

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA APORTADA POR EL OLEAJE COTIDIANO MARÍTIMO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por el Bachiller:

Héctor L. Borges F.

Para optar al Título de

Ingeniero Civil

Caracas, 2008.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA APORTADA POR EL OLEAJE COTIDIANO MARÍTIMO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Tutor:

Roberto Savelli

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por el Bachiller:

Héctor L. Borges F.

Para optar al Título de
Ingeniero Civil

Caracas, 2008.

ACTA

El día viernes, 30/05/2008 se reunió el jurado formado por los profesores:

Sovelli, Roberto

MEDINA, YURI

ARCAYA, SIMENA

Con el fin de examinar el trabajo especial de grado titulado:
**"APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA APORTADA POR EL OLEAJE
COTIDIANO MARÍTIMO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA".**
Presentado ante la Ilustre Universidad Central de Venezuela para optar al Título
de **INGENIERO CIVIL.**

Una vez oída la defensa oral que los bachilleres hicieron de su Trabajo Especial
de Grado, este jurado decidió las siguientes calificaciones:

NOMBRE	CALIFICACIÓN	
	Números	Letras
Br. Héctor Luis Borges Figueredo	19	DIEZ Y NUEVE

Recomendaciones:

FIRMAS DEL JURADO

[Firma]

[Firma]

[Firma]

Caracas, 30 de mayo de 2008

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a la ilustre Universidad Central de Venezuela por haberme formado y preparado para ser un profesional y darle la cara a la nueva vida que se me viene. Dicho agradecimiento se extiende a cada uno de los profesores que tuve en todos los cursos, algunos los califique de buenos, otros de malos, pero de alguna manera u otra aprendí de todos, no solo sobre la carrera, también acerca de la vida.

Al tutor de este trabajo, el Ingeniero Roberto Savelli, por haberme asignado tan interesante tema, por ayudarme en su elaboración, y por haber sido mi profesor en el módulo de costas y puertos, me siento muy identificado con este modulo, nací cerca del mar, me crié cerca del mar, me gusta el mar, y me regreso para mi mar.

Quiero agradecer a mi familia, mi padre, mi madre, mi hermana, primos, tíos, abuelos, gracias por el apoyo y las enseñanzas que me dieron y la que me seguirán dando.

Raquel, hermana mayor, madre, ¿quién sabe?, me diste confianza, me dijiste que no temiera, me dijiste que siempre ibas a estar ahí y así lo hiciste, gracias.

Cristina, me ayudaste en mi soledad en Caracas, me ayudaste con las tablas en los informes aunque las ponía rosadas jaja, me ayudas a querer superarme, me ayudaste hasta en esta tesis, espero me sigas ayudando en lo que necesite, extendiendo este agradecimiento a su amable familia.

Profesora Milagros Lara, que bueno que usted no se le olvido que son los estudiantes, que sienten y que necesita, siempre a la orden para ayudarnos en todo, ojalá muchos sigan sus pasos que deja marcados, usted explica con su

comportamiento que un profesor debe ser un amigo y no un enemigo, o la persona del otro lado del escritorio.

A mis amigos de la universidad, porque todos sufrimos y celebramos juntos y me ayudaron a disfrutar la vida universitaria, Alejandro, Vanner, Simón, Joannys, Jaime Gabriel.

A mis amigos de toda la vida, Antonio, Andrés, José Ramón, Juan José, espero que siempre sigamos compartiendo.

RESUMEN

Borges Figueredo, Héctor Luis

APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA APORTADA POR EL OLEAJE COTIDIANO MARÍTIMO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Roberto Savelli.

**Trabajo Especial de Grado. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería.
Escuela de Ingeniería Civil. 2008, 109 páginas.**

Palabras Claves: Energía, Alternativa, Eléctrica, Oleaje, Costa.

A lo largo de las costas venezolanas se presenta una problemática generalizada, la deficiencia del servicio eléctrico en sus comunidades. En un mundo cambiante cada vez más orientado hacia la conciencia humana, hacia la conservación del ambiente, con el tema de las energías alternativas sobre la palestra, se propuso en el Trabajo Especial de Grado, la explotación de la energía brindada por el oleaje para mitigar la situación presentada en las costas. La tecnología es conocida como energía undimotriz.

Por lo antes mencionado se propuso localizar el lugar en las costas venezolanas con el mayor potencial para la implementación del sistema de aprovechamiento de la mencionada energía, a través del estudio de variables de relevancia como: oleaje predominante, morfología costera, cantidad de habitantes, calidad de servicio eléctrico, vías de comunicación, y cualquier otra que resultara pertinente para la investigación.

Los objetivos pautados al inicio de la investigación se lograron mediante la aplicación de una metodología que incluyó los siguientes aspectos: 1) Se clasificó la costa venezolana en sectores; 2) Se determinó, para cada sector, la locación con mayor potencial para la implementación del sistema; 3) Se definió entre una lista, la localidad más idónea de nuestras costas para implementar el sistema y se recomendaron lugares adicionales por intereses de soberanía nacional y desarrollo turístico; 4) Se investigó acerca de los adelantos en esta tecnología; y 5) Se planteó la estructura contentiva del sistema.

De la investigación ejecutada, resultó que el municipio Páez, en el estado Zulia, resultó ser la población idónea para implementar una planta undimotriz, por poseer una excelente condición de altura de oleaje, con un porcentaje de ocurrencia alto, y tener una gran deficiencia en el suministro de servicio eléctrico, además es una población fronteriza con la República de Colombia; lo que califica la zona como de interés para el resguardo del Territorio Nacional; aunado al hecho que pudiera servir como apoyo para el desarrollo de la zona que actualmente se encuentra despoblada, existiendo centros poblados dispersos y distantes entre si.

Mediante la investigación a través de las páginas WEB de Internet (principal fuente de información, considerando lo novedoso del sistema que actualmente y a nivel mundial, está pasando de la fase de investigación a aplicación), se encontró que Europa es la región con más adelantos en este tema, aunque aún no se tenga conocimiento de alguna planta undimotriz en pleno funcionamiento. Se encontraron distintos tipos de sistemas para el aprovechamiento del oleaje, el que se recomendó para el municipio Páez es el de boyas oscilantes colocado en aguas profundas, propuesto por la compañía española denominada *Hidroflot s.l.*

Como resultado del análisis de los sistemas existentes, es importante que la estructura mantenga al sistema siempre en sitio, sea flexible y a la vez resistente para poder soportar los embates del mar, y evitar la pérdida de los equipos de tan elevado costo. Se planteó el uso de sistema de boyas con cadenas o cables de acero, además de un sistema de inundación y sumergimiento en el lecho marino del sistema, para minimizar los efectos producidos por temporales.

ÍNDICE

ACTA.....	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN	vi
ÍNDICE	ix
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE FOTOS	xv
LISTA DE GRÁFICAS	xvi
LISTA DE TABLAS.....	xvii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	3
FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.2. OBJETIVOS.....	5
1.2.1. Objetivo General:.....	5
1.2.1. Objetivos Específicos:	5
LIMITACIONES	6
CAPÍTULO II	7
MARCO TEÓRICO.....	7
MARCO TEÓRICO	8
2.1. OLEAJE.....	12
2.1.1. Origen.....	12

2.1.2. Tipos de oleaje	14
2.1.3. Clima de oleaje	22
2.1.4. Derivación del oleaje (McCormick, 1973)	22
2.1.5. Teoría Lineal.....	26
2.1.6. Energía	28
2.2. MAREA (Brown, 1989).....	29
2.2.1. Origen.....	29
2.2.2. Tipos de marea.....	30
2.3. BATIMETRÍA (Wikipedia Foundation Inc., 2001).....	33
2.4. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS (Ippen, 1966)	35
2.4.1. Tipos de transportes	36
CAPÍTULO III	38
MÉTODO.....	38
CAPÍTULO IV	53
RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	53
4.1. Caracterización de las costas venezolanas.	54
4.2. Evaluación de zonas costeras según su deficiencia de energía eléctrica. .	66
4.3. Determinación de las zonas costeras idóneas para la implementación de plantas de energía undimotrices.....	81
4.4. Características del sistema undimotriz.	84
CAPÍTULO V	103
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	103
CONCLUSIONES	104

RECOMENDACIONES.....	106
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
BIBLIOGRAFÍA	109

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Aproximación del oleaje a la costa.....	13
Figura 2. Ilustración de una onda.....	14
Figura 3. Ola teórica.....	15
Figura 4. Onda de ola.....	15
Figura 5. Rompiente de derrame.....	20
Figura 6. Rompiente de vuelco.....	20
Figura 7. Rompiente ondulada.....	21
Figura 8. Rompiente de colapso.....	21
Figura 9. Tipos de rompiente.....	22
Figura 10. Transformación del oleaje.....	23
Figura 11. Formación de la marea.....	30
Figura 12. Marea viva de conjunción.....	30
Figura 13. Marea viva de oposición.....	31
Figura 14. Marea Muerta.....	31
Figura 15. Gráfica de evolución de la marea semidiurna.....	32
Figura 16. Gráfica de evolución de las mareas diurnas.....	32
Figura 17. Gráfica de evolución de la marea mixta.....	33
Figura 18. Batimetría tridimensional de las islas del Caribe.....	34
Figura 19. Mapa interactivo, municipios del estado Zulia.....	41
Figura 20. Ejemplo de información de altura de oleaje y dirección.....	43
Figura 21. Sector Golfo de Venezuela.....	55

Figura 22. Sector Falcón.	56
Figura 23. Sector Morrocoy.	57
Figura 24. Sector Litoral Central.....	58
Figura 25. Sector Miranda y Anzoátegui.	59
Figura 26. Sector Mochima.	60
Figura 27. Sector Nueva Esparta.	61
Figura 28. Sector Sucre Norte.....	62
Figura 29. Sector Sucre y Monagas Este.....	63
Figura 30. Sector Delta amacuro.....	64
Figura 31. Clasificación de la costa venezolana en sectores.	65
Figura 32. Parque Nacional Mochima y Península de Araya.	66
Figura 33. Golfo de Paria.	67
Figura 34. Detalle de Costa del estado Delta Amacuro.....	68
Figura 35. Localización de Localidades Identificadas.	78
Figura 36. Mapas Históricos de Isla de Aves.	79
Figura 37. Posición en el mapa venezolano de Isla de Aves.	80
Figura 38. Posición en el mapa venezolano de la Isla la Tortuga.	81
Figura 39. Sistema Wavehub.	85
Figura 40. Sistema de boyas bouybu propuesto por AWS Ocean Energy.	86
Figura 41. Sistema de columna de agua oscilante.....	88
Figura 42. Dispositivo Salter Duck.	89
Figura 43. Parque de producción de energía eléctrica undimotriz de 50MW.	90

Figura 44. Simulación de inundación de plataforma de Hidroflot.	98
Figura 45. Información parcial de mapa batimétrico en Zulia.	99
Figura 46. Vista de planta de sistema Hidroflot.	101
Figura 47. Vista lateral de sistema Hidroflot con propuesta de anclaje.	101
Figura 48. Propuesta de inmersión de sistema generador de electricidad.	102

LISTA DE FOTOS

Foto 1. Olas de viento.....	16
Foto 2. Oleaje de mar de fondo.....	17
Foto 3. Oleaje de tormenta.....	18
Foto 4. Tsunami.	19
Foto 5. Reflexión de oleaje por una embarcación.	24
Foto 6. Difracción de oleaje en Playa el Saco, Mochima.	25
Foto 7. Fenómeno de run-up.....	26
Foto 8. Sistema Pelamis propuesto para Uruguay.....	87

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Ejemplo de gráfica de valores de altura de oleaje, periodo y dirección.	44
Gráfica 2. Ejemplo de roseta de incidencia de oleaje.....	46
Gráfica 3. Gráfica de Altura de Oleaje vs Período para las costas venezolanas...	47
Gráfica 4. Perfil batimétrico en municipio Páez.	100

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ejemplo de información Parcial de datos arrojados por el Nomenclador de Centros Poblados Y Comunidades Indígenas 2001.....	42
Tabla 2. Tabla extraída del Nomenclador de Centros Poblados para el sector Golfo de Venezuela.	69
Tabla 3. Tabla extraída del Nomenclador de Centros Poblados para el sector Falcón.	71
Tabla 4 . Tabla extraída del Nomenclador de Centros Poblados para el sector Morrocoy.	72
Tabla 5. Tabla extraída del Nomenclador de Centros Poblados para el sector Litoral Central.....	73
Tabla 6. Tabla extraída del Nomenclador de Centros Poblados para el sector Miranda y Anzoátegui.....	74
Tabla 7. Tabla extraída del Nomenclador de Centros Poblados para el sector Nueva Esparta.....	75
Tabla 8. Tabla extraída del Nomenclador de Centros Poblados para el sector Sucre Norte.	76
Tabla 9. Tabla resumen de localidades elegidas.	77
Tabla 10. Clima de oleaje para las localidades elegidas a evaluar.	82
Tabla 11. Energía aportada por el oleaje para las localidades elegidas a evaluar.	82
Tabla 12. Valores de energía y servicio para localidades seleccionadas.....	83
Tabla 13. Tabla ponderada comparativa.....	84
Tabla 14. Características de la tecnología investigada.	91

Tabla 15. Consumo eléctrico estimado de una vivienda rural.	93
Tabla 16. Consumo eléctrico estimado de un colegio rural.	93
Tabla 17. Consumo eléctrico estimado de alumbrado público rural.	93
Tabla 18. Consumo eléctrico estimado para un mini mercado.	94
Tabla 19. Estimación de consumo eléctrico del municipio Páez.	94
Tabla 20. Estimación de consumo eléctrico para parroquia Higuerote.	96
Tabla 21. Estimación de consumo eléctrico para parroquia Caraballeda.	96

INTRODUCCIÓN

Numerosas poblaciones a lo largo de toda la costa venezolana presentan severos problemas en el abastecimiento de servicio eléctrico, por lo que, de la mano con la actual visión mundial hacia energías limpias, se investigó una alternativa amigable ambientalmente hablando, para contrarrestar la problemática presentada en las poblaciones.

Se encontró, a través de investigaciones, que la energía undimotriz puede ser una alternativa viable y prometedora para ayudar la problemática presentada. Esta solución utiliza la energía potencial que aporta el oleaje, que en su condición de onda, se puede valer de sus crestas y valles, para posteriormente por medio de mecanismos, convertir la mencionada energía, en energía eléctrica y aprovechable, principalmente pensando en los centros poblados más necesitados.

El trabajo especial de grado, buscó localizar a todo lo largo de las costas venezolanas, poblaciones que presenten condiciones ideales para que se pueda implementar el sistema de abastecimiento eléctrico, siempre bajo la premisa que se usara en paralelo con la red de distribución nacional eléctrica, y no independiente a esta. Será entonces un complemento a la red nacional de distribución de energía eléctrica.

Fue necesario investigar, en las poblaciones costeras a lo largo del país, variables de gran importancia como: cantidad de habitantes, vías de acceso, morfología de sus playas, proyecciones de crecimiento poblacional, presencia y cobertura de servicio de electricidad, altura de oleaje y energía aportada por él; para así poder valorar y discernir cuales son las localidades más apropiadas para que el sistema sea implantado

Debido a que la tecnología es desconocida en Venezuela, el trabajo requirió investigar compañías y organismos internacionales conocedoras del área. En general, no se tiene conocimiento de alguna planta undimotriz a nivel mundial que este actualmente operativa, pero si algunas que están en planificación y construcción, con proyecciones prometedoras para un futuro no muy lejano. En comparación con la energía eólica y la solar, se estima mejor rendimiento o aprovechamiento por metro cuadrado de terreno ocupado por el sistema, y es por esto que ha resultado recientemente de gran interés para muchos organismos internacionales, principalmente en Europa.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a los problemas de suministro de electricidad que sufren algunas comunidades a lo largo de la zona costera del país, surgió la necesidad de mermar esta deficiencia o ausencia de servicio y se planteó la implementación de un sistema de energía alternativo que trabaje en conjunto con la red nacional de distribución de energía eléctrica. Se proyecta trabajo en unión con la red nacional y no independiente a ella porque el sistema planteado, al depender directamente del oleaje y considerando que este no es constante en el transcurso del día, ni a lo largo del año, ya que puede variar desde un oleaje calmado hasta tempestuoso, no será constante la energía aportada por el oleaje.

El trabajo consistió en investigar cuál sitio es el más idóneo de las costas del país para implementar el sistema de generación de electricidad, también en plantear el tipo de estructura que va a contener el sistema. Además parte del trabajo consistió en estimar cuánta energía puede generar el oleaje cotidiano, para así ilustrar el alcance que pueda tener el proyecto. No incluyó el diseño de la turbina o mecanismo que convertirá esta energía de oleaje en energía eléctrica, aunque se investigó acerca de la tecnología de aprovechamiento disponible para hacer recomendaciones al respecto.

Se espera que una vez diseñado el sistema se pueda aprovechar en pequeñas poblaciones para disminuir las fallas de cobertura eléctrica que sufren localidades del país como El Hatillo, La Cerca, Boca de Uchire, en el estado Anzoátegui. Para esto se desea responder: ¿Se puede conseguir un lugar ideal donde implantar el sistema? ¿Es capaz la energía aportada por el oleaje de generar suficiente energía eléctrica para utilizarla en una comunidad? ¿Existe tecnología disponible de conversión de energía que pueda ser utilizada o será necesario diseñar nuevas tecnologías?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General:

Localizar el o los lugares más idóneos de la costa venezolana para la implementación de un sistema de generación de energía eléctrica con el oleaje cotidiano marítimo.

1.2.1. Objetivos Específicos:

- Clasificar las costas venezolanas en sectores
- Identificar las localidades costeras que van a ser evaluadas.
- Definir las zonas costeras más apropiadas para la implementación del sistema.
- Investigar la tecnología disponible para la implementación del sistema.
- Plantear el tipo de estructura contenedora del sistema.

LIMITACIONES

A lo largo de la realización del Trabajo Especial de Grado, se presentaron las siguientes limitaciones:

- Los datos demográficos fueron extraídos principalmente de el último censo, realizado en el año 2001, el cual ya tiene 7 años de antigüedad.
- Al ser un sistema totalmente novedoso, no solo en nuestro país, sino también a nivel mundial, la tecnología se encuentra en solo fases de investigación y proyecto, y la información existente es limitada y dificulta su investigación.
- Debido a que el sistema está orientado al desarrollo de zonas necesitadas, y de implementarse, variaría considerablemente las tasas de crecimientos de las poblaciones favorecidas, se desconoce en cuanto pudieran variar dichas tasas, por lo que no se tomaron en cuenta. Sin embargo se importante mencionar, que el sistema tiene la capacidad de expandirse de acuerdo a como va aumentando la demanda.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

MARCO TEÓRICO

En vista de la problemática generalizada de poblaciones costeras venezolanas que dependen de un mal servicio de energía eléctrica a través de la red de distribución nacional, o en el peor de los casos, la ausencia de este, se crea la necesidad de implementar un sistema alternativo, que pueda mermar esta deficiencia en las localidades necesitadas.

La energía mareomotriz puede ser una alternativa y se puede aprovechar de muchas formas, como lo pueden ser las corrientes marinas, mareas u oleaje cotidiano de zonas costeras.

A continuación se definieron algunos términos para poder así comprender como se puede aprovechar esta energía que nos brinda el mar y que aún no se ha empezado a explotar.

Una energía alternativa es aquella que se busca para suplir a las energías actuales, por su menor efecto contaminante y por su capacidad de renovación.

La energía es fundamental para el desarrollo económico de un país y para el bienestar de su población. Forma parte del instrumental económico, pues se la requiere para activar todo tipo de maquinaria o herramienta y, aunque no se incorpora materialmente a los bienes o servicios producidos, tiene incidencia en los costos de producción. Además, es un bien de consumo final que se utiliza para el bienestar humano.

La derivación del término "crisis energética" corresponde a la caída o descenso de la actividad económica, como por ejemplo, la producción y el consumo, pero a su vez, tiende a la escasez, a la necesidad, a la carestía, etc. Esto quiere decir que

hay una crisis. La energía es la forma de producir el trabajo que tiene la materia, ya sea en forma de movimiento, de luz, calor, etc. Es por eso que la crisis energética hace referencia a escasez y carestía de la energía.

Algunas energías renovables son: la energía eólica (que es producida por el movimiento del viento y se puede obtener a través de aerogeneradores, esta energía es muy efectiva, pero el único problema es que no es posible instalar aerogeneradores en cualquier zona, porque es necesario que el viento sea constante); la energía hidráulica, (que es producida por la utilización del agua); la energía oceánica o mareomotriz, (que es obtenida por la utilización del agua en los océanos y los mares, esta se pone en uso, cuando el agua de la marea alta se embalsa); energía undimotriz, (la que es obtenida de las olas del mar); la energía solar (que utiliza la radiación solar con el uso de paneles solares, el único inconveniente es que los paneles solares son muy costosos en la actualidad); la energía geotérmica (que es el uso del agua que surge bajo presión desde el subsuelo, esta se obtiene a través de una perforación en la tierra y luego de ésta, se añade agua. Esta agua, al llegar a cierta temperatura se calienta produciendo vapor, el cual mueve alternadores de generación eléctrica); y la biomasa (que utiliza la descomposición de residuos orgánicos).

La discusión energía alternativa/convencional, no debe entenderse como una mera clasificación de las fuentes de energía, puesto que el término se gesta, de la mano de científicos y movimientos ecologistas y sociales, con el propósito de proponer un modelo energético alternativo al imperante en la actualidad.

Dicho modelo energético, se basa en las siguientes premisas:

- El uso de fuentes de energía renovable, ya que las fuentes fósiles actualmente explotadas, terminarán agotándose, según los pronósticos actuales, en el transcurso del siglo XXI.
- El uso de fuentes limpias, abandonando los procesos de combustión convencionales y la fisión nuclear.
- La explotación extensiva de las fuentes de energía, proponiéndose como alternativa el fomento del autoconsumo, que evite en la medida de lo posible la construcción de grandes infraestructuras de generación y distribución de energía eléctrica.
- La disminución de la demanda energética, mediante la mejora del rendimiento de los dispositivos eléctricos (electrodomésticos, lámparas, etc.). Este modelo, se enmarca dentro de una estrategia de mayor calado, denominada Desarrollo Sostenible.

La producción de energías no convencionales o limpias, alternativas y renovables, es ventajosa en tanto y cuando se explote un tipo de recurso renovable que a su vez no produzca agentes contaminantes que perjudiquen la salud del medio ambiente y social.(Wikipedia Foundation, Inc, 2001)

En el caso de Venezuela, y particularmente de este estudio realizado nos ocuparemos de estudiar las costas venezolanas, para poder así decidir el lugar más idóneo para la implementación de un sistema mareomotriz, no para suplantar el actual sistema de energía eléctrica a nivel nacional, sino para solventar problemáticas de localidades costeras que tengan deficiencia o ausencia del servicio eléctrico a través de la red nacional.

2.1. OLEAJE

El oleaje son ondulaciones estacionarias en el agua, habitualmente generadas por el viento, sismos o influencias atmosféricas que se desplazan en grupos de ondas a través del medio acuático hasta alcanzar la costa, siendo movimientos ondulatorios, oscilaciones periódicas de la superficie del mar, formadas por crestas y depresiones que se desplazan horizontalmente.

2.1.1. Origen

El viento es el principal responsable de la generación del oleaje que se desplaza sobre la superficie del agua y que juega un rol muy importante en la modificación de la línea costera. Basta que existan vientos superiores a 3 km/h, para que se generen pequeñas olas. Pero también existen responsables del origen de las olas; cambios bruscos en la presión atmosférica en una localidad, sismos, etc.

En las olas no hay traslado de agua, sino sólo un movimiento oscilatorio. Esto se puede notar al flotar un objeto en el agua lejos de la playa: se percibe la onda, pero no se desplaza del lugar. Diferente es cuando la ola llega a la orilla y "revienta"; ahí penetra unos cuantos metros en la playa o choca contra rocas.

En las playas se puede observar la rompiente de la ola. Esto se debe a que la base de la ola ve interrumpido su avance de forma cada vez más creciente a medida que la profundidad disminuye; llega a un punto en donde la ola se hace inestable, y cae hacia adelante generando la rompiente. En estos casos, la ola "siente el fondo" cuando la profundidad del océano es la mitad de su longitud de onda, por ejemplo, si la longitud de onda es de 10 metros, la ola sentirá el fondo a

los 5 metros de profundidad. Esto se puede apreciar en la figura 1, presentada a continuación.



Figura 1. Aproximación del oleaje a la costa.

Fuente: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA).

Para el estudio del oleaje resulta necesario modelar una onda que represente el comportamiento de un grupo de ellas mediante la caracterización de la misma. Las olas se caracterizan por su:

- **Longitud de onda (λ):** es la distancia horizontal entre dos crestas o dos depresiones sucesivas.
- **Período (T):** es el tiempo, contado en segundos, entre el paso de dos crestas sucesivas por un mismo punto.
- **Altura (H):** distancia vertical medida desde la parte más alta de la cresta de la ola y el nivel medio del mar.
- **Pendiente:** relación entre la altura y la longitud de onda (H/λ).
- **Amplitud (A):** distancia vertical medida desde la cresta y el valle de la ola.
- **Velocidad de propagación (Celeridad):** $C = \lambda/T$

En la figura 2, se pueden observar las características de las olas.

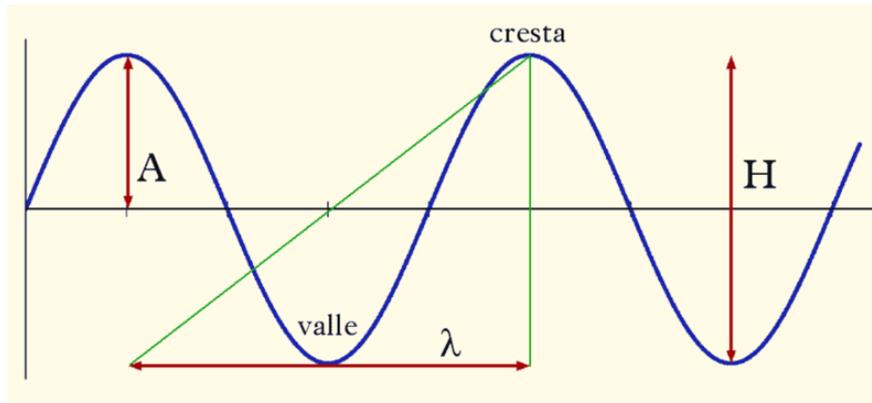


Figura 2. Ilustración de una onda.
Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Olas>

Como las olas son muy variables, para analizarlas y describirlas se usan métodos estadísticos. Así, para la altura, normalmente se refiere a la altura significativa, esto es el promedio de 1/3 de las olas más altas observadas en una serie en un período de tiempo determinado.⁸

2.1.2. Tipos de oleaje

Las olas se pueden clasificar de la siguiente manera:

- a) Según profundidades de las aguas en donde se propagan:
 - **Olas de aguas profundas:** son las que no están influenciadas por el fondo, moviéndose independientemente de él, produciendo un movimiento más o menos regular en la superficie del océano, en el cual la altura de la ola es relativamente débil en relación con el largo de la onda. Este oleaje se propaga en el océano, por lo general muy lejos del lugar donde se origina (Ola teórica). La característica de este tipo de oleaje es que al pasar la ola

por las partículas, en la superficie, estas suben y bajan, debido al paso de la onda, moviéndose en orbitas circulares cuyo diámetro disminuye con la profundidad.

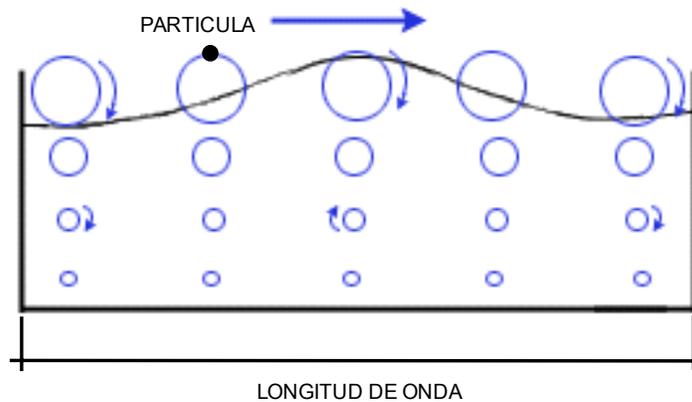


Figura 3. Ola teórica.
Fuente: Wave, Tides and Shallow – Water Processes, 1989.

La figura anterior supone que las partículas de la superficie del mar describen círculos cuyo radio depende de la profundidad, que el diámetro de las trayectorias disminuye a medida que esta aumenta y es prácticamente nulo en el fondo.

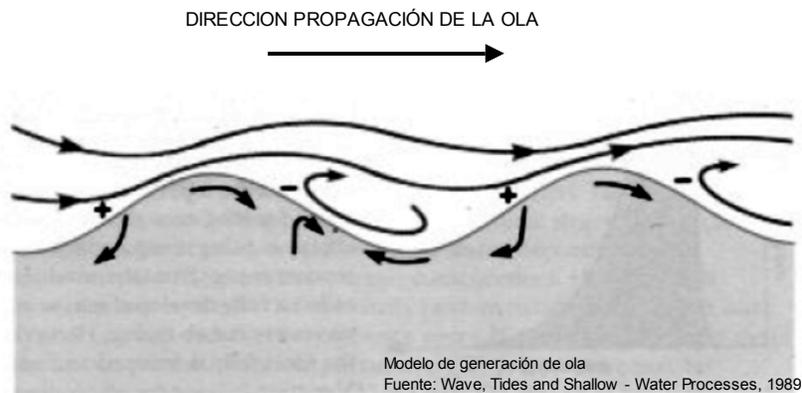


Figura 4. Onda de ola.
Fuente: Wave, Tides and Shallow.

- **Olas costeras o de aguas poco profundas:** este tipo de olas ocurren a medida que se van acercando a la costa, disminuye la profundidad del

fondo marino, influenciando a la ola de manera tal que la deforma aumentado su altura y reduciendo el largo de la onda. En esta transición las partículas del mar no describen círculos si no elipses, y por efectos de esbeltez y roce con el fondo del mar se produce la rompiente, al llegar a la costa.

b) Según la fuente que las origina: (Carter, 1994)

- **Olas marinas o de viento:** Están sometidas a la influencia directa del viento que las produce, pudiendo llegar a anularse o reforzarse. Su morfología muestra crestas puntiagudas y surcos redondeados que forman rizaduras superpuestas. Según la velocidad del viento y las características de cada masa ácuea, presentan dimensiones que varían desde un oleaje con escasa magnitud (mar rizada o picada, de 0 a 0,25 m de altura) a mar gruesa y muy gruesa (de 2,5 a 6m de altura).



Foto 1. Olas de viento.

Fuente: <http://www.farosdelmundo.com/gallery2/v/concurso/slideshow.html>

- **De fondo o swell:** Olas que no están bajo la influencia directa del viento, a causa del cese de este, que pueden desplazarse decenas, o incluso centenas de kilómetros desde su zona de origen y según la dirección del viento sin ser mantenidas por éste. Son ondulaciones sinusoidales con gran simetría y circularidad: crestas y senos redondeados, altura y espaciado uniformes. Suele ser un oleaje en proceso de decaimiento o dispersión. Son generadas principalmente por depresiones atmosféricas.



Foto 2. Oleaje de mar de fondo.

Fuente: <http://www.lacanciondelpirata.com/wp-content/upload/2007/01/sol%20tras%20la%20ola.jpg>

- **De temporal:** Tiene el mismo origen que las “olas marinas”, pero son transportadas y mantenidas por el viento de una zona tormentosa. La energía y rapidez del avance en los trenes de olas sobre los rompientes, interrumpe transitoriamente el flujo de retorno provocando un “apilamiento” del agua y una “invasión” de zonas más alejadas tierra dentro. Puede llegar a ser un oleaje muy destructivo, esencialmente si a los efectos del temporal

se suman otros como mareas de tormenta (tide storms) u ondulaciones debidas a diferencias en las presiones atmosféricas (surge storms). Son olas con longitud de onda y período largos, de gran altura: desde arboladas (6 a 9m) a enormes (mayores de 14m).



Foto 3. Oleaje de tormenta.

Fuente: <http://www.infobae.com/adjuntos/imagenes/69/0176956B.jpg>

- **Tsunamis:** Oleaje asociado a la actividad submarina (tectónica, volcánica, deslizamiento), que desplaza masas de agua a gran profundidad y origina olas en superficie con amplitud pequeña (alrededor de 1m) y gran longitud de onda (50 a 200 Km); pueden transportarse a largas distancias (centenas de Km) y velocidades (hasta 800 km/h). En alta mar apenas es perceptible, sin embargo, al llegar a la costa sufre una notable transformación: cuando disminuye la profundidad, esa energía acumulada debe concentrarse en un volumen de agua mucho menor, lo cual implica mayor altura, pasando de 60-100cm a 15-30m. Son olas muy destructivas.



Foto 4. Tsunami.

Fuente: <http://albertovilches.com/wp-content/uploads/tsunamiMadrid.jpg>

c) Según su frecuencia (Munk, 1951)

- **Olas capilares:** Se deben al roce entre láminas de aire y agua en la misma fuente del viento; están controladas por la tensión superficial del líquido. Son pequeñas rizaduras con morfología en V, cuya longitud de onda es inferior a 1,73cm y su altura aproximada unos milímetros.
- **Olas de gravedad:** Olas generadas por la transferencia de energía desde el viento al agua y controladas por la masa movilizada. Su longitud de onda es superior a 1,73 cm. Incluyen a las olas marinas, de swell y traslación o surf.
- **Olas infragravitarias:** Formadas mediante interacción entre olas. Tienen amplitud baja y periodos largos.
- **Olas de periodo largo:** Producidas por movimientos periódicos de baja frecuencia (mareas) y eventos sin periodicidad (tsunamis y tormentas).

d) Según sus propiedades hidrodinámicas (Galvin, 1968)

Considera la transferencia energética desde la oscilación al desplazamiento o translación, con la consiguiente removilización de material. A veces lo denominan oleaje de translación, rompiente, surf, etc., y puede ser:

- **De derrame (*spilling*):** Movimiento progresivo de atenuación en una onda y paso a la translación; llegan a presentar rupturas encadenadas.(Patrick, 1955)

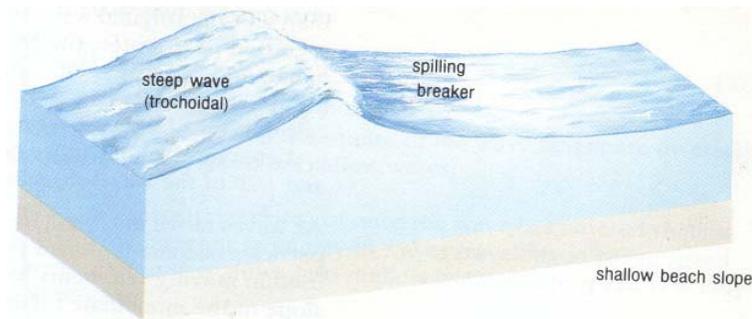


Figura 5. Rompiente de derrame.
Fuente: Waves, Tides and Shallow.

- **De vuelco (*plunging*):** Adelanto en cada cresta respecto a su base, pérdida de sustentación y enroque, ocasionando un vacío o “voluta”, con desintegración posterior y fuertes turbulencias.(Patrick, 1955)

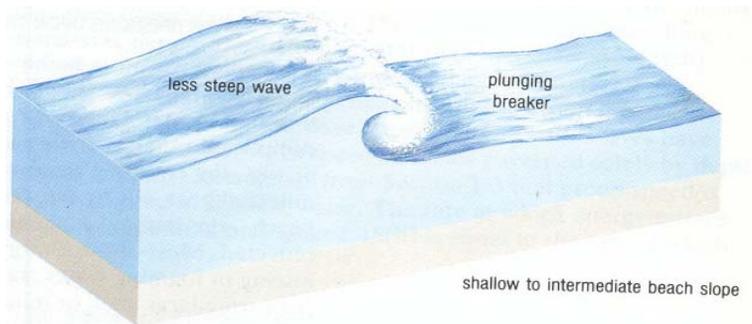


Figura 6. Rompiente de vuelco.
Fuente: Waves, Tides and Shallow.

- **Ondulada (*surging*):** Formación de una cresta que no llega al “vuelco” y se diluye, al tiempo que es adelantada por su base en avance hacia la zona de batida.(Patrick, 1955)

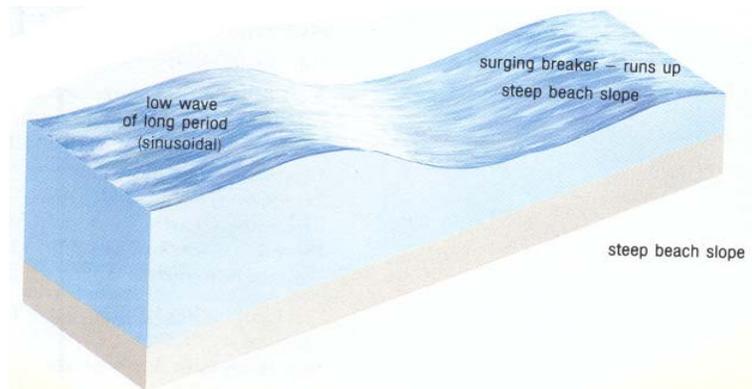


Figura 7. Rompiente ondulada.
Fuente: Waves, Tides and Shallow.

- **De colapso (*collapsing*):** Caso mixto entre vuelco y ondulada.

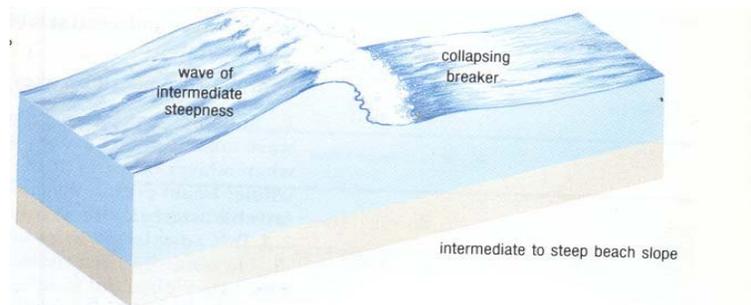


Figura 8. Rompiente de colapso.
Fuente: Waves, Tides and Shallow.

A continuación, en la figura 9, se presenta una comparación de los distintos tipos de rompientes.

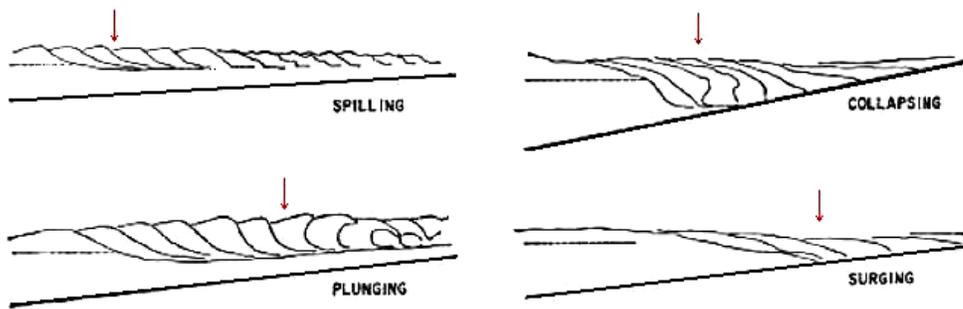


Figura 9. Tipos de rompiente.

Fuente: <http://www.es.flinders.edu.au/~mattom/IntroOc/notes/figures/fig9b2.html>

2.1.3. Clima de oleaje

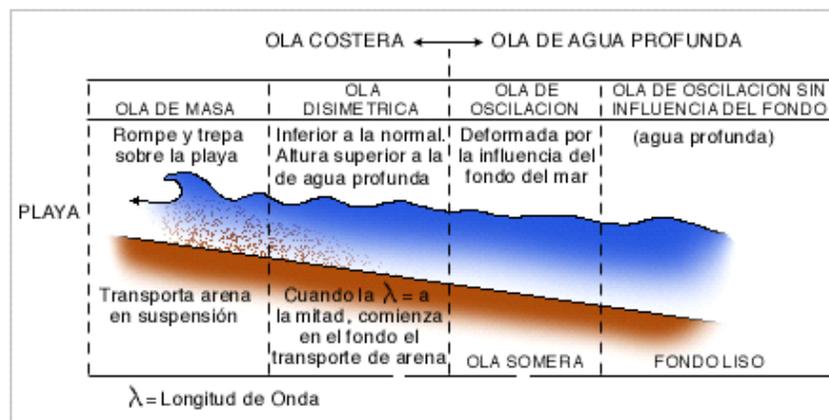
Para el análisis del comportamiento del oleaje a lo largo del tiempo, resulta necesaria la definición de un clima de oleaje mediante el cual se detalla características de oleaje como longitudes, períodos significativos y ángulos con que llegan a la costa. Esto se hace a través de datos estadísticos que se basan en la observación de un número de olas en lapsos determinados de tiempo, correlacionados con sus características, para así poder obtener por métodos matemáticos los insumos necesarios para el estudio del oleaje que afecten a la costa de interés.

2.1.4. Derivación del oleaje (McCormick, 1973)

Al avanzar hacia la costa las olas cambian de dirección, disminuyen su velocidad, y se transforman, debido a la topografía marina, principalmente a la reducción de

la lámina de agua. Y como describimos anteriormente cuando la profundidad es inferior a la mitad de la longitud de onda se producen los siguientes fenómenos:

- **Transformación:** A medida que se acerca a la costa la longitud de onda se reduce y la altura se incrementa. El exceso de altura y la disimetría debida al empuje de las olas posteriores provoca un exceso de arqueado, la caída de la cresta y la ruptura de la ola. De esta forma el movimiento de ondulación se transforma en movimiento de translación.



RELACION PROFUNDIDAD - FORMA DE LA ONDA / CON TRANSPORTE DE SEDIMENTOS
FUENTE: www.puc.cl/sw_educ/geo_mar

Figura 10. Transformación del oleaje.
Fuente: www.puc.cl/sw_educ/geo_mar

- **Refracción:** es la modificación de la orientación de las crestas de las olas, en dirección paralela a la línea de costa o a las líneas de igual profundidad del fondo (isóbatas). Este fenómeno es importante en geomorfología litoral porque explica el hecho de que para un mismo tipo de ola, la energía liberada en algunos sectores es mayor que en otros y esto tiene consecuencias en las formas resultantes.

- **Reflexión:** se produce cuando la ola se topa con un obstáculo (por ejemplo un espigón) y es reflejada, es decir, rebota y es enviada en la dirección exactamente opuesta a la de incidencia. En el caso de que las olas ataquen oblicuamente el obstáculo, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, como se puede apreciar en la foto 5..



Foto 5. Reflexión de oleaje por una embarcación.
Fuente: Google Earth.

- **Difracción:** se produce cuando la ola se topa con un obstáculo que parte la cresta de la ola y que provoca la divergencia ortogonal en ésta. En este caso se atenúan las ondas, debido a la disipación de energía. Cuando en el oleaje se equilibran las fuerzas desarrolladas por los oleajes oblicuos, se llama oleaje medio. Se desarrollan en direcciones opuestas tras un

obstáculo, como un islote. Esta onda tiende a rodear al obstáculo que desvía la ola.



Foto 6. Difracción de oleaje en Playa el Saco, Mochima.
Fuente: Google Earth.

- **Run-up (ascenso del oleaje):** Es la zona de la playa en la que, tras la rotura de la ola, la lámina de agua llega a la línea de costa y asciende por la pendiente de la playa (también ocurre en estructuras costeras) y posteriormente desciende por efecto de la gravedad.



Foto 7. Fenómeno de run-up.
Fuente: Elaboración propia.

2.1.5. Teoría Lineal

Ondas en superficies de líquidos

Una onda es una perturbación en un medio, la cual se propaga con el tiempo. Para que exista una onda debe existir un medio y lo que se propaga es una perturbación, no el medio en sí. En general, lo que llamamos una onda no es una perturbación única, sino una serie de perturbaciones que, en el mejor de los casos, son periódicas. Que lo que se propaga es la perturbación y no el medio en sí es algo que habrá notado cualquier persona que haya observado alguna fuente o piscina con algún objeto flotando. En efecto, las olas en la superficie del agua principalmente hacen subir y bajar un objeto flotante, pero no la desplazan más allá de un pequeño movimiento oscilatorio de ida y vuelta.

A todas las ondas se les puede asociar varias características comunes, independientemente del tipo de ondas que sean. Todas están formadas por crestas y valles, lo que nos lleva al concepto de amplitud; todas las ondas periódicas tienen un periodo (o su equivalente, una frecuencia), todas tienen una longitud de onda, una velocidad de propagación y una fase principal. Estos parámetros genéricos de la onda están estrechamente relacionados con propiedades físicas bien definidas de cada tipo de ola.

Para las ondas en superficies de líquidos, las crestas de las ondas son las zonas de mayor altura, mientras que los valles son las de menor. La amplitud de la onda es la mitad de la altura de la onda, es decir, la mitad de la distancia vertical desde el valle hasta la cresta. La amplitud de una onda está ligada con el flujo de energía asociado a la onda.

De la mencionada teoría se pueden obtener fórmulas que representan comportamientos de velocidades de movimiento de una partícula en una onda que está directamente asociado al comportamiento de una ola.

Aguas profundas:

- Componente horizontal: $u = \frac{\pi H}{T} e^{-\frac{2\pi y}{\lambda}} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x - \omega t\right)$ Ecuación 1

- Componente vertical: $v = \frac{\pi H}{T} e^{-\frac{2\pi y}{\lambda}} \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{\lambda} x - \omega t\right)$ Ecuación 2

Aguas poco profundas:

$$\text{Componente horizontal: } u = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{h}} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x - \omega t\right) \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\text{Componente vertical: } v = \frac{\pi H}{T} \frac{y + H}{h} \text{sen}\left(\frac{2\pi}{\lambda} x - \omega t\right) \quad \text{Ecuación 4}$$

2.1.6. Energía

La energía aportada por el oleaje está directamente relacionada con la teoría lineal, donde se explican las velocidades verticales y horizontales producidas por una ola, y también a la amplitud de la onda, a mayor amplitud, mayor será la energía que se pueda aprovechar, y así lo será también a medida que aumentan las celeridades tanto verticales como horizontales.

Es interesante calcular el flujo de energía asociado a una onda. No es difícil demostrar a partir de la función de onda que la energía total asociada a una onda sinusoidal, con cierta amplitud de onda es:

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \rho g A^2 \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde E es denominado densidad de energía de una ola o energía por unidad de área.

$A \rightarrow$ amplitud de la ola.

$g \rightarrow$ fuerza de gravedad.

$\rho \rightarrow$ densidad del agua o medio.

También podemos obtener una fórmula donde se puede estimar la energía aportada por una onda de ola específica en un ancho específico, es decir, se puede estimar cuanta energía produce cada ola en cierta área definida:

$$E = \frac{1}{2} \rho g A^2 L B \quad \text{Ecuación 6}$$

Dónde “L” representa la longitud de la ola y “B” el ancho de la ola y “E” la energía total aportada por esa ola.

2.2. MAREA (Brown, 1989)

Se le llama marea al cambio periódico del nivel del mar, ascenso y descenso que resulta de la atracción gravitacional de la Luna y del Sol que actúa sobre la tierra en rotación, produciéndose oscilaciones rítmicas de las masas de agua.

Al momento en que el agua alcanza su máxima altura dentro del ciclo de mareas, se le conoce como marea alta o pleamar. El momento opuesto, en el que el mar alcanza su menor altura es llamado marea baja o bajamar.

2.2.1. Origen

Las mareas se originan como resultado de la combinación de dos fuerzas: la atracción que ejerce la luna y/o el sol sobre cada punto de la tierra, que aumenta a medida que la distancia entre el punto y el satélite disminuye; y la fuerza centrífuga que sufre al girar en torno al centro de gravedad del sistema Tierra-Luna (constante en todos los puntos de la Tierra). Como se ilustra en la figura 11.

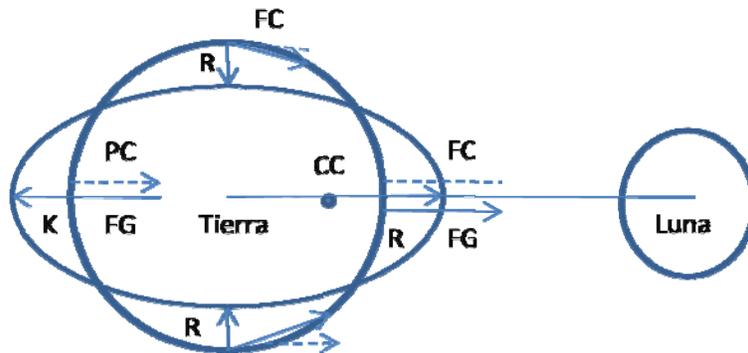


Figura 11. Formación de la marea.
Fuente: Elaboración propia.

2.2.2. Tipos de marea

- **Vivas:** Se determina por la alineación en el eje del elipsoide de los planetas Sol-Luna-Tierra en donde se presenta el mayor nivel de las aguas debido a la suma de las fuerzas de atracción de dichos planetas.

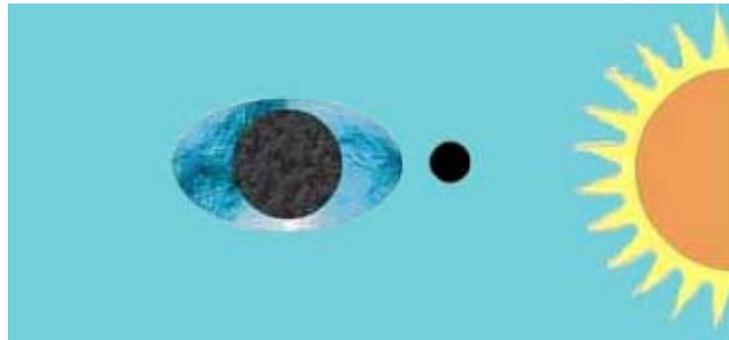


Figura 12. Marea viva de conjunción.
Fuente: <http://www.paranauticos.com/notas/Tecnicas/Mareas/tipos-mareas.htm>.



Figura 13. Marea viva de oposición.

Fuente: <http://www.paranauticos.com/notas/Tecnicas/Mareas/tipos-mareas.htm>.

- **Muertas:** Son aquellas que se producen en el momento donde el eje Luna–Tierra se encuentra perpendicular con el Eje Sol – Tierra. En este punto las mareas son menores que las vivas, ya que la atracción del sol es menor que la de la luna debido a la gran distancia que lo separa de nuestro planeta.



Figura 14. Marea Muerta.

Fuente: <http://www.paranauticos.com/notas/Tecnicas/Mareas/tipos-mareas.htm>.

Clasificadas según las frecuencias de las pleamares y las bajamares:

- **Semidiurnas:** Ocurren dos pleamares y dos bajamares, en el transcurso de un día lunar. Considerando que el día lunar es de 24h 50m se producirá una pleamar y una bajamar cada 12h 25m.

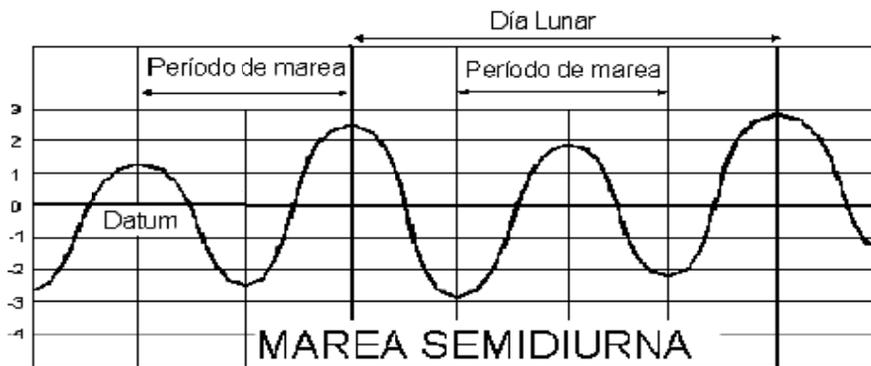


Figura 15. Gráfica de evolución de la marea semidiurna
Fuente: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/celeste/mareas/mareas.htm>

- **Diurnas:** Con una pleamar y una bajamar en el transcurso del día lunar.
- **Diurnas irregulares:** Con dos ciclos por día lunar pero con marcadas diferencias en las alturas y en los períodos de tiempo.

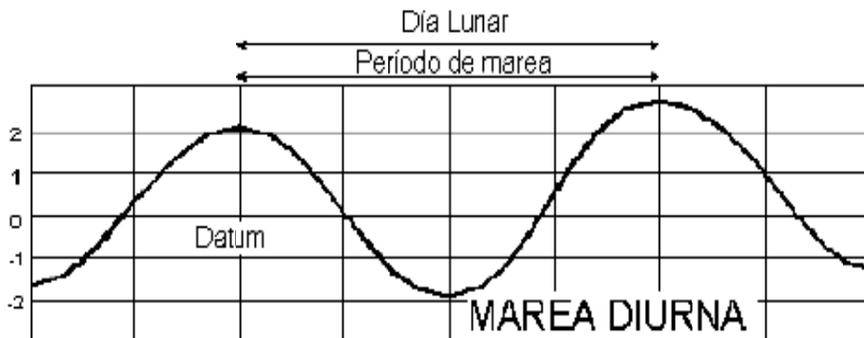


Figura 16. Gráfica de evolución de las mareas diurnas
Fuente: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/celeste/mareas/mareas.htm>

- **Mareas mixtas:** Régimen de tipo intermedio, durante un día lunar se presentan dos pleamares y una bajamar o dos bajamares y una pleamar.

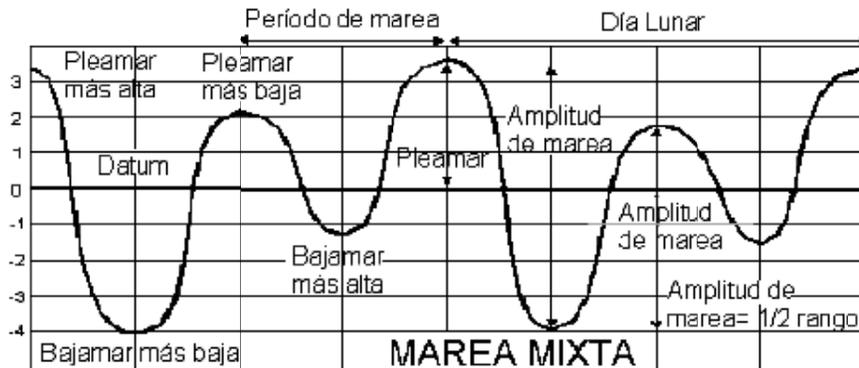


Figura 17. Gráfica de evolución de la marea mixta.
Fuente: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/celeste/mareas/mareas.htm>

2.3. BATIMETRÍA (Wikipedia Foundation Inc., 2001)

Es el equivalente submarino de la altimetría. En otras palabras, la batimetría es el estudio de la profundidad marina, de la tercera dimensión de los fondos lacustres o marinos. Un mapa o carta batimétrica normalmente muestra el relieve del fondo o terreno como isogramas, y puede también dar información adicional de navegación en superficie.

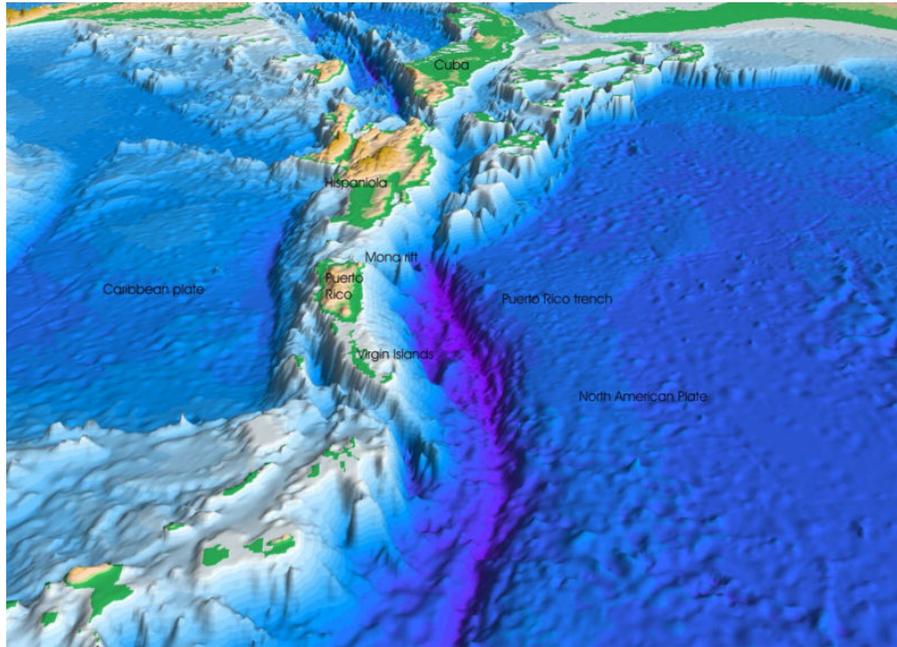


Figura 18. Batimetría tridimensional de las islas del Caribe.
 Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Batimetr%C3%ADa>.

Originalmente, batimetría se refería a la medida de la profundidad oceánica. Las primeras técnicas usaban segmentos de longitud conocida de cable o cuerda pesada, descolgadas por el lateral de un barco. La mayor limitación de esta técnica es que mide la profundidad en un solo punto cada vez, por lo que es muy ineficiente. También es muy imprecisa, ya que está sujeta a los movimientos del barco, las mareas, y las corrientes que puedan afectar al cable.

Los datos usados hoy en día para la confección de mapas batimétricos provienen normalmente de un sonar montado bajo la quilla o en el lateral de un buque, lanzando una onda de sonido hacia el fondo marino. La cantidad de tiempo que tarda el sonido en viajar a través del agua, rebotar en el fondo y volver, informa al equipo de la profundidad real. Años atrás, se podía calcular la media de cada uno de los impulsos individuales de un sonar para confeccionar un mapa continuo en lugar de una medición de puntos. Hoy día se puede usar un sonar de barrido

ancho, consistente en docenas de ondas simultáneas, muy estrechas y adyacentes entre sí, formando un abanico entre 90 y 180 grados.

El abanico de ondas sonoras formado por los sonares de barrido ancho permite una resolución y precisión muy altas. En general, aunque depende de la profundidad, permite a un buque cubrir mucha más superficie del fondo marino que a base de mediciones individuales. Las ondas se actualizan muchas veces por segundo (normalmente de 1 a 40 Hz, dependiendo de la profundidad), lo que permite al buque hacer pasadas mucho más rápidas, manteniendo una cobertura del fondo del 100%. Sensores adicionales corrigen la señal dependiendo de la inclinación y el movimiento del buque, y un girocompás proporciona información exacta de la dirección de la nave. Adicionalmente, un sistema GPS puede especificar de forma exacta la posición del buque. Se emplean también mediciones exactas de la velocidad del sonido en el agua para calcular la refracción de las ondas de sonido al atravesar capas de agua con distinta temperatura, conductividad y presión. Un sistema informático procesa todos los datos, corrigiendo según cada uno de los factores, así como por el ángulo de cada rayo individual. Al final, mediante este conjunto masivo de datos se consigue generar un mapa de forma casi automática.

2.4. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS (Ippen, 1966)

Los sedimentos de las playas son movilizados fundamentalmente por las rompientes de las olas y por las corrientes que las propias olas generan, tanto a lo largo de la costa como en forma perpendicular a la misma. Estas corrientes, dentro de la zona de rompientes, son usualmente más importantes que las corrientes marinas y, consecuentemente, tienen una mayor capacidad para transportar sedimentos.

2.4.1. Tipos de transportes

- **Transporte Litoral:** La experiencia indica que las olas se acercan a la costa luego de transformarse (altura y longitud de onda) en la plataforma interior y rompen transfiriendo cantidad de movimiento a la columna de agua y disipando energía.

La transferencia de cantidad de movimiento produce un cambio en el nivel medio del mar dentro de la zona de rompientes. Esta sobre elevación o "wave setup" es proporcional a la altura de la ola por lo que es más intenso durante tormentas.

La disipación de energía genera corrientes paralelas a la costa en la medida que las olas rompan formando un ángulo con la línea de costa. Estas corrientes o "long shore currents" arrastran sedimentos en gran cantidad y son responsables de cambios importantes de las costas en la medida que su ciclo natural sea alterado de alguna manera.

- **Transporte Normal:** El perfil de playa en equilibrio es producto de fuerzas "constructivas" y "destructivas" que actúan sobre los granos de arena ubicado en la zona de acción de la rompiente de olas. Las fuerzas constructivas se ponen en evidencia si se observa que la playa es más alta cerca de los médanos que cerca del mar y por lo tanto dichas fuerzas actúan contra la gravedad. Las fuerzas destructivas manifiestan su existencia al observar una playa luego de una tormenta severa caracterizada por la elevación del nivel de mar y olas de gran tamaño. Durante estas condiciones el sedimento es sacado de la playa,

transportado hacia el mar y depositado en forma de una barra característica (perfil de playa de "invierno"). En ausencia de tormentas, las olas restituyen el material erosionado haciendo desaparecer la barra y definiendo un perfil más suave o de "verano". Es posible afirmar que para cierto tamaño de granos de arena, cierto nivel del mar y clima de olas existe un único perfil de playa. Cualquier cambio en los elementos antes citados desencadenaría otro perfil de playa que estaría en equilibrio con la nueva situación. Dado que las condiciones oceanográficas que interesan las playas dependen fuertemente de la meteorología es correcto decir que "las playas cambian tanto como lo hace el tiempo". En síntesis, las olas generan corrientes en dirección hacia la costa y hacia el mar, que también transportan sedimentos en lo que se denomina como "On-Offshore Sediment Transport" o transporte de sedimentos normal a la costa.

CAPÍTULO III

MÉTODO

En el trabajo de grado se estudiaron las costas venezolanas, con el objeto de indicar cuál o cuáles son las más apropiadas para la implementación de un sistema de generación de energía eléctrica undimotriz, para poblaciones costeras, cercanas al sistema que presentan deficiencia en el servicio, para subsanar dicha problemática y ayudar a su desarrollo socio-económico.

Por lo antes mencionado, se estimó la energía aportada por el oleaje cotidiano, en ciertas poblaciones y lugares costeros del país, que fueron seleccionados bajo criterios de accesibilidad, morfología, ubicación, población, información existente acerca de la problemática en cuanto al suministro de servicio eléctrico y datos sobre el clima de oleaje en la zona. Para esto fue necesario recopilar y analizar la información disponible a lo largo de la línea de costa venezolana.

Para la realización del trabajo Especial de Grado, se plantearon una serie de objetivos, los cuales fueron alcanzados mediante una serie de pasos descritos a continuación.

En primer lugar fue necesario clasificar las costas venezolanas en varios sectores, con la ayuda de datos obtenidos del Instituto Nacional de Estadísticas INE de Venezuela, y con la ayuda de un modelador de viento y oleaje marítimo global a través de internet llamado Buoyweather que se apoya en información de la National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica) de los Estados Unidos.

En el INE se solicitó información demográfica y de servicios de las poblaciones a lo largo de toda la costa venezolana. El INE suministro el “Nomenclador de Centros Poblados y de Comunidades Indígenas 2001” contentivo de un disco compacto con información digitalizada de cada uno de los asentamientos poblacionales en el país como: información demográfica, servicios públicos

disponibles, tipos de vías de comunicación, etc. Adicionalmente se verificaron mapas de la división político territorial de cada estado en contacto con la costa venezolana, y dentro de cada estado, los mapas municipales y parroquiales, para verificar y complementar la información extraída del “Nomenclador de Centros Poblados”

Teniendo en cuenta que una de las variables más importantes para encontrar la localidad en donde se pueda implantar el sistema, es la deficiencia o ausencia del servicio en ciertas poblaciones, se tomó en consideración primordialmente la data obtenida del “Nomenclador de Poblaciones”, y de los mapas municipales y parroquiales a lo largo de la costa venezolana, en variables de relevancia como lo fueron: la información de algunos asentamientos poblacionales a todo lo largo de la costa, división político territorial del país, acceso a los diversos asentamientos, pendientes del fondo marino de las playas a lo largo de toda la costa e islas pertenecientes al país; todo esto expuesto se utilizó para discutir cómo sería la clasificación de las costas venezolanas. Pero sin olvidar que el oleaje juega un papel fundamental en la investigación, se verificó además, información de oleaje en la costa a través del modelador Buoyweather.

Se buscó que con el conjunto de variables estudiadas, cada sector presentara características semejantes a lo largo de su costa para así poder posteriormente hacer un estudio más profundo en cada uno de los sectores.

Comenzando de oeste al este, desde el estado Zulia y llegando hasta el estado Delta Amacuro, se evaluó cada municipio del país que tuviera contacto con la costa, como se puede mostrar en la figura 19.

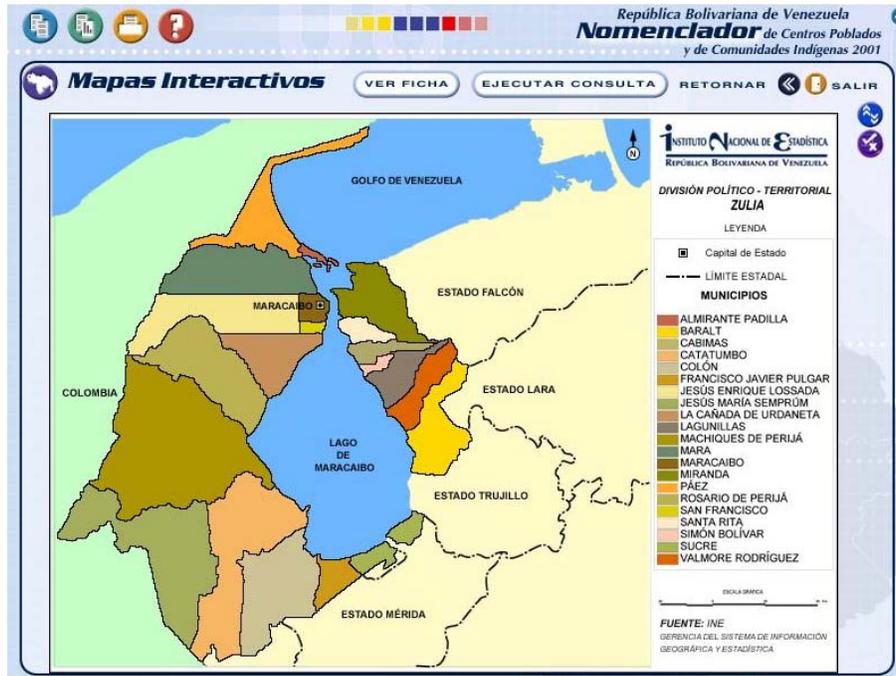


Figura 19. Mapa interactivo, municipios del estado Zulia.
 Fuente: INE.

Se verificó con el nomenclador información de estos municipios, variables como: cantidad de población, cantidad de viviendas, tipos de vías de comunicación, tipo de servicio de electricidad y cantidad de viviendas que tienen acceso a este servicio como se observa en el ejemplo de la tabla 1.

Tabla 1. Ejemplo de información Parcial de datos arrojados por el Nomenclador de Centros Poblados Y Comunidades Indígenas 2001.

ENTIDAD	Zulia		
MUNICIPIO	Almirante Padilla		
PARROQUIA	Isla de Toas	Monagas	
CENTRO POBLADO	Toro, El (Capital)	San Carlos (Capital)	Maraca, Chirikicha
TOTAL DE VIVIENDAS	1781	523	56
VIVIENDAS OCUPADAS	1488	347	56
VIVIENDAS DESOCUPADAS	166	29	0
VIVIENDAS EN CONSTRUCCIÓN	48	18	0
VIVIENDAS DE USO OCASIONAL	79	129	0
POBLACIÓN TOTAL	6667	1712	386
HOMBRES	3331	900	200
MUJERES	3336	812	186
ASFALTADA	NO	NO	NO
ENGRANZONADA	NO	NO	NO
DE TIERRA	NO	NO	NO
AÉREA	NO	NO	NO
MARÍTIMA Y FLUVIAL	SI	SI	NO
ELECTRICIDAD PÚBLICA	SI	SI	NO
ELECTRICIDAD PRIVADA	NO	NO	NO
PLANTA DE LA COMUNIDAD	SI	NO	SI
SERVICIO ELÉCTRICO	1443	331	0

Fuente: INE.

Adicionalmente a la verificación de la información adquirida en el INE, se usó el modelador de oleaje Buoyweather para complementar el estudio de las costas del país. Con esta herramienta se extrajeron datos de un histórico de oleaje para lecturas de longitud, período y altura de oleaje, cada 3 horas por un período total de un año, datos que fueron manipulados en una hoja de cálculo para obtener promedios de altura de oleaje, longitud y período y así crear un clima de oleaje para zonas aguas adentro de las costas venezolanas.

En gráficos, figuras y tablas se verificó información de oleaje a lo largo del año 2007, para así, una vez analizada toda esta información, decidir el alcance de cada sector en el territorio nacional, buscando que las playas y poblaciones de cada sector tuvieran características semejantes. Se decidió tomar una muestra de

oleaje durante un año entero (como mínimo), porque a lo largo de este, el oleaje cambia de duración, intensidad y frecuencia, por ejemplo, durante el período de julio a septiembre se producen olas más fuertes por ser la época de tormentas.

A continuación en la figura 20 se ilustra cómo está expresada la información, correspondiente a altura de oleaje extraída del modelador Buoyweather, para la fecha del 1 de enero de 2007 a las 12:00am.

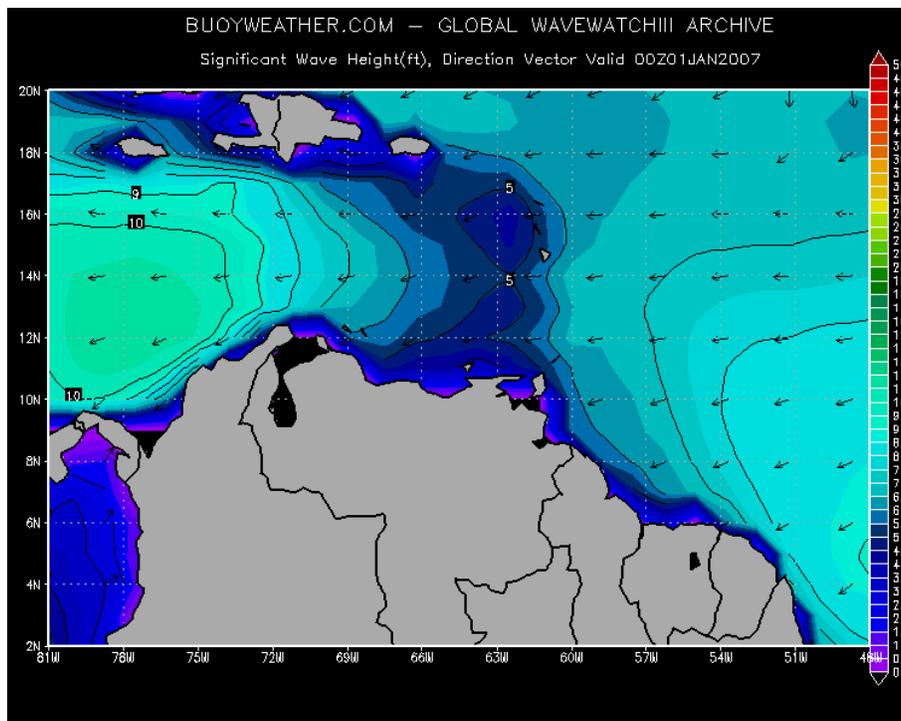
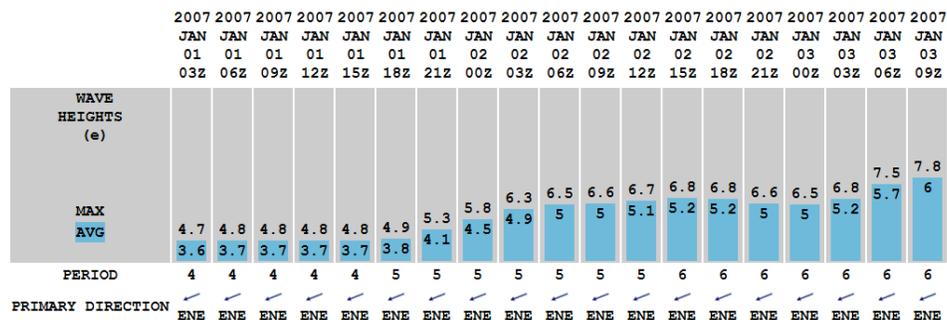


Figura 20. Ejemplo de información de altura de oleaje y dirección.
Fuente: Buoyweather.

Seguidamente se observa en la gráfica 1 los valores de oleaje expresado en pies, para la misma fecha de la figura 20, con valores de altura de oleaje para cada 3 horas comenzando desde el 1 de enero de 2007 a las 3:00 am; adicionalmente en la gráfica se pueden apreciar valores de período del oleaje y dirección de

propagación predominante del oleaje. Esta información es específicamente para un punto cercano a la isla de Margarita, Latitud N-11,22°; O-63,77°.



Gráfica 1. Ejemplo de gráfica de valores de altura de oleaje, periodo y dirección.
Fuente: Buoyweather.

Una vez obtenida la clasificación de la costa venezolana, se hizo un descarte preliminar de algunos sectores en donde era evidente que el sistema no se puede implantar o no es necesario.

Luego de descartados algunos sectores, con apoyo en los mapas municipales y parroquiales del INE, se procedió a investigar a los centros poblados que se encuentran en la costa de cada sector. Para la identificación de estas localidades, se utilizó información más detallada en los datos adquiridos en el INE, el estudio evolucionó de la revisión de estadísticas de municipio, al exhaustivo análisis estadístico de parroquias e incluso centros poblados de ser necesario, porque al fin y al cabo, estos serán los beneficiarios directos de este servicio, ya que este sistema está enfocado a subsanar problemas localizados.

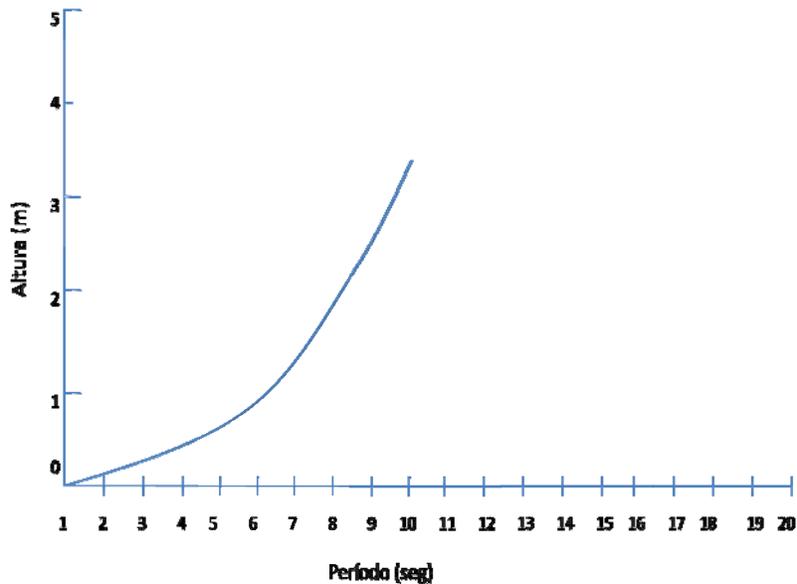
Para cada sector, en un cuadro comparativo con los datos del Censo 2001 del INE, se buscó un balance entre cantidad de habitantes, y deficiencia en la cobertura del servicio eléctrico, ya que puede haber una gran deficiencia del servicio, pero una muy baja población; o por el contrario, puede haber muchos habitantes, pero una buena cobertura de electricidad. Para esto, con porcentaje de

cobertura, y cantidad de habitantes, se calculó en cada parroquia el número de habitantes sin servicio eléctrico, y se seleccionaron aquellos que tuvieran el valor más elevado, lo que es indicativo directo de mayor necesidad del servicio.

Adicionalmente, se sugirieron algunas poblaciones y lugares estratégicos, que es conveniente sean evaluados por cuestiones de soberanía nacional, y potenciales desarrollos turísticos, que puedan impulsar el desarrollo del país y proteger sus intereses territoriales.

Ya una vez identificadas las localidades a ser evaluadas en este objetivo, se creó una tabla con datos del oleaje predominante para cada uno de los lugares, que fueron extraídos del informe de “Estimación Del Régimen Del Oleaje En Las Costas Venezolanas”, esto por ser más preciso que el modelador Buoyweather, debido a que son mediciones reales, realizadas en ese estudio, y que toma en cuenta las distintas derivaciones que pueda tener el oleaje desde que se origina, hasta que llega a nuestras costas, y el Buoyweather solo arroja aproximaciones del oleaje lejano a costa, y se puede utilizar para grandes sectores, y no localidades específicas en las costas. Los datos extraídos específicamente fueron:

- % porcentaje de ocurrencia del oleaje, que viene dado en forma de roquetas, con oleaje incidente desde direcciones Az = 22,5°(N-NE); 67,5°(E-NE); 112,5°(E-SE); 157,5°(S-SE); 202,5° (S-SO); 247,5°(O-SO); 292,5°(O-NO); 337,5°(N-NO). Teniendo en cuenta solo las direcciones de incidencia a cada población, de acuerdo con su orientación hacia el mar, como se puede observar en la gráfica demostrativa 2.



Gráfica 3. Gráfica de Altura de Oleaje vs Período para las costas venezolanas.
Fuente: Hidromet.

Ya con las alturas, los porcentajes y direcciones de incidencia del oleaje se calculó la energía aportada por el oleaje para cada una de las localidades, mediante la Ecuación 7, que es una derivación de la Ecuación 5, que incluye la energía aportada a lo largo de una hora, y la ajusta con el porcentaje de ocurrencia del oleaje de la zona.

$$E = \frac{1}{2} \times \rho \times g \times A^2 \times \left(\frac{3600}{T} \right) \times \left(\frac{\% \text{ Ocurr.}}{100} \right) \quad \text{Ecuación 7}$$

En donde:

E= Energía aportada en Joules por cada hora para cada metro cuadrado.

ρ = Densidad del Agua (1035 para agua salada)

g= Aceleración gravitatoria

A= Altura del oleaje

T= Período típico del oleaje

% Ocurr.= Porcentaje de ocurrencia del oleaje

Obtenidos los datos anteriores se creó una tabla donde a cada una de las poblaciones se les ponderó en base a la energía aportada por el oleaje y la cantidad de viviendas que requieren de servicio eléctrico. Cada una de esas dos variables se transformaron a valores adimensionales con rango desde 0 (cero) hasta 10 (diez), para poder ser comparadas posteriormente de la siguiente manera:

- Se buscó el valor máximo de energía total aportada en una hora de todas las locaciones evaluadas.
- Se dividió el valor de energía total en una hora de cada una de las poblaciones por el valor máximo calculado en el paso anterior.
- Se multiplicó el valor obtenido para cada una de las localidades por 10 para así llevarla al rango de cero a diez en la valoración.
- Se repitieron los pasos anteriores para los datos de viviendas sin electricidad y ponerlos en la misma escala adimensional.

El lugar ideal para la colocación del sistema es donde se presente necesidad de servicio eléctrico y buena cantidad de energía aportada por el oleaje cotidiano marítimo, deben estar presentes ambas cualidades ya que, sin energía del oleaje no se puede producir electricidad por el sistema y sin deficiencia o ausencia de servicio eléctrico no surge necesidad urgente alguna para implementarlo. Debido a que la presencia de oleaje, y su energía aportada, es estrictamente necesaria para implementar el sistema, y hay lugares en donde quizás a pesar de no tener la más alta deficiencia eléctrica, igual se pueda proponer por diversas razones (turísticas, de soberanía nacional, elevar potencial de desarrollo, ambientales, etc.), se le dio

ligeramente más importancia a energía aportada por oleaje, que a deficiencia del servicio.

Teniendo los nuevos valores en escalas adimensionales del 0 al 10, finalmente se hizo un promedio ponderado donde la energía aportada por el oleaje tenía una importancia del 60% y el 40% restante pertenecía a las viviendas sin servicio eléctrico.

El lugar de la costa venezolana con la ponderación más alta recibida en la tabla creada, fue elegido como el más idóneo para la implementación del sistema de aprovechamiento de la energía aportada por el oleaje.

Seguido a la localización de el o los lugares más idóneos para la implementación de una planta undimotriz, se procedió a investigar la tecnología disponible en el mercado, para cotejar como puede ésta interactuar con las poblaciones definidas.

Debido a lo innovador del sistema para el aprovechamiento de energía aportada por el oleaje marítimo, Venezuela no dispone de antecedentes conocidos acerca de este sistema, por lo tanto, no existe compañía ni organismo que pueda aportar información para la investigación. Entonces, el método utilizado para investigar acerca de la tecnología disponible fue el de la búsqueda a través de la internet; solo pocas compañías a nivel mundial, están empezando a diseñar y fabricar la tecnología undimotriz.

Se hizo contacto con las compañías encontradas para solicitar información por medio de correos electrónicos y llamadas telefónicas.

Adicionalmente se hizo una evaluación del alcance que puede tener la tecnología investigada en la solución del problema presentado, para así de forma ilustrativa entender el alcance del sistema y la importancia de su implementación.

Para lo antes mencionado, se realizó una entrevista con el Ingeniero Electricista, Miguel Cova. El producto de la mencionada entrevista fue la estimación del consumo promedio del municipio Páez, las parroquias Higuerote y Caraballeda, y se cotejó cada una con la energía capaz de brindar la tecnología investigada, específicamente con el sistema propuesto por la compañía Hidroflot, con los datos del clima de oleaje de la zona.

Para la estimación de consumo eléctrico de cada localidad, se planteó el gasto de una vivienda tipo, un mercado, un colegio y alumbrado público, para así teniendo la cantidad de casas que requieren servicio eléctrico, poder estimar el consumo necesario que deberá abastecer el sistema propuesto.

Se estimó entonces el consumo eléctrico de las 3 localidades más ideales para la implementación del sistema, que fueron producto de la investigación, y se verificó con la tecnología investigada si podía ser cubierta la demanda, y además se hizo un estimado de costo para cada una de las poblaciones según los valores que expresa la compañía Hidroflot.

Los valores que expresa Hidroflot son de 2 millones de euros por cada megavatio instalado, y sus productos son plataformas de 6 megavatios cada una, por lo que se verificó la cantidad de plataformas necesarias para cubrir la demanda y se multiplicó entonces el mencionado valor de estimación de costo, por seis (numero de megavatios por cada plataforma), y por la cantidad necesaria de plataformas para cubrir la demanda, como se muestra en la ecuación 8.

$$\text{Costo estimado} = 2 \text{ MM euros} \times 6 \frac{\text{megavatios}}{\text{plataforma}} \times \text{cantidad de plataformas}$$

Ecuación 8.

La estructura encargada de contener la planta undimotriz es una parte importante de la implementación del sistema, debido a que la estructura contenedora será quien tenga al sistema generador de electricidad en la posición indicada en todo momento. Deberá ser una estructura resistente debido a que la tecnología investigada es de costo elevado, y un sistema flotando a la deriva posiblemente tenga un final poco alentador, sobre todo con el pasar de temporales o mares de leva, los cuales pueden llevar a las plataformas a colisionar con la orilla de las playas, arrecifes coralinos o amontonamientos rocosos, y como justamente se ha expresado que las olas son ondas, y se repiten, se traduciría en choques consecutivos que serían catastróficos para el sistema.

Para prevenir lo expuesto, el sistema deberá ser más flexible que rígido, por el constante movimiento del oleaje y por la marea que en nuestro país fluctúa diariamente, con una amplitud aproximada de 80cm, movimiento que hará también el sistema. Adicionalmente deberá ser resistente por estar expuesto a la intemperie, temporales y mares de leva, y que permanezca en su ubicación inicial.

Se realizaron esquemas de como estaría contenido el sistema y además se ubicó un lugar específico en donde se debiera permanecer el sistema, para esto, se tiene la premisa de que el sistema deberá estar en aguas profundas.

Para verificar donde queda la zona de aguas profundas, se calculó de acuerdo con la longitud del oleaje más representativo de la zona, con esa longitud de onda, se verifica que la profundidad deba ser mayor a una cuarta parte de la longitud de la ola.

Sabiendo cual es la profundidad indicada para colocar el sistema, se localiza un punto que cumpla esta condición sobre un mapa con información de batimetría de el municipio Páez proporcionado por la Dirección de Hidrografía y Navegación

(DHN) de la Armada de Venezuela, y se realiza un perfil batimétrico de la zona para ilustrar las condiciones en donde estaría dispuesto el sistema.

CAPÍTULO IV
RESULTADOS Y ANÁLISIS

En base a la metodología aplicada, a continuación se presentarán los resultados y análisis efectuados en relación a cada uno de los objetivos planteados al inicio de la investigación a fin de obtener como resultado la definición de las localidades donde se pudiera o sería recomendable la aplicación del sistema, en otras palabras, en qué lugares a lo largo de las costas de Venezuela pudiera ser utilizado el sistema que permitiera disminuir la deficiencia eléctrica a futuro.

Es importante resaltar que la tecnología actual existente para la obtención de energía proveniente del oleaje es novedosa y es ahora que se está colocando en operación en algunos lugares alrededor del mundo, por ende, no se tiene información detallada de su verdadero potencial como energía alternativa, sin embargo, los estudios y pruebas existentes están demostrando ser una energía óptima y limpia, al ser comparada con las convencionales y otras alternativas.

Como fue indicado en el marco metodológico, el análisis y resultados se enfocaron hacia la definición de los sitios idóneos para la implantación, que a su vez determinará la viabilidad de utilizar este tipo de energía en Venezuela, finalizando con el conocimiento de los sistemas actuales existentes en el mercado y bajo investigación, así como las características del sistema y algunas consideraciones importantes para su construcción, operación y uso.

4.1. Caracterización de las costas venezolanas.

Luego de haber recopilado y procesado la información disponible, se clasificó la costa venezolana en 10 sectores que fueron el resultado de la metodología empleada para clasificar las costas venezolanas. Se procuró que cada sector definido tuviera características semejantes, como morfología de la costa, clima de oleaje, accesibilidad, población, entre otros. Cada uno de los sectores resultantes

será descrito a continuación, en orden desde el límite más oeste de nuestro país, y así consecutivamente hasta llegar hasta el final de nuestra costa por el este.

Analizando los datos del INE, debido a que el estado Zulia y el lado oeste del estado Falcón tienen en común el Golfo de Venezuela, despreciando los municipios que se encuentran dentro del Lago de Maracaibo, debido a que este lago no presenta oleaje significativo, se decidió clasificar como un sector costero desde la frontera con Colombia, en un pueblo llamado Castilletes, hasta el límite entre los municipios Los Taques y Falcón, en el centro poblado Boca Jacuque, en el estado Falcón, este sector fue llamado “Golfo de Venezuela” y se ilustra en la figura a continuación.

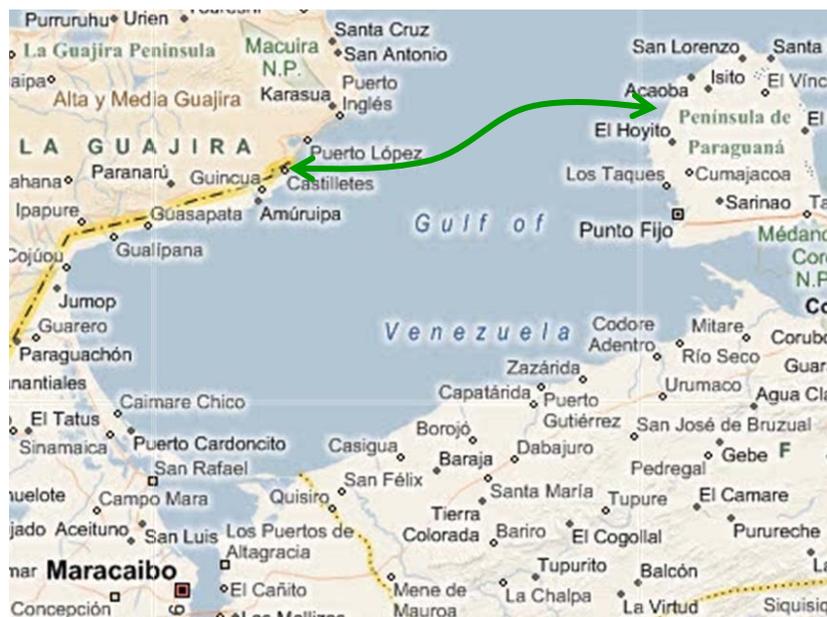


Figura 21. Sector Golfo de Venezuela.
Fuente: Microsoft Virtual Earth.

En el mismo estado Falcón, comenzando desde Boca Jacuque se decidió alcanzar el límite del siguiente sector hasta la población de Curamichate, que es justamente la última población que no tiene acceso por la Troncal 3, que bordea la costa desde Puerto Cabello hasta después de la población La Villa; además que la morfología de sus playas es muy semejante, todas con poca pendiente, este sector fue llamado “Falcón” y se ilustra en la siguiente figura.

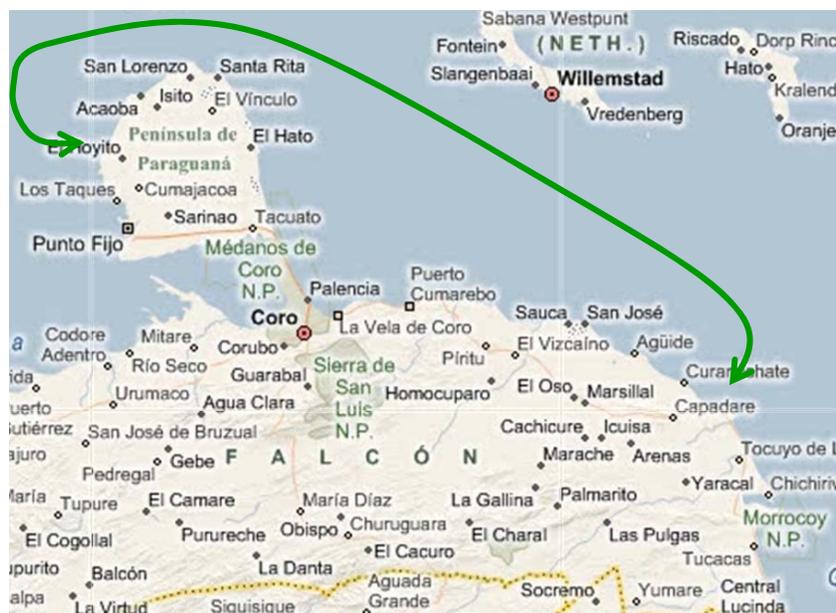


Figura 22. Sector Falcón.
Fuente: Microsoft Virtual Earth.

Debido a que desde Puerto Cabello hasta después de La Villa se extiende la Troncal 3, que es una vía de gran importancia nacional, y con la refinería El Palito en la zona costera cerca de Puerto Cabello, lo cual significa fácil acceso a la electricidad de todas esas poblaciones, se decidió delimitar el nuevo sector desde Curamichate hasta el límite en la costa entre los estados Carabobo y Aragua. Dicho sector se llamó “Morrocoy” y se presenta gráficamente en la siguiente figura.



Figura 23. Sector Morrocoy.
Fuente: Microsoft Virtual Earth.

El siguiente sector se extendió hasta Playa Pintada en el estado Miranda, incluye los estados Vargas y Carabobo completamente, y se decidió extenderlo hasta dicho lugar, debido a que la costa tiene a todo lo largo una morfología similar, propia de playas montañosas, en donde se tiene una alta pendiente en el fondo marino, oleaje significativo, alto nivel de desarrollo de las zonas en general debido a la cercanía con ciudades importantes como Caracas, Valencia, Puerto Cabello e Higerote. Este sector fue llamado “Litoral Central” y abarca el área delimitada en la figura 24.



Figura 24. Sector Litoral Central.
Fuente: Microsoft Virtual Earth.

Comenzando desde Playa Pintada, abarcando Higuero, Río Chico, Puerto Píritu y llegando hasta el cerro El Morro, en Lechería, estado Anzoátegui, se decidió delimitar el siguiente sector, debido a que a lo largo del mismo, las playas poseen poca pendiente, oleaje significativo, fácil acceso por la llamada Carretera de la Costa, que es la troncal 9 del país, la vía de mayor importancia que conecta el oriente con el centro del país, con un tráfico vehicular elevado, que vincula a ciudades como Puerto la Cruz, Barcelona, el puerto de Guanta y Cumaná con la ciudad de Caracas. Este sector fue llamado “Miranda y Anzoátegui” y se ilustra en la siguiente figura.



Figura 25. Sector Miranda y Anzoátegui.
Fuente: Microsoft Virtual Earth.

Desde el Cerro el Morro hasta la Península de Araya, la costa se encuentra protegida tanto por los islotes pertenecientes al parque nacional Mochima, como por la península, lo que influye en un oleaje de baja altura en la zona, por lo tanto se extendió el sector desde el Cerro el Morro hasta la población Punta Colorada en el extremo oeste de la Península de Araya, en el estado Sucre. El sector fue llamado “Mochima” y se puede observar en la figura 26.



Figura 26. Sector Mochima.
Fuente: Microsoft Virtual Earth.

En la isla de Margarita, se decidió tomar la totalidad de sus costas como un solo sector por cuestiones de accesibilidad primordialmente, por ser justamente un conjunto de islas, como se muestra en la figura 27. El sector fue denominado “Nueva Esparta”.



Figura 27. Sector Nueva Esparta.
Fuente: Microsoft Virtual Earth.

Como la parte norte de la costa del estado Sucre se encuentra casi en su totalidad descubierta al mar Caribe, tienen en su generalidad vista hacia el norte, se decidió que un sector abarcara desde Punta Colorada hasta el centro poblado Don Pedro en la Península de Paria del estado Sucre. El sector fue llamado “Sucre Norte” y se puede observar en la siguiente figura.



Figura 28. Sector Sucre Norte.
Fuente: Microsoft Virtual Earth.

El Golfo de Paria se encuentra protegido del oleaje proveniente del Océano Atlántico por las islas de Trinidad y Tobago, al igual que por la Península de Paria, lo que trasciende en un oleaje relativamente tranquilo a lo largo de todo el año, por lo cual, se concluyó que el sector debía abarcar desde Don Pedro hasta el límite costero entre los estados Monagas y Delta Amacuro. El sector fue denominado “Sucre y Monagas Este” y se puede apreciar en la figura 29.



Figura 29. Sector Sucre y Monagas Este.
Fuente: Microsoft Virtual Earth.

Ya clasificada la costa en sectores, se presenta la figura 31 que ilustra sobre un mapa la distribución y alcance de los sectores.

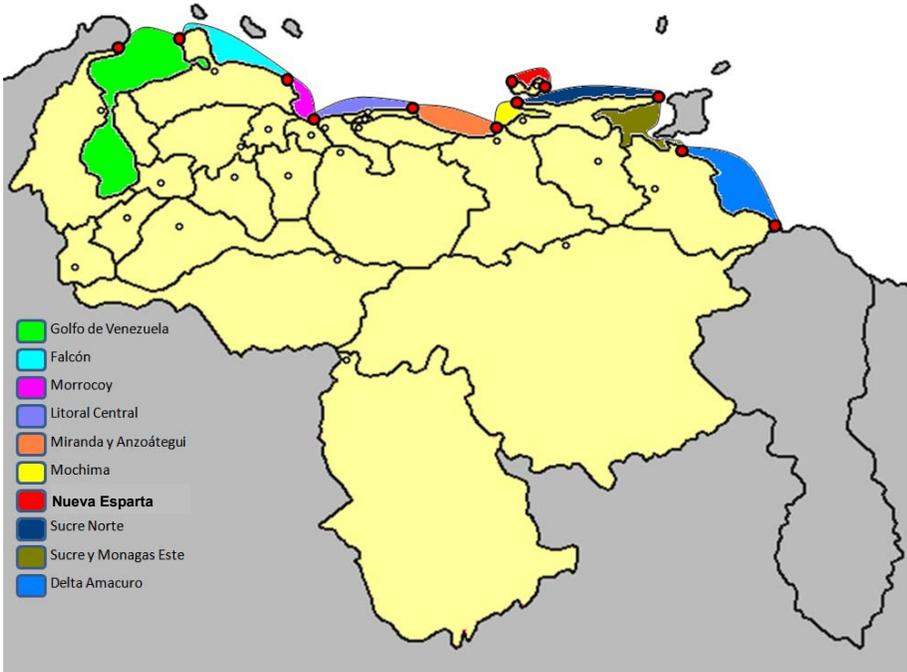


Figura 31. Clasificación de la costa venezolana en sectores.
Fuente: Elaboración propia.

4.2. Evaluación de zonas costeras según su deficiencia de energía eléctrica.

Como se expuso en la metodología, se empezó por un descarte preliminar de sectores en los cuales por diversas consideraciones, no tendría sentido el implementar este tipo de energía alternativa como se expresa a continuación:

Inicialmente se descartó el sector Mochima, debido al bajo oleaje que presenta este sector, causado por los islotes del parque nacional que resguardan toda la costa y debido también a la Península de Araya que cubre el resto del sector, y repercute en un bajo oleaje, como se puede observar en la figura 32.

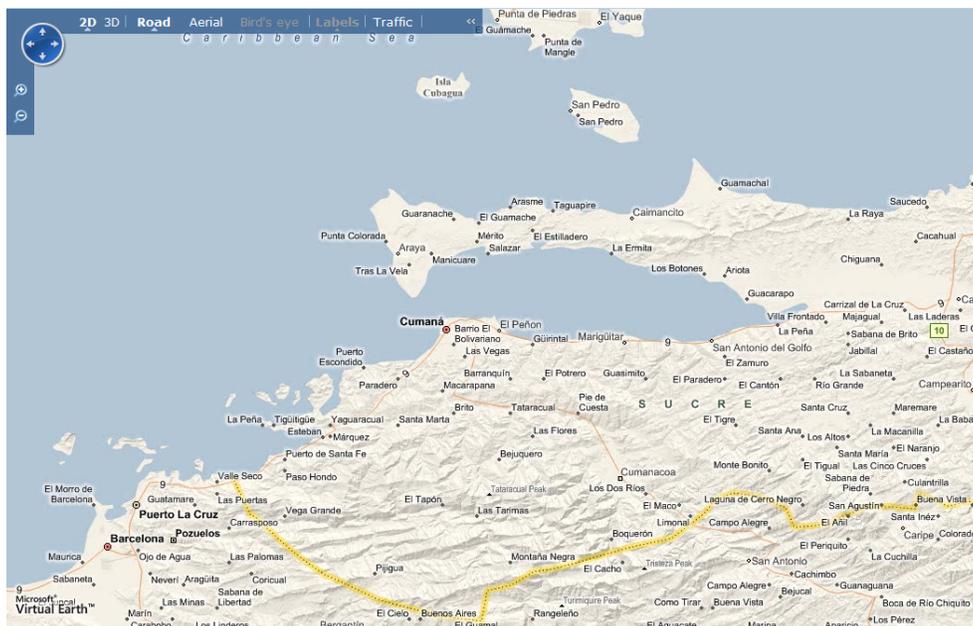


Figura 32. Parque Nacional Mochima y Península de Araya.
Fuente: Microsoft Virtual Earth.

Sucre y Monagas Este, por estar bajo la protección de la isla Trinidad y de la Península de Paria, el oleaje proveniente del Océano Atlántico, lo que resulta bajo oleaje del sector, como su puede apreciar en la figura 33.

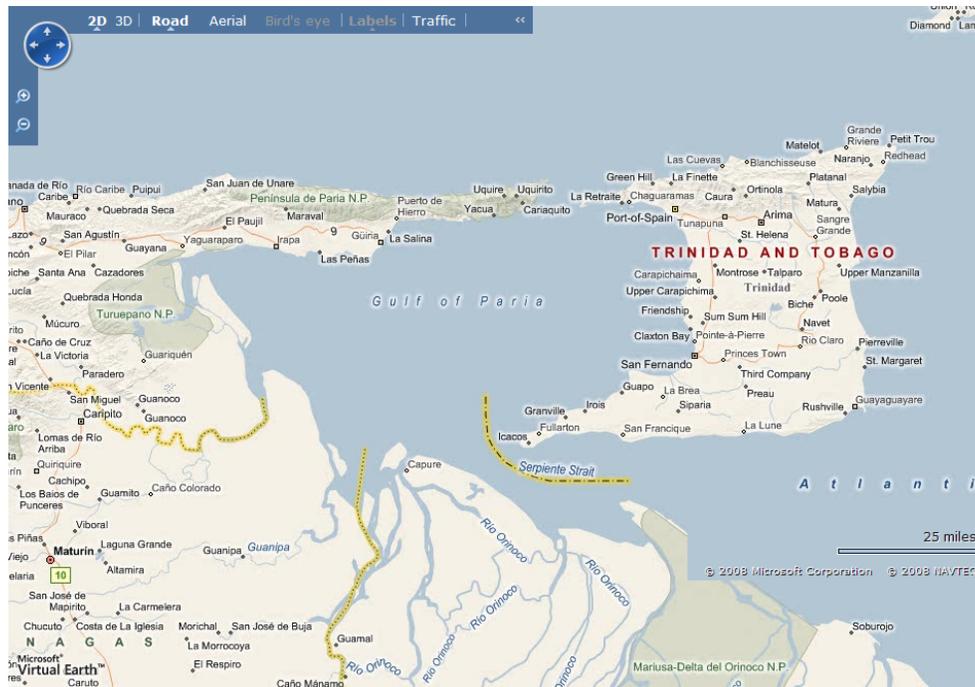


Figura 33. Golfo de Paria.
Fuente: Microsoft Virtual Earth.

Delta Amacuro, debido a que la totalidad de la costa en contacto con mar abierto pertenece a pequeñas islas, separadas de tierra firme por el delta del Río Orinoco, trae como consecuencia la ausencia de vías de comunicación terrestres, y por lo tanto, por informaciones brindadas desde el INE, no se proyecta crecimiento alguno en la zona. Se puede apreciar la costa del estado Delta Amacuro en la figura 34.



Figura 34. Detalle de Costa del estado Delta Amacuro.
Fuente: Microsoft Virtual Earth.

Ya una vez realizado el descarte preliminar, se hizo la selección de al menos una localidad en cada sector, que por distintas consideraciones obedeciendo a la metodología empleada, se perfilan como los mas ideales para la implementación de una planta undimotriz. Dichas localidades resultantes se expresan y analizan a continuación:

En el sector Golfo de Venezuela, aunque la parroquia de Punta Cardón es la que tiene la mayor cantidad de habitantes sin servicio eléctrico, como se muestra en la tabla 2, su posición geográfica la tiene resguardada del oleaje predominante en

nuestro país(N-NE y E-NE); le sigue la parroquia de Idelfonso Vásquez, del municipio Maracaibo, pero al pertenecer a la zona metropolitana del estado Zulia tiene más fácil el acceso al suministro eléctrico convencional, por lo que se eligió a la parroquia Guajira, que junto con las parroquias Alta Guajira y Sinamaica, forman el municipio Páez; que tiene grandes fallas eléctricas, como se puede observar en la tabla 2, tienen vías de comunicación de difícil acceso y por ser un municipio fronterizo con Colombia es de suprema importancia por cuestiones de soberanía nacional.

Tabla 2. Tabla extraída del Nomenclador de Centros Poblados para el sector Golfo de Venezuela.

ENTIDAD	MUNICIPIO	PARROQUIA	% COBERTURA DE SERVICIO ELÉCTRICO	SUMA DE HABITANTES SIN ELECTRICIDAD
Zulia	Maracaibo	Idelfonso Vásquez	83.92%	16 921
		Olegario Villalobos	79.69%	13 615
		Coquivacoa	85.45%	11 383
		Santa Lucía	85.45%	4 909
	Total Maracaibo		83.30%	46 829
	Páez	Guajira	59.90%	13 576
		Alta Guajira	4.10%	4 059
		Sinamaica	78.86%	2 794
	Total Páez		59.56%	20 429
	Mara	San Rafael	Tamare	82.92%
Total Mara			84.20%	7 121
Miranda		Altagracia	85.39%	6 346
Total Miranda		85.39%	6 346	
Almirante Padilla	Monagas	Isla de Toas	81.02%	1 265
		Total Almirante Padilla		72.86%
	Falcón	Carirubana	Punta Cardón	74.68%
Carirubana			88.43%	7 349
Norte			88.97%	6 580
Santa Ana			75.44%	3 025
Total Carirubana		82.59%	34 053	
Miranda	San Gabriel	86.65%	5 625	

ENTIDAD	MUNICIPIO	PARROQUIA	% COBERTURA DE SERVICIO ELÉCTRICO	SUMA DE HABITANTES SIN ELECTRICIDAD
		Santa Ana	85.03%	2 314
		Mitare	41.23%	790
		Río Seco	80.95%	340
	Total Miranda		84.51%	9 069
	Buchivacoa	Capatárida	48.70%	3 065
		Zazárida	63.05%	1 571
		Borojó	55.98%	711
	Total Buchivacoa		53.92%	5 346
	Los Taques	Los Taques	69.52%	4 968
	Total Los Taques		69.52%	4 968
	Mauroa	Casigua	60.00%	2 029
		San Félix	53.04%	1 017
	Total Mauroa		57.77%	3 046
	Urumaco	Urumaco	64.61%	1 511
	Total Urumaco		64.61%	1 511

Fuente: INE.

De este modo fue elegido el conjunto del municipio Páez, el lugar más apropiado del sector Golfo de Venezuela.

En el sector Falcón, la parroquia que presenta mayor problemática de servicio eléctrico, es la de Puerto Cumarebo, como se observa en la tabla 3, y por estar descubierta al oleaje predominante a nuestro país, presenta condiciones adecuadas para que fuera elegida como la localidad más adecuada de este sector.

Tabla 3. Tabla extraída del Nomenclador de Centros Poblados para el sector Falcón.

ENTIDAD	MUNICIPIO	PARROQUIA	% COBERTURA DE SERVICIO ELÉCTRICO	SUMA DE HABITANTES SIN ELECTRICIDAD
Falcón	Falcón	Adícora	22.65%	2 226
		Jadacaquiva	57.86%	1 391
		El Vínculo	46.55%	1 199
		Baraived	56.75%	1 051
		El Hato	70.63%	764
	Total Falcón		41.14%	6 631
Acosta	Acosta	San Juan de los Cayos	60.49%	2 409
		Capadare	80.13%	1 110
		La Pastora	65.96%	1 031
	Total Acosta		67.59%	4 550
Zamora	Puerto Cumarebo	81.55%	3 913	
	Total Zamora		81.55%	3 913
Colina	Colina	La Vela de Coro	83.27%	3 755
	Total Colina		83.27%	3 755
Píritu	Píritu	Píritu	68.55%	2 014
		San José de la Costa	67.31%	720
	Total Píritu		68.22%	2 734
Tocópero	Tocópero	Capital Tocópero	71.89%	1 194
	Total Tocópero		71.89%	1 194

Fuente: INE.

Para el sector Morrocoy, la parroquia Tucacas es la que presentan la mayor problemática de electricidad, como se observa en la tabla 4, la zona se encuentra descubierta al oleaje lo que la favorece, por lo que se eligió como la más apropiada del sector.

Tabla 4 . Tabla extraída del Nomenclador de Centros Poblados para el sector Morrocoy.

ENTIDAD	MUNICIPIO	PARROQUIA	% COBERTURA DE SERVICIO ELÉCTRICO	SUMA DE HABITANTES SIN ELECTRICIDAD
Falcón	Silva	Tucacas	35.24%	12 471
		Boca de Aroa	48.10%	3 837
	Total Silva		38.02%	16 308
	Monseñor Iturriza	Chichiriviche	31.93%	5 036
		Boca de Tocuyo	40.30%	875
	Total Monseñor Iturriza		32.94%	5 911
	Carabobo	Juan José Mora	Urbana Morón	79.50%
No Urbana Urama			76.90%	1 812
Total Juan José Mora		79.10%	11 515	
Puerto Cabello		Urbana Juan José Flores	90.98%	5 836
		Urbana Fraternidad	88.05%	1 227
		No Urbana Patanemo	69.07%	999
		No Urbana Borburata	80.34%	872
Total Puerto Cabello		88.24%	9 611	

Fuente: INE.

Para el sector Litoral Central, se eligió la parroquia Caraballeda por ser la que presenta mayor número de habitantes sin acceso a la electricidad, como se puede observar en la tabla 5.

Tabla 5. Tabla extraída del Nomenclador de Centros Poblados para el sector Litoral Central.

ENTIDAD	MUNICIPIO	PARROQUIA	% COBERTURA DE SERVICIO ELÉCTRICO	SUMA DE HABITANTES SIN ELECTRICIDAD	
Vargas	Vargas	Caraballeda	38.57%	17 011	
		Raúl Leoni	60.70%	13 300	
		Catía La Mar	84.12%	13 114	
		Carayaca	57.53%	10 721	
		Naiguatá	40.14%	7 686	
		Macuto	58.02%	5 980	
		Maiquetía	86.08%	4 528	
		La Guaira	84.17%	3 065	
		Caruao	44.69%	2 858	
Aragua	Girardot	Urbana Madre María de San José	77.16%	13 033	
		Urbana José Casanova Godoy	88.43%	7 727	
		Urbana Andrés Eloy Blanco	85.88%	7 573	
		Urbana Los Tacariguas	91.72%	5 200	
		Urbana Las Delicias	91.08%	4 365	
		Urbana Pedro José Ovalles	94.25%	3 471	
		Urbana Joaquín Crespo	93.49%	2 745	
		No Urbana Choroní	58.70%	1 723	
	Total Girardot	87.42%	45 838		
	Santiago Mariño	No Urbana Samán de Güere	Capital Santiago Mariño	84.68%	6 704
			No Urbana Arévalo Aponte	86.93%	4 028
			No Urbana Alfredo Pacheco Miranda	94.55%	1 059
			No Urbana Chuao	55.12%	481
			Total Santiago Mariño	87.30%	19 451
	Tovar	Capital Tovar		64.24%	5 007
Total Tovar			64.24%	5 007	
Ocumare de La Costa de Oro	Capital Ocumare de La Costa de Oro		31.38%	4 212	
		Total Ocumare	31.38%	4 212	

Fuente: INE.

En el Sector Miranda y Anzoátegui, se presenta la mayor necesidad de energía eléctrica en la parroquia El Carmen, pero por pertenecer a la zona metropolitana, específicamente a la ciudad de Barcelona, capital del estado Anzoátegui, condición por la que sería más factible subsanar su problemática a través de la red nacional de distribución, se descartó entonces y se eligió a Higueroite, que sigue en el número de habitantes sin electricidad, datos que son observables en la tabla 6.

Tabla 6. Tabla extraída del Nomenclador de Centros Poblados para el sector Miranda y Anzoátegui.

ENTIDAD	MUNICIPIO	PARROQUIA	% COBERTURA DE SERVICIO ELÉCTRICO	SUMA DE HABITANTES SIN ELECTRICIDAD
Anzoátegui	Simón Bolívar	El Carmen	83.97%	28 864
		San Cristóbal	84.58%	22 937
	Total Simón Bolívar		84.24%	51 802
	Fernando de Peñalver	Capital Fernando de Peñalver	53.00%	8 858
		Sucre	38.61%	1 336
	Total Fernando de Peñalver		50.91%	10 194
	San Juan de Capistrano	Capital Boca de Uchire	51.18%	3 155
		Boca de Chávez	35.92%	511
	Total San Juan de Capistrano		48.18%	3 666
Miranda	Brión	Higueroite	30.05%	16 197
	Total Brión		30.05%	16 197
	Páez	Río Chico	44.63%	8 126
		Tacarigua de La Laguna	35.56%	2 336
		Paparo	19.64%	876
	Total Páez		39.99%	11 338
	Pedro Gual	Machurucuto	36.89%	488
	Total Pedro Gual		36.89%	488

Fuente: INE.

Para el estado Nueva Esparta, cuyo sector lo abarca en su totalidad y lleva el mismo nombre, se decidió elegir a dos parroquias: Capital Mariño por poseer el

número más desfavorable en necesidad del servicio (ver tabla 7), pero que se encuentra en una posición geográfica donde solo el oleaje proveniente desde el Este se puede aprovechar, el cual es un oleaje todavía importante por sí solo, y la parroquia de Capital Maneiro, siguiente en la lista de las personas sin servicio eléctrico y tiene una muy buena posición para el oleaje proveniente desde el Este, Nor-Este Norte, oleajes con mayor porcentaje de ocurrencia en nuestro país.

Tabla 7. Tabla extraída del Nomenclador de Centros Poblados para el sector Nueva Esparta.

ENTIDAD	MUNICIPIO	PARROQUIA	% COBERTURA DE SERVICIO ELÉCTRICO	SUMA DE HABITANTES SIN ELECTRICIDAD
Nueva Esparta	Mariño	Capital Mariño	63.92%	30 502
	Total Mariño		63.92%	30 502
	Maneiro	Capital Maneiro	53.77%	8 602
		Aguirre	53.63%	7 788
	Total Maneiro		53.70%	16 389
	Díaz	Capital Díaz	75.88%	7 626
		Zabala	60.97%	6 019
	Total Díaz		70.55%	13 644
	García	Francisco Fajardo	77.76%	7 282
		Capital García	72.27%	3 582
	Total García		76.11%	10 864
	Marcano	Capital Marcano	70.41%	5 229
		Adrián	65.89%	3 551
	Total Marcano		68.64%	8 780
	Gómez	Capital Gómez	67.44%	3 644
		Sucre	66.53%	2 848
		Guevara	81.01%	876
		Matasiete	77.96%	874
		Bolívar	76.12%	430
	Total Gómez		70.72%	8 672
	Antolín del Campo	Capital Antolín del Campo	62.30%	7 662
	Total Antolín del Campo		62.30%	7 662
	Arismendi	Capital Arismendi	71.64%	6 550
	Total Arismendi		71.64%	6 550

ENTIDAD	MUNICIPIO	PARROQUIA	% COBERTURA DE SERVICIO ELÉCTRICO	SUMA DE HABITANTES SIN ELECTRICIDAD
	Tubores	Capital Tubores	80.71%	3 493
		Los Barales	78.66%	2 035
	Total Tubores		80.05%	5 528
	Península de Macanao	San Francisco	75.47%	2 680
		Capital Península de Macanao	81.99%	1 581
	Total Península de Macanao		78.46%	4 261
	Villalba	Capital Villalba	78.00%	1 054
		Vicente Fuentes	79.24%	681
	Total Villalba		78.52%	1 735

Fuente: INE.

Por último, el sector Sucre Norte, en la tabla 8 se evidencia que la parroquia Santa Catalina es la que tiene mayor necesidad de electricidad, y no hay factores adicionales que puedan ser tomados en consideración para esta selección, porque toda la costa de este sector, mira por igual hacia el norte y tiene características de mucha semejanza en todas sus poblaciones.

Tabla 8. Tabla extraída del Nomenclador de Centros Poblados para el sector Sucre Norte.

ENTIDAD	MUNICIPIO	PARROQUIA	% COBERTURA DE SERVICIO ELÉCTRICO	SUMA DE HABITANTES SIN ELECTRICIDAD
Sucre	Bermúdez	Santa Catalina	83.49%	9 096
		Bolívar	74.54%	7 528
		Santa Rosa	82.14%	5 027
		Santa Teresa	82.28%	856
	Total Bermúdez		80.74%	22 507
	Arismendi	Río Caribe	77.69%	5 158
		Antonio José de Sucre	42.06%	1 675
Puerto Santo		77.66%	1 310	
El Morro de Puerto Santo		83.73%	1 176	
		San Juan de Las Galdonas	70.14%	1 172

ENTIDAD	MUNICIPIO	PARROQUIA	% COBERTURA DE SERVICIO ELÉCTRICO	SUMA DE HABITANTES SIN ELECTRICIDAD
	Total Arismendi		74.86%	10 492
	Ribero	Villa Frontado (Muelle de Cariaco)	74.84%	6 982
		Rendón	77.79%	1 061
	Cruz Salmerón Acosta	Araya	79.60%	3 418
		Chacopata	69.89%	1 794
		Manicuare	70.12%	1 534
	Total Cruz Salmerón Acosta		75.24%	6 746
	Andrés Eloy Blanco	Mariño	75.46%	3 227
	Total Andrés Eloy Blanco		75.46%	3 227

Fuente: INE.

Producto del análisis de cada sector, se obtuvieron entonces un total de 8 localidades, identificadas como las más potenciales para la implementación del sistema undimotriz, que se resumen a continuación en la tabla 9.

Tabla 9. Tabla resumen de localidades elegidas.

ENTIDAD	MUNICIPIO	PARROQUIA
Falcón	Silva	Tucacas
	Zamora	Puerto Cumarebo
Miranda	Brión	Higuerote
Nueva Esparta	Maneiro	Capital Maneiro
	Mariño	Capital Mariño
Sucre	Bermúdez	Santa Catalina
Vargas	Vargas	Caraballeda
Zulia	Páez	

Fuente: INE.

Para ilustrar como quedaron distribuidas las localidades identificadas en el país, se muestra la figura 35



Figura 35. Localización de Localidades Identificadas.
Fuente: Modificación sobre plano base de MapSource.

Adicionalmente a las localidades ya identificadas, fue necesario sugerir las siguientes localidades:

La Dependencia Federal Isla de Aves, puesto que gracias a su presencia, representa para la nación más de 150.000km² de zona de exclusividad económica y mar patrimonial que tienen un gran potencial en yacimientos de gases e hidrocarburos, es muy pequeña, con una longitud máxima de 150m y apenas 2 msnm en su punto más alto y cada día va perdiendo mas superficie porque se

encuentra en un proceso natural de erosión, y de perder totalmente su superficie, significaría la pérdida para el país de gran parte de este mar territorial que ella representa. En la figura a continuación se muestra la evolución de Isla de Aves a través del tiempo.

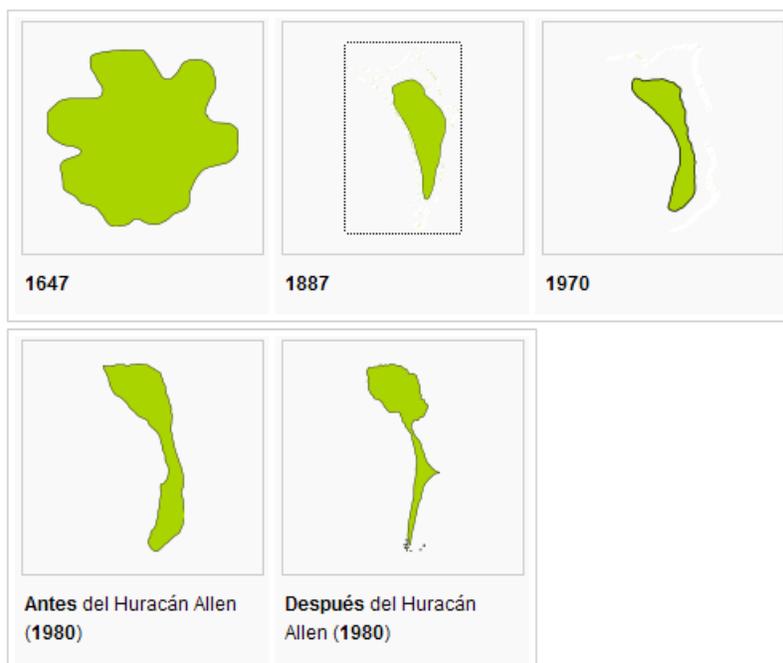


Figura 36. Mapas Históricos de Isla de Aves.
Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Isla_de_Aves.

La posición tan alejada, casi en el centro del Mar Caribe mantiene a Isla de Aves despoblada, y algunos estados como la Mancomunidad de Dominica lo reclaman como suyo. Por esto es de vital importancia estudiarla para poder desarrollarla, y tener presencia permanente por cuestiones de soberanía nacional. En la figura 37 se puede apreciar la posición de isla de aves en el mapa venezolano.

La Dependencia Federal Isla la Tortuga, para apoyar el desarrollo turístico que se está planificando en torno a ella. Ésta energía limpia ayudaría a minimizar el impacto ambiental que puedan causar plantas eléctricas de combustibles. La posición de la Isla la tortuga se muestra en la siguiente figura.



Figura 38. Posición en el mapa venezolano de la Isla la Tortuga.
Fuente: Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar.

Los puntos fronterizos del país, como Castillete, en Zulia que colinda con Colombia, y Punta Barima en Delta Amacuro que limita con la Guyana Esequiba, son pueblos de interés para resguardar nuestras fronteras para cuestiones de soberanía nacional.

4.3. Determinación de las zonas costeras idóneas para la implementación de plantas de energía undimotrices.

Una vez identificadas las localidades costeras a ser evaluadas, se procedió a realizar las tablas comparativas con las que se definiría la más apropiada.

En la tabla 10 se sintetizaron los valores extraídos, referentes al clima de oleaje, del informe de Hidromet “Estimación Del Régimen De Oleaje En Las Costas Venezolanas” para cada una de las poblaciones elegidas.

Tabla 10. Clima de oleaje para las localidades elegidas a evaluar.

ENTIDAD	MUNICIPIO	PARROQUIA	% OLEAJE DE 0.90m	% OLEAJE DE 1.50m	% OLEAJE DE 2.10m
Falcón	Silva	Tucacas	46.86	12.13	0.35
Falcón	Zamora	Puerto Cumarebo	41.54	20.01	3.08
Miranda	Brión	Higuerote	49.82	6.69	0.29
Nva Esparta	Mariño	Capital Mariño	45.23	3.81	0.22
Nva Esparta	Maneiro	Capital Maneiro	45.23	3.81	0.22
Sucre	Bermúdez	Santa Catalina	45.23	3.81	0.22
Vargas	Vargas	Caraballeda	47.86	10.79	0.50
Zulia	Páez		32.32	34.27	11.31

Fuente: Elaboración propia con datos extraídos de Hdromet.

En la tabla 11 se expresan los valores de energía aportada por el oleaje en cada locación seleccionada.

Tabla 11. Energía aportada por el oleaje para las localidades elegidas a evaluar.

ENTIDAD	MUNICIPIO	PARROQUIA	ENERGÍA OLEAJE EN UNA HORA 0.90m (Kj/m ²)	ENERGÍA OLEAJE EN UNA HORA 1.50m (Kj/m ²)	ENERGÍA OLEAJE EN UNA HORA 2.10m (Kj/m ²)	ENERGÍA TOTAL EN UNA HORA (Kj/m ²)
Falcón	Silva	Tucacas	1824	792	35	2651
Falcón	Zamora	Puerto Cumarebo	1617	1306	310	3233
Miranda	Brión	Higuerote	1939	437	29	2405
Nva Esparta	Mariño	Capital Mariño	1760	249	22	2031

ENTIDAD	MUNICIPIO	PARROQUIA	ENERGÍA OLEAJE EN UNA HORA 0.90m (Kj/m2)	ENERGÍA OLEAJE EN UNA HORA 1.50m (Kj/m2)	ENERGÍA OLEAJE EN UNA HORA 2.10m (Kj/m2)	ENERGÍA TOTAL EN UNA HORA (Kj/m2)
Nva Esparta	Maneiro	Capital Maneiro	1760	249	22	2031
Sucre	Bermúdez	Santa Catalina	1760	249	22	2031
Vargas	Vargas	Caraballeda	1863	704	50	2617
Zulia	Páez		1258	2237	1139	4634

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 12, se dispusieron los valores de energía total aportada por el oleaje a lo largo de una hora y cantidad de vivienda sin servicio eléctrico para cada una de las poblaciones

Tabla 12. Valores de energía y servicio para localidades seleccionadas.

ENTIDAD	MUNICIPIO	PARROQUIA	ENERGÍA TOTAL EN UNA HORA (Kj/m2)	VIVIENDAS SIN ELECTRICIDAD
Zulia	Páez		4634	3768
Miranda	Brión	Higuerote	2405	12787
Vargas	Vargas	Caraballeda	2617	11618
Falcón	Silva	Tucacas	2651	8025
Nva Esparta	Mariño	Capital Mariño	2031	9131
Falcón	Zamora	Puerto Cumarebo	3233	1072
Nva Esparta	Maneiro	Capital Maneiro	2031	3311
Sucre	Bermúdez	Santa Catalina	2031	2403

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 13, se usaron los valores transformados adimensionales en rango de 0 a 10 para las variables de energía aportada por el oleaje y cantidad de viviendas sin electricidad, y se expresó el promedio ponderado de esas valoraciones con

importancias de 60% a la energía aportada y 40% a las viviendas sin servicio eléctrico.

Tabla 13. Tabla ponderada comparativa.

ENTIDAD	MUNICIPIO	PARROQUIA	VALORACIÓN ENERGÍA APORTADA	VALORACIÓN VIVIENDAS SIN ELECTRICIDAD	PROMEDIO PONDERADO
Zulia	Páez		10.0	2.9	7.2
Miranda	Brión	Higuerote	5.2	10.0	7.1
Vargas	Vargas	Caraballeda	5.6	9.1	7.0
Falcón	Silva	Tucacas	5.7	6.3	5.9
Nva Esparta	Mariño	Capital Mariño	4.4	7.1	5.5
Falcón	Zamora	Puerto Cumarebo	7.0	0.8	4.5
Nva Esparta	Maneiro	Capital Maneiro	4.4	2.6	3.7
Sucre	Bermúdez	Santa Catalina	4.4	1.9	3.4

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, como se puede observar en la tabla 13, la población más indicada según este estudio para la implementación del sistema de generación de electricidad con el oleaje cotidiano marítimo es la del municipio Páez, ubicada en el estado Zulia, además, las parroquias de higuerote en Miranda y Caraballeda del estado Vargas obtuvieron un valor alto en la ponderación, cercano al del municipio Páez.

4.4. Características del sistema undimotriz.

Debido a lo novedoso de la energía alternativa investigada, que en Venezuela no existe referencia alguna acerca del sistema, y que a nivel mundial, compañías y organismos apenas se encuentran en etapas de investigación, y en el mejor de los

casos en planificación de los primeros proyectos, se dificultó el conseguir información detallada de las diversas tecnologías en desarrollo.

En el Reino Unido se encontró que la compañía Wavehub, terminaría para el presente año, un proyecto que debería estar completado para la primavera del año 2010. El sistema propuesto por ellos es de boyas superficiales que oscilan con el pasar de las olas.

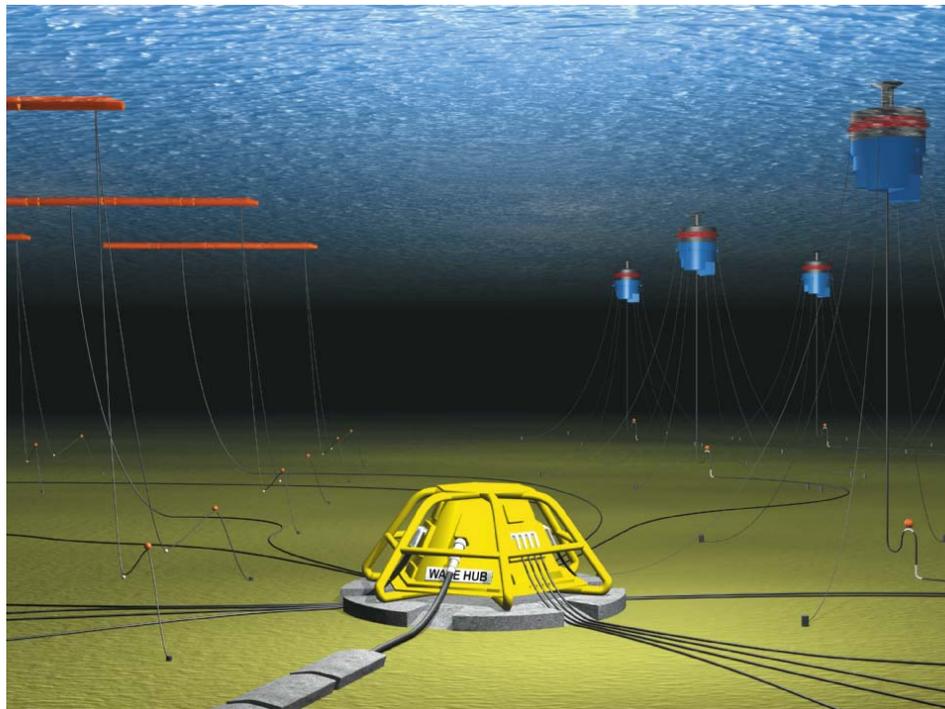


Figura 39. Sistema Wavehub.
Fuente: www.wavehub.co.uk

Otra empresa británica, llamada AWS Ocean Energy tiene un sistema que funciona construyendo una boya submarina que puede aprovechar la energía de las olas a una profundidad de 50 metros bajo la superficie.

La boya, a la que llaman “buoybu”, es capaz de capturar la energía de la ola a distancia a través de los cambios en la presión que producen las olas al incrementar y reducir la columna de agua. Esto sucede cuando una ola pasa sobre la boya en la superficie, lo cual provoca una elevación en la presión local del agua y el hundimiento de la mitad superior del dispositivo. Entre olas, la columna de agua decrece, devolviendo la presión del agua a su valor normal y provocando que la mitad superior de la boya se eleve de nuevo. Esta variación en la presión se convierte en electricidad, que luego puede añadirse a la red eléctrica.

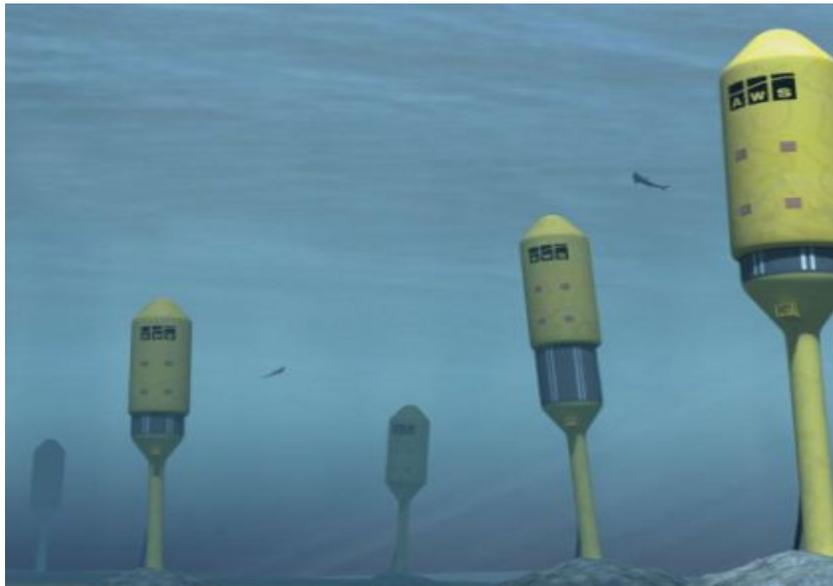


Figura 40. Sistema de boyas buoybu propuesto por AWS Ocean Energy.
Fuente: <http://www.awsocan.com/>

En Uruguay está en planes la construcción de una central undimotriz, aunque se encuentra paralizado por problemas políticos en cuanto al proyecto. Se planea utilizar un sistema llamado Pelamis.

El sistema Pelamis consiste en una serie de secciones cilíndricas parcialmente sumergidas, unidas por juntas bisagra. La ola induce un movimiento relativo entre dichas secciones, activando un sistema hidráulico interior que bombea aceite a

alta presión a través de un sistema de motores hidráulicos, equilibrándose con el contenido en unos acumuladores.

Los motores hidráulicos están acoplados a un generador eléctrico para producir electricidad. Se estima que la cantidad de energía obtenida por 30 de estos sistemas, podría abastecer aproximadamente 20.000 hogares con un consumo medio europeo.

La potencia de todos los sistemas hidráulicos de un elemento se transporta mediante un sólo cable a una base situada en el lecho oceánico. Varios elementos se pueden interconectar a una misma base para unir su potencia de generación y trasladar la energía producida mediante un sólo cable submarino hacia la costa.

Lo único desfavorable del sistema es que siempre debe estar el sistema orientado en una dirección específica para que pueda aprovechar el oleaje



Foto 8. Sistema Pelamis propuesto para Uruguay.

Fuente: <http://www.armandobronca.com/energia-undimotriz-para-uruguay-electricidad-de-las-olas/>

Existe otro dispositivo llamado “de columna de agua oscilante”, este va dispuesto en la costa y se compone de una estructura hueca, abierta por debajo del nivel del mar, el movimiento oscilatorio que produce la ola presuriza y despresuriza la estructura hueca por dentro, y a través de una apertura superficial con una turbina, llamada “Wells” por su inventor Alan Wells, que mantiene constante el sentido de revolución de la turbina sin importar la dirección de propagación del aire encapsulado dentro del sistema

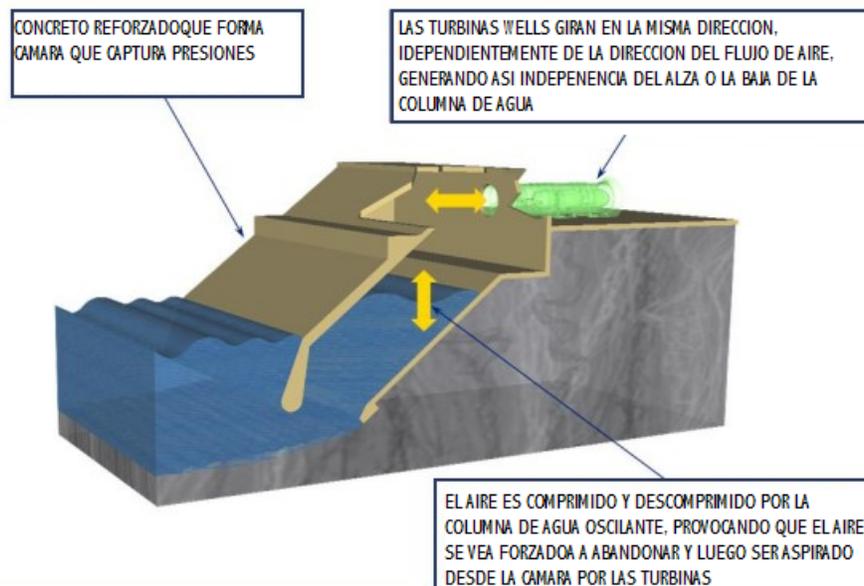


Figura 41. Sistema de columna de agua oscilante.

Fuente: Wavegen.

El concepto también se conoció de un sistema llamado “Salter Duck” que intenta aprovechar tanto la energía potencial como la cinética del oleaje y consta de un ala oscilante que rota con el movimiento de las olas.

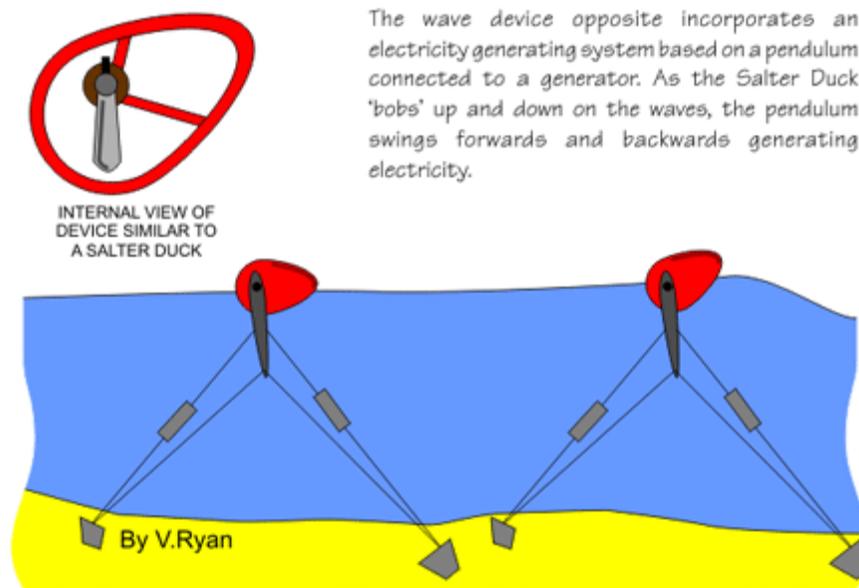


Figura 42. Dispositivo Salter Duck.
Fuente: www.celsias.com/.../23/ocean-power-on-the-rise/

Entre las compañías que se encontraron que trabajan en esa área, se halló también, en Barcelona, España, Hidroflot s.l. con la que fue más fácil por cuestiones de idioma tener contacto. Se escribieron correos a la compañía explicando la investigación en proceso y se tuvo la oportunidad de concertar una cita con Ricardo Prats Canós, quien se desempeña como Director Gerente, en la sede de su compañía en Barcelona, España. En la mencionada cita, el Director Gerente indicó que la compañía nace como una idea e investigación desde el año 2000 y que a lo largo de 5 años hubo avances importantes en los ideales que llevaron a la constitución de la compañía, con soporte del ministerio de Educación y Ciencia de España. Al momento de la reunión ya la compañía contaba con respaldo de diversos organismos de la Unión Europea y habían conseguido varios reconocimientos. El empresario explicó que todo el sistema era auténtico desde la pieza más pequeña hasta el sistema visto como un todo, por lo que ellos están protegidos con derechos de autor para evitar plagios.

Básicamente, el sistema consta de una o varias plataformas flotantes con un sistema de 16 boyas, que genera alrededor de 6 Megavatios, y cada plataforma está conectada a una boya única de conexión central, que se encarga de recolectar la energía proveniente de todas las plataformas y la reenvía a la costa por medio de un cable submarino.

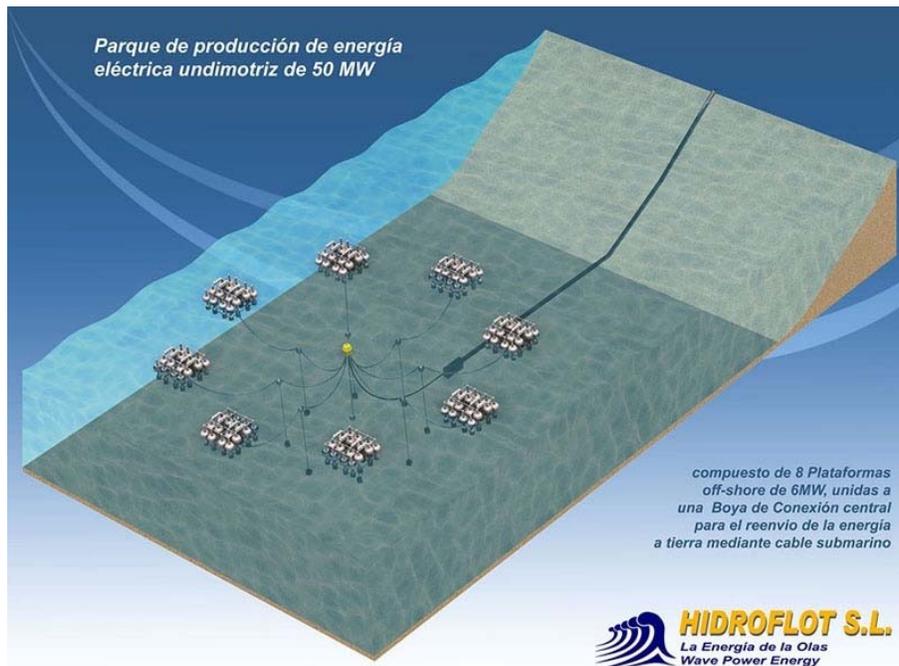


Figura 43. Parque de producción de energía eléctrica undimotriz de 50MW.
Fuente: Hidroflot s.l.

Obtenidos los resultados de la investigación de las tecnologías en desarrollo se sintetizaron algunas cualidades de cada tipo de sistema como se puede observar en la tabla 14.

Tabla 14. Características de la tecnología investigada.

Sistema	¿Depende de la dirección del oleaje?	Ubicación	Mantenimiento	Construcción
Boya Oscilante	no	Aguas Profundas	Difícil	Se confecciona, y ensambla en tierra y se coloca similar al sembrado de boyas
Pelamis	si	Aguas Profundas	Difícil	Se confecciona, y ensambla en tierra y se coloca similar al sembrado de boyas
Columna de agua oscilante	no	Costa Rocosa	Mediano	Estructura monolítica y compleja por su ubicación en zona rocosa
Salter Duck	si	Aguas Profundas	Difícil	Se confecciona, y ensambla en tierra y se coloca similar al sembrado de boyas

Fuente. Elaboración propia.

Cuando se expresa en la tabla 14, si el sistema depende o no de la dirección del oleaje, se debe a que algunos deben estar direccionados en una posición específica para así aprovechar el oleaje que proviene de esa dirección, el no depender de una dirección específica significa que se aprovecha la totalidad del oleaje presente en donde esté ubicado el generador, y no se desperdician oleajes que sean distintos a la dirección principal de propagación del oleaje.

Algunos sistemas están diseñados para operar en aguas profundas, lo que está directamente relacionado con la dificultad para realizar mantenimiento del tipo

preventivo y correctivo. Se requiere embarcaciones y buzos para realizar estas actividades.

Adicionalmente en la tabla 14, se expresa la logística en la construcción del sistema, el menos complicado es el que se arma en tierra firme y luego es llevado al mar y dispuesto como se hace el sembrado de boyas; se disponen los muertos de concreto pobre en el fondo marino, se atan las cadenas o cables al muerto y se amarran al sistema. Por otro lado, está el sistema de Columna de Agua Oscilante, que es una estructura monolítica de concreto armado, que debe ser resistente al oleaje, puesto que se encuentra en la posición de la rompiente de las olas, donde se libera una gran cantidad de energía, y debe soportar también los embates producidos por el efecto de mares de leva y tormentas.

Para ilustrar lo que es capaz de abarcar un sistema undimotriz, se hizo un estimado de demanda de consumo eléctrico para el municipio Páez, el cual fue encontrado como el de mayor potencial para implementar el sistema. Dicha demanda fue comparada con la información aportada por la empresa Hidroflot s.l.

Primero se generó una tabla con el gasto típico que pueda tener una vivienda rural, que se puede observar en la tabla 15.

Tabla 15. Consumo eléctrico estimado de una vivienda rural.

Equipo	Cantidad	Consumo Energético	Horas al día de Consumo	Horas Semanales	Consumo Mensual en kW
Plancha	1	1250	1.0	7.0	35
Nevera	1	700	12.0	84.0	235
Licuada	1	100	0.5	3.5	1
Lavadora	1	500	0.8	5.6	11
Ventilador	2	100	10.0	70.0	56
Tv	2	250	6.0	42.0	84
Radio	1	50	8.0	56.0	11
Bombillos	6	80	6.0	42.0	81
Total		3030			515

Fuente: Ing. Miguel Cova.

Se hizo un estimado de consumo para un colegio, en tabla 16.

Tabla 16. Consumo eléctrico estimado de un colegio rural.

Equipo	Cantidad	Consumo Energético	Horas al día de Consumo	Horas Semanal	Consumo Mensual en kW
Bombillos	12	80	12.0	84.0	27
Nevera	1	700	12.0	84.0	235
Ventiladores	6	100	12.0	84.0	34
Total		880			296

Fuente: Ing. Miguel Cova.

Y se estimó también el gasto que produce el alumbrado público, en tabla 17.

Tabla 17. Consumo eléctrico estimado de alumbrado público rural.

Equipo	Cantidad	Consumo Energético	Horas al día de Consumo	Horas Semanales	Consumo Mensual en kW
Luminarias Vías	377	327	10.0	70.0	34 500
Total					34 500

Fuente: Ing. Miguel Cova.

Por último, aunque comúnmente los mercados de los pueblos son las mismas viviendas adecuadas para este fin, se hizo un cálculo de mini mercados, que se puede observar en la tabla 18.

Tabla 18. Consumo eléctrico estimado para un mini mercado.

Equipo	Cantidad	Consumo Energético	Horas al día de Consumo	Horas Semanales	Consumo Mensual en kW
Neveras	8	750	16	112	2 688
Luminarias	16	150	16	112	1 075
Cajas Registradoras	2	35	14	98	27
Total					3 791

Fuente: Ing. Miguel Cova.

Una vez obtenidas las estimaciones de consumo de viviendas, colegios, alumbrado, público y mercados, se calculó el gasto promedio del municipio Páez para cubrir la población sin acceso a servicio eléctrico. Para esto se utilizó el número de viviendas sin acceso a electricidad, como se observa en la tabla 19.

Tabla 19. Estimación de consumo eléctrico del municipio Páez.

Cantidad de Casas	3768
Cantidad de Mercados	10
Cantidad de Colegio	10
Factor de Diversidad	1.002
Factor de Coincidencia	0.998
Factor de Demanda	0.170
Horas al día de Funcionamiento del Sistema	18
Consumo Total en MWh por mes	2015
Capacidad de la Planta en MWh por mes	3240
# de Plataformas Hidroflot Requeridas	1

Fuente: Ing. Miguel Cova.

Para las horas al día de funcionamiento del sistema, se utilizó el porcentaje de ocurrencia de olas mayores a 0,90m extraído del informe de Hidromet, que es a partir de donde el sistema Hidroflot funciona a plena capacidad según la empresa.

Con solo una plataforma ya se puede dar acceso al servicio eléctrico a la totalidad de los habitantes del municipio Páez que carecen de este. No fue necesario hacer estimaciones de crecimiento poblacional en el municipio Páez, porque el hecho de implementar este sistema, promovería el desarrollo de la zona, y afectaría notablemente la tasa de crecimiento. De todos modos, el sistema es actualizable, y dependiendo del crecimiento de la demanda de servicio eléctrico, se pueden instalar las plataformas adicionales que sean requeridas para cubrir la demanda.

La empresa Hidroflot tiene un valor para estimar el coste total de instalación de 2 millones de euros por cada megavatio, y como aquí se planea poner una sola plataforma de 6 Megavatios el coste estimado de la obra serían 12 millones de euros para el Municipio Páez.

Además, como Higuero y Caraballeda obtuvieron un alto puntaje en la tabla ponderada 13, se realizó también una tabla con el gasto típico para cada uno, con el fin de compararlo con el sistema Hidroflot.

A continuación, en la tabla 20, usando las mismas características de vivienda típica rural en tabla 15, de colegio en tabla 16, de iluminación pública en tabla 17, y mercados en tabla 18, se calculó el gasto de la parroquia Higuero de acuerdo a la cantidad de viviendas sin acceso al servicio eléctrico, y a su porcentaje de ocurrencia de oleaje mayor a 90 cm de altura.

Tabla 20. Estimación de consumo eléctrico para parroquia Higuerote.

Cantidad de Casas	12 787
Cantidad de Mercados	30
Cantidad de Colegio	20
Factor de Diversidad	1.001
Factor de Coincidencia	0.999
Factor de Demanda	0.170
Horas al día de Funcionamiento del Sistema	13
Consumo Total en MWh por mes	6 817
Capacidad de la Planta en MWh por mes	2 340
# de Plataformas Hidroflot Requeridas	3

Fuente: Ing. Miguel Cova.

Al igual que con la parroquia Higuerote, se hizo con la parroquia Caraballeda, como se observa en la tabla 21.

Tabla 21. Estimación de consumo eléctrico para parroquia Caraballeda.

Cantidad de Casas	11 618
Cantidad de Mercados	30
Cantidad de Colegio	20
Factor de Diversidad	1.001
Factor de Coincidencia	0.999
Factor de Demanda	0.170
Horas al día de Funcionamiento del Sistema	14
Consumo Total en MWh por mes	6 205
Capacidad de la Planta en MWh por mes	2 520
# de Plataformas Hidroflot Requeridas	3

Fuente: Ing. Miguel Cova.

El coste aproximado de la implementación del sistema undimotriz para Higuerote será parecido al de Caraballeda, puesto que ambos requerirán 3 plataformas de 6

megavatios, con un aproximado de 2 millones de Euros por cada megavatio, para un total de 32 millones de euros para cada una de las poblaciones.

Para que el sistema sea flexible y no rígido, se descarta el uso de pilotes para contener el sistema. Lo más eficaz para contener el sistema sería por medio de anclajes con cadenas o cables de acero, que le proporcionarán la flexibilidad requerida y a la misma vez la resistencia demandada; similar al procedimiento para el sembrado o colocación de boyas, elementos que son utilizados como sistema para la ayuda a la navegación.

Estos tirantes estarán sujetos al fondo marino por medio de paralelepípedos de concreto pobre, que proporcionarán el peso necesario para sujetar las plataformas, comúnmente llamados “muerto”.

Las plataformas y la boya de conexión central del sistema propuesto por Hidroflot son flotantes e independientes, están fijadas por un sistema de anclaje con unos pesos de concreto llamados “muertos” y unas cadenas que van del muerto a la plataforma. De cada una de las 4 esquinas sumergidas de la plataforma están fijadas dos cadenas que van a 2 muertos mas, por lo que cada plataforma está fijada por 8 muertos de concreto.

Hay ciertas condiciones climáticas que ponen en riesgo el sistema propuesto por Hidroflot, como: oleaje excesivo propio de tormentas, mares de fondo, fuertes vientos, entre otros, por lo que Hidroflot protege a su sistema mediante un mecanismo de inundación con una serie de tanques de lastre y por el tensado de las cadenas de anclaje, que produce que la plataforma se sumerja hasta una distancia milimétrica del fondo marino, donde el agitación del oleaje es menos fuerte y así proteger el sistema de estos temporales. La compañía explicó que se dejaban las plataformas solo a milímetros del suelo y no en contacto con este por

leyes internacionales, que indican que un objeto flotante al hundirse y llegar a tocar el fondo marino se considera un naufragio y no puede estar operativo hasta que se haga un mantenimiento mayor, lo que significaría sacar el sistema completamente del agua para hacerlo.

En la siguiente figura se ilustra como el sistema Hidroflot puede ser sumergido bajo el lecho marino para resguardarse de temporales.

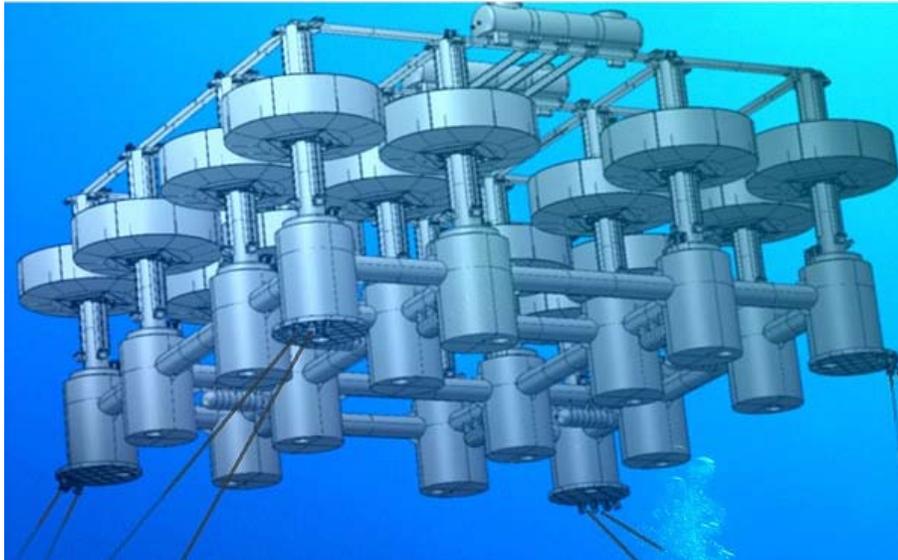


Figura 44. Simulación de inundación de plataforma de Hidroflot.
Fuente: Hidroflot s.l.

Considerando lo expuesto anteriormente, se procedió a realizar un esquema del sistema en la locación más idónea, que resultó ser el municipio Páez en el estado Zulia.

En el municipio Páez, el oleaje que más porcentaje de ocurrencia tiene, es el de olas de 1,50m, la longitud de oleaje se calcula de la siguiente manera:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} = \frac{9,81 \times 6,30^2}{2 \times 3,14} = 62,00m$$

Seguidamente se buscó la profundidad de aguas profundas que debe ser al menos una cuarta parte de la longitud de la ola

$$h = \frac{L}{4} = \frac{62.00m}{4} = 15.50m$$

A partir de 15,50m ya se considera aguas profundas y se puede colocar el sistema undimotriz.

Sobre un mapa proporcionado por el DHN se localizó una posición que cumpla con la condición de profundidad y se procura que tenga buena posición con respecto al oleaje predominante, que viene desde afuera desde el golfo, que para el caso del golfo son las direcciones E-NE y N-NE. En la figura 45, se muestra parcialmente el mapa de DHN donde se verificó profundidad y se eligió la posición exacta donde se sugiere sea dispuesto el sistema.

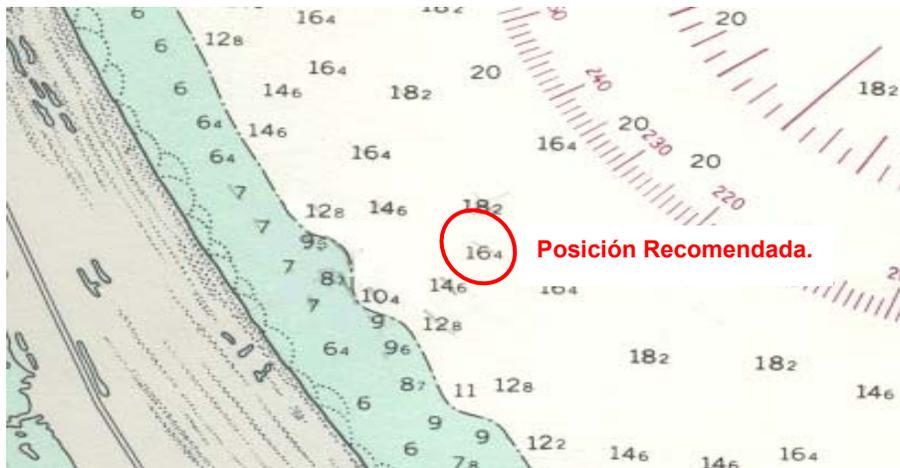
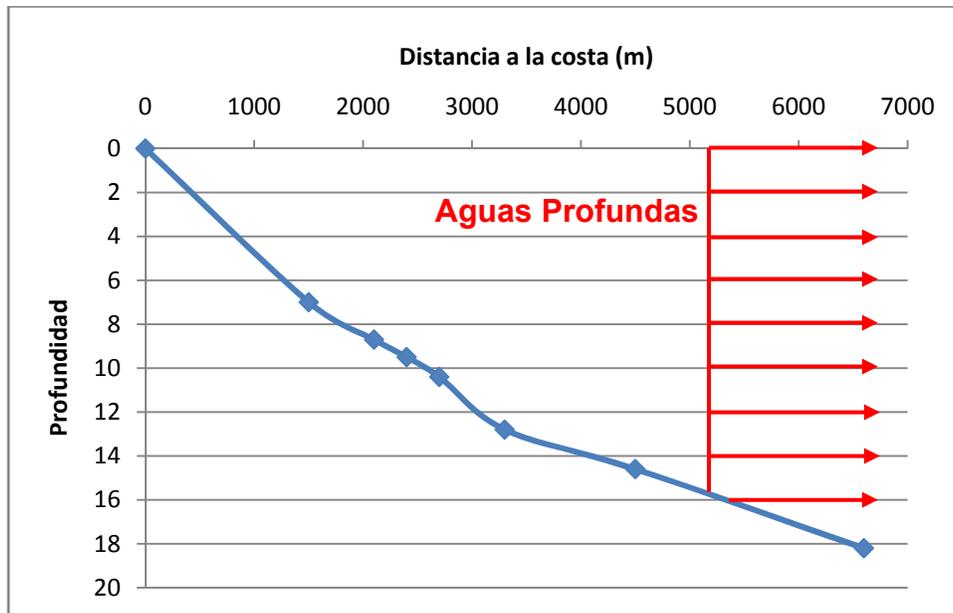


Figura 45. Información parcial de mapa batimétrico en Zulia.
Fuente: DHN.

Se localizó entonces la posición del sistema en las coordenadas latitud N-11°16,5' y longitud O-71°50,0', lugar que resulta conveniente porque en la costa bordea la troncal 6, está cercano a la población de Jurubá y se encuentra a una distancia aproximada de 7km de la costa.

En la gráfica 4, se muestra el perfil de la costa basado en la posición que se sugirió sea dispuesto el sistema y el mapa de DHN donde se tiene la información batimétrica del sector.



Gráfica 4. Perfil batimétrico en municipio Páez.
Fuente: Elaboración propia.

Es importante señalar que las profundidades expresadas en el mapa del DHN, vienen expresadas con respecto a bajamar, las variaciones de la marea aumentarán la profundidad en sitio y se sigue manteniendo entonces sobre el valor de profundidad de aguas profundas, por lo que no es necesario realizar correcciones por el cambio de marea.

Adicionalmente se hicieron unos esquemas de cómo sería el anclaje del sistema Hidroflot. En la figura 46, se muestra una vista de planta de una plataforma y la boya de conexión central, aunque de ser necesario a la boya central se pueden colocar el número de plataformas que sean necesarias.

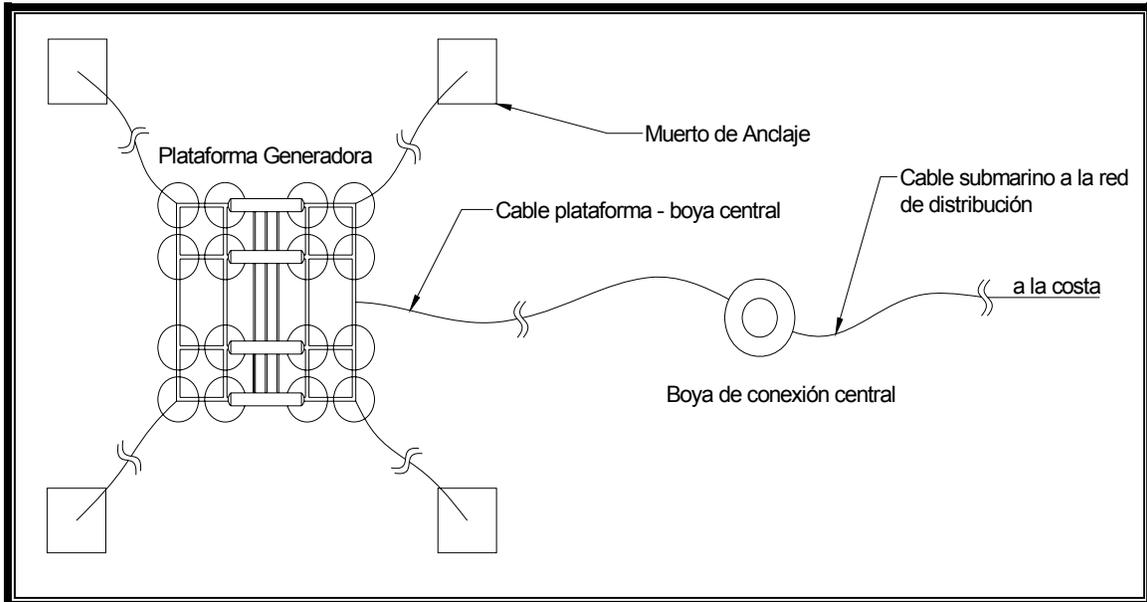


Figura 46. Vista de planta de sistema Hidroflot.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 47 se muestra una vista lateral del una plataforma de Hidroflot, donde se puede apreciar que los tirantes verticales son los encargados de sumergir la plataforma, como medida de protección ante la presencia de temporales y los tirante oblicuos mantendrán la plataforma en la posición fijada.

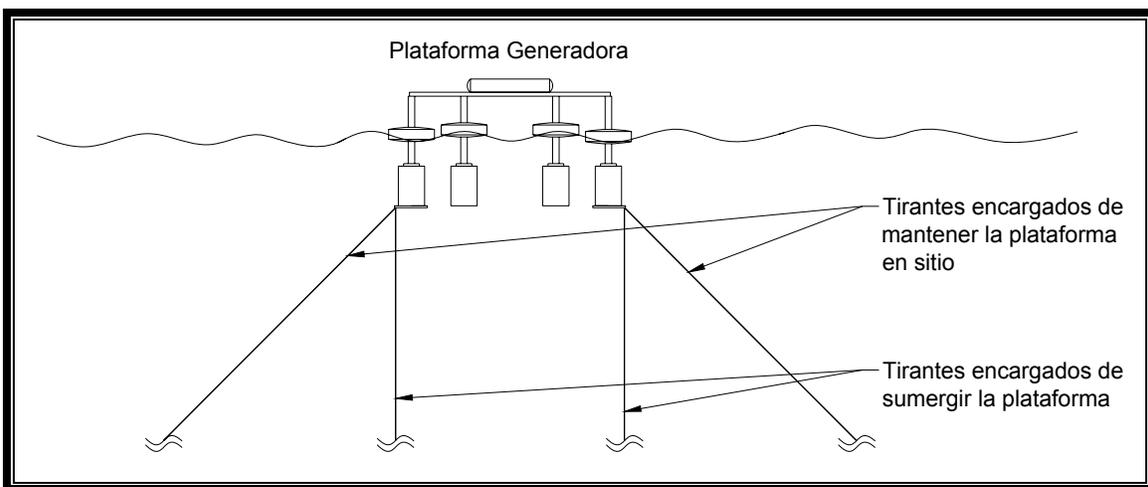


Figura 47. Vista lateral de sistema Hidroflot con propuesta de anclaje.
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente en la figura 48, se muestra un esquema de la plataforma sumergida para protegerse de temporales. Se sumerge inundando los lastres que se encuentran en la plataforma y tensionando los tirantes encargados de sumergir la plataforma, a la vez se deben tener tensionados los tirantes oblicuos para evitar movimientos bruscos o volcamiento de la plataforma.

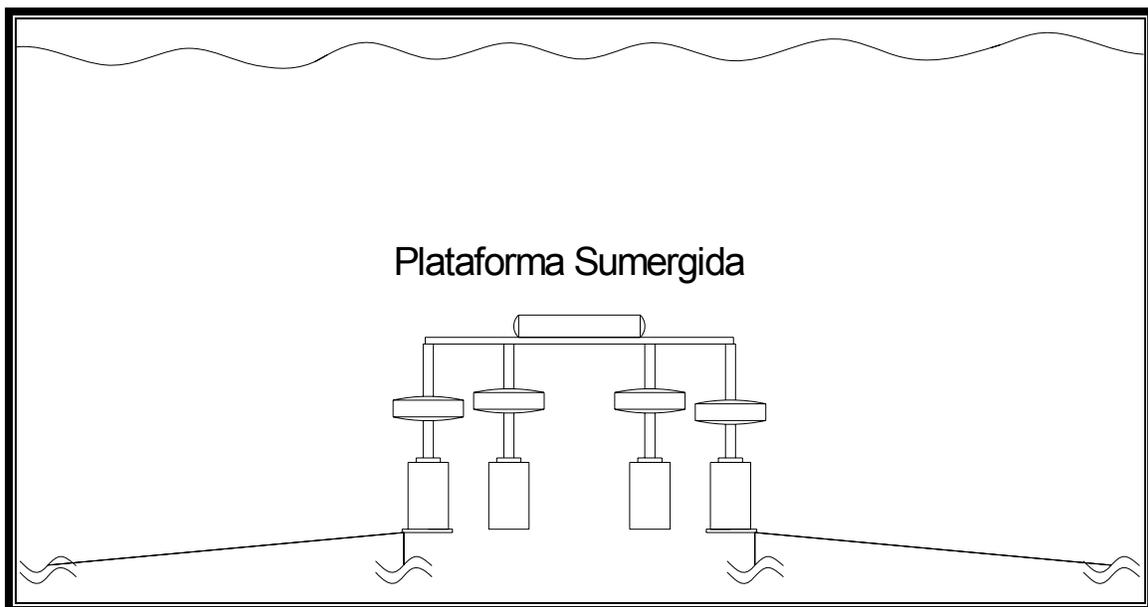


Figura 48. Propuesta de inmersión de sistema generador de electricidad.
Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

La costa venezolana fue convenientemente clasificada en 10 sectores (Golfo de Venezuela, Falcón, Morrocoy, Litoral Central, Miranda y Anzoátegui, Mochima, Nueva Esparta, Sucre Norte, Sucre y Monagas Este, Delta Amacuro), en los que cada uno guarda características semejantes internamente en cuanto a clima de oleaje, morfología de sus playas, vías de comunicación, servicio eléctrico y actividades económicas. La clasificación realizada ayudó a simplificar la identificación de localidades potenciales para la implementación del sistema.

Se identificó de forma satisfactoria, al menos un lugar de interés para cada sector, con excepción de los 3 descartados previamente (Mochima, Sucre y Monagas Este, Delta Amacuro). Se creó una lista con 8 localidades potenciales (Tucacas, estado Falcón; Puerto Cumarebo, estado Falcón; Higuero, estado Miranda; Capital Mariño, estado Nueva Esparta; Capital Maneiro, estado Nueva Esparta; Santa Catalina, estado Sucre y el Municipio Páez en el estado Zulia) para la implementación del sistema. Adicionalmente se sugirieron 4 lugares (Isla de Aves, Isla La Tortuga, Castilletes, Punta Barima) que su desarrollo puede ser de interés nacional por cuestiones de soberanía nacional, y turismo.

Se definió el municipio Páez, en el estado Zulia como el más idóneo para la implementación de un sistema de aprovechamiento de la energía aportada por el oleaje cotidiano de la zona para convertirla en energía eléctrica. Presenta las condiciones de oleaje más fuertes del país y una elevada cantidad de habitantes sin acceso al servicio eléctrico. Además dentro de este municipio se encuentra la población de Castilletes, la cual fue sugerida también por ser fronteriza en la línea de costa con la República de Colombia, por esto se debe tomar en cuenta este municipio particularmente como el de mayor potencial para la instalación del

sistema propuesto, para así subsanar la problemática del servicio eléctrico, y desarrollar la zona que es de alta importancia por razones de soberanía nacional.

Se encontraron varios sistemas para el aprovechamiento de la energía generada por el oleaje, para su transformación en energía eléctrica, el más interesante llegó a ser el de boyas flotantes que oscilan, puesto que no dependen de la dirección del oleaje, y tienen valores de eficiencia bastante prometedores, capaces de abastecer a cantidades importantes de habitantes. La empresa Hidroflot s.l. tiene adelantos interesantes y disposición para ayudar en la investigación.

Una estructura flexible y a la vez resistente es la más indicada para resistir los embates del mar, es importante que en temporales el sistema pueda contar con un sistema adicional, como lo puede ser el de inmersión propuesto, para minimizar los esfuerzos que ejercen aguas agitadas sobre el costoso sistema.

La energía alternativa propuesta, no se debe comparar con los sistemas convencionales en cuanto a costo, puesto que la ganancia de estas energías es que son renovables y no afectan de forma negativa el ambiente, lo que si hacen las tradicionales, como lo son las de combustibles, que despiden gases contaminantes al ambiente, y las hidroeléctricas que en la creación de sus represas producen impactos ambientales irreversibles a todo su alrededor por las inundaciones.

RECOMENDACIONES

En base a la información analizada, y los resultados obtenidos, se recomienda al Ministerio para el Poder Popular de Energía y Petróleo, garante del acceso al servicio eléctrico en el país, a su Directorio de Energías Renovables, y a los principales centros de investigación del país, como la Universidad Central de Venezuela, trabajen en conjunto para extender la presente investigación en el siguiente sentido:

- Debido a que la investigación se basa en datos de oleaje obtenidos a partir de modelos y estudios generalizados de grandes zonas, se recomienda hacer muestreo de oleaje en campo por un tiempo de al menos dos años, para las 3 localidades que resultaron más apropiadas para un sistema undimotriz, y así tener una estimación más precisa de la energía aportada por el oleaje.
- Implementar una planta piloto, posiblemente en Caraballeda, por ser más cercano a la ciudad de Caracas y por lo tanto se puede tener mejor control de los resultados y eventualidades que se puedan suscitar con este nuevo sistema.
- Incentivar la investigación y desarrollo de maquinarias de aprovechamiento de la energía aportada por el oleaje para convertirla en energía eléctrica, en las principales universidades del país para minimizar la dependencia de tecnología extranjera. Esto es de gran importancia, ya que la tecnología se encuentra en una etapa novedosa y reciente, por lo que se pudiera crear un diseño propio emanado de los centros de investigación más importantes del país.

- Promover campañas de concientización ciudadana, acerca de la importancia de investigar e implementar energías alternativas renovables que ayuden a preservar el ambiente, para despertar el interés en futuros extensores de tan interesante proyecto y afines.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIBLIOGRAFÍA

- Brown, J. (1989). *Waves, Tides and Shallow*. New York: Pergamon Press Ltd.
- Buoyweather. (1998). Virtual Buoy. Maui, Hawaii, Estados Unidos de América.
- Carter, R. (1994). *Coastal Evolution*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Cova, M. (20 de abril de 2008). Consumo energético. (H. Borges, Entrevistador)
- Dirección de Hidrografía y Navegación. (30 de abril de 1947). Mapa Cartográfico del golfo de Venezuela. Caracas, Distrito Federal, Venezuela.
- Galvin, C. (1968). *Breaker Type Classification of Three Laboratory Beaches*. Massachusetts: Journal Geophysical Research.
- Hidromet. (1976). *Estimación del Régimen del Oleaje en las Costas Venezolanas*. Caracas: Informe presentado al Instituto Nacional de Puertos.
- Instituto Nacional de Estadística. (2001). Nomenclador de Centros Poblados y Comunidades Indígenas. Caracas, Distrito Federal, Venezuela.
- Ippen, A. (1966). *Estuary and Coastal Hydrodynamics*. Prentice Hall.
- McCormick, M. (1973). *Ocean Engineering Wave Mechanichs*. Wiley Interscience.
- Munk, W. (1951). *Ocean Acoustic Tomography*. Cambridge.
- Patrick, D. y. (1955). *Amphibian Tractors in the Surf*. Washington: First Conference on Ships and Waves.
- Wikipedia Foundation Inc. (20 de mayo de 2001). *La Enciclopedia Libre*. Recuperado el 11 de septiembre de 2007, de <http://es.wikipedia.org/wiki/Batimetr%C3%ADa>
- Wikipedia Foundation, Inc. (20 de mayo de 2001). *Wikipedia, La Enciclopedia Libre*. Recuperado el 18 de noviembre de 2007, de http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_alternativa