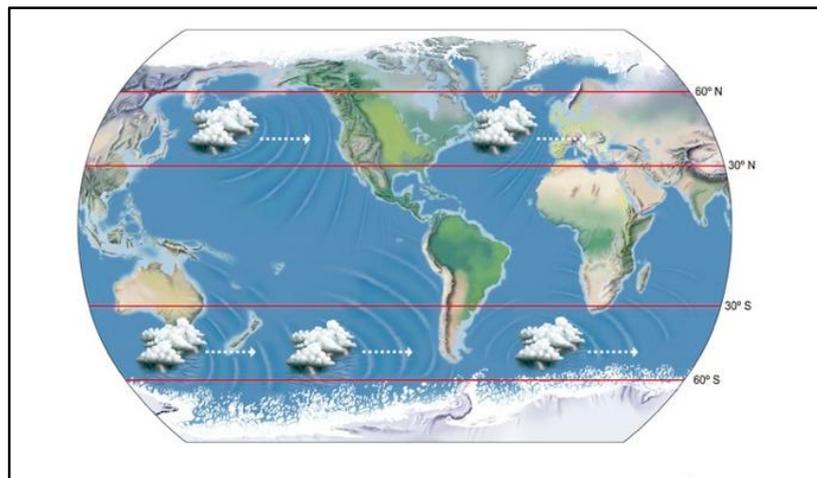


Figura 2.4. Tormentas que producen olas hacia nuestra costa.⁽⁷⁾

El sistema de tormentas del Pacífico Sur comienza al sur de Australia, y las olas generadas por las tormentas formadas en esta zona deben viajar unos 12,000 kilómetros para llegar a Perú. En cambio, las olas generadas por tormentas ubicadas frente a la costa sur de Chile sólo necesitan viajar unos 3,000 ó 4,000 kilómetros para reventar en nuestras orillas. El sistema del Sur suele estar activo todo el año; sin embargo, las

tormentas más potentes se presentan entre abril y octubre, es decir, durante el invierno peruano.

La distancia que las olas tienen que viajar, como ya se mencionó, afecta el tamaño de las mismas, pero este recorrido produce olas más ordenadas y limpias, un aspecto muy valorado por los tablistas. ¿Cómo se explica esto? Ya sabemos que en la zona de las tormentas se produce una situación caótica, con vientos muy fuertes de diversa potencia y en distintas direcciones. Una tormenta, durante sus horas de vida, genera muchos tumbos con direcciones y tamaños diferentes; pero al viajar grandes distancias, sólo sobrevivirán los tumbos de mayor periodo, es decir aquellos que fueron formados por los vientos más fuertes que han soplado por un tiempo razonable y en una misma dirección, lo que se traduce en olas más parejas y simétricas.

Como, por ejemplo, se puede indicar que en las costas peruanas los oleajes del Suroeste suelen ser más ordenados que los oleajes del Sur, por la sencilla razón que los primeros son generados por tormentas más distantes (usualmente ubicadas entre Nueva Zelanda y la mitad del Pacífico Sur), mientras que los segundos son generados por tormentas muy cercanas a la costa sur de Chile. Por esta misma razón las crecidas del hemisferio norte, que son las más lejanas, suelen traernos las olas más perfectas.⁽⁷⁾

Una vez que las olas se alejan del área de generación, sus crestas son más lisas y menos caóticas. A este oleaje se le llama marejada de fondo. Estas olas se dispersan sobre la superficie oceánica con muy poca pérdida de energía (interacción entre ondas y fricción con corrientes marinas), aunque pierden altura (como se muestra en la Figura 2.5), fundamentalmente por dispersión angular.

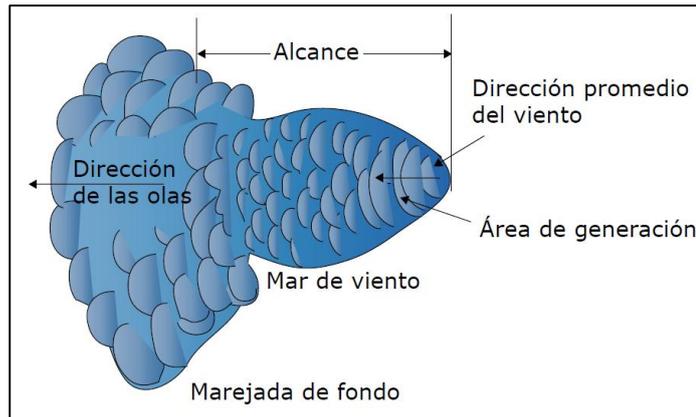


Figura 2.5. Interacción entre ondas. ⁽¹⁰⁾

Una ola oceánica en aguas profundas aparenta un imponente objeto en movimiento, una cresta de agua que viaja a través de la superficie del mar. Pero para entender la energía del oleaje es importante darse cuenta que esto no es así.

2.2.4. Movimiento de una ola.

Una ola oceánica es el movimiento de energía, pero el agua no se está moviendo de forma similar. En el océano, donde las olas mueven la superficie del agua arriba y abajo, el agua no se está moviendo hacia la orilla. En realidad, su comportamiento es similar al de una soga que hacemos oscilar (Ver Figura 2.6). Por tanto, una ola oceánica no representa un flujo de agua.

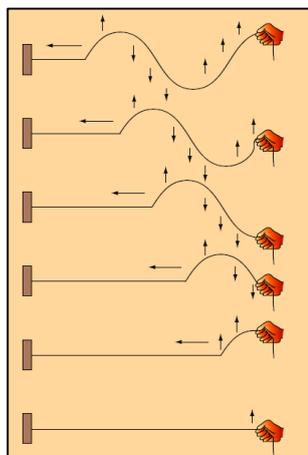


Figura 2.6. Generación de una onda en una soga. ⁽¹⁰⁾

Una ola representa un flujo o movimiento de energía desde su origen hasta su eventual rotura, la cual puede ocurrir en medio del océano o contra la costa.

La dirección de las olas que viajan en aguas profundas viene fijada por la dirección del viento que las generó. Por tanto, en una zona dada pueden llegar olas procedentes de distintos lugares y diferentes direcciones.

2.2.5. Fenómenos de una ola.

Como es de esperar, las olas resultantes son complejas. El perfil de la superficie de los océanos viene generado por las olas, sin embargo, es necesario entender la naturaleza de la parte sumergida de las olas, si se desean diseñar dispositivos que capturen su energía. Las olas de los océanos están constituidas por moléculas de agua que se mueven formando círculos. En la superficie del agua, en zonas profundas, los movimientos son del mismo tamaño que la altura de la ola, pero estos movimientos disminuyen exponencialmente en tamaño al descender debajo de la superficie. El comportamiento de las olas depende en gran medida de la relación que existe entre el tamaño de las olas y la profundidad del agua donde ésta se está moviendo. El movimiento de las moléculas de agua cambia de forma circular a elipsoidal cuando una ola llega a la costa y la profundidad del agua disminuye- el movimiento es más horizontal, tal y como se puede apreciar en la Figura 2.7.

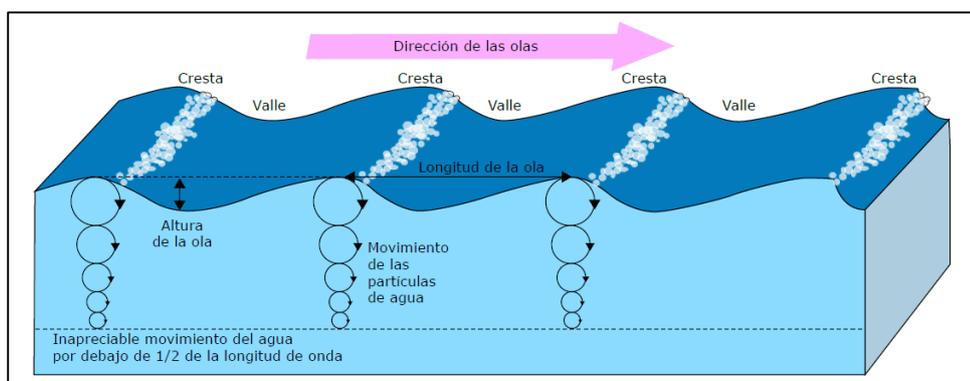


Figura 2.7. Movimiento de las moléculas de agua en las olas. ⁽¹⁰⁾

La velocidad c de las olas en aguas poco profundas depende de la profundidad:

$$c = \sqrt{gh} \quad (3)$$

Por tanto, la porción de la ola que está viajando sumergida, viaja más rápido.

Esto origina que las olas vayan cambiando gradualmente su velocidad de propagación y su dirección conforme se aproximan a la costa. A este comportamiento se le denomina refracción de olas.

Este cambio de dirección se puede analizar trazando líneas perpendiculares al frente de ola como se muestra en la Figura 2.8, cuando las líneas trazadas se juntan están indicando la convergencia de energía de la ola (aumento de altura H). Es como si el frente de las olas se comprimiera, lo cual implicaría aumentar su altura. Mientras que una separación de las líneas trazadas perpendicularmente al frente de olas indica divergencia de energía (menor altura H), y sería equivalente a que el frente de ola se alargase.

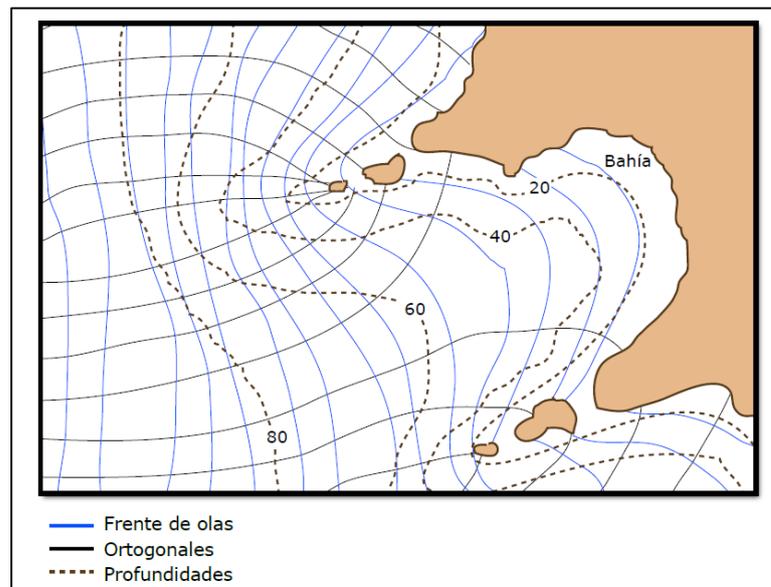


Figura 2.8. Divergencia y convergencia de las olas en la costa. ⁽¹⁰⁾

Según las olas se van aproximando a la playa, su velocidad de avance y su longitud de onda disminuyen, y su altura aumenta hasta que la velocidad de las partículas del fluido excede la velocidad de avance de la ola (velocidad de fase), y la ola se hace inestable y rompe (Figura 2.9). Esta situación se produce cuando la relación entre la altura de onda H y la profundidad del agua h es aproximadamente igual a 0,78.

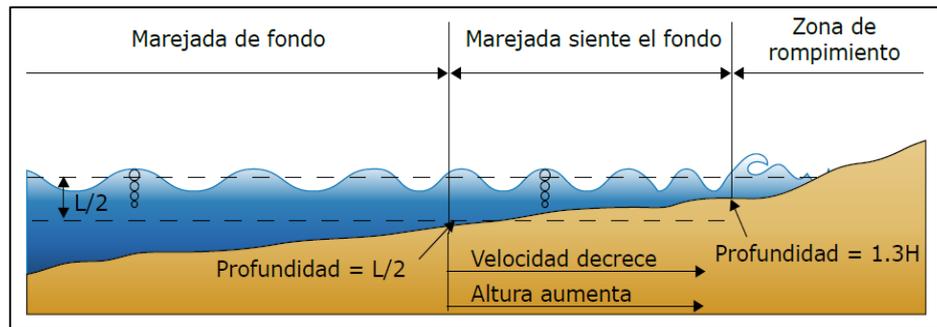


Figura 2.9. Esquema del rompimiento de las olas en la costa. ⁽¹⁰⁾

Otro fenómeno que puede producirse cuando las olas llegan a la costa es el de reflexión. Este se produce cuando la ola choca contra un obstáculo o barrera vertical; la ola se refleja con muy poca pérdida de energía. Si el tren de ondas es regular, la suma de las ondas incidente y reflejada origina una ola estacionaria, en la que se anulan mutuamente los movimientos horizontales de las partículas debidas a las ondas incidentes y reflejadas, permaneciendo sólo el movimiento vertical de altura doble y, por lo tanto, de energía doble al incidente. La resultante será la superposición de las dos olas, incidente y reflejada (Figura 2.10).

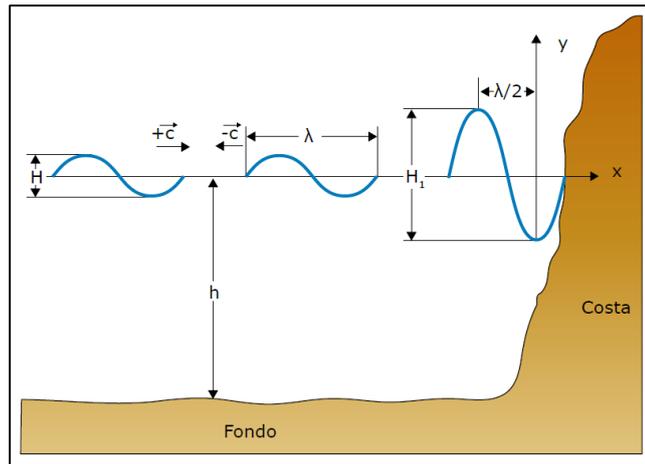


Figura 2.10. Fenómeno de reflexión. ⁽¹⁰⁾

En condiciones ideales la energía de la onda estacionaria resultante es dos veces la de la onda incidente, fenómeno que puede ser utilizado en la conversión del oleaje. Si el oleaje fuese irregular, la reflexión sería totalmente distinta.

También, en el caso de una barrera puede producirse el fenómeno denominado de difracción. Este consiste en la dispersión de la energía del oleaje a sotavento de una barrera, el cual permite la aparición de pequeños sistemas de olas en aguas protegidas por un obstáculo (Figura 2.11)

Cuando la ola traspasa la barrera, el frente de olas adopta una forma curva, entrando en una zona de calma por detrás de la barrera, disminuyendo su altura H en esa zona, mientras que la velocidad y la longitud L de la ola no se modifican.

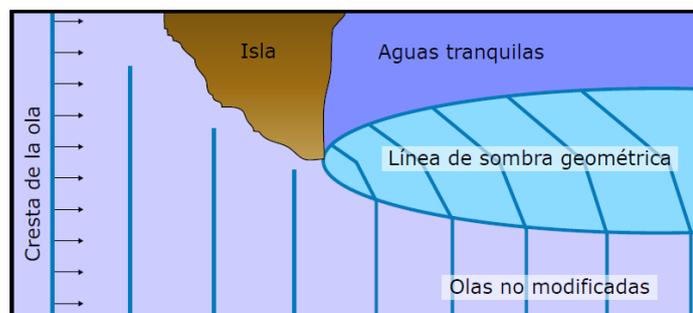


Figura 2.11. Fenómeno de difracción. ⁽¹⁰⁾

La altura de la ola en la zona de difracción es función del ángulo del oleaje incidente con respecto a la barrera, de la longitud de la barrera, de la profundidad del agua y de la posición del punto en cuestión en la zona de difracción. El fenómeno de la difracción se puede aprovechar para el control y concentración del oleaje.

En definitiva, las olas oceánicas son, esencialmente, como ya se ha mencionado, movimientos de energía. Esta energía es de dos tipos: las moléculas individuales de agua se están moviendo constantemente en una forma circular, y esta energía (energía cinética) puede ser utilizada en diferentes clases de aparatos de conversión de energía del oleaje, bien directamente vía alguna clase de hélice o indirectamente mediante dispositivos compuestos por columnas oscilantes de agua y en su movimiento circular las moléculas individuales de agua son elevadas encima de la línea inmóvil de la superficie del agua y entonces representa una energía potencial.

2.2.6. Potencial

La energía de las olas oceánicas es enorme. Incluso la fracción de la energía que es potencialmente explotable es muy grande comparada con el consumo actual de electricidad en el mundo.

Se han realizado diversos estudios con el propósito de estimar el potencial mundial. Se estima la energía mundial explotable es de 2TWh año. ⁽⁸⁾

La energía que una ola adquiere depende, básicamente, de: la intensidad del viento que sopla sobre la superficie del océano, del tiempo en que el viento está soplando y del alcance o superficie sobre la cual sopla el mismo.

La potencia P , en kW por metro de ancho de ola, contenida en una ola oceánica idealizada (onda sinusoidal de amplitud constante y periodo y longitud de onda bien definidos) puede expresarse según la siguiente ecuación:

$$P = \frac{g^2 \delta H^2 T}{32\pi} \quad (\text{kW/m}) \quad (4)$$

Donde:

g : Aceleración de la gravedad (9.81m/s^2)

δ : Densidad del agua (agua de mar = 1027 kg/m^3)

H : Altura de la ola (m)

T : Periodo y π : $3,1416^{(12)}$

Según esta ecuación la potencia contenida en una ola es proporcional al cuadrado de la amplitud H y al periodo del movimiento T . Las olas con periodos largos (entre 7s y 10s) y grandes amplitudes (del orden de 2m) tienen un flujo de energía que normalmente excede de los 40-50kW por metro de ancho.

La potencia total en cada metro de frente de ola del mar irregular es la suma de las potencias de todos sus componentes. Evidentemente, es imposible medir todas las alturas y periodos de ondas independientemente, por tanto, para estimar la potencia total se utiliza una media.

Utilizando dispositivos de medida de las características de las olas (Figura 2.12) o satélites (Figura 2.13) es posible recoger la variación del nivel de la superficie del mar durante un determinado periodo.



Figura 2.12. Dispositivos de medida del oleaje. ⁽¹⁰⁾



Figura 2.13. Satélite usado para medir características del oleaje. ⁽¹⁰⁾

Con los datos recopilados es posible calcular lo que los oceanógrafos denominan la altura significativa de las olas H_s (Figura 2.14), la cual se define como la altura promedio de la tercera parte de las olas más altas en un registro, y el periodo energético o periodo de nivel cero T_e , como el periodo de tiempo que transcurre entre valores sucesivos el paso de una ola dos veces consecutivas por una línea imaginaria situada a la mitad de distancia entre una cresta y un valle.

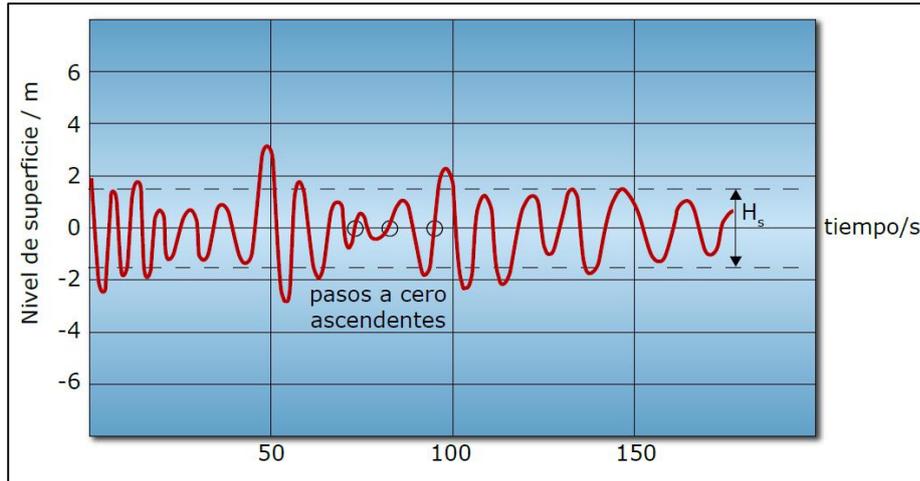


Figura 2.14. Altura significativa de las olas. ⁽¹⁰⁾

Por tanto, en un mar irregular típico, la potencia media total, en kW/m, vendrá dada por:

$$P_s = 0,49H^2sTs \quad (5)$$

Como la mayoría de las fuentes renovables de energía, la energía de las olas se encuentra distribuida en el globo terráqueo de forma desigual (Ver Figura 2.15). Las zonas del mundo sujetas a vientos regulares son las que disponen de mayores potenciales energéticos que pueden extraerse de las olas. Así, la actividad de la olas se ve incrementada entre las latitudes de 30° y 60° en ambos hemisferios, inducidas por los vientos alisios predominantes que soplan en estas regiones. Los vientos procedentes del Golfo de Méjico, que soplan con una dirección predominante del noreste, cruzan el Atlántico y tienen varios miles de kilómetros para transferir energía al Océano Atlántico. Estos vientos crean grandes olas que llegan a las líneas de costa de Europa.

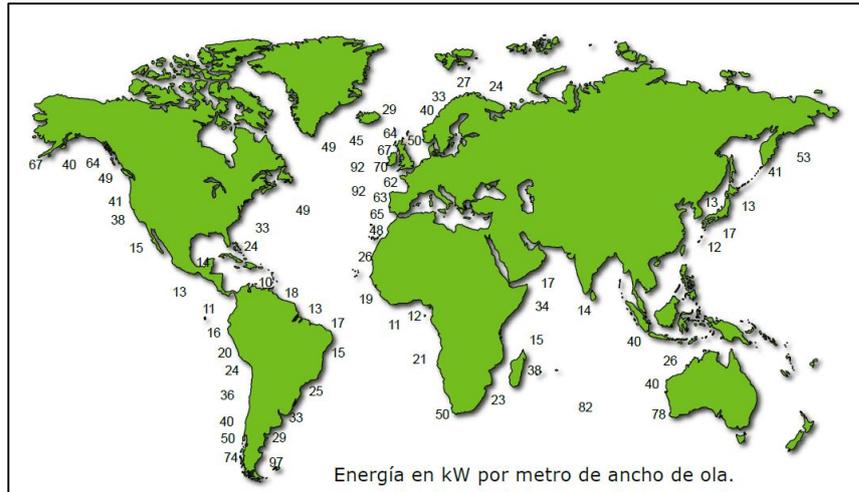


Figura 2.15. Distribución global de la energía de las olas en kW por m² ⁽⁸⁾

Para capturar la máxima energía de una ola los aparatos deberían diseñarse para interceptar completamente los movimientos de las partículas de agua, es decir, deberían capturar la energía de todos los movimientos circulares de la ola, desde la superficie hasta las profundidades (Figura 2.7). Sin embargo, ya que las orbitas más profundas y pequeñas contienen poca energía no resulta viable, desde el punto de vista técnico y económico, tratar de capturarlas todas.

A la hora de decidir cuánto debe introducirse, debajo de la superficie del mar, un dispositivo de captación de energía del oleaje, ha de tenerse presente que el 95% de la energía de una ola se encuentra entre la franja comprendida entre la superficie y una profundidad de un cuarto de la longitud de onda L (Figura 2.16).

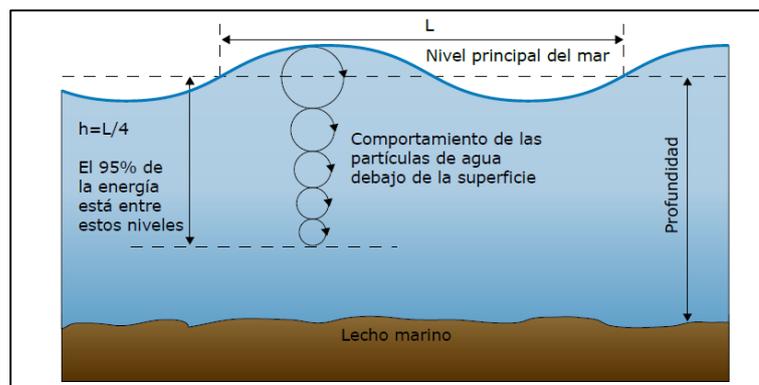


Figura 2.16. Franja donde se encuentra la energía de una ola. ⁽¹⁰⁾

Existen pocos lugares en el mundo donde la línea de costa está constituida de acantilados bañados por aguas profundas. Estos lugares son los más apropiados para instalar dispositivos de captación de la energía del oleaje ya que las olas incidentes contienen gran cantidad de energía. Sin embargo, en la mayoría de las zonas costeras del mundo las aguas son poco profundas.

La ola cuando se acercan a aguas poco profundas va perdiendo gradualmente su potencia. Ello se debe a la fricción que se produce entre las partículas de agua más profundas y el fondo del mar, siendo el efecto más significativo cuando la profundidad del agua es menos de un cuarto de la longitud de ola (Figura 2.9). Esta pérdida de potencia es muy importante ya que reduce la cantidad de energía útil que puede extraerse del oleaje. Normalmente, olas con una densidad de potencia de 50kW/m, en aguas profundas, pueden reducir su densidad a 20kW/m o menos cuando están más cerca de la costa, en aguas poco profundas, dependiendo de la distancia recorrida en aguas poco profundas y de la rugosidad del fondo del mar. Por otro lado, las olas originadas por tormentas también se atenúan y por consiguiente son menos probables que destruyan los aparatos instalados en la línea de costa.

Hay otro mecanismo que interviene en la pérdida de potencia de las olas cuando estas llegan a la playa. Las olas se rompen, son turbulentas y disipan energía. Estas olas son apropiadas para actividades deportivas y de ocio, tales como surfing, pero pueden ser muy dañinas para las estructuras de los aparatos que se instalen para captar su energía. Hay que tener en cuenta que los aparatos de captación deben ser diseñados no solo para que funcionen correctamente en las tareas de conversión energética a un costo apropiado, sino que también deben ser capaces de soportar las cargas más extremas que produzcan las olas, lo cual puede elevar de forma notable los costos de inversión de la instalación.

2.2.7. Tecnología

Ante la potencia de las olas que todos los días golpean las costas de islas y continentes, se han imaginado los dispositivos más ingeniosos y, a veces, más increíbles, para captar esta tentadora fuente de energía. Sin embargo, muchos de ellos no han pasado de la etapa de diseño y solo una pequeña proporción ha sido ensayada y evaluada. Además, solo unos pocos han sido ensayados en el mar, y muy pocos han sido los que han alcanzado la fase comercial.

Los dispositivos para aprovechar la energía almacenada en las olas deben captar la energía cinética y/o potencial de las mismas y convertirla eficientemente en otra forma de energía útil, generalmente energía eléctrica.

Existen miles de patentes que proponen diferentes dispositivos para extraer la energía de las olas (Figura 2.17). Asimismo, existen múltiples criterios para clasificar a los distintos dispositivos que se han diseñado:

- Por la posición relativa de los dispositivos respecto de la costa: ubicados en la costa, cercanos a la costa y en alta mar. ⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾
- Por su capacidad de extraer energía: pequeña, mediana y gran capacidad.
- Por su geometría y posición relativa respecto del oleaje: los totalizadores o terminadores son dispositivos largos, que tienen su eje principal paralelo al frente de olas, es decir, perpendicular a la dirección en que las olas se mueven, y que extraen la energía de las mismas de una sola vez; los atenuadores son dispositivos largos, cuyo eje principal es paralelo a la dirección del movimiento de las olas, es decir, perpendicular al frente olas, y que extraen la energía de forma progresiva; y los captadores puntuales, que son dispositivos aislados de dimensiones reducidas que aprovechan la concentración y convergencia del oleaje. Por su movimiento relativo respecto de las olas: aparatos de estructura fija o inmóvil, que disponen de una

estructura que se fija a la costa o al fondo del mar; y aparatos flotantes o semi-sumergidos.

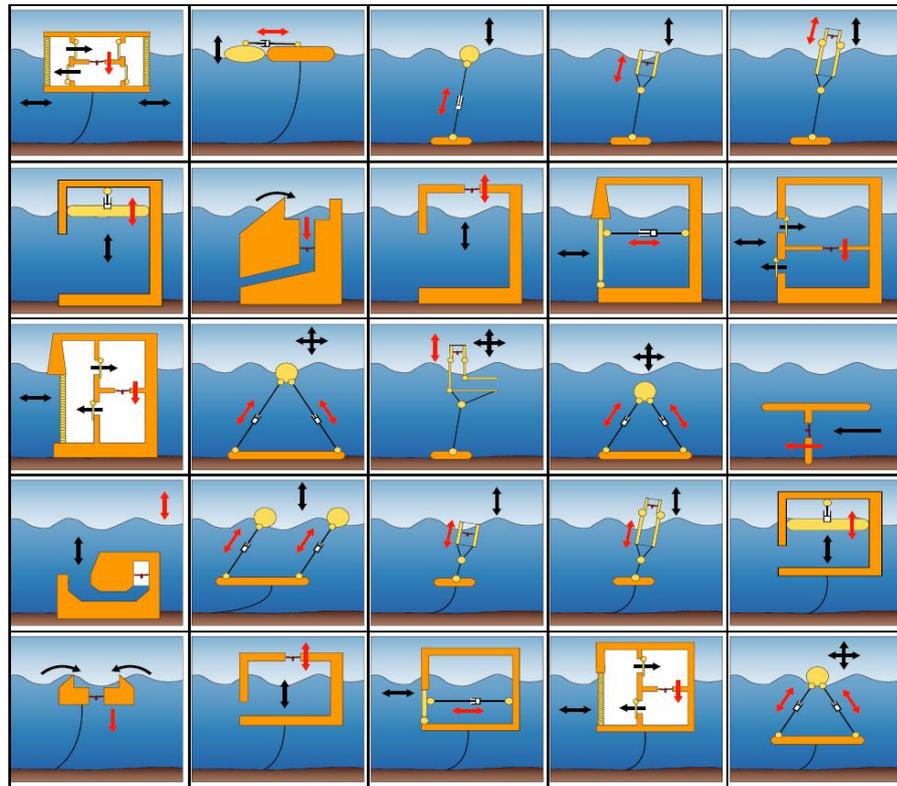


Figura 2.17. Diferentes tecnologías para extraer la energía de las olas. ⁽¹⁰⁾

Aunque los dispositivos de aprovechamiento de la energía del oleaje pueden instalarse en el océano en varias posibles situaciones y localizaciones, la mayoría de ellos se han ubicado cerca de la costa.

Los dispositivos de estructura fija se anclan al fondo del mar o en la costa, de manera que la estructura principal no se mueve con el mar. Sin embargo, estos aparatos disponen de elementos que pueden moverse respecto de la estructura fija, cuando las olas actúan sobre los mismos, y convierten la energía del oleaje en energía mecánica, la cual es generalmente transformada en energía eléctrica. Estos dispositivos son más fáciles de fabricar y mantener que los dispositivos flotantes, sin embargo, presentan varios inconvenientes:

- El reducido número de lugares costeros donde se puedan instalar.

- Que capturan mucho menos energía que los aparatos flotantes que se instalan alejados de la costa, debido a que las olas en aguas profundas disponen de más energía que las olas de las aguas más cercanas a la costa.

Los sistemas ubicados en tierra incluyen los canales ahusados denominados TAPCHAN, una variedad de columnas oscilantes de agua (siglas en inglés OWC, Oscillating Water Column) y los denominados “pendulor”.

Las OWC consisten en una estructura hueca, parcialmente sumergida, que está abierta al mar por su parte inferior (figura 2.18). Esta estructura encierra una columna de aire en la parte superior de una columna de agua. Cuando las olas actúan sobre el aparato hacen que la columna de agua suba y baje, con lo cual la columna de aire se comprime y descomprime alternativamente. Es decir, se aprovecha el principio de la cavidad resonante. Si este aire atrapado se le permite fluir hacia y desde la atmósfera a través de los alabes de una turbina, puede extraerse energía mecánica del sistema y usarse para generar electricidad mediante un generador eléctrico mecánicamente acoplado a la turbina. Las turbinas generalmente utilizadas son las denominadas turbinas Wells, que reciben este nombre de su inventor, el profesor Alan Wells.

Estas turbinas tienen la propiedad de rotar en el mismo sentido independientemente del sentido en que el aire pase por sus alabes de perfil simétrico.



Figura 2.18. Instalaciones de columna oscilante de agua (OWC) ⁽¹⁰⁾

No todos los dispositivos de columna oscilante de agua diseñados emplean turbinas Wells. Por ejemplo, el Laboratorio Nacional de Ingeniería del Reino Unido, cuyas siglas en inglés son N.E.L. (UK National Engineering Laboratory), propone la utilización de un sistema de válvulas y una turbina convencional que opere en un solo sentido de circulación del aire (Figura 2.19.)

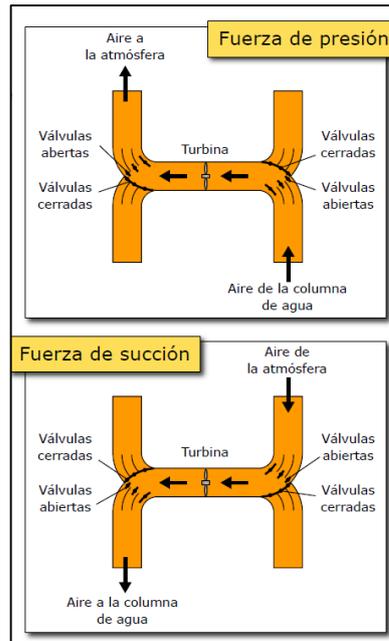


Figura 2.19. Columna oscilante de agua con sistema de válvulas. ⁽¹⁰⁾

El convertidor propuesto por NEL consiste en una barrera totalizadora (Figura 2.20). Dicha barrera está compuesta por una serie de columnas oscilantes de agua situadas una a continuación de la otra.

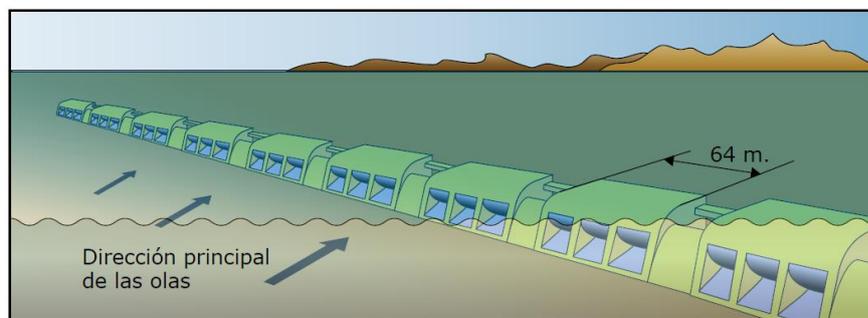


Figura 2.20. Convertidor propuesto por NEL. ⁽¹⁰⁾

Aparatos de estructura fija, basados en columnas oscilantes de agua, se han instalado en diversas partes del mundo. En Sanze-Japón, en 1983, con una capacidad instalada de 40kW; en Toftestallen-Noruega, en 1985, con una potencia instalada de 600kW; en Neya-Japón, en 1985, con una potencia instalada de 40kW.; en Kujukuri-Japón, en 1988, con una potencia instalada de 30kW.; en Sakata-Japón, en 1989, con una potencia instalada de 60kW; en la isla Islay-Escocia, en 1991, con una potencia instalada de 75kW; en Islay-Escocia, en 2001, con una potencia instalada de 500kW; en Trivandrum-India, en 1991, con una potencia de 150kW; en la isla de Pico-Las Azores-Portugal, con una potencia instalada de 350-500kW.

Investigación y Tecnología Aplicada, ART (ART, son las siglas en inglés de Applied Research Technology) ha desarrollado un sistema piloto de OWC en acero, que han denominado OSPREY. El aparato, con una potencia nominal de 2MW, se ha diseñado para que sea instalado cerca de la costa, sujeto al fondo del mar.

Un dispositivo de estructura fija que aprovecha el empuje de las olas es el Pendulor (Figura 2.21). Los dispositivos Pendulor, instalados en Muroran-Japón, en 1983, y en Mashike-Japón, en 1985, disponen de una potencia instalada de 5kW cada uno, y básicamente consisten en una puerta articulada en su parte superior y que se encuentra conectada con un cilindro hidráulico. La energía de las olas se extrae cuando éstas mueven la puerta y ésta, a su vez acciona al cilindro hidráulico. El instituto Tecnológico de Muroran (Japón) está desarrollando un dispositivo de este tipo, con una potencia de 150kW, para instalar en Yagishiri (Japón).

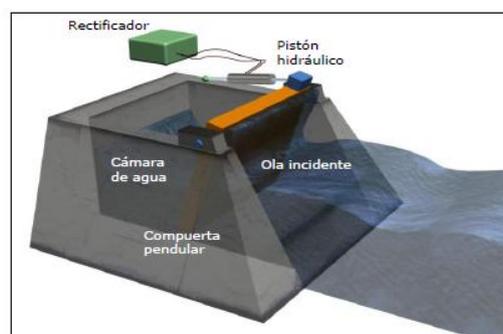


Figura 2.21. Dispositivo Pendulor⁽¹⁰⁾

Los canales ahusados, también llamados sistemas TAPCHAN, se sitúan en la línea de costa y cuentan con una estructura construida en un canal que concentra las olas, conduciéndolas a un depósito elevado. El flujo de agua que sale de este depósito se usa para generar electricidad, usando tecnologías hidroeléctricas estándar.

En 1985 se instaló un sistema de este tipo en Toftestallen, una pequeña isla de Noruega. El prototipo cuenta con un canal de 10 metros de alto (7 metros debajo del mar y 3 metros por encima) y 170 metros de longitud. Con este sistema la energía cinética de las olas se transforma en energía potencial, que posteriormente se convierte en electricidad al permitir que el agua del depósito vuelva al mar a través de una turbina Kaplan.

La potencia mecánica de rotación de la turbina se utiliza para accionar un generador de inducción de 350kW de potencia nominal, el cual inyecta la energía eléctrica generada en la red eléctrica de la isla.

Sistemas de este tipo están siendo considerados para ser instalados en Tasmania (Indonesia) y en Shetland (Escocia).

Otro dispositivo fijo significativo es el Rectificador Russell. Se trata de un aparato totalizador constituido por módulos, cada uno constituido por dos tanques situados a alturas diferentes, los cuales se comunican a través de una turbina de pequeño salto. El dispositivo se fija al fondo del mar en zonas de poca profundidad. Las crestas de las olas introducen el agua en el tanque superior, la cual pasa, por acción de la fuerza de gravedad, a través de los alabes de la turbina, al tanque inferior. Un sistema de válvulas unidireccionales es el encargado de permitir la entrada de agua en el tanque superior y la salida de la misma por el inferior (Figura 2.22). Generadores eléctricos, mecánicamente conectados a las turbinas, son los encargados de producir electricidad.



Figura 2.22. Rectificador Russell⁽¹⁰⁾

Los dispositivos que se instalan fuera de la costa incluyen las columnas oscilantes de agua, las boyas y otros aparatos.

En la Universidad de Queen (Irlanda del Norte) se ha investigado un dispositivo, denominado convertidor de Belfast, que aprovecha el principio de la cavidad resonante, es decir, se trata de un OWC, pero que se incluye dentro de los captadores puntuales, ya que se ha diseñado para captar las olas independientemente de la dirección de propagación de las mismas.

Los dispositivos de estructura flotante oscilan con las olas y necesitan disponer de un almacén estable de referencia para que las partes activas del aparato se puedan mover respecto de la estructura principal. Esto se puede lograr aprovechando la inercia, o haciendo la estructura suficientemente grande para que se apoye en varias crestas de olas y pueda permanecer razonablemente estable en la mayoría de los estados de la mar.

Esta clase de aparatos explota la mayor cantidad de energía de las olas, disponible a mayores profundidades de agua (más de 40m de profundidad).

Son, principalmente, aparatos flotantes que se mantienen en su lugar con ayuda de diferentes sistemas de amarre. En general, estos aparatos están menos desarrollados que las columnas oscilantes de agua. Existen diversos diseños, algunos de los cuales se encuentran actualmente en fase de desarrollo y comercialización.

El Dragón de olas (The Wave Dragon) (figura 2.23.a) (Imágenes de EarthVision), es un dispositivo flotante que utiliza el mismo principio que los denominados canales ahusados (Tapchan), pero que usa un par de reflectores curvos (de un diseño patentado) para recoger las olas y subirlas por una rampa a un depósito donde el agua es liberada a una turbina situada en la parte inferior (figura 2.23.b). Un modelo a pequeña escala ya ha sido ensayado y el modelo a escala 1:1, que se estima tendrá una generación pico de 4MW, dispondrá de unos brazos reflectores de 227 metros.



Figura 2.23.a Dragón de olas⁽¹⁰⁾

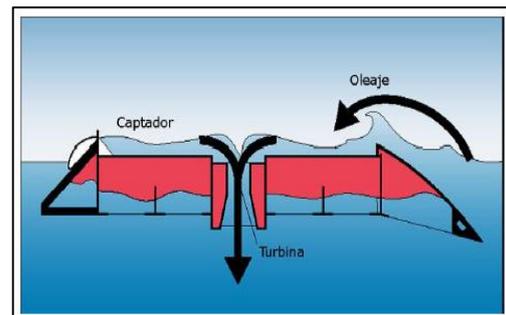


Figura 2.23.b Esquema de funcionamiento del Dragón de olas.⁽¹⁰⁾

Un invento danés, el denominado Wave Plane (Figura 2.24.a), es un dispositivo flotante que se ancla al fondo del mar y aprovecha la energía cinética y potencial de las olas.

El aparato es una estructura en forma de cuña, con canales (Figura 2.24.b) que recogen las olas en un depósito que tiene forma espiral. La salida del depósito está conectada a un extremo de un conducto de inercia. En el otro extremo el tubo de inercia tiene conectada una turbina axial. La forma del depósito hace que el agua produzca un vórtice en el tubo inercial.



Figura 2.24.a Wave Plane⁽¹⁰⁾



Figura 2.24.b Canales de recogida de las olas.⁽¹⁰⁾

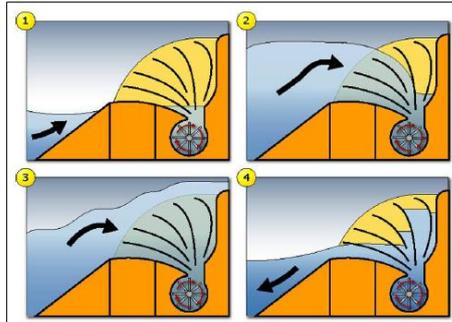


Figura 2.24.c Esquema de captación y almacenamiento de la ola. ⁽¹⁰⁾

La parte de la ola que entra el depósito será “cortada en un número de rebanadas horizontales” (figura 2.24.c). La ola es de ese modo dividida en secciones con diferente cantidad de energía cinética y potencial. La parte más baja de la ola que es capturada tiene, relativamente, más energía cinética, la parte más alta dispone, relativamente, de más energía potencial.

Dentro de los dispositivos totalizadores flotantes destaca el denominado Pato Salter (Figura 2.25). Este aparato convierte la energía cinética y potencial de las olas en un movimiento de rotación alternativo, que a su vez se transforma en electricidad mediante el uso de un generador eléctrico.

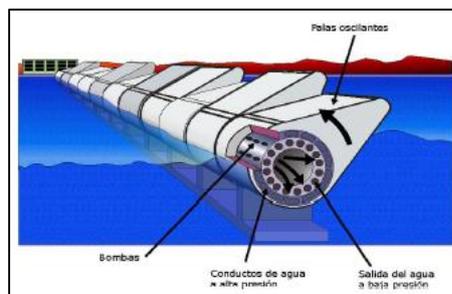


Figura 2.25. Pato Salter⁽¹⁰⁾

El dispositivo denominado Pelamis (figura 2.26) está compuesto por una serie de segmentos cilíndricos conectados por uniones articuladas. El dispositivo pertenece al grupo de dispositivos denominados atenuadores, ya que su eje principal es paralelo a la dirección en que se mueve la ola, es decir, perpendicular al frente de olas. En este aparato los

segmentos cilíndricos se mueven unos respecto a otros cuando las olas recorren, por debajo, la longitud del dispositivo.



Figura 2.26. Dispositivo denominado Pelamis⁽¹⁰⁾

Entonces émbolos hidráulicos situados en las uniones bombean aceite para accionar un motor hidráulico que se acopla a un generador eléctrico. La electricidad generada en cada articulación se transmite a la costa por un cable submarino común.

El dispositivo mide aproximadamente 130m de longitud y 3,5 m de diámetro. El dispositivo de mayor tamaño que se piensa construir tendrá una potencia nominal eléctrica de 0,75MW.

Archimedes Wave Swing (AWS) es una compañía que ha desarrollado un sistema totalmente sumergido, que extrae energía de las olas aprovechando el movimiento de subida y bajada de las mismas.

En este sistema, la energía de las olas se transfiere a un movimiento relativo lineal, de arriba abajo, entre dos cilindros. El cilindro inferior se fija al fondo del mar mientras el cilindro superior, también llamado flotador, se mueve arriba y abajo accionado por las olas. Simultáneamente, imanes unidos al cilindro superior, se mueven a lo largo de una bobina para generar electricidad.⁽¹⁰⁾

2.2.8. Costos

La explotación de la energía del oleaje, como ocurre con muchas otras tecnologías renovables, precisa de altos costos de inversión. Los altos costes de capital se deben a la necesidad de construir grandes

estructuras para captar una cantidad significativa de energía. Por otro lado, los costos de operación son relativamente bajos en los dispositivos costeros (bastantes más altos en los aparatos alejados de la costa), ya que no existen costes de combustibles, y los costes de operación, reparación y mantenimiento anuales solo representan entre un 3 a un 8 por ciento de los costes de inversión. Sin embargo, habrá costes de seguros que podrán ser altos en los primeros años cuando la experiencia en la tecnología sea limitada. La tecnología de la energía del oleaje, como ocurre con la mayoría de las otras tecnologías renovables, solo es rentable si los costos de capital por kw instalado es menor de 1600€.

El costo de la energía obtenida con los aparatos captadores de la energía de las olas es altamente dependiente del interés. Se estima que los aparatos instalados en la costa tengan un coste de la unidad energética generada entre 0,09€/kwh y 0,14€/kwh. Los costes de los aparatos instalados fuera de la costa presentan una mayor dispersión, pero se estima que se encuentren en el rango comprendido entre 0,18€/kwh y 0,49€/kwh. Está claro que estos costes variarán de un país a otro, e incluso dentro de un mismo país, dependiendo del potencial del oleaje. La viabilidad económica de la explotación de la energía del oleaje será por tanto diferente de un sitio a otro. Se está observando que los costos de la electricidad obtenida con aparatos captadores de la energía del oleaje, y en particular los OWC ubicados en la línea de costa, se están aproximando cada vez más a los costes de la electricidad obtenida mediante el empleo de plantas convencionales de carbón. En la Figura 2.27, donde se muestra la evolución prevista del coste de la energía producida, puede observarse la tendencia decreciente de los costes, en función del lugar de instalación, los cuales se han determinado considerando un coste de oportunidad del 8%.⁽¹⁰⁾

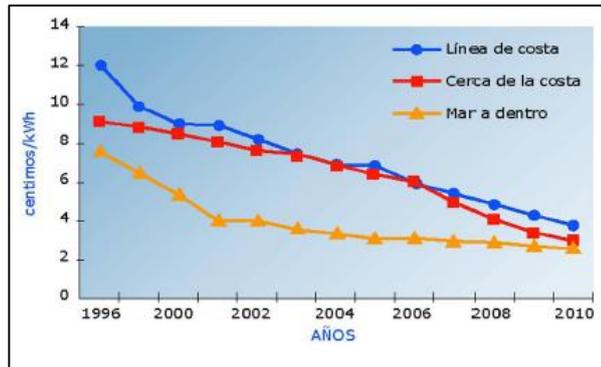


Figura 2.27. Evolución prevista del coste de la energía producida⁽⁹⁾

2.2.9. Impacto Ambiental

Los sistemas de aprovechamiento de la energía de las olas deben de resolver una serie de problemas antes de que sean ampliamente usados. De todas formas, hay que señalar que muchos de ellos solo afectan a los dispositivos ubicados en la costa. ⁽⁹⁾

Entre los posibles impactos negativos pueden señalarse los siguientes:

- a) Impacto visual. El impacto visual depende del tipo de aparato y de su distancia de la línea de costa. En general, un sistema de boya flotante o una plataforma situada mar a dentro o un sistema sumergido, probablemente no presente mucho impacto visual. Cuando un área depende del turismo, la obstrucción visual es crítica.
- b) Ruido. Los sistemas de conversión de la energía de las olas producen ruido, aunque los niveles suelen ser menores que los ruidos de un barco.

Cuando operan a plena carga, no se espera que sean más ruidosos que el viento o las olas, además, estos sistemas pueden ser construidos con un buen material aislador de ruidos.

El ruido generado puede viajar largas distancias debajo del agua y pueden afectar a ciertos animales, tales como las ballenas, las focas, etc.

Se precisan más investigaciones para determinar si existen impactos en la vida de los mamíferos debido al ruido de estos aparatos.

Molestias y destrucción de la vida marina. Los aparatos de captación de la energía de las olas pueden tener una variedad de efectos en el comportamiento del oleaje. Esto podría influir en las áreas de línea de costa y en las plantas y animales que viven en ella. Los sistemas ubicados en tierra requieren importantes modificaciones que afectan al impacto ambiental. Los impactos potenciales incluyen las molestias o destrucción de vida marina (incluyendo cambios en la distribución y tipos de vida marina cerca de la costa). La instalación de las estructuras soporte y colocación de cables pueden interrumpir temporalmente la vida marina. Sin embargo, la ecología, probablemente, se recuperará.

Los efectos de los aparatos alejados de la costa, probablemente, son pequeños (aunque grandes aparatos podrían tener efectos notables).

Al absorber la energía de las olas, estos aparatos crean aguas en calma a su abrigo produciendo áreas válidas para actividades marinas, comerciales o recreativas.

Las estructuras marinas en el océano proporcionan superficies apropiadas para que se desarrollen variedad de algas e invertebrados, que podrán colonizar los dispositivos. Por tanto, desde el punto de vista de la conservación de estos dispositivos, es necesario tomar medidas correctoras (inyección directa de bióxidos, utilización de productos anti-incrustaciones, chorros a presión que desprendan a estos organismos de las estructuras, etc.) que eviten la destrucción de los mismos.

Sin embargo, a menos que sean adecuadamente aplicados, estas medidas anti-incrustaciones pueden tener un impacto adverso sobre la vida marina.

- c) Erosión de la costa. Los dispositivos de captación de la energía de las olas concentran la energía de estas en un área antes de su captación (Por ejemplo, los sistemas denominados TAPCHAN). Estos tipos de aparatos concentradores pueden originar un incremento de la erosión de la costa. Una reducción de la acción del oleaje en zonas de la línea de costa puede incrementar el depósito de sedimentos.

- d) Conflictos con la navegación. Una vez instalados, los sistemas de captación de la energía del oleaje podrían ser un peligroso obstáculo para cualquier embarcación que no pueda verlos o detectarlos por radar.

Para la mayoría de los aparatos, esto podría superarse con técnicas convencionales (por ejemplo, luces, pinturas, reflectores, etc.).

- e) Interferencia con la pesca comercial y deportiva.

Interferencia con otras actividades recreativas. Los sistemas de captación de la energía de las olas, si no están adecuadamente situados, pueden interferir con otros usos de las áreas de costa tales como surfing, paseos en barco, y usos de la playa.

Por otro lado, esta fuente de energía presenta una serie de ventajas, entre las que se pueden señalar:

- a) Se trata de un recurso renovable y sostenible.
- b) Es un recurso abundante.
- c) Se reduce la dependencia de los combustibles fósiles.
- d) No contamina.
- e) Es relativamente predecible.
- f) Es relativamente consistente (más que la mayoría de las fuentes renovables)
- g) Elevada flexibilidad para su instalación (en tierra, cerca de la costa, mar a dentro)
- h) Se trata de una energía muy concentrada.
- i) Disipa la energía de las olas/protege la línea de costa.
- j) La economía local se desarrolla.
- k) Tiene múltiples aplicaciones (Generación de electricidad, producción de hidrogeno por electrolisis, desalinización de agua por osmosis inversa, etc.)

2.3. Marco conceptual

- **Energía Undimotriz:** Se define a la Energía Undimotriz a aquella que es obtenida a través de la captación de la energía cinética contenida en el movimiento de las aguas de los océanos y mares.

- Ola: Las olas son ondas que se desplazan por la superficie de océanos y mares.
- Marea: La marea es el cambio periódico del nivel del mar producido principalmente por la fuerza de atracción que ejercen el Sol y, principalmente, la Luna sobre la Tierra.
- Altura de Ola (H): Es la distancia vertical entre un valle y una cresta.
- Periodo de una ola (T): Tiempo transcurrido entre el paso de dos crestas o valles sucesivos, por un punto fijo.
- Altura de ola significativa (H_{sig}): Se define como aquella ola cuya altura es igual al promedio del tercio más alto de un grupo o tren de olas. La ola significativa se ha utilizado para desarrollar formulas y teorías en el campo de la ingeniería portuaria y de costas. Cuando se hace referencia a altura de olas se habla siempre de la ola significativa.
- Altura de ola promedio (H_s): Es el promedio aritmético de todas las alturas de olas dentro de un grupo o tren de olas consideradas.
- Altura máxima (H_{max}): Es la altura de la ola más grande dentro de un grupo de olas.
- Periodo significativo (T_s): Se define como aquel, cuyo periodo es igual al promedio de la tercera parte más alta del grupo o tren de olas.
- Periodo promedio (T): Es el promedio aritmético de todos los periodos de un grupo de olas consideradas.
- Longitud de la ola (L): Es la distancia horizontal entre dos crestas o dos valles consecutivos de la ola.
- Amplitud de la ola (a): Es la altura desde el nivel del mar hasta la cresta o valle de la ola.
- Dirección de la Ola (D): La dirección de las olas se menciona de donde procede (similar a los de viento).
- Velocidad de la ola: Distancia que recorre la ola en la unidad de tiempo (es igual a la longitud de onda dividida por el periodo).⁽¹¹⁾

CAPITULO III

DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

3.1. Análisis del Modelo o Caso

El sistema más usado actualmente para obtener energía de las olas se denomina OWC o columna de agua oscilante. El sistema OWC consiste en obtener energía de las olas mediante el desplazamiento de un volumen de aire por un volumen de agua, el aire así desplazado es conducido hacia una turbina WELLS que gira cuando este pasa por ella, cuando el volumen de agua se retira se genera un vacío que inmediatamente es llenado por aire, de este modo la turbina actúa dos veces, una cuando el aire sale y dos cuando el aire reingresa.

Sin embargo, las construcciones, que pueden ser grandes cámaras semejantes a grutas naturales, estructuras situadas en el borde costero, o tubos por donde ingresa el volumen de agua, tienden a ser destruidas porque la fuerza del mar es variable y constante, de modo tal que en un plazo todas estas construcciones serán destruidas y si la construcción fuera lo bastante fuerte como para resistir todas las pruebas su costo será también enorme.

Las olas del mar tienen un movimiento ondulatorio y producen una oscilación sobre las embarcaciones. Cuando las olas son de baja intensidad este movimiento hace cabecear al bote. No importa cuál sea la intensidad de las olas siempre se producirá un movimiento oscilatorio en el bote.

Para superar todos estos inconvenientes se requiere de un artificio, que no se oponga a la fuerza de las olas y que por el contrario se rinda a ellas. Esa estructura existe y se denomina bote,⁽⁵⁾ por lo tanto para diseñar el artificio se requiere de los siguientes elementos:

- 1 Dos turbinas Wells acoplados a un generador eléctrico.
- 2 Un bote o una superficie que flote sobre el mar para poder producir el movimiento oscilatorio.

- 3 Un tubo contenedor que aplique el principio OWC.
- 4 Fuente del movimiento (el mar)
- 5 Dos Puntos de anclaje.
- 6 Un Regulador de velocidad.

Los cuales se ven reflejados en la siguiente figura:

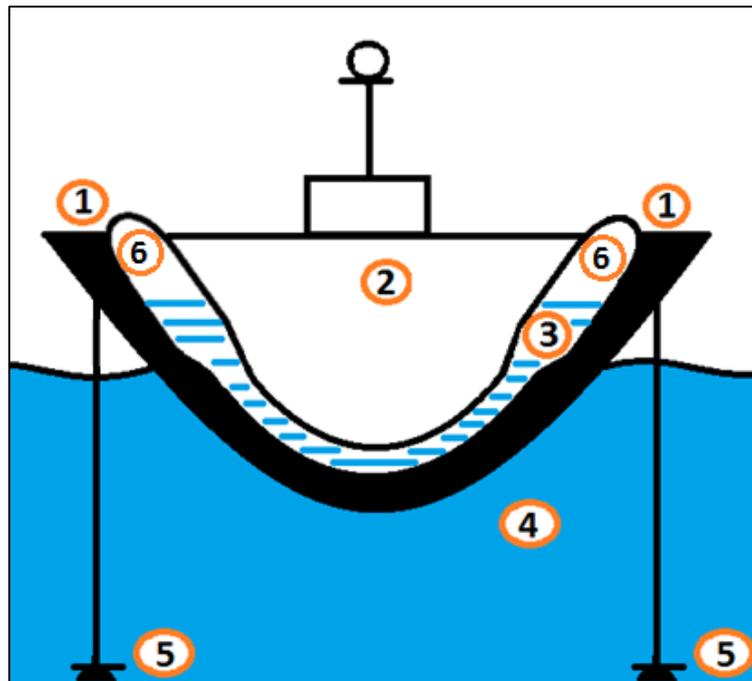


Figura 3.1. Esquema del sistema Undimotriz

Si tenemos un tubo que contiene agua en su interior, el volumen de agua toma su nivel, cuando un extremo del tubo tiende hacia arriba, el volumen de agua toma su nivel en la dirección contraria, esto produce un desplazamiento del volumen de agua hacia uno de los extremos del tubo e inversamente se aleja del otro extremo. Como consecuencia de este movimiento el volumen de agua al desplazarse dentro del tubo que lo contiene, también desplaza un volumen de aire hacia uno de los extremos del tubo y a la vez succiona una cantidad similar por el otro extremo. Este desplazamiento de un volumen de aire es el que moverá la turbina y generará energía y a la vez la succión de aire por el otro extremo produce el mismo efecto de generación de energía en la otra turbina.

El mismo tubo, pero ahorcado en el centro o reducido su diámetro en el centro no impide que el volumen de agua se desplace de un lado a

otro, lo que significa que no se requiere de un tubo de gran diámetro en toda su extensión. Debe tenerse en cuenta que el volumen de aire que se desplaza está en función del diámetro del tubo, lo que significa que a mayor diámetro del tubo, mayor es también el volumen de aire que se desplaza. A efectos de optimizar el rendimiento, el tubo luego de haber aumentado de diámetro puede reducirse nuevamente (VENTURI) para aumentar la velocidad del aire en la salida y de este modo producir un incremento de las revoluciones en la turbina, lo que siempre es deseable.

El aparejo o artefacto o tubo puede formar parte del bote y puede usarse una combinación de tubos y contenedores no necesariamente cilíndricos, el objetivo fundamental es permitir que el volumen de agua contenido se desplace libremente dentro del contenedor. No existen limitaciones de peso, pues los botes han sido diseñados para soportar cargas enormes, tampoco existen limitaciones en cuanto a la cantidad de tubos o aparejos que puedan instalarse.

Para asegurarse que el barco siempre se mantenga paralelo a la costa, se utilizaría un sistema de anclaje, los cuales mantendrían fijo al barco, de esta manera, se aseguraría que el barco siempre se mantenga paralelo a la costa y así producir energía.

Para regular la velocidad de rotación de la turbina haremos uso de un servomotor, el cual ante una perturbación que modifique la velocidad de giro establecida, este la detecte y establezca la velocidad de referencia. La energía producida en el bote sería trasladada a la costa mediante cables submarinos, también cabe la posibilidad de almacenarlas en baterías y cuando se tenga una cantidad considerable, estas se trasladarían a las costas mediante el uso de botes como medio de transporte, la baja y alta de marea no afectarían al sistema, ya que se están tomando en cuenta las válvulas y el servomotor, estos actuarían inmediatamente ante cualquier perturbación que se produzca en el mar.

3.1.1. Costos estimados para una generación proporcional a 0.1Mw:

En el siguiente cuadro se muestra los costos asociados del proyectado para generación de energía eléctrica equivalente a 0.1Mw.

Inversión en la generación de Energía eléctrica Undimotriz proporcional a 0.1 Mw		
Nombre del elemento	Cantidad	Costo
Turbina Wells	2	S/. 700
Superficie flotante (bote)	1	S/. 2000
Tubo contenedor	1	S/. 200
Punto de anclaje	2	S/. 325
Regulador de velocidad	1	S/. 250
Total Inversión		S/. 3475

3.1.2. Comparación entre la generación eléctrica Undimotriz y generación eléctrica Convencional:

Los cuadros mostrados a continuación muestran la valoración económica de la generación de energía eléctrica en el Perú.

Inversión en la generación de Energía eléctrica Undimotriz proporcional a 0.1 Mw		
Nombre del elemento	Cant.	Costo
Turbina Wells	2	S/. 700
Superficie flotante (bote)	1	S/. 2000
Tubo contenedor	1	S/. 200
Punto de anclaje	2	S/. 325
Regulador de velocidad	1	S/. 250
Total Inversión		S/. 3475

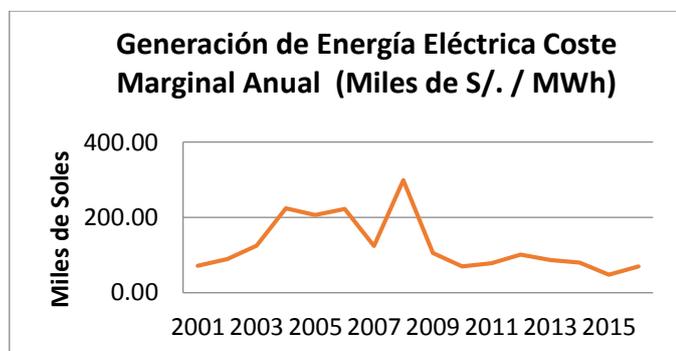
Inversión en la generación de Energía eléctrica convencional proporcional a 0.1 Mw		
Nombre del elemento	Cant.	Costo
Micro turbina Francis+ alternador	1	S/. 1900
Construcción embalse	1	S/.2500
Tranformador	1	S/. 500
Rectificador	1	S/.100
Controlador	1	S/.150
Inverter/Ondulador	1	S/.60
Cuadro eléctrico	1	S/. 100
Resistencias reguladoras	1	S/. 80
Toma de tierra	1	S/.700
Total Inversión		S/. 5460

Generación de Energía: Comparativo Resumen de Inversión			
Energía Undimotriz		Energía Eléctrica Convencional	
Inversión	S/. 3475	Inversión	S/. 5460

Fuente: COES Estadísticas Anuales

Generación de Energía Centrales Eléctricas Perú (Histórico)		
Periodo	(\$./MWh)	S/. /MWh
2001	21.94	71.74
2002	27.18	88.89
2003	38.09	124.56
2004	68.64	224.46
2005	63.13	206.43
2006	68.10	222.69
2007	37.98	124.19
2008	91.36	298.75
2009	32.19	105.26
2010	21.46	70.17
2011	23.85	77.99
2012	30.86	100.91
2013	26.52	86.72
2014	24.56	80.31
2015	14.70	48.07
2016	21.41	70.01
PROMEDIO	38.25	125.07

A continuación, se muestra un diagrama que expresa la evolución anual de los costes en generación de la energía eléctrica en el Perú, proveniente de la tabla anterior.



Fuente: Elaboración Propia

Centrales Hidroeléctricas y Térmicas: Inversión estimada para la elaboración de proyectos de inversión (US\$ millones)

Rubro	Hidroeléctrica	Térmica de ciclo simple	Térmica de ciclo combinado
Terreno	0.71	0.28	0.40
Obra civil e instalaciones	207.10	29.72	42.30
Equipamiento	93.37	90.00	128.07
Total	301.18	120.00	170.77

Fuente: ESAN – Proyecto generación eléctrica (2008)

Análisis:

Como se puede apreciar de los cuadros superiores y el resumen comparativo, de energía Undimotriz proporcional a la generación de energía eléctrica a 100 kW como modelo propuesto al ser comparado con la utilización del método convencional de generación eléctrica (hidráulica) proporcional a 100 kW, resulta ser inferior en costo. Lo que no precisa si a una mayor escala de generación eléctrica el costo de inversión según el modelo seguirá siendo favorable a la energía Undimotriz.

3.1.3. Cuadro comparativo de “Un antes” y “Un después” de implantar el sistema.

Implantación del modelo propuesto Energía Undimotriz : Cuadro Comparativo		
Antes del modelo	Criterio	Después del modelo
De manera sostenida en el tiempo se han venido utilizando las energías convencionales hidráulicas para generar energía, las cuales han venido significando un alto coste en su generación.	Costo de generar energía	Según el modelo propuesto a pequeñas escalas resulta ser menos costoso que la generación de energía convencional, por lo que significa ahorro en el recurso económico.
El potencial energético de las fuentes generadoras de energía, tales como agua, petróleo, entre otros, ha manifestado eficiencia, para la consecución su transformación en	Potencial energético	La adecuación del modelo implica un potencial energético óptimo, dado la cantidad de energía que se puede generar con las olas del mar. Por cada metro de altura se estima que se puede obtener entre 20 y 40 kW. A

energía a lo largo del tiempo, y siguen manteniendo dicha cualidad.		medida que nos adentramos en el océano, se puede llegar a los 100 kW por metro de altura.
La sostenibilidad ambiental ha venido viéndose venida a menos, debido a que en la generación de energía eléctrica tanto en el pasado como en el presente, se encuentra extendido el uso del agua mayoritariamente como fuente generadora de energía. Sumado esto a los efectos del cambio climático mundial que reducen los niveles de agua dulce y su obtención, la sostenibilidad ambiental presente y futura viene siendo un problema latente.	Sostenibilidad ambiental	Debido a que la energía undimotriz es una alternativa limpia, no genera un daño medioambiental ni afectación, como si lo es el uso cada vez mayor del agua (recurso escaso), por lo tanto su implementación resulta ser positiva.
El uso extendido de fuentes generadoras de energía como el petróleo, y otras fuentes que desprenden a la atmosfera Co2 en cantidades contaminantes, genera la necesidad de encontrar otras formas de generar energía para mitigar el daño ambiental.	Niveles de Contaminación Ambiental	La energía undimotriz es una energía limpia, por lo tanto la aplicación del modelo propuesto, no genera daño atmosférico o contaminación de los mares, ya que no se emiten gases de efecto invernadero o fuga de algún contaminante que dañe los ecosistemas marinos.

3.2. Detalle de la turbina Wells

Turbina Wells: La turbina Wells es el dispositivo aerodinámico utilizado en la actualidad para las instalaciones de extracción de Energía de las Olas, o más bien la energía cinética neumática generada por una columna oscilante de agua. Esta turbina utiliza el flujo bi-direccional del aire, comprimido por una columna oscilante de agua; y en consecuencia su diseño implica que opere en un solo sentido de giro independiente del flujo de aire que incida sobre ella. Para conservar el sentido de giro de la turbina, sin importar la incidencia del aire, el rotor se diseña con perfiles aerodinámicos simétricos dispuestos radialmente.

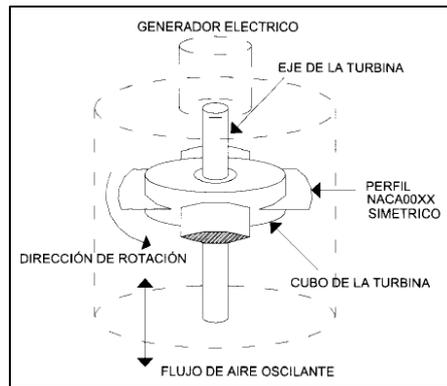


Figura 3.2. Detalle Turbina Wells

La turbina Wells al igual que otro tipo de turbinas, extrae la energía cinética disponible del aire, sin cambios bruscos en su velocidad de rotación que impliquen grandes aceleraciones y fuerzas aerodinámicas. ⁽⁶⁾ Se muestra más detalles en el Anexo 10.

3.3. Diseño del modelo mejorado.

Para elevar un peso de 100 kg cincuenta centímetros una vez por segundo durante un día equivale a 11.76 kwh, elevarlo entonces solo 10 centímetros equivale entonces a la quinta parte o 2.35 kwh. Por lo tanto, una tonelada que se eleva 10 centímetros por segundo produce 23,5 kwh diariamente, pero como ese no será el caso pues las olas se suceden cada quince segundos (valor aproximado) ⁽¹¹⁾, entonces produciríamos solo 1.57 kwh por turbina, lo que nos da 3.14 kwh por tonelada cada 10 centímetros de oscilación. Este es el rendimiento mínimo posible. Ahora bien consideremos 1000 toneladas y cincuenta centímetros, esto significa 5000 (1000 veces más peso x cinco veces más altura) veces más y ya estamos hablando de energía comercial con una producción de 15,700 kwh diarios, suficiente para abastecer 3000 hogares. ⁽⁵⁾

Ahora analizaremos las siguientes tablas (1 – 5) de promedios de olas por día que fueron pronosticados para el mes de febrero del 2015. ⁽¹²⁾

Bayovar

DIA	Hs
1	105.00
2	105.75
3	107.00
4	107.50
5	108.50
6	109.25
7	109.00
8	108.75
9	108.25
10	107.75
11	107.25
12	107.25
13	108.00
14	109.25
15	108.50
16	108.50
17	110.00
18	111.00
19	112.50
20	113.25
21	114.25
22	113.50
23	112.25
24	111.00
25	110.50
26	110.25
27	102.33
28	110.50
Hs del mes	109.17

Tabla 1. Tabla de olas para febrero en Bayovar.

Paita

DIA	Hs
1	109.50
2	110.25
3	111.50
4	112.00
5	113.00
6	133.00
7	113.50
8	113.25
9	112.75
10	112.25
11	111.75
12	111.75
13	112.50
14	101.67
15	113.00
16	113.00
17	114.50
18	115.50
19	117.00
20	117.75
21	148.67
22	118.00
23	116.75
24	115.50
25	115.00
26	114.75
27	115.00
28	105.33
Hs del mes	114.94

Tabla 2. Tabla de olas para febrero en Paita.

Callao

DIA	Hs
1	68.75
2	75.33
3	68.75
4	69.50
5	69.75
6	70.75
7	71.00
8	71.25
9	71.00
10	70.75
11	70.00
12	69.75
13	66.67
14	69.25
15	68.25
16	68.00
17	68.50
18	79.67
19	71.50
20	72.75
21	73.75
22	74.25
23	74.50
24	74.75
25	74.25
26	72.33
27	74.25
28	73.50
Hs del mes	71.53

Tabla 3. Tabla de olas para febrero en Callao.

Chimbote

DIA	Hs
1	82.25
2	82.00
3	82.25
4	92.67
5	83.25
6	84.25
7	84.50
8	84.75
9	84.50
10	84.25
11	83.50
12	83.25
13	82.75
14	77.67
15	81.75
16	81.50
17	82.00
18	82.75
19	84.25
20	101.33
21	87.25
22	87.75
23	88.00
24	88.25
25	87.75
26	88.00
27	83.00
28	87.00
Hs del mes	85.09

Tabla 4. Tabla de olas para febrero en Chimbote.

Ilo

DIA	Hs
1	56.00
2	55.25
3	54.75
4	54.25
5	54.50
6	54.50
7	54.75
8	55.25
9	56.25
10	56.50
11	51.67
12	58.50
13	57.00
14	55.75
15	65.00
16	56.75
17	56.25
18	56.25
19	57.00
20	56.75
21	57.25
22	57.75
23	58.25
24	48.67
25	61.00
26	59.50
27	58.50
28	57.50
Hs del mes	56.48

Tabla 5. Tabla de olas para febrero en Ilo.

Ahora con el promedio calculado hallaremos la energía que se puede extraer en las zonas mencionadas haciendo uso de la fórmula (4).

$$P = \frac{g^2 \delta H^2 T}{32\pi} \quad (\text{kW/m})$$

Datos necesarios para el cálculo: ⁽¹¹⁾

g : Aceleración de la gravedad (9.81m/s^2)

δ : Densidad del agua (agua de mar = 1027 kg/m^3)

H : Altura de la ola (m)

π : 3,1416

T : 15

Entonces, la energía para cada caso es:

$E_{\text{Bayovar}} = 11.56\text{ kW/m}$

$E_{\text{Paíta}} = 12.81\text{ kW/m}$

$E_{\text{Callao}} = 4.96\text{ kW/m}$

$E_{\text{Chimbote}} = 7.02\text{ kW/m}$

$E_{\text{Ilo}} = 3.09\text{ kW/m}$

De los datos comparados podemos decir que se puede generar mayor energía en Paíta que en los otros lugares mencionados.

La distancia recomendable para colocar nuestro sistema Undimotriz, sería en el punto centro del inicio de una bahía, para nuestro caso práctico, se tomará como referencia la bahía de Paíta, perteneciente a Piura (Playa Mata caballo), (figura 3.3.) ya que es el lugar donde más energía se puede producir.

- Distancia hacia el oeste con respecto a la playa Mata caballo: 21km aproximadamente.
- Distancia hacia el norte con respecto a la playa Bayobar: 19km aproximadamente.

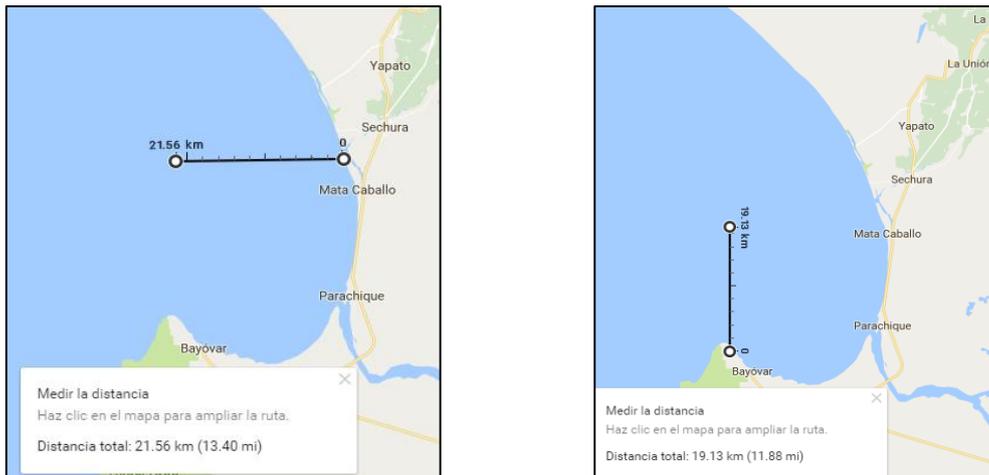


Figura 3.3. Distancias referenciales para la ubicación de nuestro barco. Fuente: Google Maps

Luego de realizar el cálculo de la energía que se puede hallar en los lugares antes mencionados nos apoyamos en la opinión pública para saber la posición de la población peruana acerca de la Energía Undimotriz.

- **Diseño no experimental**

Se plantea la utilización del diseño no experimental, el cual no incluye la manipulación deliberada de variables. Mediante este diseño se observan los fenómenos en su ambiente natural para después analizarlos. A continuación, se detalla el tipo de diseño no experimental utilizado. ⁽¹²⁾

- **Diseño transeccional o transversal**

El diseño no experimental se clasifica en diseño transeccional o transversal y en diseño longitudinal. En la presente investigación se hace uso del primer diseño, ya que éste recopilan datos en un momento único, y tiene como objetivo describir la variable de estudio y posteriormente hacer un análisis de su incidencia e interrelaciones en un momento determinado.

- **Diseño transeccional descriptivo**

Dentro de la tipología del diseño no experimental, en esta investigación se utiliza el diseño transeccional descriptivo. Este diseño

indaga la incidencia de particularidades y niveles de la variable de estudio en una población determinada, para posteriormente incurrir en su análisis. Es así como se realizó una encuesta de opinión, la cual se explica a continuación.

- **ENCUESTA DE OPINIÓN**

El Objetivo es determinar la viabilidad de la implementación de un sistema de Energía Undimotriz en función a la opinión técnica (especialistas) y pública.

- Determinación de la población

La población a estudiar son todos los habitantes del Perú, ya que este trabajo de investigación busca ser aplicado en el país, para el disfrute y aprovechamiento de la población, debido a la capacidad de las olas como generadora de energía alternativa. Por lo tanto, nuestra población está conformada por 30 814 175 habitantes. ⁽¹³⁾

Se representa el total de la población con la letra “N”.

- Determinación de la muestra

La muestra está constituida por un número reducido de la población peruana. Debido a las limitaciones que conlleva realizar una investigación universitaria, se ha limitado el recojo de la muestra a la capital del país, en específico Lima Metropolitana, por las siguientes razones:

- Mayor número de habitantes concentrados en la capital.
- Menor inversión en tiempo y gastos que conllevan la toma de muestra.
- Para el cálculo de muestra utilizamos la formula correspondiente para poblaciones finitas, ya que conocemos el número de población total.

$$n = \frac{N * Z_{\alpha}^2 * p * q}{d^2 * (N - 1) + Z_{\alpha}^2 * p * q}$$

Donde:

N = Total de la población = 30 814 175*

Z α = 1.96 al cuadrado (si la seguridad es del 95%)

p = proporción esperada (en este caso 5% = 0.05)

q = 1 – p (en este caso 1-0.05 = 0.95)

d = precisión = 5%

*Se considera la cantidad total de población peruana y no la cantidad de habitantes de Lima Metropolitana, debido a que no genera variación en el cálculo.

Se tendría de la siguiente manera:

$$n = \frac{30814175 * 1.96^2 * 0.05 * 0.95}{0.05^2 * (30814175 - 1) + 1.96^2 * 0.05 * 0.95}$$

$$n = 72.99$$

$$n = \mathbf{73 \text{ encuestas}}$$

Para poder obtener mejores resultados, y debido a que el investigador busca obtener la apreciación de la opinión pública y la apreciación de personas especializadas o de conocimiento técnico, es que se realizó una toma de muestra dividiendo en dos partes el número total de encuestados. ⁽¹⁴⁾ Las encuestas se dividen de la siguiente manera:

Ciudadanos comunes = 37 encuestas

Ciudadanos con conocimiento técnico = 36 encuestas

- Elaboración de la encuesta

Para la construcción de la encuesta se tomó la variable principal, que es la Energía Undimotriz, relacionándolo en su repercusión al aplicarse en el Perú.

La encuesta está compuesta por una primera parte que incluye los datos del encuestado, tales como género, edad y ocupación, siendo el último ítem de importancia para poder hacer una clasificación. No se pidió a los encuestados la inclusión de sus nombres para mantener la discrecionalidad.

En la segunda parte se incluyen cinco preguntas que buscan

obtener conocimientos y opinión del encuestado sobre el tema en curso.

Las preguntas realizadas son de tipo cerradas, con respuesta múltiple, que no dejan espacio a la inseguridad en la obtención de la información. Asimismo, estas preguntas no generan sesgo en la investigación, ya que se coloca al encuestado en diferentes panoramas, para que pueda emitir una opinión válida.

- **Análisis de los datos**

La información recogida de la muestra en toda Lima Metropolitana, fue organizada en cuadros comparativos, y gráficos para el análisis que a continuación se presenta.

Se dividió la información y análisis según el tipo de encuestado, si pertenece al habitante común y la persona con conocimientos relacionados al tema específico.

- **Opinión Pública**

De los encuestados se obtiene, que la muestra está compuesta mayoritariamente por mujeres.

La mayoría de los encuestados son estudiantes (universitarios), con un 24%, y en su mayoría tienen entre 25-35 años de edad, lo que ayuda a la investigación en cuanto al criterio que tienen ellos a la hora de brindar información.

Los habitantes de las zonas de Lima que tienen más interés en participar en estudios sobre este tema de investigación, es Lima Sur, con un 40% de incidencia.

Ante la pregunta sobre el conocimiento sobre los daños ocasionados al medioambiente por el uso de combustibles fósiles -como medio de obtener energía-, a pesar de no ser expertos en la materia, el 81% de los encuestados manejan información al respecto. Esto es importante, ya que, al tener una sociedad instruida y concientizada de manera siquiera parcial sobre el daño ambiental, pues se puede promover actitudes de cambio y apoyo a la implementación de un sistema de utilización de energía amigable con el ambiente, como lo es la Energía

Undimotriz.

La mayoría de los encuestados (57%) no tienen conocimiento acerca de la existencia de formas de generación de energía que no dañe el ambiente. Y Sólo el 38% está informado o ha escuchado hablar sobre la "Energía Undimotriz".

Las personas que tienen conocimiento sobre la generación de Energía Undimotriz, en un 71% están de acuerdo que tanto la empresa privada y/o el estado peruano, ejecute proyectos para la generación de este tipo de energía para el aprovechamiento colectivo. El motivo principal sería para ellos la disminución de gases contaminantes a la atmósfera, así como la mejora de la salud humana.

El 29% de personas que tienen conocimientos sobre la "Energía Undimotriz", están en desacuerdo que se implementen proyectos para la generación de esta, debido principalmente a los altos costos de inversión y la falta de preparación de todo un país para su adecuación.

- **Opinión Especializada:**

La muestra, compuesta por 36 personas, tiene en su mayoría varones, 28 en cantidad y la ocupación mayoritaria son estudiantes y profesionales técnicos, con un 28% y 44% respectivamente.

La zona de Lima más habitada es Lima sur y el rango de edad mayoritario de los encuestados es entre 35 a 45 años, seguido de 25-35 años de edad.

En cuanto al conocimiento sobre los efectos ocasionados por el uso de los combustibles para la generación de energía, el 100 % de encuestados maneja la información. Esta situación se repite cuando se les preguntó si conocían otras formas de generación de energía más amigable con el medio ambiente.

El 78 % de especialistas manejan información sobre la Energía Undimotriz, y de ellos el 69% están de acuerdo que la empresa privada y/o pública genere proyectos de inversión para el aprovechamiento de esta. Las razones preponderantes son: la disminución de emisión a la

atmósfera de gases contaminantes, y el aprovechamiento de la capacidad del litoral peruano.

El 31% de las personas que conocen la Energía Undimotriz, no están de acuerdo con la implementación de proyectos de inversión para la generación de este tipo de energía, debido a las siguientes razones principalmente: los altos costos que conlleva y la adecuación de la tecnología actual a ella.

3.4. Revisión y consolidación de resultados.

Como podemos apreciar generar energía en nuestro mar peruano si es posible, así como también podemos cuantificarla, el problema que se presenta entonces es, las olas no son constantes, teniendo etapas en las cuales su periodo es corto, y en otras es muy amplio, entonces en los momentos que hay mayor posibilidad de generar energía, se debe aprovechar al máximo y colocar unas baterías que puedan almacenar la energía y utilizarla en momentos en las cuales la generación sea en menor cantidad.

CONCLUSIONES

1. La energía y la adecuada conservación del ambiente son indispensables para el desarrollo sostenible, es por eso que la Energía Undimotriz es una de las opciones para satisfacer las necesidades de la población que residen en las cercanías del mar peruano.
2. Los lugares donde se pueda aprovechar la energía de las olas son un tanto aisladas de la ciudad lo que implica un costo de conexión excesivo.
3. Personas comunes como personas con conocimiento técnico, en su mayoría, están concientizadas sobre los efectos que genera el uso de formas tradicionales de generación de energía y saben de la existencia de otras formas de generación de energía. Esto representa un aspecto importante para una implementación futura de proyectos de inversión en Energía Undimotriz, ya que hay una demanda de la sociedad peruana en la reducción de emisiones de gases contaminantes provenientes del uso de combustible fósil.
4. Tenemos el privilegio de contar con una amplia costa, en la cual se puede aprovechar este recurso y por último debemos recordar la importancia de la diversificación del mix energético.

RECOMENDACIONES

1. Existen en todos los puertos embarcaciones en desuso que pueden ser usadas inmediatamente para estos efectos. La electricidad producida en las turbinas puede ser conducida hacia la costa mediante cables. Se requiere sólo que el bote esté anclado y cuya proa este orientada hacia las olas, con el objeto de obtener la máxima eficiencia del sistema.
2. Se podría utilizar esta energía para la iluminación de puertos, para desalinizar el agua de mar y necesidades que se presentan a diario en lugares cercanos al mar.
3. No dejar de lado la energía de las olas, ya que podríamos llegar a un futuro, donde debamos aprovechar todos los recursos disponibles.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- (1) “”. (s.f.). Ministerio del Ambiente.
Recuperado de: <http://www.minam.gob.pe/>
- (2) “”. Organismo supervisor de la inversión en energía y minería (2014) Introducción a las Energías Renovables. Lima, Perú. Disponible en: <http://www2.osinerg.gob.pe/EnergiasRenovables/contenido/IntroduccionEnergiasRenovables.html>
- (3) Mar de Grau. (s.f.) En Wikipedia. Recuperado de: http://es.wikipedia.org/wiki/Mar_de_Grau
- (4) Pelissero, M. (2010). Aprovechamiento de la Energía Undimotriz. Departamento de Ingeniería Mecánica-Facultad Regional de Buenos Aires. Disponible en: <http://www.apiperu.com.pe/presentaciones/ingenieria-2010-argentina>
- (5) “”. Plan nacional de gobierno (2014). Lima, Perú. Disponible en: <http://plannacionaldegobierno.blogspot.com/>
- (6) Santa, A., Lozano, M., Pinilla, A. (2002). "Generación de energía eléctrica con turbinas Wells "Revista de Ingeniería; volumen (15), 56-64
- (7) G. BarandariánGutierrez. (2011). "Olas Peruanas". (2da. Edición) Lima, Perú: Prima Afp
- (8) CENTRE FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES, (2004). "Ocean Energy Conversion in Europe. Recent advancements and prospects", en Coordinated Action on Ocean Energy, proyecto de la UE, Renewable Energy Technologies. Disponible en: http://www.cres.gr/kape/index_eng.htm
- (9) Fernández chozas, J. (2008). Una aproximación al aprovechamiento de la energía de las olas para la generación de electricidad. (Proyecto fin de carrera) Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.
- (10) Calero Pérez, R., Carta Gonzáles, J.A., Padrón Hernández, J.M. (s/f). "Energía". Recuperado en: http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/curso/energia_p/le_11guiad.html
- (11) Perú, Dirección de Hidrografía y Navegación (2013), Normas Técnicas Hidrográficas N°08 .Manual de Procedimiento para la Medición de Olas. (1ra

Edición).Callao: Hidronav. Disponible en:
<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGGAE/ARCHIVOS/estudios/EIAS%20-%20hidrocarburos/EIA/EIA%20KAROON%20-%20EIA%20PERFO%2020%20POZOS%20-%20Z-38/4.1.4%20Oceanograf%C3%ADsica.pdf>)

(12) "" (s.f.). Dirección de Hidrografía y Navegación Marina de Guerra del Perú.
Recuperado de: <https://www.dhn.mil.pe/>

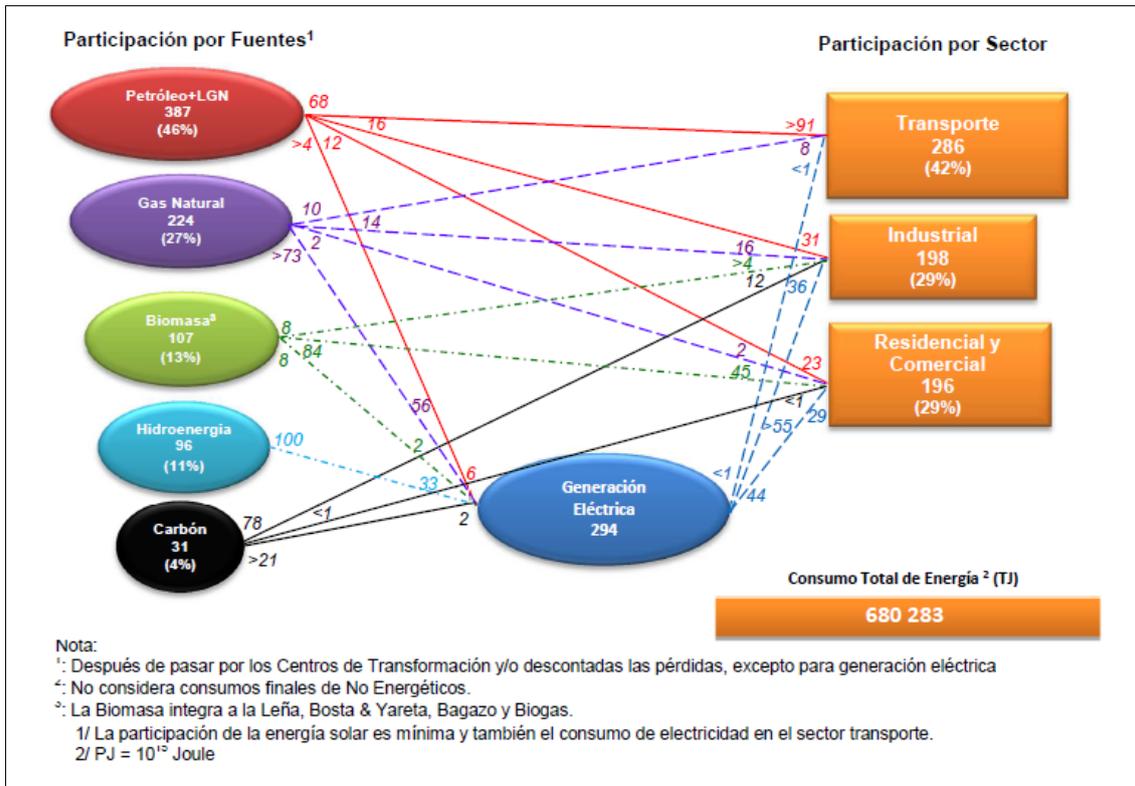
(13) Hernández Sampieri, R., Fernández Collado., C y Baptista Lucio, P., (2010), *“Metodología de la investigación”*. México D.F., México: Mc Graw-Hill

(14) Instituto Nacional de Estadística e informática. “Estado de la población peruana 2014”, [En línea]. Publicación digital INEI (s/f). Dirección URL: http://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1157/libro.pdf.

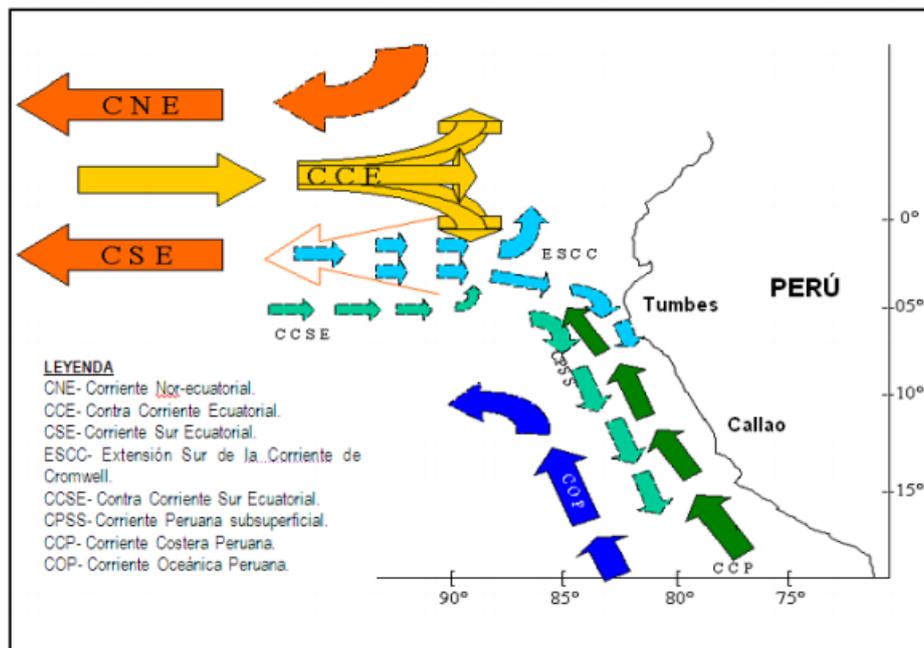
(15) Cordova Zamora, M., (2001), “Estadística Descriptiva e Inferencial”. Lima, Perú: Moshera

ANEXOS

ANEXO 1 Matriz energética del Perú 2012

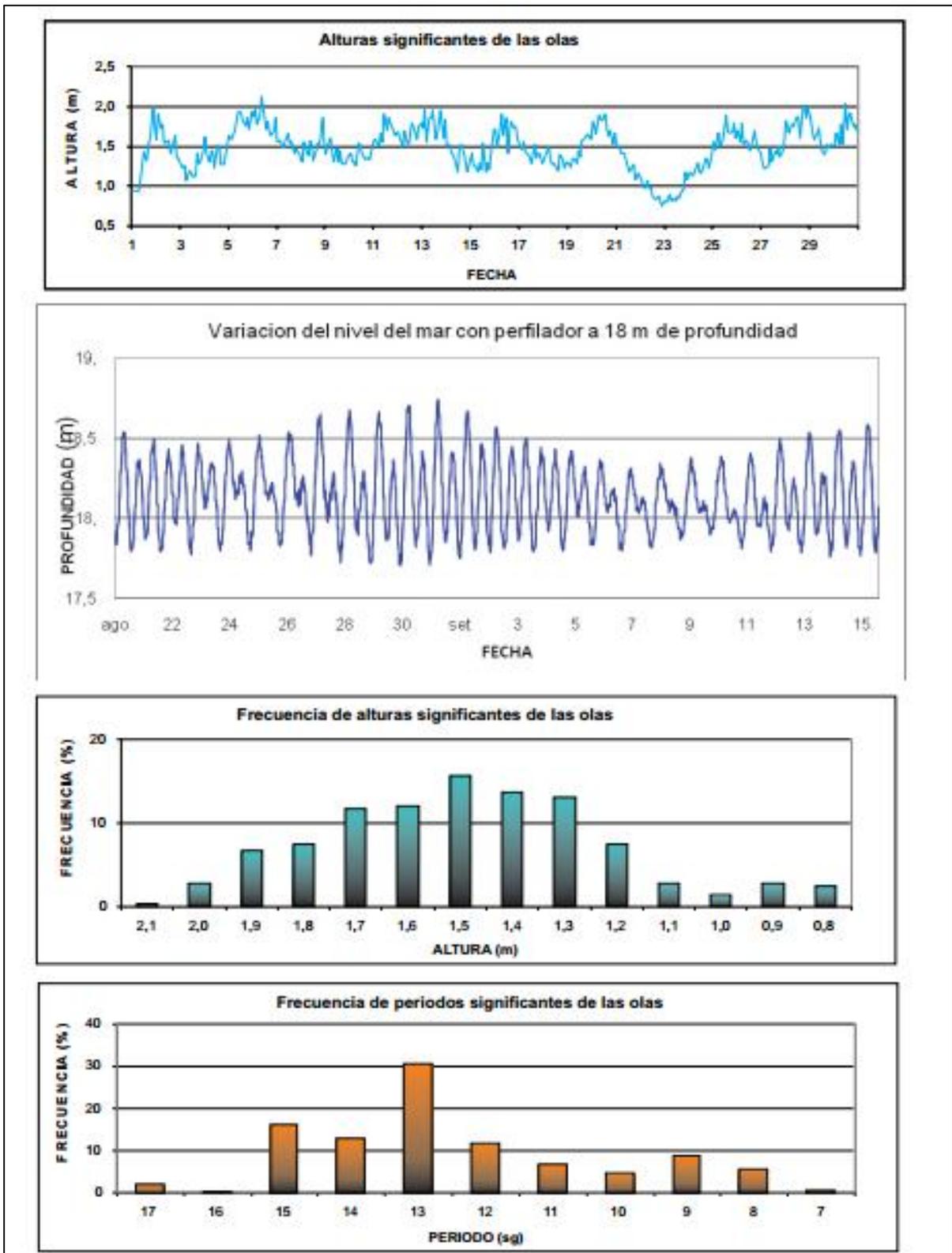


ANEXO 2 Esquema del sistema de las corrientes marinas frente al litoral de Perú.



Fuente: IMARPE

ANEXO 3 Principales parámetros de una ola



ANEXO 4 Registro de campo de las alturas de olas

CLASIFICACIÓN TOTAL DE ALTURAS DE OLAS REGISTRADAS				
Lugar: Puerto de Chancay	Cantidad:	180	N = Cantidad por clase	
	Hs 1.54			
Fecha inicio: 01-Set-2008	Posición:		EN = Suma acumulada	
	Lat.: 11° 35'. 24" S		% = EN x 100	
Fecha final: 30-Set-2008	Long.: 077° 23.7' W		CANT. TOTAL	
ALTURA (m)	N	%	EN	%
2.5	2	1.1	2	1.1
2.4	1	0.6	3	3.76
2.3	1	0.6	4	2.2
2.2	1	0.6	5	2.7
2.1	2	1.1	7	3.9
2.0	2	1.1	9	5.0
1.9	2	1.1	11	6.1
1.8	3	1.7	14	7.8
1.7	2	1.1	16	8.9
1.6	8	4.4	24	13.3
1.5	5	2.8	29	16.1
1.4	7	3.9	36	20
1.3	10	5.6	46	25.6
1.2	10	5.6	56	31.1
1.1	19	10.6	75	41.7
1.0	18	10	93	51.7
0.9	25	13.9	118	65.5
0.8	30	16.7	148	82.2
0.7	19	10.6	167	92.8
0.6	11	6.1	178	98.9
0.5	2	1.1	180	100

ANEXO 5 Tabla de olas para Ilo – Febrero 2015

DIA	HORA	CM	DIA	HORA	CM	DIA	HORA	CM			
1	55	21	11	625	28	21	339	0			
	625	73		1325	84		946	103			
	1155	17		1916	43		1545	7			
	1854	113	12	40	73		2203	119			
2	137	17	12	711	30	22	422	1			
	710	76		1428	87		1038	106			
	1240	14		2048	44		1642	14			
	1933	114	13	147	67		2252	110			
3	215	14	13	813	30	23	506	6			
	751	78		1533	92		1132	107			
	1322	13		2216	39		1744	21			
	2009	114	14	320	64		2343	99			
4	249	12	14	922	28	24	551	12			
	830	80		1633	99		1231	106			
	1401	13		2320	32		1856	28			
	2043	112	15	444	65		25	41	88		
5	321	12	15	1026	23	25	641	19			
	907	82		1727	107		1335	105			
	1439	15		16	10		25	2019	32		
	2115	109	16	545	70		26	148	78		
6	352	13		17	1122	17		27	739	25	
	944	82			1815	115			1443	103	
	1516	18	17		53	17			2141	32	
	2145	105	18	636	77	28	306		73		
7	421	15		19	1215		10	28	846	29	
	1021	82			1901		121		1554	103	
	1552	23	20		135		10		2250	29	
	2215	99		18	723	84	28		423	72	
8	449	18			19	1307		5	28	955	29
	1059	82	1946			126		1658		104	
	1631	28	20	216		5		2346		25	
	2245	93		19	809	92	28				
9	518	22			20	1358		3	28		
	1140	82	20			2031		128		28	
	1714	34		20		257		1			28
	2317	87			20	857	98	28			
10	548	25	20			1451	3		28		
	1228	82		20		2117	125			28	
	1806	39			20						28
	2353	80	20					28			

ANEXO 6 Tabla de olas para Chimbote – Febrero 2015

DIA	HORA	CM	DIA	HORA	CM	DIA	HORA	CM
1	259	102	11	305	54	21	28	39
	906	36		957	101		627	127
	1610	135		1515	72		1217	40
	2233	56		2059	107		1851	143
2	346	103	12	353	53	22	114	39
	946	35		1159	104		720	128
	1645	136		1659	75		1309	49
	2306	54		2207	101		1934	135
3	429	104	13	453	51	23	203	41
	1022	35		1309	110		818	126
	1718	136		1916	72		1409	60
	2337	54		2345	98		2018	125
4	507	105	14	605	48	24	254	45
	1055	37		1358	118		929	124
	1747	136		2020	67		1529	69
5	7	54	15	57	98		2112	115
	541	105		714	44	25	349	49
	1124	40		1442	125		1058	123
	1814	134		2104	60		1713	73
6	34	56	16	157	101		2230	106
	612	105		812	38	26	452	52
	1152	45		1523	133		1219	125
	1837	131		2143	54		1854	73
7	58	56	17	254	106		2357	102
	642	105		903	33	27	601	53
	1221	50		1605	140		1325	127
	1900	127		2221	49		2017	69
8	123	57	18	349	112	28	106	101
	714	104		951	29		708	53
	1252	55		1646	146		1419	130
	1922	123		2301	44		2106	64
9	151	56	19	443	118			
	750	103		1039	29			
	1329	61		1728	149			
	1948	118		2343	41			
10	225	55	20	535	123			
	838	102		1127	33			
	1414	67		1810	148			

ANEXO 7 Tabla de olas para Callao – Febrero 2015

DIA	HORA	CM	DIA	HORA	CM	DIA	HORA	CM
1	357	81	11	410	48	21	133	33
	1011	30		1055	80		725	106
	1708	114		1620	66		1322	34
	2338	50		2157	86		1949	122
2	444	82	12	458	47	22	219	33
	1051	29		1257	83		818	107
	1743	115		1804	69		1414	43
		2305		80	2032		114	
3	11	48	13	558	45	23	308	35
	527	83		1407	89		916	105
	1127	29		2021	66		1514	54
	1816	115			2116		104	
4	42	48	14	43	77	24	359	39
	605	84		710	42		1027	103
	1200	31		1456	97		1634	63
	1845	115		2125	61		2210	94
5	112	48	15	155	77	25	454	43
	639	84		819	38		1156	102
	1229	34		1540	104		1818	67
	1912	113		2209	54		2328	85
6	139	50	16	255	80	26	557	46
	710	84		917	32		1317	104
	1257	39		1621	112		1959	67
	1935	110		2248	48			
7	203	50	17	352	85	27	55	81
	740	84		1008	27		706	47
	1326	44		1703	119		1423	106
	1958	106		2326	43		2122	63
8	228	51	18	447	91	28	204	80
	812	83		1056	23		813	47
	1357	49		1744	125		1517	109
	2020	102			2211		58	
9	256	50	19	6	38			
	848	82		541	97			
	1434	55		1144	23			
	2046	97	1826	128				
10	330	49	20	48	35			
	936	81		633	102			
	1519	61		1232	27			
	2116	92		1908	127			

ANEXO 8 Tabla de olas para Paita – Febrero 2015

DIA	HORA	CM	DIA	HORA	CM	DIA	HORA	CM
1	226	155	11	227	65	21	547	203
	846	46		840	147		1149	22
	1518	168		1423	77		1813	221
	2121	69		2047	158	22	25	29
2	314	161	12	318	69		636	199
	928	41		938	141		1235	32
	1600	176		1518	86	1856	212	
	2201	63		2143	151	23	111	33
3	355	166	13	424	71		727	190
	1005	38		1053	140		1322	46
	1636	183		1637	92	1941	198	
	2236	59		2257	147	24	200	42
4	433	169	14	539	69		820	178
	1038	37		1216	145		1413	62
	1709	186		1813	91	2030	180	
	2309	56	15	19	150	25	253	54
5	507	170		650	62		920	165
	1109	39		1328	157		1511	78
	1739	188	1930	83	2125	163		
	2340	55	16	130	159	26	355	64
6	539	170		751	50		1030	155
	1138	43		1426	173		1625	90
	1807	186	2030	70	2233	150		
7	10	56	17	229	172	27	508	70
	611	167		843	38		1149	151
	1207	48		1516	191		1757	95
	1834	183		2120	57		2355	144
8	40	57	18	321	185	28	626	71
	642	164		932	26		1306	154
	1235	53		1602	207		1921	91
	1901	179		2208	44	19	410	196
9	111	59	19	410	196		1018	19
	716	159		1018	19		1646	218
	1306	60		1646	218		2254	35
	1931	173		2254	35	20	459	202
10	146	62	20	459	202		1103	17
	754	153		1103	17		1729	223
	1341	68		1729	223		2339	29
	2005	166		2339	29			

ANEXO 9 Tabla de olas para Bayovar – Febrero 2015

DIA	HORA	CM	DIA	HORA	CM	DIA	HORA	CM
1	235	146	11	236	65	21	556	194
	855	46		849	138		1158	22
	1527	159		1432	77		1822	212
	2130	69		2056	149	22	34	29
2	323	152	12	327	69		645	190
	937	41		947	132		1244	32
	1609	167		1527	86		1905	203
	2210	63		2152	142	23	120	33
3	404	157	13	433	71		736	181
	1014	38		1102	131		1331	46
	1645	174		1646	92		1950	189
	2245	59		2306	138	24	209	42
4	442	160	14	548	69		829	169
	1047	37		1225	136		1422	62
	1718	177		1822	91		2039	171
	2318	56	15	28	141	25	302	54
5	516	161		659	62		929	156
	1118	39		1337	148		1520	78
	1748	179		1939	83		2134	154
	2349	55	16	139	150	26	404	64
6	548	161		800	50		1039	146
	1147	43		1435	164		1634	90
	1816	177		2039	70		2242	141
7	19	56	17	238	163	27	517	70
	620	158		852	38		1158	142
	1216	48		1525	182		1806	95
	1843	174		2129	57	28	4	135
8	49	57	18	330	176		635	71
	651	155		941	26		1315	145
	1244	53		1611	198		1930	91
	1910	170		2217	44	9		
9	120	59	19	419	187			
	725	150		1027	19			
	1315	60		1655	209			
	1940	164		2303	35			
10	155	62	20	508	193			
	803	144		1112	17			
	1350	68		1738	214			
	2014	157		2348	29			

ANEXO 10 Generación de Energía Eléctrica con Turbinas Wells

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON TURBINAS WELLS

Alfredo Santa*

Marco Lozano**

Alvaro E. Pinilla***

Abstract

The present article, briefly, describes the theoretical design procedure of Wells turbines, typically utilized in Pneumatic Wave Energy Conversion Systems (PWECS). The principle behind the PWECS consists of extracting the pneumatic energy caused by an oscillating water column by the entrance of water waves in enclosed spaces. The paper establishes the design and experimental testing of a small permanent magnet generator suited for the wells turbine under development. The adequate matching between the Wells turbine and the generator has been conceived as a portable 50w d.c. electricity generation device; to be used, either, to powering telecommunications systems in military operations or to power navigation aids in rivers or at sea

Palabras Claves

Turbina Wells, generación de energía, aerodinámica, turbo-maquinaria, Energía de las Olas.

NOTACIÓN

A	Área proyectada por el disco de la turbina
B	Número de aspas
C	Longitud de cuerda del perfil
C_L	Coefficiente de sustentación
C_D	Coefficiente de arrastre
D	Fuerza de arrastre
D_t	Diámetro del disco de la turbina
h	Relación diámetros del cubo y del disco
L	Fuerza de sustentación
P	Presión estática
Q	Flujo
r	radio de la turbina, elemento variable
R	Radio de la turbina
T	Torque
T^*	Número adimensional de torque $T/\rho \cdot \Omega^2 \cdot R^3$
U^*	$U/\Omega R$
U_t	Velocidad rotacional inducida
U	Velocidad de la corriente de aire
V_{EPEC}	Velocidad efectiva

V_{geom}	Velocidad geométrica
W	Potencia
ΔP_o	Caída de presión a través de la turbina ($P_1 - P_2$)
ΔP_o^*	Número adimensional de presión $\Delta P_o/\rho \cdot \Omega^2 \cdot R^2$
α	Ángulo de ataque
φ_o	Ángulo de velocidad efectiva
η	Eficiencia aerodinámica de la turbina
ρ	Densidad del aire bajo condiciones estándar
σ	Solidez de la turbina
Ω	Velocidad rotacional angular
λ	$(\Omega R/U)$ Velocidad específica de rotación

SUBÍNDICES

_{1,2} Condiciones inicial y final

1. INTRODUCCIÓN

La turbina Wells es el dispositivo aerodinámico utilizado en la actualidad para las instalaciones

* Ingeniero Mecánico Universidad EAFIT, Colombia.

** Ingeniero Mecánico Uniandes, Colombia.

*** Profesor Titular Departamento de Ingeniería Mecánica Uniandes, Bogotá-Colombia.

de extracción de Energía de las Olas, o más bien la energía cinética neumática generada por una columna oscilante de agua. Esta turbina utiliza el flujo bi-direccional del aire, comprimido por una columna oscilante de agua; y en consecuencia su diseño implica que opere en un solo sentido de giro independiente del flujo de aire que incida sobre ella. Para conservar el sentido de giro de la turbina, sin importar la incidencia del aire, el rotor se diseña con perfiles aerodinámicos simétricos dispuestos radialmente. [Figura No. 1].

La turbina Wells al igual que otro tipo de turbinas, extrae la energía cinética disponible del aire, sin cambios bruscos en su velocidad de rotación que impliquen grandes aceleraciones y fuerzas aerodinámicas.

Este dispositivo Wells se acopla a un pequeño generador eléctrico de imanes permanentes para la generación de energía eléctrica a 12 Voltios y una capacidad nominal de 50 vatios. Las aplicaciones de este pequeño dispositivo pueden ir desde sistemas portátiles para operaciones militares de telefonía o para la iluminación de boyas marinas, entre otras.

2. DISEÑO AERODINÁMICO

La extracción de energía en el rotor de la turbina, implica un cambio en el momentum angular de la corriente de aire. Este cambio ocurre con la interacción entre el flujo de aire y los alabes simétricos que componen la turbina. El adecuado diseño de esta consiste en que la componente de energía cinética rotacional aguas arriba de la turbina sea lo más reducida posible. Dicha componente rotacional o velocidad inducida (U_i) tiene un efecto directo en el desempeño aerodinámico de la turbina. (Pinilla, 1985)

La teoría utilizada para el diseño aerodinámico de la turbina Wells se basa en la adecuada combinación del análisis del elemento de aspa (Blade Element Theory) y la teoría de momentum. En la figura No. 2 se ilustra el triángulo de velocidades incidentes y las fuerzas aerodinámicas sobre el elemento de aspa. Para la turbina Wells, el ángulo que describe la velocidad efectiva (ϕ_e)

respecto al plano de giro del rotor varía desde el radio del cubo hasta el radio exterior de la turbina.

Para un elemento diferencial de la turbina (dr), la tasa de cambio del momentum angular por la velocidad de rotación (Ω), puede igualarse al diferencial de la potencia extraída por el elemento de aspa. Esta expresión conduce al principio de conservación de la energía por unidad de volumen, expresada como:

$$(P_1 - P_2) - \frac{1}{2} \rho \cdot U_i^2 = \rho \cdot r \cdot \Omega \cdot U, \quad (2.1)$$

Y la potencia extraída por el elemento de aspa será entonces:

$$W_1 - W_2 = U \cdot (2\pi r dr) \left((P_1 - P_2) - \frac{1}{2} \rho \cdot U_i^2 \right) \quad (2.2)$$

El término $(P_1 - P_2) 2\pi r dr \cdot U$ el trabajo entregado por el fluido en la unidad de tiempo. $(\frac{1}{2} \rho \cdot U_i^2) 2\pi r dr \cdot U$, representa la energía cinética rotacional por unidad de tiempo, que se deja en la estela y la cual no se aprovecha en la extracción de energía. (Pinilla, 2001)

2.1. Fuerzas aerodinámicas sobre el perfil

Las fuerzas aerodinámicas de sustentación y arrastre pueden descomponerse en una componente axial (F_x) y una componente tangencial (F_T) (Ver figura No 2). Esta última es la responsable del movimiento rotacional del disco de la turbina.

$$\begin{aligned} F_T &= L \sin \phi_a - D \cos \phi_a \\ F_x &= L \cos \phi_a + D \sin \phi_a \end{aligned} \quad (2.3)$$

En un perfil simétrico la dirección de la componente tangencial (F_T) debe ser la misma para ángulos de ataque positivos y negativos, produciendo un giro en el rotor de la turbina en una única dirección. La componente axial es la fuerza que servirá para el diseño estructural de la turbina. (Raghunathan y Beattie, 1996). La condición de diseño que optimiza la fuerza aerodinámica sobre el elemento de aspa y expresado como fuerza de sustentación y arrastre será entonces:

$$L = \frac{1}{2} \rho \cdot V_{\text{traz}}^2 \cdot c \cdot C_{L_{\text{optimo}}} \quad (2.4)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho \cdot V_{\text{traz}}^2 \cdot c \cdot C_D$$

Combinando las componentes tangencial de la fuerza aerodinámica y la ecuación de energía, expresada como:

$$(P_1 - P_2) = \rho \cdot U \cdot U_i \cdot \cot \varphi_o \quad (2.5)$$

del triángulo de velocidades [Figura No. 2] se puede determinar el ángulo de la velocidad efectiva (φ_o) respecto al plano de rotación de la turbina. (Pinilla, 2001). Este es el primer parámetro para determinar la geometría óptima del aspa de la turbina.

$$\cot \varphi_o = \frac{\Omega r + U_i}{U} \quad (2.6)$$

El diseño óptimo de la turbina considera que la caída de presión a través de la turbina sea constante para cada elemento de aspa. Asegurando esta condición se obtiene la ecuación 2.7, que determina la velocidad inducida (U_i) para cada posición radial:

$$U_i = \frac{P_1 - P_2}{2 \rho \cdot \Omega \cdot r} \quad (2.7)$$

Combinando estas expresiones se obtiene la ecuación de diseño que determina la longitud y distribución de la cuerda óptima a lo largo del aspa. (Pinilla, 2001).

$$\frac{B \cdot c \cdot C_{L_{\text{optimo}}}}{4\pi r} = \Delta P_o \cdot \frac{1}{\sqrt{1+(U_i)^2}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta P_o}{2} \cdot \left(\frac{2+(U_i)^2}{1+(U_i)^2}\right)\right)} \quad (2.8)$$

3. DIMENSIONAMIENTO PRELIMINAR DE LA TURBINA WELLS

3.1. Análisis Dimensional

Para determinar unas dimensiones preliminares del rotor de la turbina se recurre a los resultados reportados en Curran y Gato, 1997, en el cual se obtiene la eficiencia para varios

tipos de rotores Wells. El procedimiento se basa en rotores de 8 aspas radiales con un perfil NACA 0015, con la siguiente geometría:

Tabla No. 1 Dimensiones

(Curran y Gato, 1997)	
Diámetro exterior	590 mm
Diámetro del cubo	400 mm
Cuerda	125 mm
Solidez (σ)	0.640
Velocidad de rotación	2000 rpm

La solidez (σ) del rotor es la relación entre el área ocupada por las aspas y el área total descrita por el mismo. Para el caso de la turbina Wells este valor puede calcularse a través de:

$$\sigma = \frac{2 \cdot B \cdot c}{\pi \cdot D_o \cdot (1+b)} \quad (2.9)$$

La solidez del rotor varía con el recíproco del cuadrado de la velocidad específica (U^*) de diseño. (Pinilla, 1985) Es decir, cuando se requiere una alta velocidad para extraer energía, se requieren valores pequeños de solidez. Otra característica es que el torque de arranque aumenta con el incremento de la solidez, de allí el compromiso de balancear estas características para obtener un diseño óptimo de turbina.

Realizando un análisis adimensional, se pueden determinar 4 grupos que tipifican el funcionamiento de la turbina. Estos grupos son función de la densidad del fluido, velocidad del aire, diámetro del rotor, caída de presión, velocidad angular, potencia extraída y torque. Estos números se convierten en los parámetros conocidos inicialmente en el diseño del sistema.

La eficiencia de la turbina puede ser determinada a través de la relación entre la potencia extraída y la energía neumática disponible.

$$\eta = \frac{T \cdot \Omega}{Q \cdot \Delta P_o} \quad (2.10)$$

Los valores obtenidos en el experimento de la referencia para los parámetros adimensionales en estudio, son determinados en el punto máximo de eficiencia obtenida para la turbina y mostrados en la tabla No 2.

Para el valor obtenido de eficiencia, se produjo una velocidad en la corriente de aire de 9.30 m/s, un flujo de 1.37 m³/s, una caída de presión de 2362 Pa, un torque en el disco de 7.35 N.m para una potencia útil de 1924 W. (Curran y Gato, 1997).

Tabla No. 2 Resultados
(Curran y Gato, 1997)

ΔP_o^*	0.330
T^*	0.04
U^*	0.120
η^*	59,5%

3.2. Diseño de la geometría preliminar

Con los parámetros adimensionales del estudio anterior, se realizó un procedimiento de similitud geométrica representado en el aseguramiento de la solidez (s) y la relación de diámetros. Como primera aproximación se elige un diámetro del rotor de 300 mm para una velocidad de rotación de 3000 rpm.

Para las condiciones atmosféricas de Bogotá con una densidad de 0.950 Kg/m³ a 2600 m, los resultados de diseño preliminares para la turbina son los siguientes:

Tabla No. 3 Resultados propuestos

Diámetro exterior	300 mm
Diámetro del Cubo	204 mm
Cuerda	63 mm
Torque	0.285 Nm
Potencia	89.47 W
Caída de presión	708.83 Pa
Velocidad aire	5.65 m/s
Caudal de aire	0.215 m ³ /s
Energía neumática	152.32 W
Eficiencia Global	59.8%

La relación que se presenta entre la velocidad de rotación y potencia generada, para el rotor propuesto se presenta en la figura No. 3.

Se conserva el número de aspas para mantener el torque de arranque necesario. La disposición de las aspas puede ser de manera rectangular o por sectores, la ventaja de las aspas sectoriales

radica en la concentración del flujo en el diámetro exterior, lo cual se refleja en una rápido arranque. [Figura No. 5]

Entre más delgado sea el perfil aerodinámico, su relación sustentación-arrastre óptimos aumenta para un determinado número de Reynolds. Se elige un perfil NACA 0018 con una relación C_L/C_D de 37.2 que se presenta a un ángulo de ataque de 8° y su número de Reynolds de 160000. [Figura No. 4].

3.3. Adecuación geometría preliminar

Con los resultados mostrados en los parámetros adimensionales, se optimiza la geometría del rotor de la turbina con ayuda de las ecuaciones teóricas de la sección 2. Se conserva la consideración inicial de un rotor de 8 aspas, con una velocidad angular de 3000 rpm.

Se obtienen los valores de la velocidad inducida (U_i), ángulo de ataque ($\alpha = \phi_o$), factor de diseño ($B \cdot C \cdot CL_{optimo} / 4pr$), número de flujo (U^*) y velocidad efectiva de la corriente de aire en cualquier elemento de aspa para determinada posición radial. [Tabla No.4].

La velocidad inducida (U_i) al igual que el ángulo (ϕ), son mayores en el cubo y varían hasta un mínimo en la punta, este comportamiento produce una velocidad efectiva mayor en la punta. De igual manera la geometría del perfil representada en la longitud de cuerda, muestra un valor menor en el cubo hasta un máximo en la punta. Este tipo de aspas es conocido como sectorial, y optimiza la extracción de la potencia disponible en la corriente de aire. [Figura No. 5].

La desventaja de las aspas sectoriales radica en su fabricación. Otra opción de construcción consistiría en un diseño simplificado conformado por una aspa rectangular con una longitud de cuerda media. [Figura No. 6].

4. DISEÑO DEL GENERADOR

La energía mecánica rotacional suministrada por la turbina debe ser transformada a energía eléctrica a través de un generador eléctrico. Se optó por diseñar un generador de imanes permanentes el cual tiene un menor volumen y peso

en comparación a una máquina tradicional equivalente. (Patrick y Stephen, 1996).

Este generador se debe ajustar a los requerimientos de la turbina, tales como: bajo torque de arranque y generación de potencia entre 50 -100 W. [Figura No. 7].

4.1. Diseño del embobinado

El generador consta de una parte estática conformada por un núcleo magnético y 8 bobinas dispuestas simétricamente alrededor del núcleo. La parte giratoria es constituida por un volante de motocicleta NIPON DENSO, el cual contiene (4) imanes dispuestos radialmente.

El voltaje inducido en el devanado depende del número de vueltas de cada una de las bobinas, el material del núcleo y la velocidad relativa entre el devanado y el campo. Para obtener un voltaje suficiente en el devanado, el generador debe tener la máxima cantidad posible de bo-

binas y vueltas en cada una de ellas. Considerando las condiciones geométricas del volante, se disponen 8 bobinas con 16 vueltas cada una; dos bobinas por cada polo del volante. [Foto No. 1]

Cada bobina se fabrica con alambre de cobre esmaltado AWG No. 19, con un diámetro de 0.912 mm, y una capacidad máxima de corriente de aproximadamente 12 A. Estas se disponen en un núcleo fabricado con láminas de acero al silicio con alta permeabilidad magnética. Debe tenerse en cuenta que las principales pérdidas en una máquina eléctrica se deben a las producidas en el núcleo y al cobre del devanado. (Wallace y Rodríguez, 2000)

La eficiencia del generador se ve influenciada en primera medida, por el entrehierro que existe entre el núcleo y el campo magnético. Esta distancia en el generador diseñado tiene aproximadamente 1.20 mm. (radiales)

Tabla No. 4 Resultados óptimos (Pinilla, 2001)

r (mm)	$V_T = \Omega r$ (m/s)	u_t (m/s)	α_0 (grados)	V_{atc} (m/s)	U^*	C. DISEÑO	c(mm)
102 ¹	32,044	11,642	7,375	44,051	0,176	0,2486	54,03
107	33,552	11,119	7,215	45,028	0,169	0,2489	56,83
112	35,060	10,641	7,054	46,050	0,161	0,2491	59,22
116	36,568	10,202	6,894	47,111	0,155	0,2493	61,82
121	38,076	9,798	6,737	48,207	0,149	0,2494	64,41
126	39,584	9,425	6,582	49,334	0,143	0,2496	67,00
131	41,092	9,079	6,431	50,489	0,138	0,2497	69,59
136	42,600	8,758	6,283	51,668	0,133	0,2499	72,18
140	44,108	8,458	6,140	52,869	0,128	0,2500	74,77
150 ^c	47,124	7,917	5,866	55,330	0,120	0,2502	79,94

4.2. Generación de Corriente

Cuando una carga externa es conectada al devanado del generador un circuito cerrado se completa, permitiendo la circulación de una corriente. Es importante recordar que el disco de turbina Wells diseñado estará sometido a un flujo de aire oscilante que implicará en el generador un voltaje a una frecuencia variable. Esta consideración obliga a la utilización de un rectificador a la salida del generador para lograr un voltaje de naturaleza continua.

El voltaje en el generador diseñado es rectificado inicialmente con una conexión de diodos tipo puente de onda completa con una capacidad máxima de 25 A. La onda de voltaje obtenida en las terminales (3 y 4) del puente es directa, la cual debe ser corregida a una onda lo

más uniforme posible. Para obtener un voltaje continuo, se colocan dos condensadores de 6800 mF y 4700 mF conectados en paralelo a la salida del puente rectificador.

4.3. Montaje experimental

Para caracterizar el funcionamiento del generador se diseña una carga eléctrica conformada por 3 bombillos de alta de automóvil dispuestos en paralelo, con el fin de obtener una corriente eléctrica por cada una de las líneas.

El generador es montado en un torno mecánico con valores fijos de velocidad entre 60 a 2245 RPM, verificando este valor con un tacómetro de luz estroboscópica. El objetivo de este montaje es determinar la potencia extraída del generador, obtenida por la corriente total que cir-

cula por el circuito eléctrico y el voltaje a la salida del puente de rectificación. [Foto No. 2]

Finalmente se mide el voltaje en el dominio del tiempo con ayuda de un osciloscopio, para determinar el comportamiento de sus ondas dentro del sistema.

4.4. Resultados obtenidos

En un generador de imanes permanentes la velocidad de giro del campo magnético es conocida como la velocidad sincrónica de rotación y es determinada fácilmente por:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (2.11)$$

Donde:

- n_s : Velocidad sincrónica de rotación (RPM)
- f : Frecuencia del sistema (Hz)
- p : Número de polos (4)

La frecuencia medida de la onda de voltaje es de 84.7 Hz; considerando la ecuación anterior se obtiene un valor de velocidad sincrónica de 2541 RPM, valor que es cercano a la velocidad de giro del volante del generador. El comportamiento de la onda final de voltaje se acerca a la forma deseada con pequeñas fluctuaciones que deberán ser corregidas posteriormente.

El voltaje se reduce a medida que la carga en el sistema aumenta, considerando sólo la rectificación en el puente de onda completa el valor máximo obtenido es de 10.58 VDC. Este valor puede aumentarse con la adición de los condensadores a la salida del puente rectificador. [Figura No. 8] La potencia máxima extraíble es de 60.51 W para un valor de 9.10 VCC y una corriente total en el sistema de 6.65 A. [Figura No. 9]

Para producir una velocidad de giro de 2500 RPM en el disco preliminar de la turbina Wells, se requiere una potencia mecánica de 51.78 W. Comparando con los resultados de la potencia eléctrica del generador, sería posible utilizar el generador para alcanzar el objetivo de 50 W eléctricos. El exceso de potencia eléctrica podría ser utilizado para optimizar el diámetro exterior del disco o su velocidad de giro.

5. INVESTIGACIÓN FUTURA

Los conocimientos teóricos y experimentales hasta el momento enmarcan el adecuado acople y diseño del disco preliminar de la turbina y el generador requerido para extraer la potencia eléctrica necesaria de 60 W.

5.1 Optimización del generador y de la turbina

Con los resultados preliminares del generador se debe optimizar la geometría del rotor de la turbina con el fin de definir la geometría del modelo. En esta etapa se define la construcción del rotor y los experimentos que permitirán el refinamiento del modelo teórico y la obtención de parámetros adimensionales.

Esta etapa igualmente caracteriza el desempeño mecánico del generador, determinado por curvas de torque y el comportamiento frente a variaciones en la velocidad del rotor. Variaciones que se presentan por las oscilaciones en el flujo de aire a través de la turbina.

5.2 Diseño final y adecuación

La etapa final consiste en la construcción del dispositivo sugerido con la adecuación del generador eléctrico y el dispositivo de suministro de aire por medio de un fuelle. Este último involucra los límites ergonómicos, las condiciones de los equipos a los cuales se suministra energía, y el desarrollo de un modelo económico para su inmediata o futura implementación.

La construcción del sistema propuesto, genera una base preliminar de conocimiento en nuestro país para implementar y diseñar futuros sistemas de conversión de energía a pequeña escala bajo el principio de turbinas Wells, principalmente en zonas remotas del país.

6. CONCLUSIÓN

Los resultados experimentales obtenidos del generador eléctrico muestran la posibilidad de extraer una potencia de 60 W a 2545 rpm. Los cálculos teóricos preliminares para dimensionar la turbina Wells muestran una potencia requerida de 51.78 W para producir un giro de 2500 rpm. Los resultados teóricos y experimentales

se encuentran bien encaminados para realizar el acople más adecuado de los elementos para la construcción del dispositivo final.

Vale la pena mencionar que este trabajo es el resultado de la primera parte de una tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica (Santa) con el apoyo de un estudiante en su proyecto de grado (Lozano). El desarrollo del dispositivo completamente probado en el laboratorio se culminará a mediados del mes de Mayo de 2002.

7. REFERENCIAS

1. Curran, R., Gato, L.M.C. The Energy conversion of several types of Wells turbine designs. Proc. Instn. Mech. Engrs, Part A, 1997, 211, 133-145.
2. Dunn, P.D. Renewable Energies: Sources, Conversion and Application. IEE energy series Vol. 2, Peter Peregrinus Ltd., 1986, 290-336.
3. Pinilla, Alvaro E., Wind Powered Pumping Systems for Colombia. Ph. D. Thesis, Reading University, 1985, 43-66.
4. Pinilla, Alvaro E., Diseño de turbina Wells. Documento Interno de Trabajo, Universidad de los Andes, 2001, Bogotá.
5. Patrick, R., Dale, Stephen, W., Fardo. Rotating electrical machines and power systems. Prentice Hall, second edition, 1996.
6. Raghunathan, S., Beattie, W.C. Aerodynamic performance of contra-rotating Wells turbine for wave energy generation. Proc. Instn. Mech. Engrs, Part A, 210, 1996.
7. Sharpe, D., J. Layman's Guide to the aerodynamics of Wind Turbines. Wind energy conversion, 1988, 229-242.
8. Wallace, C., Rogel, Rodríguez, E., Alejandro. Diseño de un generador de flujo axial con imanes permanentes para aplicaciones eólicas. Revista facultad de Ingeniería, U.T.A. Chile. Vol.7, 2000.

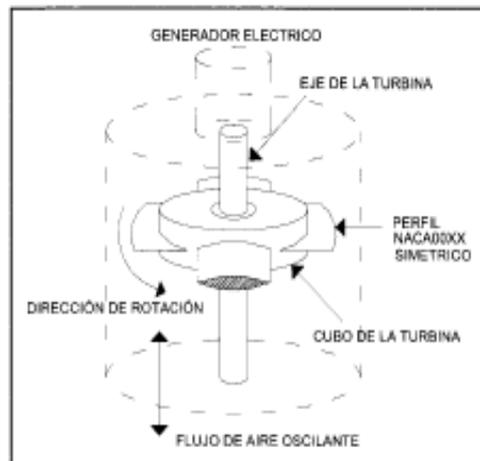


Figura No. 1 Diagrama esquemático de una turbina Wells

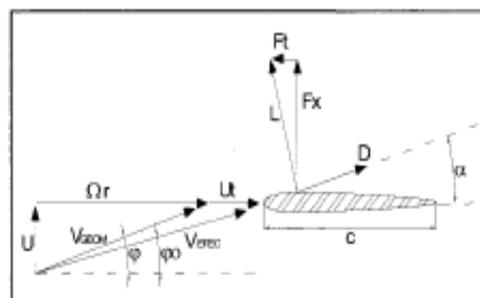


Figura No. 2 Velocidades y fuerzas aerodinámicas sobre perfil. (Pinilla, 1985)

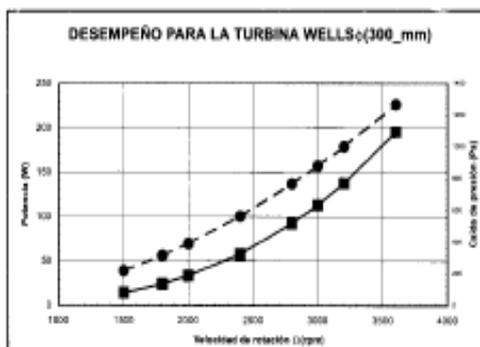


Figura No. 3 Relación entre la velocidad angular y potencia generada

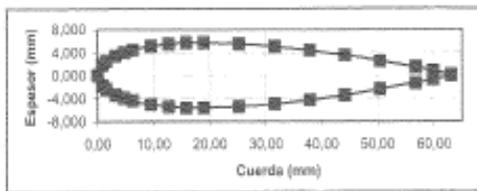


Figura No. 4 Perfil NACA0018 para una cuerda de 63 mm

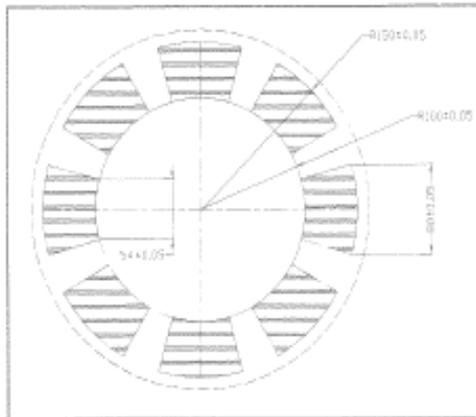


Figura No. 5 Disco de turbina optimizado por sectores

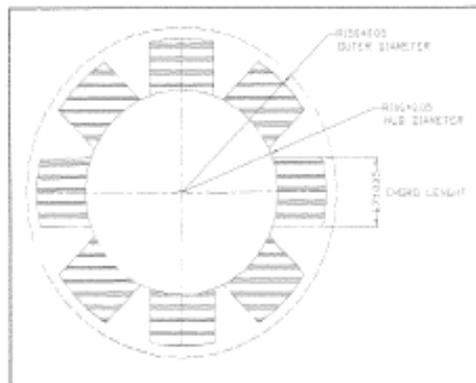
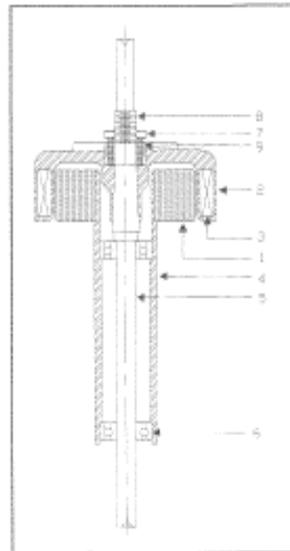
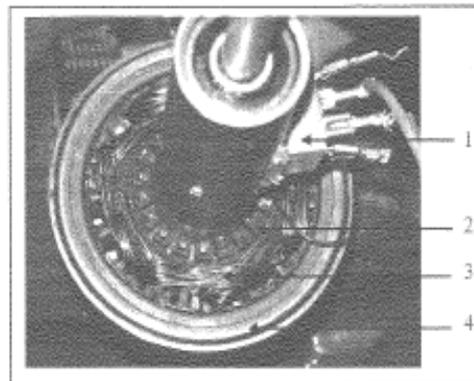


Figura No. 6 Geometría simplificada de la turbina



1. Estator (Devanado)
2. Rotor implementado por volante de motocicleta (Campo)
3. Imán permanente
4. Estructura principal del estator
5. Eje del rotor en material SAE 4340
6. Rodamiento 6201 2RS
7. Tuerca de fijación 3/4"
8. Rosca externa para fijación del rotor 1/2" NF
9. Buje aseguramiento f 21.6 x 15.6 mm

Figura No. 7 Diagrama del generador diseñado



1. Puente de rectificación
2. Núcleo o entrehierro
3. Bobinas
4. Volante

Foto No. 1 Partes Físicas del generador

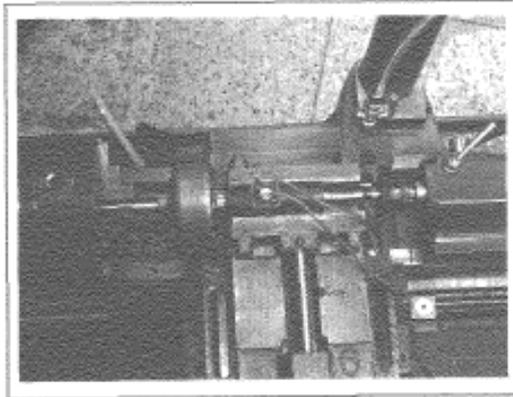


Foto No. 2 Montaje experimental del generador.

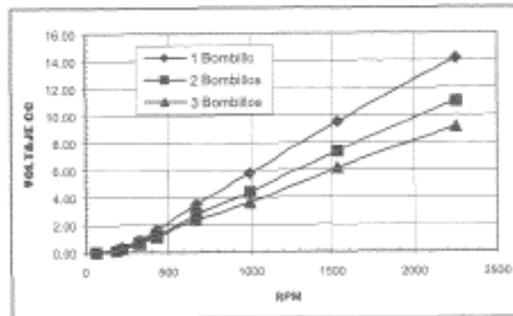


Figura No. 8 Comportamiento del voltaje inducido

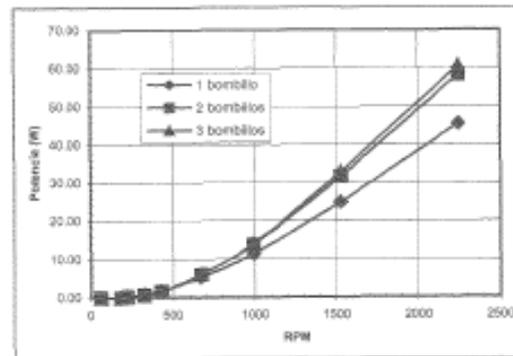


Figura No. 9 Comportamiento de la potencia generada

ANEXO 11 Encuesta de opinión

<u>ENCUESTA</u>			
Objetivo: Determinar la viabilidad de la implementación de un sistema de energía undimotriz en función a la opinión técnica (especialistas) y pública.			
I. Datos del encuestado			
Género:		Edad:	
Ocupación:		Zona donde vive:	
II. Preguntas:			
1. ¿Tiene usted conocimiento acerca de los efectos en el ambiente ocasionados por la utilización de combustibles fósiles (petróleo, gasolina, etc.) en la generación de energía eléctrica?			
a) Si		b) No	
2. ¿Sabía usted que existen formas de generar energía que no generan daños en el ambiente?			
a) Si		b) No	
3. ¿Conoce o tiene conocimiento sobre la capacidad de las olas del mar para generar energía, la llamada "Energía Undimotriz"?			
a) Si		b) No	
4. Si la respuesta fue afirmativa a la pregunta anterior, ¿Considera usted que se deben implementar proyectos del estado y/o empresa privada para generar energía undimotriz?			
a) Si		¿Por qué?	
		a) Generaría la disminución de emisión de gases contaminantes a la atmósfera.	
		b) Disminuiría los daños al ser humano ocasionado por el uso de fuentes de energías tradicionales.	
		c) A mediano y largo plazo se reduciría el costo que genera el uso de energías tradicionales.	
		d) Representa una forma de aprovechamiento de la capacidad del litoral marino peruano.	
b) No		¿Por qué?	
		a) Representa altos costos de inversión.	
		b) Involucraría la adecuación de la tecnología actual a la energía undimotriz.	
		c) El Perú no está preparado técnicamente para el uso de este tipo de generación de energía.	

ANEXO 12 Tablas y gráficos de los resultados obtenidos en la encuesta de opinión

OPINIÓN PÚBLICA

I. Datos Personales

Género

Masculino	Femenino	Total
15	22	37

Ocupación

Opciones	Cantidad
Ama de casa	7
Independiente	5
Estudiante	9
Jubilado	2
Obrero	4
Emplado	8
Otros	2
Total	37

Zona donde vive

Opciones	Cantidad
Lima centro	7
Lima sur	15
Lima este	10
Lima norte	5
Total	37

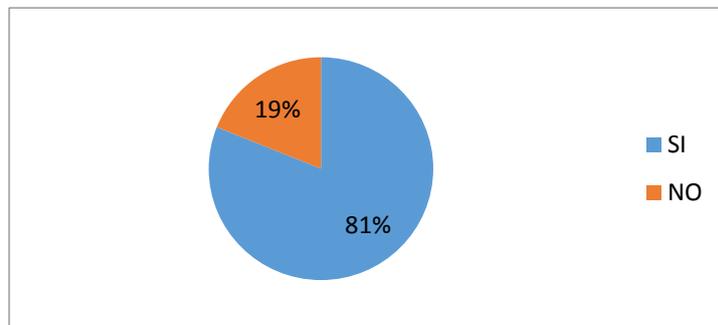
Edad

Rango de opciones	Cantidad
15-25 años	4
25-35 años	7
35-45 años	15
45-55 años	7
55-65 años	4
Total	37

II. Preguntas

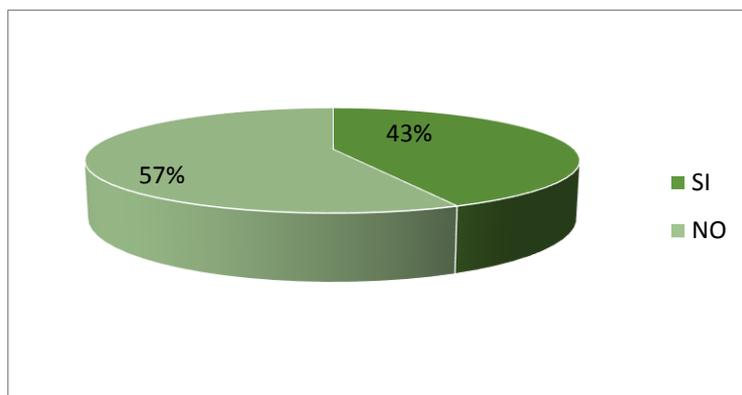
1. ¿Tiene usted conocimiento acerca de los efectos en el ambiente ocasionados por la utilización de combustibles fósiles (petróleo, gasolina, etc.)?

Opciones	Cantidad
SI	30
NO	7
TOTAL	37



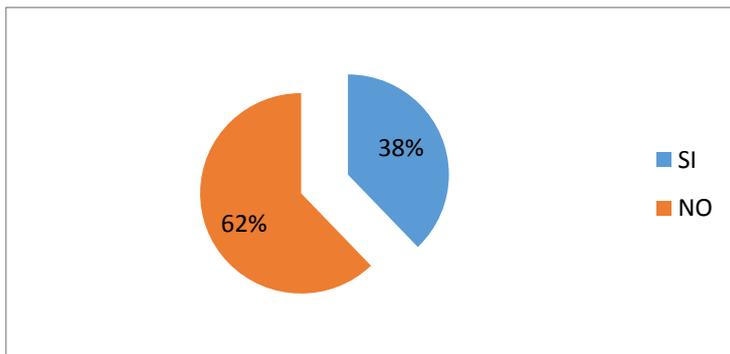
2. ¿Sabía usted que existen formas de generar energía que no generan daños en el ambiente?

Opciones	Cantidad
SI	16
NO	21
TOTAL	37



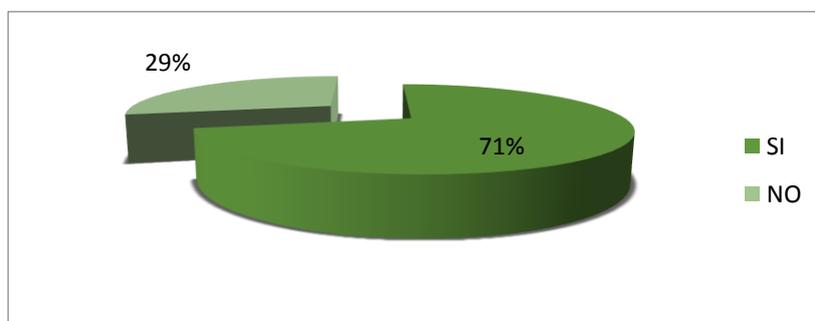
3. ¿Conoce o tiene conocimiento sobre la capacidad de las olas del mar para generar energía, la llamada “Energía Undimotriz”?

Opciones	Cantidad
SI	14
NO	23
TOTAL	37



4. Si la respuesta fue afirmativa a la pregunta anterior, ¿Considera usted que se deben implementar proyectos del estado y/o empresa privada para generar energía undimotriz?

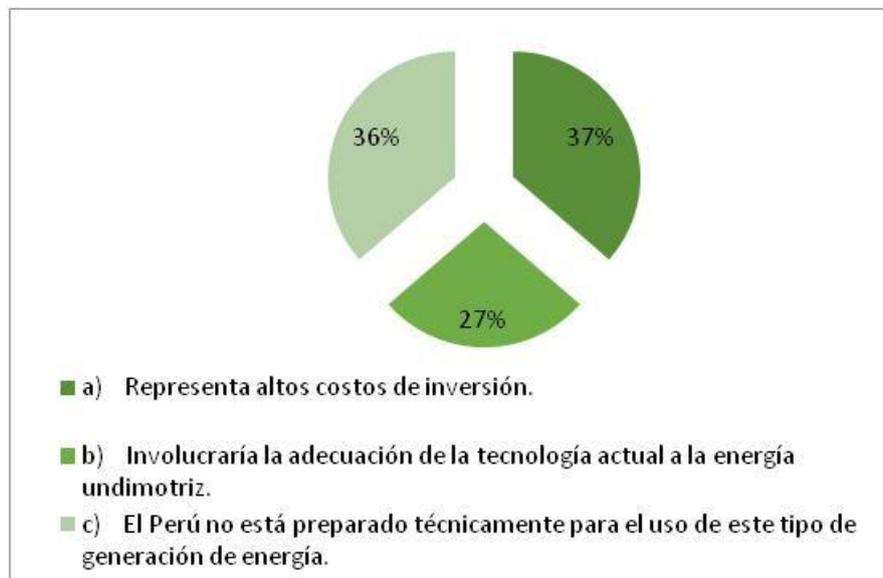
Opciones	Cantidad
SI	10
NO	4
TOTAL	14



Respuesta Afirmativa	
Opciones	Cantidad
a) Generaría la disminución de emisión de gases contaminantes a la atmósfera.	10
b) Disminuiría los daños al ser humano ocasionado por el uso de fuentes de energías tradicionales.	9
c) A mediano y largo plazo se reduciría el costo que genera el uso de energías tradicionales.	5
d) Representa una forma de aprovechamiento de la capacidad del litoral marino peruano.	8
Total	32



Respuesta Negativa	
Opciones	Cantidad
a) Representa altos costos de inversión.	4
b) Involucraría la adecuación de la tecnología actual a la energía undimotriz.	3
c) El Perú no está preparado técnicamente para el uso de este tipo de generación de energía.	4
Total	11



OPINIÓN ESPECIALIZADA

I. Datos Personales

Ocupación	
Opciones	Cantidad
Técnico	16
Profesional	8
Estudiante	10
Otros	2
Total	36

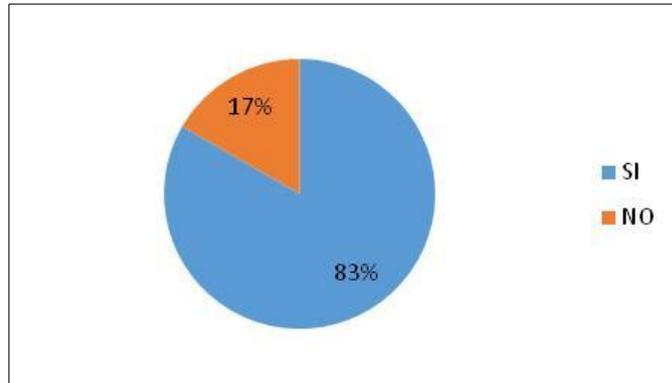
Zona donde vive	
Opciones	Cantidad
Lima centro	6
Lima sur	13
Lima este	9
Lima norte	8
Total	36

Edad	
Rango de opciones	Cantidad
15-25 años	4
25-35 años	9
35-45 años	11
45-55 años	6
55-65 años	6
Total	36

II. Preguntas

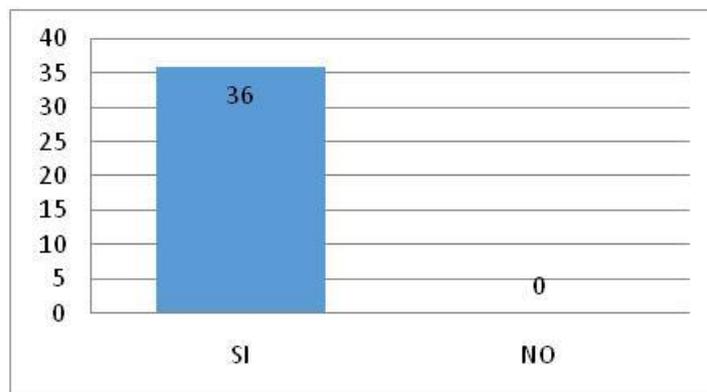
1. ¿Tiene usted conocimiento acerca de los efectos en el ambiente ocasionados por la utilización de combustibles fósiles (petróleo, gasolina, etc.)?

Opciones	Cantidad
SI	30
NO	6
TOTAL	36



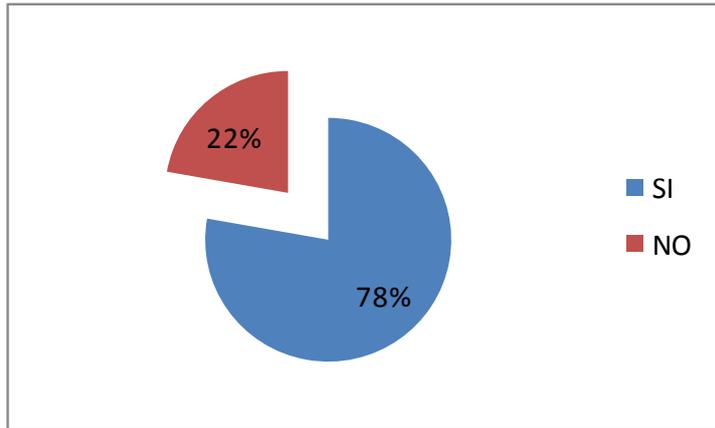
2. ¿Sabía usted que existen formas de generar energía que no generan daños en el ambiente?

Opciones	Cantidad
SI	36
NO	0
TOTAL	36



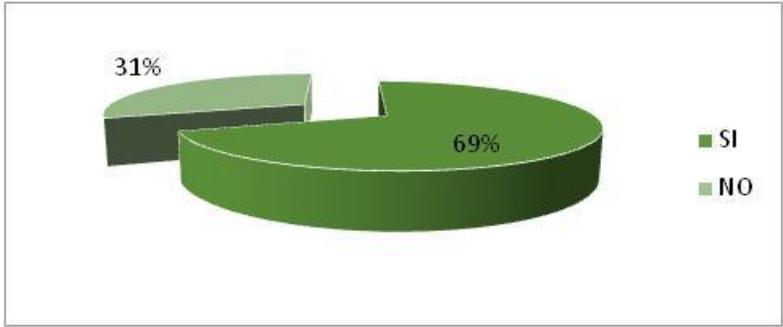
3. ¿Conoce o tiene conocimiento sobre la capacidad de las olas del mar para generar energía, la llamada “Energía Undimotriz”?

Opciones	Cantidad
SI	28
NO	8
TOTAL	36



4. Si la respuesta fue afirmativa a la pregunta anterior, ¿Considera usted que se deben implementar proyectos del estado y/o empresa privada para generar energía undimotriz?

Opciones	Cantidad
SI	25
NO	11
TOTAL	36



Respuesta Afirmativa	
Opciones	Cantidad
a) Generaría la disminución de emisión de gases contaminantes a la atmósfera.	25
b) Disminuiría los daños al ser humano ocasionado por el uso de fuentes de energías tradicionales.	23
c) A mediano y largo plazo se reduciría el costo que genera el uso de energías tradicionales.	11
d) Representa una forma de aprovechamiento de la capacidad del litoral marino peruano.	25
Total	84



Respuesta Negativa	
Opciones	Cantidad
a) Representa altos costos de inversión.	11
b) Involucraría la adecuación de la tecnología actual a la energía undimotriz.	9
c) El Perú no está preparado técnicamente para el uso de este tipo de generación de energía.	4
Total	24

