



Alternativa Tecnológica para el Aprovechamiento de la Energía Undimotriz

Romero, Estefany¹

Corporación Petroquímica de Venezuela (Pequiven)
Estefany120327@gmail.com

Guevara, Rafael²

Petróleos de Venezuela (Pdvsa)
guevarary@gmail.com

Amaya, Adolfina³

Corporación Petroquímica de Venezuela (Pequiven)
adolamaya@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0001-6653-2032>

Recibido: 25/08/2020

Aceptado: 28/01/2021

RESUMEN

El propósito de este artículo es presentar los resultados de una investigación cuyo objetivo fue proponer una alternativa tecnológica para el aprovechamiento de la energía undimotriz en el estado Zulia. La investigación se enmarcó dentro de la modalidad de proyecto factible, de tipo descriptiva con un diseño documental. La población estuvo conformada por estudio e investigaciones científicas y reportes técnicos relacionados a la energía proveniente de las olas. Los datos obtenidos fueron evaluados empleando análisis estadístico para el estudio del mercado eléctrico zuliano, matrices de análisis para caracterizar los dispositivos en estudio, matrices de comparación para determinar su madurez tecnológica, dominio, impacto y análisis de brechas; finalmente la evaluación de los aspectos económicos. Los resultados arrojaron que existe un grave impacto ambiental en la región, así como un déficit en el suministro de electricidad por los sistemas actuales de 1472 mW. Las tecnologías estudiadas se encuentran en la fase comercial, sin embargo presentan altos costos de inversión. El dispositivo Boya de Energía, fue el seleccionado por contar con una capacidad apta para el oleaje venezolano, así como el mayor dominio en el mercado, con el menor impacto ambiental entre las tecnologías evaluadas, lo que permitió seleccionarlo como la alternativa ideal para el aprovechamiento de la energía undimotriz en el estado Zulia.

Palabras clave: Alternativa Tecnológica; Electricidad; Energía Undimotriz; Energía de Olas; Boya de Energía.

¹ Corporación Petroquímica de Venezuela (Pequiven). Ingeniera. MSc. Gerencia Proyectos Industriales. Venezuela

² Corporación Petroquímica de Venezuela. Ingeniera. MSc. Gerencia Proyectos industriales. Dra. Ciencias Gerenciales.

³ Corporación Petroquímica de Venezuela. Ingeniera. MSc. Gerencia Proyectos Industriales. Dra. Ciencias Gerenciales. Post-Doctora Gerencia Pública y Gobierno. Directora Cideti.

Technological Alternative for the Use of Energy Undimotríz

ABSTRACT

The purpose of this article is to present the results of an investigation whose objective was to propose a technological alternative for the use of wave energy in the state of Zulia. The research was framed within the feasible project modality, of a descriptive type with a documentary design. The population was made up of scientific research and technical reports related to the energy coming from the waves. The data obtained were evaluated using statistical analysis for the study of the Zulia electricity market, analysis matrices to characterize the devices under study, comparison matrices to determine their technological maturity, domain, impact and gap analysis; finally the evaluation of the economic aspects. The results showed that there is a serious environmental impact in the region, as well as a deficit in the supply of electricity by the current systems of 1472 mW. The technologies studied are in the commercial phase; however they present high investment costs. The Energy Buoy device was selected for having a capacity suitable for the Venezuelan waves, as well as the greatest dominance in the market, with the least environmental impact among the evaluated technologies, which allowed it to be selected as the ideal alternative for the use of wave energy in the state of Zulia.

Keywords: Alternative Technology; Electricity; Undimotríz Energy; Wave Energy; Energy Buoy.

Introducción

La electricidad ha sido desde su descubrimiento, un recurso fundamental para el sustento y desarrollo de países a nivel mundial. Sin embargo hasta la fecha, ésta proviene en mayor proporción de centrales termoeléctricas e hidroeléctricas, utilizando como materia prima recursos naturales agotables, contaminando significativamente las zonas donde éstas se encuentren.

Países desarrollados, en vista del inevitable agotamiento de los recursos naturales, han desarrollado e implementado tecnologías que utilizan como materia prima los recursos inagotables existentes en la tierra como el viento, agua, u otros; de los cuales uno de los mejores posicionamientos lo ha tenido la energía obtenida de las olas, llamada undimotríz, la cual se basa en el aprovechamiento de la fuerza

cinética contenida en las ondas marinas generadas por la acción del viento sobre su superficie; destacando la posibilidad de obtener mejores resultados a los obtenidos actualmente con la energía eólica.

En este sentido, según Carta, J., Calero, R., Colmenar, A. y Castro, M. (2009) se han realizado diversos estudios con el propósito de estimar el potencial mundial a ser obtenido de la energía de las olas, arrojando aproximadamente 17.500 TWh/año. El límite explotable de este recurso probablemente se encuentre en el rango del 10% al 25%. La energía de las olas puede contribuir significativamente a la satisfacción de la demanda de energía, alrededor del mundo, equivalente al doble de electricidad producida en las centrales nucleares y térmicas.

Por tanto, los mejores sitios para implantar esta tecnología, son aquellos lugares donde haya varios metros de diferencia entre las mareas altas y bajas, tal es el caso de la costa oeste de Escocia, donde se tiene instalada la tecnología basada en una columna de agua oscilante (OWC, siglas en inglés), produciendo 500 kW/día desde el año 2000 (Otterbac, 2014).

Así mismo, en el año 2002 en New Jersey (Estados Unidos) se instaló un proyecto piloto con el dispositivo Power Buoy (Boya de Energía), generando 50 kW/día. Por su parte, Dinamarca desde el 2008 tiene instalado el sistema Wave Dragón (Dragón de Olas) generando 20 kW/día. El más destacado hasta la actualidad es el sistema instalado en Portugal por medio de la Serpiente Marina (Pelamis), con el cual se puede abastecer a 1500 hogares/día. En Latinoamérica, Argentina ya genera más de 60 kW/día y existen proyectos por ejecutar en Chile, Argentina y Uruguay.

En Venezuela existe un Sistema Eléctrico Nacional con aproximadamente 38.000 megavatios (MW) de capacidad instalada, fundamentalmente en el aprovechamiento de la Central Hidroeléctrica Simón Bolívar (Guri), ubicada en el estado Bolívar, así como la utilización de una variedad de termoeléctricas a lo largo y ancho del país. Éstas son de tipo convencional y generan gran cantidad de



agentes contaminantes de la atmósfera, así como un grave y notable daño al ecosistema que los rodea. El Centro de Ingenieros del estado Zulia (CIDEZ, 2019), indica que en el país existen siete plantas de generación de electricidad, tanto hidroeléctrica como termoeléctrica, donde el Guri aporta el 70% de la energía nacional, haciendo dependiente a todo el país.

Igualmente el CIDEZ (2019), señala que el retardo en el cumplimiento de los programas de mantenimiento preventivo de estaciones, sub-estaciones y líneas de tensión motivado a los altos costos en la procura de piezas y repuestos importados, así como las variaciones climáticas que inhabilitan áreas de la Central Hidroeléctrica Simón Bolívar casi en su totalidad, han venido generando continuas fallas eléctricas y fluctuaciones a nivel nacional, provocando racionamientos eléctricos para tratar de cubrir la demanda eléctrica de la población en crecimiento de todo el país.

El estado Zulia, es el más afectado por las largas distancias que recorre el fluido eléctrico que viene de la Central Hidroeléctrica Simón Bolívar, desde donde se envían 1000 MW, utilizando una subestación intermedia ubicada en el estado Yaracuy, con 335 kilómetros de líneas de transmisión que atraviesan los estados Lara y Falcón, llegando hasta la subestación el Tablazo situada en una zona cercana al Complejo Petroquímico Ana María Campos, para emprender un recorrido de 8.5 kilómetros sobre las aguas del Lago de Maracaibo, y culminar en la subestación Cuatricentenario, la cual recibe y reenvía las cargas a toda la región Zuliana. Por tanto, al igual que la mayoría del país, el estado Zulia subsiste eléctricamente dependiendo de un sistema de generación eléctrica costoso, existiendo la probabilidad de quedar sin el servicio eléctrico.

Debido a lo antes expuesto, se observa la necesidad de buscar una fuente alternativa para la generación eléctrica en el estado Zulia, capaz de aportar calidad de vida a los habitantes de la localidad, dadas las constantes interrupciones presentadas en el sistema eléctrico nacional, lo cual afecta negativamente al sector

comercial, industrial y a la población en general de la región. Por tales motivos, se pretende mitigar estos efectos por medio de energías renovables, utilizando el recurso inagotable con el que cuenta la localidad, el agua, a través del aprovechamiento de la energía undimotriz.

Por ello, el objetivo general de la investigación fue proponer una alternativa tecnológica para el aprovechamiento de la energía undimotriz en el estado Zulia, para la cual se formularon los siguientes objetivos específicos: diagnosticar la situación actual del mercado de la energía eléctrica del estado Zulia; Identificar las alternativas tecnológicas de generación eléctrica a través de la energía undimotriz aplicables al estado Zulia; Determinar los aspectos tecnológicos para el aprovechamiento de la energía undimotriz; Determinar los aspectos económicos; y seleccionar una alternativa tecnológica para el aprovechamiento de la energía undimotriz en el estado Zulia.

Materiales y métodos

La investigación fue del tipo descriptiva en correspondencia con los postulados teóricos de Hurtado de Barrera (2015), quien la define como aquella cuyo propósito es exponer el evento estudiado, haciendo una enumeración detallada de sus características. Según la naturaleza de los objetivos en cuanto al nivel de conocimiento que se buscaba alcanzar (estado del conocimiento), esta investigación se clasificó como documental, al respecto Arias (2012) indica, en este tipo de estudio la información para llevar a cabo la investigación proviene de documentos especializados tanto nacionales como internacionales, en este caso la energía undimotriz, así como trabajos desarrollados por otros investigadores en el área de alternativas tecnológicas.

Igualmente catalogó como proyecto factible, ya que se elaboró una propuesta de acción para transformar una realidad, al cubrir una necesidad o solucionar un problema, aportando información para el diseño o creación de un modelo (Pelekais



y col., 2010). Tomando como base los aportes de Hernández y otros, (2014), para efectos de esta investigación la población estuvo conformada por todas aquellas publicaciones especializadas, tanto nacionales como internacionales, en el ámbito energético así como las patentes y publicaciones relacionadas con el objeto de estudio y sus aplicaciones.

En función de obtener la información requerida para alcanzar los objetivos planteados en la investigación, se empleó como técnica de recolección de datos la revisión y análisis de publicaciones especializadas en el área energética, energías renovables, energías alternativas, así como revistas y publicaciones científicas encontradas vía web, por tanto el diseño del estudio fue documental.

Resultados

A continuación se presentan los resultados generados a partir del análisis de documentos y reportes técnicos consultados de las fuentes especializadas en el área energías renovables, especialmente la undimotriz a nivel mundial; con el objetivo fundamental de proponer una alternativa tecnológica para el aprovechamiento de las energías provenientes de las olas en el estado Zulia.

Diagnóstico de la situación del mercado de la energía eléctrica del estado Zulia

El estudio abarcó en primera instancia la realización del diagnóstico de la situación del mercado de la energía eléctrica venezolana y particular la región zuliana, mediante la revisión de cifras oficiales de la Corporación Eléctrica Nacional, S.A (Corpoelect, 2019), sobre la demanda máxima, la capacidad instalada y capacidad disponible.

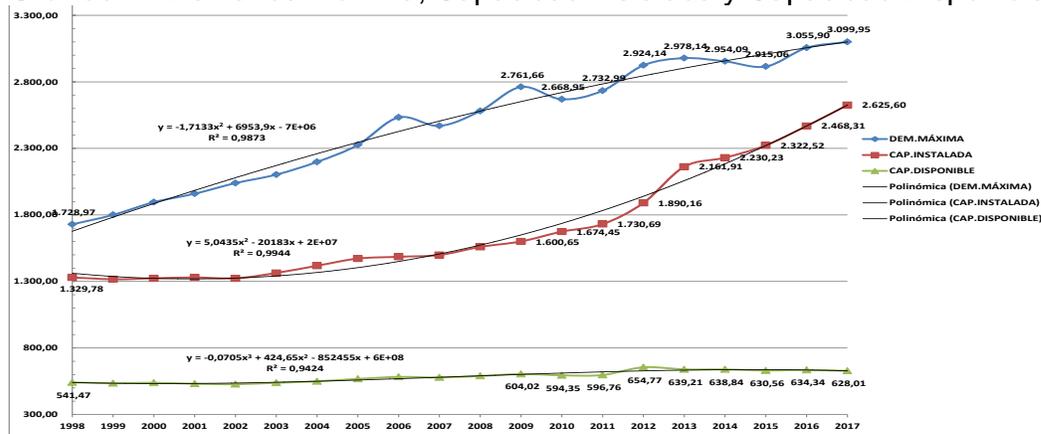
El suministro de energía eléctrica para el estado Zulia, es un servicio indispensable para sus habitantes, debido a que dicho estado presenta con una de las mayores temperaturas durante todo el año, convirtiéndolo en el segundo consumidor de energía eléctrica de Venezuela, para mantener operativos sus

sistemas de refrigeración. Así mismo, es una de las regiones más comerciales del país, donde funcionan plantas productoras y compresoras de gas y estaciones de flujo para la extracción, transporte y almacenamiento de crudo pertenecientes a Pdvsa y el Complejo Petroquímico Ana María Campos de Pequiven, entre otras, las cuales consumen parte de la energía proveniente de las centrales hidroeléctricas del país.

Motivado a la inexistencia de datos históricos oficiales para la región, se tomaron los resultados emitidos por el Grupo Ricardo Zuloaga (2018) para el sistema eléctrico nacional, y a partir de ellos se realizó una extrapolación a nivel regional, con el fin de cumplir con los objetivos planteados. El análisis de la información recolectada arrojó que a nivel nacional, se cuenta con una capacidad instalada superior a la demanda existente, pero existe un amplio porcentaje de inoperatividad.

Mientras el estado Zulia muestra una demanda superior a la capacidad instalada e igualmente alto porcentaje de inoperatividad del sistema, con proyección a mantenerse esa tendencia por los próximos años, tal como se muestra en la siguiente gráfica.

Gráfico 1. Demanda Máxima, Capacidad Instalada y Capacidad Disponible (Zulia)



Fuente: Elaboración Propia (2019)

Al respecto el Centro de Ingenieros del estado Zulia (CIDEZ, 2019), afirmó que de acuerdo a los estudios realizados, el déficit de generación de energía eléctrica se ubica en más del 70% y se debe a la inoperatividad de varias de las planta termoeléctricas de la región, encontrándose una deficiencia de más de 2000 MW de generación eléctrica, sumado al deterioro que presentan las torres del Lago de Maracaibo que enlazan al Guri. La capacidad de generación de las diferentes instalaciones localizadas en el estado Zulia, alcanza a 2625 MW, sin embargo se encuentra en 628 MW de generación real (ver cuadro 1), tal como se observa en detalle el anterior grafico 1.

Según Corpoelec (2018) la demanda de energía eléctrica en el estado Zulia se encuentra situada en 3100 MW (ver gráfico 1), pero motivado a los problemas operacionales solo aportan 1.000 MW, y se reciben 1.000 MW del Guri para un total de 2000 MW, lo que no permite cubrir la demanda del Zulia real de 3100 MW.

Cuadro 1. Oferta de Energía Eléctrica en el estado Zulia.

Instalación de Unidades de Generación Eléctrica	Municipio	Capacidad de Generación (MW)	Generación Real (MW)
Ramón Laguna	Maracaibo	660	28
Bachaquero	Valmore Rodríguez	500	0
Gabarra de Generación Antonio Nicolás Briceño	Baralt	90	0
Termozulia 1, 2, 3 y 4	La Cañada de Urdaneta	1300	600
Parque Eólico La Guajira	Guajira	75.6	0

Fuente: CIDEZ (2019)

Alternativas tecnológicas de generación eléctrica a través de la energía undimotriz

Por otra parte, se analizó la información técnica obtenida de páginas web sobre alternativas tecnológicas y específicamente la energía undimotriz; observándose que existe una cantidad extensa de tecnologías de esta índole,

procediendo a evaluar las cuatro mayormente implementadas a nivel mundial hasta la actualidad; Columna de Agua Oscilante (OWC); Boya de Energía; Dragón de Olas; y Serpiente Marina (ver cuadro 2).

Cuadro 2. Alternativas disponibles de generación eléctrica - energía undimotriz

Alternativa Tecnológica	Elementos de Análisis			
	Capacidad de Generación	LOCALIZACIÓN	Impacto Ambiental	Mantenimiento
Columna de Agua Oscilante	Según Caballero (2011), este sistema tiene una producción máxima alrededor de los 500KW.	Según Fernández (2008), su instalación y mantenimiento es sencillo, puesto que en la mayoría de los casos el emplazamiento es accesible. Suelen construirse sobre rocas.	Según el Instituto Tecnológico y de Energías Renovables, SA (ITER, SA) (2007), los dispositivos en la costa presentan un impacto visual alto así como para la vida y morfología del litoral; y sonoro de tipo medio así como para la vida marina	Según Cavia (2008), los mantenimientos para los equipos son similares, y son aquellos dentro de los planes previstos e inesperados, revisiones del funcionamiento, recolocación y sustitución de elementos
Boya de Energía	Según Caballero (2011), La potencia marina mínima para que este dispositivo sea rentable se calcula en 20 kW/m.	Según Fernández (2008), Cavia (2008), y otros; los dispositivos Boya de Energía, Dragón de Olas y Serpiente Marina, se encuentran en aquella clasificación de dispositivos mar adentro	Según el Instituto Tecnológico y de Energías Renovables, SA (ITER, SA) (2007), los dispositivos flotantes presentan un impacto ambiental bajo de tipo sonoro así como para la vida y morfología del litoral, vida marina; y medio de tipo visual	Según Caballero (2011) el mantenimiento de la instalación se recomienda en el entorno de los tres años, y consistiría básicamente en la extracción de la boya del agua, la limpieza y el repintado de la superficie con algún producto que diera protección. Cada 7 u 8 años sería conveniente la sustitución de elementos como el generador o la bomba hidráulica.
Dragón de Olas	Según Fernandez (2008), la potencia del Wave Dragón es de 6000kW		Según el Instituto Tecnológico y de Energías Renovables, SA (ITER, SA) (2007), los dispositivos semisumergidos ocasionan un impacto bajo de tipo visual, sonoro, así como a la morfología y vida del litoral; y de tipo medio a la vida marina	Según Cavia (2008), los mantenimientos para los equipos son similares, y son aquellos dentro de los planes previstos e inesperados, revisiones del funcionamiento, recolocación y sustitución de elementos
Serpiente Marina	Según Cuevas y Ulloa (2015), El prototipo a escala completa de 750 Kw			

Fuente: Elaboración Propia (2019)

Como se observa en el cuadro 2, el dispositivo OWC (Columna de agua oscilante) tiene una producción máxima de 500 kW, mientras que la tecnología Power Buoy (Boya de Energía) tiene un estimado de capacidad de generación de



20 kW. Por su parte, el Wave Dragón (Dragón de Olas), tiene una potencia de generación de 6000 kW, y el sistema Pelamis (Serpiente Marina) de 750 kW. Estas variaciones corresponden a las diversas ubicaciones que estos tienen, así como a los diseños propios de cada uno; y la selección de un dispositivo dependerá del requerimiento que exista.

Los dispositivos de una Columna de Agua Oscilante son instalados en la costa; mientras que los dispositivos de las otras tres tecnologías (Boya de Energía, Dragón de Olas y Serpiente Marina), son instalados mar adentro, en aguas profundas. Teniendo estas premisas, cualquier dispositivo de los estudiados, puede ser instalado en el estado Zulia, puesto que se dispone de las condiciones idóneas para los mismos.

Así mismo, Venezuela en cumplimiento a la convención de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, establecido en el protocolo de Kyoto, presenta el compromiso de reducir considerablemente las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera que se emitan en todo el territorio nacional, por lo cual debe prestar vital atención al sector industrial y en consecuencia al sector eléctrico. En este sentido, la investigación arrojó que el impacto ambiental ocasionado por la implementación de cualquier sistema para la generación de energía undimotriz es relativamente bajo comparado con otros tipos de energías alternativas.

Aspectos tecnológicos para el aprovechamiento de la energía Undimotriz

Considerando, que al momento de seleccionar una nueva tecnología es determinante conocer los avances tecnológicos adquiridos hasta la fecha, así como los cambios culturales requeridos para su implementación, sostenibilidad y las estrategias para optimizar su potencial, se evaluaron los siguientes aspectos tecnológicos para el mejor aprovechamiento de la energía undimotriz en el estado Zulia: madurez, dominio, impacto y análisis de brechas.

De acuerdo con Caballero (2011), la energía undimotriz es un recurso que está empezando a ser explotado a nivel mundial, el cual se presenta prometedor a medio plazo. Son cada vez más las empresas dedicadas al diseño y fabricación de dispositivos como prototipos a escala reducida para procesos de investigación, como también aparatos operativos a escala real, actualmente instalados y en funcionamiento. Sin embargo, no es posible distinguir entre todos estos diseños un único ejemplar que muestre unas perspectivas más prometedoras frente a otros.

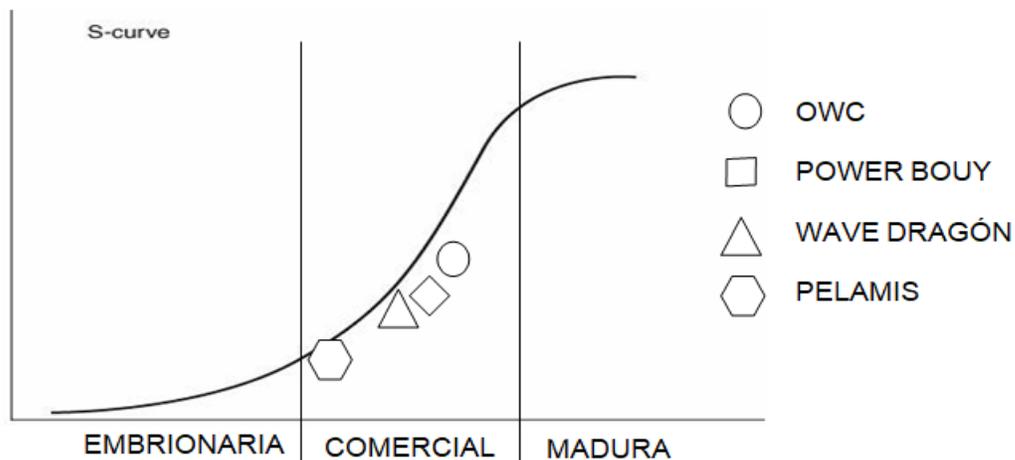
Según el autor anteriormente citado (Caballero, 2011), esta forma de generación de energía lleva aproximadamente dos siglos en implementación, sin embargo esta no ha sido desarrollada de manera masiva dada la aparición del petróleo, lo cual resulta más económico a la hora de generar electricidad. Fue en épocas de crisis petrolera, donde la energía undimotriz renació y recientemente como parte de los planes ambientales de los países desarrollados, especialmente en Europa, así como parte de su preparación para una posible era sin petróleo.

De la información recolectada de las patentes y publicaciones especializadas relacionadas con la energía undimotriz, la madurez tecnológica de los dispositivos analizados en el presente estudio pueden observarse en la siguiente Figura 1, donde se observa que todas las tecnologías consultadas se encuentran en etapa comercial, aventajando la Columna de Agua Oscilante. Todas las fuentes consultadas coinciden en que hasta la actualidad la información sobre las lecciones aprendidas no es muy extensa como para considerarlos en la etapa comercial madura.

Uno de los desarrolladores de la Columna de Agua Oscilante, ha sido la empresa Energetech en Australia en el año 2005 (Miguélez, 2009). Por su parte, el dispositivo Power Buoy fue desarrollado por OPT (Ocean Power Technologies, 2019) de Estados Unidos, y el mismo se encuentra comercialmente disponible. La misma empresa, posteriormente pasaría a llamarse Pelamis Wave Power Ltd y creó

el sistema Pelamis. Finalmente, la tecnología Wave Dragón fue desarrollada y creada por la compañía danesa Wave Dragon ApS (2019).

Figura 1. Nivel de madurez de las tecnologías analizadas.



Fuente: Elaboración Propia (2019)

Dada la aplicabilidad que ha tenido el dispositivo OWC desde hace décadas en países como Japón, Noruega, Escocia, India, Australia y otros, el mismo se puede situar en la etapa de uso masivo. Sin embargo, algunos proyectos han presentado fallas al poco tiempo de comenzar a operar y los proyectos han tenido que ser reestructurados en varias ocasiones.

Sobre el dispositivo Boya de Energía (Power Buoy), se han llevado a cabo tres proyectos situados en el Atlántico y en el Pacífico:

Oahu (Hawaii): desarrollado entre 2004 y 2007 con el objetivo de utilizar la energía del oleaje para las bases de la marina norteamericana. El parque de olas estaba situado a una profundidad de 30 metros con una potencia de hasta 1MW.

Atlantic City (New Jersey - Estados Unidos): parque operativo desde del 2005 para demostrar la viabilidad del sistema de captación energética en el estado de

Nueva Jersey. La boya es de 5 metros de diámetro y 14 metros de longitud. Se encuentra situada a una profundidad de 18 metros con una potencia nominal de 40 kW.

Santoña (España): proyecto que se empezó a desarrollar en 2006 para Iberdrola S.A. con el objetivo de evaluar la viabilidad del sistema en la costa norte de España. El parque se sitúa a 50 metros de profundidad e inicialmente se puso una potencia nominal de 1.35 MW. En posteriores apartados se desarrollará con más detalle éste caso.

El dispositivo Wave Dragón también cuenta con varios proyectos en el mundo, entre los que destacan:

Milford Haven (Escocia): dispositivo pre-comercial para estudio de viabilidad cuya construcción inició en el 2000, situado de 2 a 3 millas de distancia de la costa suroeste de Escocia, ocupando un área de 0.25 km². En un principio, el proyecto incluyó la instalación de una unidad de 7MW para abastecer a 6000 casas, aprovechando las ventajas de la localización: oleaje con dirección predominante, ubicación cercana a la costa, conexión a la red y no interfiere con las líneas marítimas.

Portugal: proyecto desarrollado por TecDragon, abarca la instalación de un parque de olas de 50MW en la costa portuguesa.

En relación al sistema Pelamis, de acuerdo con diversos autores, entre ellos Cuevas y Ulloa (2015), entre 1998 y 2004 se han probado varios dispositivos a diferentes tamaños. Los proyectos que se están desarrollando actualmente son los siguientes:

Aguaçadoura (Portugal): actualmente operativo, el proyecto empezó en 2005 y consiste en tres dispositivos Pelamis situados a 5km de la costa norte de Portugal con capacidad de 2.25 MW en total (cada uno de 750 kW). Es el primer parque de

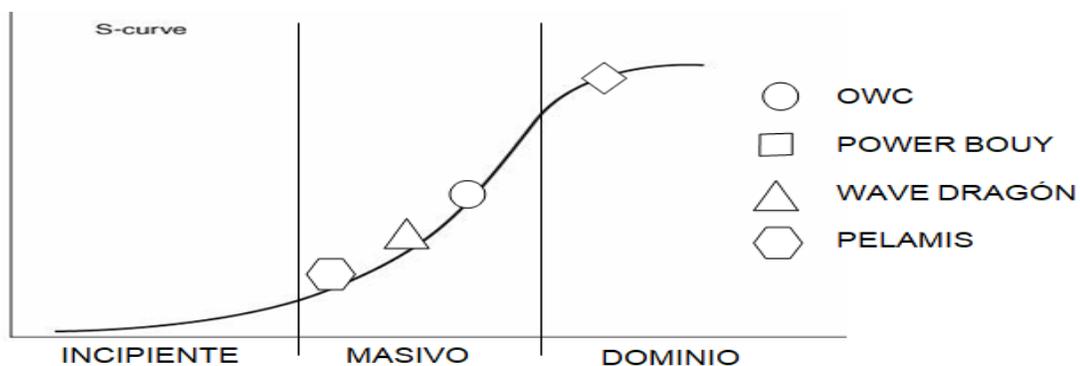
olas con pretensiones comerciales, con proyección para su ampliación hasta los 20 MW.

Orkney (Escocia): En construcción, consta de cuatro dispositivos Pelamis situados a 2km de la costa oeste de Escocia en el parque de pruebas de European Marine Energy Centre, con una capacidad de 3 MW. El proyecto utiliza el sistema de cables, subestación y conexión a la red ya existente, usada para ensayar el prototipo a escala real.

Cornwall (Gran Bretaña): situado a 15km de la costa norte de Cornwall (Inglaterra), previsto que llegue a contener hasta siete dispositivos Pelamis con una capacidad máxima de 5 MW. Se espera llegue a ser el mayor parque de olas con tecnología Pelamis.

De acuerdo lo antes expuesto, se ubica a los sistemas OWC, Wave Dragón y Pelamis en la etapa de uso masivo de la curva de dominio (ver figura 2), pues se observa como la tecnología se ha ido masificando y probablemente las brechas entre los diferentes diseñadores y fabricantes se encuentren cerradas. Dada la operatividad que han tenido los proyectos antes mencionados, se sitúa al sistema Power Buoy en la etapa de Dominio.

Figura 2. Nivel de dominio de las tecnologías analizadas



Fuente: Elaboración Propia (2019)

Aspectos económicos de las alternativas tecnológicas para el aprovechamiento de la energía undimotriz.

De acuerdo con las fuentes consultadas en relación a los costos y análisis económicos para el aprovechamiento de la energía undimotriz, se obtuvo entre otros factores, la inversión inicial y los costos asociados a la operación y mantenimiento. Según Cuevas y Ulloa (2015), la cantidad de energía producida vendrá relacionada con su costo, puesto que si un dispositivo trabaja correctamente proporcionando gran cantidad de energía, el costo ponderado será menor a aquel cuya eficiencia es escasa. En tal sentido, el balance entre lo estimado a generar y la cantidad de energía finalmente obtenida, determinará el costo de la energía y viabilidad para su explotación.

Ahora bien, es importante destacar otros factores a considerar durante la visualización de cualquier proyecto de energía renovable capaz de contribuir a la generación de energía: el impacto ambiental generado por las fuentes de generación eléctrica convencionales, el agotamiento de los recursos de tipo fósil, las lluvias ácidas, el calentamiento global reflejado por el derretimiento de glaciares en la Antártida y el deterioro de la capa de ozono. Localmente, uno de los factores a considerar es la contaminación producida por las torres que atraviesan el Lago de Maracaibo para la distribución de electricidad al estado Zulia.

La explotación de la energía del oleaje, como ocurre con muchas otras tecnologías renovables, precisa de altos costos de inversión, debido a la necesidad de construir grandes estructuras para captar una cantidad significativa de energía, como los costos de seguros que pueden ser altos en los primeros años cuando la experiencia en la tecnología sea limitada. Sin embargo, los costos de operación son relativamente bajos en los dispositivos costeros (bastantes más altos en los aparatos alejados de la costa), por no ocasionar costos de combustibles, así como

los costos por reparación y mantenimiento anuales solo representan un 3 - 8 por ciento de los costos de la inversión requerida.

Se estima que los equipos instalados en la costa tengan un costo por unidad energética generada entre 0,09 €/kWh y 0,14 €/kWh, mientras instalados fuera de la costa presentan mayor dispersión en sus costos, estimándose se encuentren en el rango comprendido entre 0,18 €/kWh y 0,49 €/kWh. Los costos variarán de un país a otro, e incluso dentro de un mismo país, dependiendo del potencial del oleaje de la zona donde se instalen. Al respecto, Caballero (2011) destaca la importancia del costo del anclaje o fundación, relacionado directamente con la profundidad del agua y la naturaleza del fondo marino, así como la conexión a tierra, el cual aumenta en función de la distancia a la costa.

Para Fernández (2008), los costos de amarre y anclaje pueden alcanzar la mitad de los costos totales de inversión. A continuación se presenta un cuadro comparativo de la inversión requerida para cada una de las cuatro tecnologías estudiadas, obtenida de cotizaciones e información mostrada en las páginas web de cada uno de los fabricantes.

Cuadro 3. Costos de inversión de la energía undimotriz

OWC	POWER BUOY	WAVE DRAGÓN	PELAMIS
USD 8.700.000,00	USD 6.000.000,00	USD 12.000.000,00	USD 7.500.000,00

Fuente: Elaboración Propia (2019)

En complemento a lo anteriormente indicado, se tiene que los costos por la instalación representan aproximadamente un 14%, instrumentación y control 6%, sistema eléctrico 8%, sistema mecánico 21%, y estructura 51%. Entre los cuales, el costo de la estructura metálica destaca como el principal costo, seguido del sistema mecánico. Es de importancia destacar, a medida que surgen mejoras tecnológicas y se gana experiencia, varían los precios de materiales, evoluciona el costo de otras energías y se construyen mayor número de dispositivos el coste capital se reduce.

El sector de la energía undimotriz no cuenta con la suficiente experiencia en campo como para estimar de forma precisa los costos correspondientes al funcionamiento operativo de los dispositivos instalados y su mantenimiento, sin embargo, es posible establecer una aproximación, según lo planteado por autores, quienes afirman, estos costos corresponden a un 8% de los costos de inversión. A su vez, estos son muy variables según el tipo de dispositivo, localización, tamaño (número y potencia) o mejoras en el diseño.

Cuadro 4. Costos de operación y mantenimiento de la Energía undimotriz

OWC	POWER BUOY	WAVE DRAGÓN	PELAMIS
USD 696.000,00	USD 480.000,00	USD 960.000,00	USD 600.000,00

Fuente: Elaboración Propia (2019)

Por ser la investigación de carácter social, fundamentada en la reducción del impacto ambiental así como en el aumento de oferta del sistema eléctrico como un aporte a la calidad de vida de los habitantes del estado Zulia, no genera ingresos en ninguna de las alternativas estudiadas durante la vida útil de los sistemas, equipos y dispositivos que las conforman, por lo que el flujo de caja es negativo y el indicador económico del Valor Presente Neto (VPN) es menor a cero.

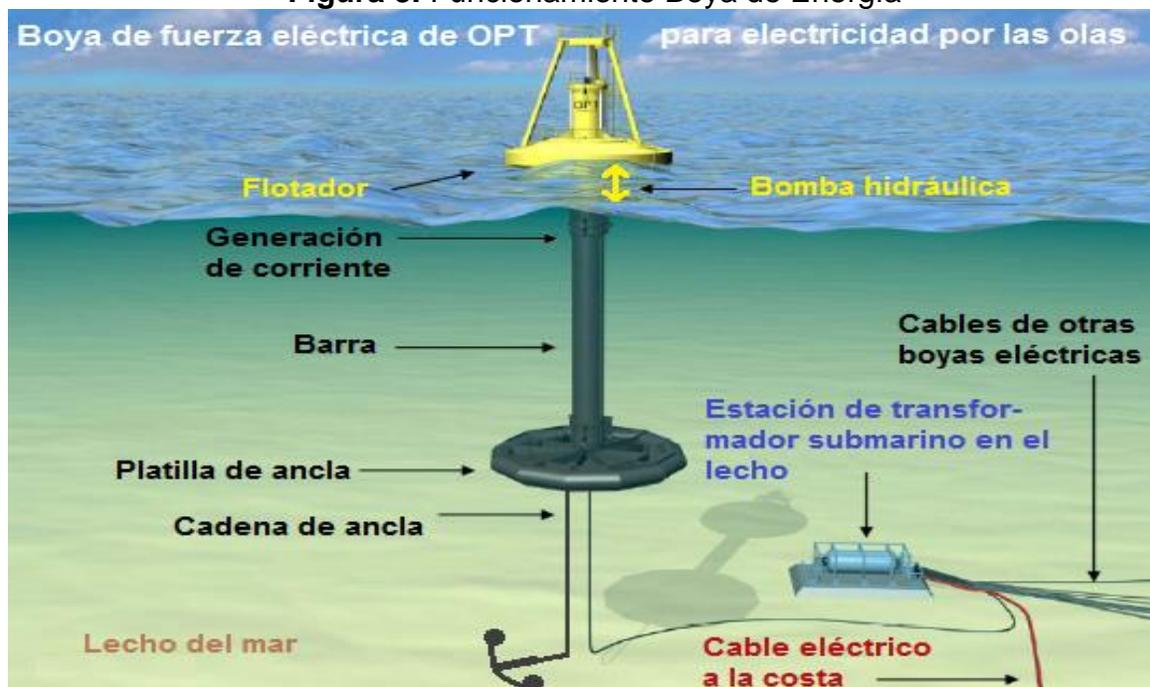
Sin embargo, los resultados obtenidos para el sistema Power Buoy son los más favorables entre las alternativas estudiadas, destacando un menor costo de inversión (MMUSD 6), así como uno de los precios más bajos por kW de acuerdo a la revisión documental realizada sobre la implementación de la tecnología a nivel mundial, por tanto, se seleccionó el dispositivo Power Buoy (Boya de Energía) como la alternativa tecnológica para el aprovechamiento de la energía undimotriz en el estado Zulia. Además, es el dispositivo con mayor avance en la fase de desarrollo e implementación en diversos países alrededor del mundo, donde opera de manera exitosa y se posiciona en lugares privilegiados de su fase comercial.

Selección de una alternativa tecnológica para el aprovechamiento de la energía undimotriz en el estado Zulia. Desarrollo de la Propuesta.

La propuesta contempla la instalación de un sistema de generación de electricidad mediante el aprovechamiento de la energía undimotriz y el uso de dispositivos y equipos de la tecnología Boya de Energía (Power Buoy), para cubrir un 5% del déficit existente en el mercado eléctrico regional, generando 80 kW para incorporar a la red eléctrica.

En la imagen mostrada a continuación, se aprecia el diagrama de proceso del sistema propuesto, el cual incluye un esquema simplificado del aprovechamiento de la energía cinética de las olas existentes en la zona costera del estado Zulia.

Figura 3. Funcionamiento Boya de Energía



Fuente: Adaptación de Fernández (2008).

El sistema propuesto basado en la tecnología desarrollada por OPT (Ocean Power Technologies) de Estados Unidos, aprovecha el movimiento vertical y pendular del oleaje a través de una boya de unos 2 a 5 metros de diámetro abierta por la parte inferior. Las boyas obtienen la energía mediante un sistema hidráulico que bombea un fluido (aceite) a alta presión, el cual a su vez acciona un generador eléctrico. La energía obtenida se envía a la costa mediante un cable instalado en el fondo marino o lacustre (Lago de Maracaibo). En caso de ocurrir temporales climáticos extremos, el sistema es desactivado para su protección y resguardo y una vez el clima vuelva a la normalidad, el sistema vuelve activarse para continuar la generación de energía eléctrica.

A continuación se presenta el esquema de las etapas a llevar a cabo para la ejecución del proyecto, desde el desarrollo de la ingeniería básica hasta implantación de la propuesta sistema eléctrico nacional; a su vez de contribuir con la reducción del impacto ambiental.

Figura 4. Etapas para la ejecución e implantación de la propuesta



Fuente: Elaboración Propia (2019)

Previo al inicio de cualquier trabajo, se realizarán reuniones gerenciales para la coordinación general del proyecto, donde se presentará oficialmente al personal que conformará el equipo del proyecto, responsable de la dirección, coordinación, gestión ambiental, calidad y seguridad del trabajo; así como la administración, seguimiento y control del proyecto. En esta etapa, se debe revisar la documentación de la ingeniería básica y determinar los entregables del proyecto, como el alcance de la obra, planos, especificaciones de los dispositivos y equipos del sistema undimotriz a instalar.



Igualmente, deberán establecerse roles y responsabilidades, así como los tiempos máximos para la implantación de la obra. En este sentido, el personal mínimo requerido para ejecutar el proyecto estará conformado por un Gerente General, tres Coordinadores de Disciplina (electricidad, civil y mecánica), un ingeniero residente, un administrador de contrato, un planificador y controlador de la obra.

Seguidamente, se debe evaluar la estrategia a implementar para el proceso de contratación, donde se sugiere sea manejada como un IPC (Ingeniería, Procura y Construcción) con la empresa autorizada en Venezuela por Ocean Power Technologies. A esta etapa, debe prestársele vital atención con el fin de que la empresa adjudicada establezca el enlace con el Ministerio de Energía. Una vez sean concedidos los permisos y autorizaciones necesarias, se dará inicio a la fase de Ingeniería de Detalle.

Por estudios realizados a nivel mundial, se conoce que el potencial de las olas venezolanas es de 20 kW/m, sin embargo, el primer paso a ejecutar en la fase de ingeniería ha de ser la evaluación del oleaje, para determinar la localización exacta de la implantación del sistema. En el cuadro 9 se presentan las actividades generales a ejecutar para la implantación del proyecto, así como la relación de costos de las mismas.

Como se observa en el cuadro 9, se estima un tiempo de ejecución de 5 meses para las fases ingeniería y procura y 7 meses para la construcción, iniciándose con el desarrollo de la ingeniería básica, donde uno de los primeros productos a elaborar son las especificaciones de los equipos y dispositivos del sistema, a fin de iniciar en paralelo y de forma temprana el proceso de procura de los mismos.

Luego, cuatro semanas después de haber iniciado la ingeniería de detalles se dará inicio a los trabajos de fabricación de la boya (122 semanas), a continuación

la construcción de los pilotes (8 semanas), posteriormente la instalación del cable a lo largo del lecho lacustre (6 semanas).

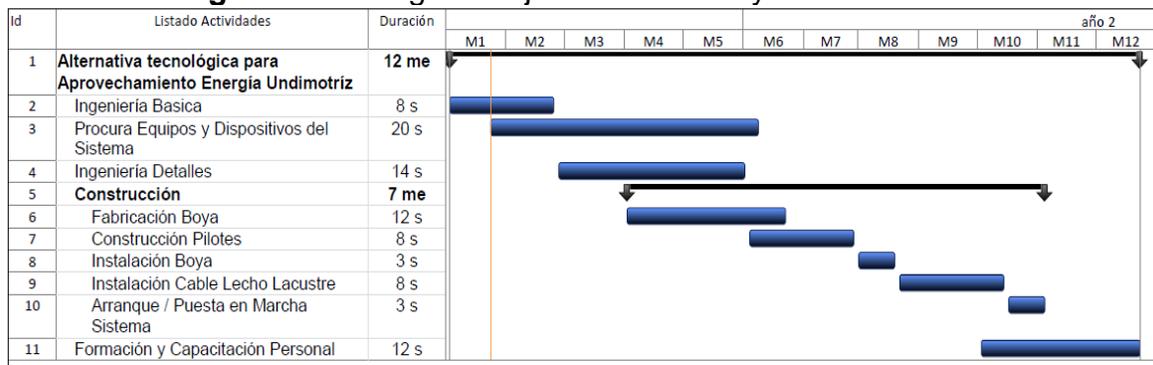
Cuadro 5. Características y Costos de IPC

Partidas	Características	Costo (USD)	Tiempo de Ejecución (Meses)
Ingeniería	Ingeniería Básica y de Detalle	600.000,00	5
Procura	- Adquisición de Motores, Cilindros, Transformador, Tanque de Conservación, Regulador, Generador. - Aquisición de Sistema Eléctrico (cableado, tableros, u otros) - Adquisición de Sistema de Transición (postes, aisladores u otros)	4.000.000,00	5
Construcción	- Fabricación de Boya - Actividades Civiles y Eléctricas - Puesta en marcha, conexiones y pruebas de Calidad	1.400.000,00	7
Total		6.000.000,00	17

Fuente: Elaboración Propia (2019)

Finalmente los trabajos de arranque y puesta en marcha del sistema undimotriz, tal como se observa en el siguiente diagrama de Gantt.

Figura 5. Cronograma ejecución del Proyecto Undimotriz



Fuente: Elaboración Propia (2019)



Formación y Capacitación del Personal

La propuesta contempla la formación y capacitación del personal a ser asignado para la operación y mantenimiento del sistema undimotriz, una vez haya culminado la fabricación de la boya e instalado el cable en el lecho lacustre y se esté en las actividades de arranque y puesta en marcha de sistema, con una duración de 12 semanas. Incluye cursos de formación, charlas, actividades y prácticas de campo relacionadas con las operaciones unitarias de la planta de generación undimotriz. De la misma manera, abarca la formación del personal que se encargará del monitoreo y control de los parámetros y niveles de calidad del sistema eléctrico involucrado en el proceso.

A continuación se presenta el personal mínimo requerido para la operación de la planta, destacando la sugerencia de un régimen laboral de operación de planta de tiempo completo (24 horas), para lo cual se contemplan dos turnos de trabajo, en cumplimiento con la Ley Orgánica de del Trabajo para los Trabajadores y las Trabajadoras (LOTTT) vigente en Venezuela.

Cuadro 6. Personal Operativo

Clasificación del Personal	Cantidad por Guardias	Descripción de Cargo
Supervisor	1	Realizar planes de mantenimiento, establecer controles de calidad, tanto en las actividades operacionales, como en las variables de seguridad y del personal a cargo
Operadores	3	<ul style="list-style-type: none"> - Ejecutar las actividades de arranque y paro seguro de los dispositivos - Ejecutar las labores de operación y control del dispositivo - Realizar ajustes requeridos para dar continuidad al proceso - Apoyo al Mantenimiento y control de Calidad
Mantenimiento	2	<ul style="list-style-type: none"> - Realizar las actividades de mantenimiento preventivo y correctivo al sistema <ul style="list-style-type: none"> - Inspeccionar los equipos - Establecer programas de mantenimiento y gestión de repuestos

Fuente: Elaboración Propia (2019)

Discusiones y/o Conclusiones

Luego de analizados los resultados para darle respuesta al objetivo principal, proponer una alternativa tecnológica para el aprovechamiento de la energía undimotriz en el estado Zulia, se evidenció que el sistema de generación de electricidad a nivel nacional se encuentra en un avanzado estado de deterioro, debido a la falta de mantenimientos e inversión de capital en el mismo. Así mismo, los datos encontrados demuestran un alto déficit para cubrir la demanda actual, y como tal las proyecciones arrojan datos alarmantes, dada la inexistencia de proyectos para atacar tal problemática.

Se comprobó la existencia de cuatro alternativas tecnológicas para la generación de energía eléctrica a partir de las olas del mar y el Lago de Maracaibo, Columna de Agua Oscilante (OWC); Boya de Energía; Dragón de Olas; y Serpiente Marina, las cuales presentan bajo impacto ambiental, favorecen la preservación y conservación de los recursos fósiles, disminución de las lluvias ácidas, el calentamiento global y deterioro de la capa de ozono.

Se determinó que la capacidad de generación aprovechable para Venezuela es de 20 kW, por lo cual la tecnología más apropiada para el aprovechamiento de la energía undimotriz es la Boya de Energía (Power Buoy), para lo cual se instalan los dispositivos mar adentro y mediante un cable instalado a lo largo del lecho marino o lacustre, se lleva la energía hasta un generador instalado en tierra firme.

Finalmente, se evaluaron los aspectos económicos de cada tecnología, obteniendo resultados negativos dados los altos costos de inversión y mantenimiento. Sin embargo, se pudo revisar diversos estudios pronosticadores de una disminución de costos con el pasar de los años dado el aumento de los combustibles de tipo fósil. Por lo cual el análisis costo – beneficio se realizó con elementos cualitativos, destacando la importancia social del proyecto.

Así mismo, se planteó la realización de un convenio IPC con la empresa autorizada por el licenciante del dispositivo Power Buoy en Venezuela, para la colocación de la orden de compra de los equipos y dispositivos, así cumplir de manera eficiente y eficaz con el aprovechamiento del recurso natural requerido como lo es las olas del agua proveniente del mar o del Lago de Maracaibo, manteniendo un contacto continuo con la empresa fabricante para la asistencia técnica de los equipos y dispositivos, a fin de la actualización tecnológicas e innovaciones realizadas al dispositivo durante su vida útil.

Referencias bibliográficas

- Arias, F. (2012). El Proyecto de Investigación. Introducción a la Metodología Científica. Sexta edición. Editorial Epistemes, C. A. Caracas
- Caballero, C. (2011), **Estudio de plantas de producción de energías renovables con aprovechamiento de la energía del mar**. Universidad Carlos III de Madrid. Repositorio institucional e-Archivo.
- Carta, J., Calero, R., Colmenar, A. y Castro, M. (2009). **Centrales de Energías Renovables: Generación Eléctrica con energías renovables**. Editorial Pearson. Madrid.
- Centro de Ingenieros del estado Zulia (CIDEZ, 2019). www.cidez.com
- Corpoelect (2019). Corporación Eléctrica Nacional, S.A <http://www.corpoelec.gob.ve>
- Cuevas, T. y Ulloa, G. (2015), **Energía Undimotriz. Seminario: Mercado de Energía Convencional y Renovable para Ingenieros Civiles**. Universidad de Chile.
- Fernández, J. (2008) **Una aproximación al aprovechamiento de la energía de las olas para la generación de electricidad**. Trabajo especial de grado. Universidad Politécnica de Madrid.
- Grupo Ricardo Zuloaga (2018). **Acciones para la recuperación y modernización del servicio eléctrico en Venezuela. Una guía aplicable después de un cambio político positivo en el país**. Versión Nov 2018.
- Hernández, R., Fernández C. y Baptista, P. (2014). **Metodología de la Investigación**. Sexta edición. Editorial McGraw Hill. México.

Hurtado de Barrera, J. (2015). **Metodología de la Investigación Holística**. Cuarta Edición. Quirón Ediciones. Caracas. Venezuela.

Miguélez Pose, F. (2009). **La energía que viene del mar**. Instituto Universitario de Estudios Marítimos. Editorial Netbiblo. España.

Ocean Power Technologies (2019). OPT's PowerBuoy® technology
<https://oceanpowertechnologies.com/>

Otterbac, Dieter H. (2014). **Energía y Calentamiento Global: ¿Cómo asegurar la supervivencia de la humanidad?**. Primera Edición eBook. Grupo Editorial Patria. México

Pelekais C.; Raspa P.; Finol M; Neuman N. y Carrasqueño E. (2010). **El ABC de la Investigación – Guía Didáctica**. 3ra Edición. Maracaibo- Venezuela, Ediciones Astro Data S.A.

Wave Dragon (2019). Technology for the generation of electricity from ocean.
<http://www.wavedragon.net/>

©2021 por el autor. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia de Creative Commons Reconocimiento – No Comercial 4.0 Internacional (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).