

**EVALUACIÓN DE LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ COMO UNA ALTERNATIVA
SUSTENTABLE PARA ALIMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE LEVANTAMIENTO
ARTIFICIAL EN UNA PLATAFORMA SEMISUMERGIBLE**

CAMILO ANDRÉS FIGUEREDO GUERRÓN

FIDEL ESTEBAN QUEVEDO ORJUELA

**Proyecto integral de grado para optar al título de
INGENIERO INDUSTRIAL E INGENIERO DE PETRÓLEOS**

Orientadores

Julio Mario Daza Escorcía

Ingeniero Industrial

Camilo Andrés Guerrero Martin

Ingeniero de Petróleos

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PROGRAMA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
BOGOTÁ D.C.**

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

Julio Mario Daza Escorcía

Nombre del presente jurado

Camilo Andrés Guerrero Martín

Nombre del presente jurado

Bogotá D.C. febrero de 2022

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claústro

Dr. Mario Posada Garcia-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada Garcia-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejia Guzman

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. Jose Luis Macías Rodriguez

Decana de la Facultad

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Director de Programa de Ingeniería Industrial

Dr. Jose Anibal Moreno Galindo

Director de Programa de ingeniería Petroleos

Dr. Juancarlos Rodriguez Esparza

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos, que me han brindado lo mejor de cada uno y me han acompañado incondicionalmente a lo largo de este bello camino.

Camilo Andrés Figueredo Guerrón

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme permitido llegar hasta este momento tan importante en mi formación. A mi madre y mi padre por ser los pilares más importantes durante toda mi vida, por demostrar su cariño, por ser ese apoyo incondicional sin importar las diferencias y dificultades, este logro es también de ustedes. A mis abuelos por estar presentes durante toda mi formación profesional y personal. A mi sobrino Juan Manuel y abuelo Fidel ya que gracias a ellos soy lo que soy hoy en día, gracias a su apoyo y presencia llegue hasta acá, sé que este logro hubiera sido tan importante para ellos como lo es para mí, aunque no puedan estar presente en este momento tan importante siempre lo estarán en mi vida. A Karen, Juliana y Samuel a quienes amo y estuvieron presentes en este proceso. A mi compañero de tesis Camilo porque sin el equipo que formamos no habiéramos llegado a esta meta.

Gracias a todos.

Fidel Esteban Quevedo Orjuela

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por todas las oportunidades y el cariño que me han brindado, a mis hermanos con quienes siempre puedo contar, a mis amigos por los grandes momentos que hemos compartido y a mis docentes por enseñar con gusto, respeto y compromiso.

Camilo Andrés Figueredo Guerrón

A mi familia por el apoyo y el cariño. A mis amigos y compañeros con quienes disfrutamos de la trayectoria en la Universidad. A Karina por estar presente durante toda la realización de la investigación y ser un apoyo adicional. A los docentes y la Universidad ya que sin ellos nada sería posible.

Fidel Esteban Quevedo Orjuela

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.1. Antecedentes	22
1.2. Pregunta de investigación	26
1.3. Justificación	26
1.4. Objetivo general	27
1.5. Objetivos específicos	27
2. METODOLOGÍA	28
2.1. Tipo y método de investigación	28
2.2. Fuentes de información	28
2.3. Fases	28
2.3.1. <i>Fase exploratoria</i>	28
2.3.2. <i>Fase descriptiva</i>	29
2.3.3. <i>Fase de diseño</i>	29
3. MARCO REFERENCIAL	30
3.1. Marco conceptual	30
3.1.1. <i>Energía renovable</i>	30
3.1.2. Energía undimotriz	31
3.1.3. <i>Sustentabilidad</i>	31
3.1.4. <i>Sistema de levantamiento artificial</i>	32
3.1.5. <i>Plataforma semisumergible</i>	33
3.1.6. <i>Costo nivelado de energía</i>	33
3.2. Marco teórico	34

3.2.1.	<i>Energías renovables</i>	34
3.2.2.	<i>Sustentabilidad</i>	35
3.2.3.	<i>Huella de carbono</i>	35
3.2.4.	<i>Análisis de costos y desempeño financiero</i>	36
3.2.5.	<i>Energía undimotriz</i>	37
3.2.6.	<i>Sistemas de levantamiento artificial</i>	38
3.3.	Marco histórico	38
3.4.	Marco normativo	40
4.	DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA ÓPTIMA DE OPERACIÓN	42
4.1.	Selección de la bomba electro sumergible	42
5.	ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DEL SISTEMA UNDIMOTRIZ	50
6.	VALIDACIÓN DEL SUMINITRO DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ	60
7.	COMPARACIÓN AMBIENTAL Y FINANCIERA	62
7.1.	Análisis ambiental del sistema undimotriz	62
7.1.1.	<i>Etapas del proyecto</i>	62
7.1.2.	<i>Factores susceptibles de impacto</i>	63
7.1.3.	<i>Puntuación de las interrelaciones</i>	72
7.1.4.	<i>Impacto ambiental del sistema undimotriz</i>	90
7.1.5.	<i>Análisis ambiental alternativa tradicional</i>	93
7.2.	Análisis económico de las alternativas	95
8.	CONCLUSIONES	103
	BIBLIOGRAFIA	

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Cuotas de participación de energía primaria global. [1]	16
Figura 2. Consumo mundial de energía primaria [1]	18
Figura 3. Opex del ciclo de vida para regiones promedio: GT frente a PFS [3]	20
Figura 4. Punto óptimo de operación (Elaboración propia)	45
Figura 5. Rangos de eficiencia para la operatividad de la bomba [26]	48
Figura 6. Boya de volumen variable [27]	50
Figura 7. RM3 Wave point absorber [28]	51
Figura 8. Mapa de ubicación de los puntos de estudio [29]	54
Figura 9. Energía de las olas en P38 [29]	55
Figura 10. Actividad del oleaje para la zona de interés (Tomada de SAM)	56
Figura 11. Distribución del análisis financiero (Tomada de SAM)	57
Figura 12. Arreglo de boyas (Tomada de SAM)	58
Figura 13. Esquema ilustrativo del proyecto (Elaboración propia)	60
Figura 14. Diagrama de procesos (Elaboración propia)	61

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Reducción anual de CO2 en plataforma con PFS [3]	21
Tabla 2. Cuadro comparativo potencia/unidad de superficie de fuentes energéticas renovables más usadas vs energía undimotriz. [7]	24
Tabla 3. En esta tabla se presentan los datos de propiedades del pozo junto con las características del yacimiento	42
Tabla 4. Propiedades del fluido de producción	43
Tabla 5. Propiedades del reservorio	43
Tabla 6. Curva VLP (elaboración propia) Tabla 7 Curva VLP (elaboración propia)	45
Tabla 8. Límites operativos de la bomba [26]	47
Tabla 9. Accesorios de la bomba [26]	47
Tabla 10. Parámetros de operatividad de la bomba para el pozo (Elaboración propia)	49
Tabla 11. Parámetros operativos del motor para el pozo (Elaboración propia)	52
Tabla 12. Requerimiento eléctrico del motor (Elaboración propia)	52
Tabla 13. Resultados de simulación undimotriz SAM (Elaboración propia)	62
Tabla 14. Costos de inversión SAM	65
Tabla 15. Matriz de impactos ambientales del proyecto	68
Tabla 16. Intervalos de impacto ambiental	70
Tabla 17. Criterios de evaluación de impactos ambientales Metodología Conesa Fernández	72
Tabla 18. Matriz de interrelaciones agua - contaminación	75
Tabla 19. Matriz de interrelaciones contaminación sonora - aire	78
Tabla 20. Matriz de interrelaciones emisión de gases - aire	80
Tabla 21. Matriz de interrelaciones contaminación - agua	82
Tabla 22. Matriz de interrelaciones accesibilidad - agua	83
Tabla 23. Matriz de interrelaciones alteración ecosistema - fauna	85
Tabla 24. Matriz de interrelaciones modificación entorno y vista - paisaje	87
Tabla 25. Matriz de interrelaciones empleo - población	89
Tabla 26. Matriz de interrelaciones oportunidades de inversión	90
Tabla 27. Matriz de interrelaciones compromiso con el ambiente - cultura	91

Tabla 28. Matriz de interrelaciones innovación - cultura	92
Tabla 29. Matriz de consolidación de impactos ambientales energía undimotriz.	94
Tabla 30. Matriz de consolidación de impactos ambientales, generador diésel.	97
Tabla 31. Costos del sistema de energía undimotriz.	99
Tabla 32. Condiciones para proyección del flujo de caja del sistema undimotriz.	100
Tabla 33. Flujo de caja del sistema undimotriz	103
Tabla 34. Condiciones para proyección del flujo de caja del generador diésel	104
Tabla 35. Flujo de caja del generador diésel	103

RESUMEN

La industria petrolera a través de los años ha usado métodos convencionales en sus operaciones que resultan ser eficientes y funcionales pero que a su vez pueden tener grandes impactos en los factores que se encuentran en su entorno, tales como el ambiental y el social, por esta razón es necesario plantear opciones en las que obtengan beneficios para la industria y para el entorno en la que se encuentran laborando. En lo que respecta a este proyecto se plantea el uso de la energía undimotriz en campos offshore de Brasil como alternativa de obtención de electricidad para una bomba electrosumergible, de esta manera reemplazando el generador eléctrico convencional a diésel por una opción mucho más limpia y amigable con el medio ambiente y su entorno.

Alineado con el interés de la descarbonización de las operaciones de la industria petrolera, se propone la evaluación de la energía undimotriz como una alternativa sustentable para alimentación de un sistema de levantamiento artificial en una plataforma semisumergible, mediante la selección de un pozo costa afuera en Brasil que cumpla las características para el estudio del presente trabajo, selección del sistema de levantamiento artificial adecuado para las propiedades del pozo seleccionado, simulación en software especializado en energías renovables para obtener los datos de desempeño, definición de parámetros ambientales para la identificación de impactos ambientales potenciales y la comparación con una alternativa energética tradicional, junto con un análisis de costos y viabilidad financiera.

Se obtienen resultados económicamente desfavorables para la implementación de la energía undimotriz, ya que se produce muy poca energía eléctrica y el costo de inversión es muy alto. Es necesario implementar 4 boyas o convertidores de energía de ola para lograr el suministro de energía al sistema de levantamiento artificial, en el escenario de costos para las boyas es necesario inversiones de millones de dólares mientras que para un generador eléctrico de combustión es necesario invertir unos cuantos miles de dólares. Desde el punto de vista de impactos ambientales y sociales si se justifica la implementación de la energía undimotriz, se genera un impacto negativo poco significativo y un impacto positivo de gran relevancia; a su vez se contrasta con la

estimación de los impactos ambientales de los generadores diésel, los cuales presentan un mayor grado de afectación ambiental a cambio de un buen desempeño económico.

PALABRAS CLAVE:

Undimotriz, energía, sustentabilidad, levantamiento artificial.

INTRODUCCIÓN

La energía undimotriz es una alternativa energética renovable que aprovecha el movimiento de las olas, capturando la energía contenida en ellas y convirtiendo la energía mecánica en energía eléctrica mediante inducción electromagnética. Tiene un gran potencial respecto a otras energías renovables, a causa de una gran densidad de potencia por metro cuadrado (m^2), y su disponibilidad y magnitud se ve influenciada por ubicación, factores geográficos, climáticos y ambientales.

Las plataformas petroleras son las encargadas de hacer posible la extracción de recursos naturales no renovables en operaciones costa afuera, existe una gran variedad de plataformas que se dividen según su alcance y funcionamiento limitado por el espesor de las láminas de agua. Los recursos extraídos luego serán tratados de forma tradicional para poder generar productos de implementación común, ya sea como necesidades principales o dirigidas al ocio, derivados tales como lubricantes, plásticos, fibras, detergentes, conservantes, entre otros.

La industria petrolera a través del tiempo ha necesitado de la energía eléctrica de forma constante para realizar con éxito y constancia cada una de sus operaciones. En la actualidad este factor energético se ha solventado con la implementación de generadores de combustión, en los que se usan combustibles fósiles, generalmente diésel para el funcionamiento. No obstante, las emisiones expedidas al medio ambiente son altas y perjudiciales en gran magnitud para el bienestar común y ambiental.

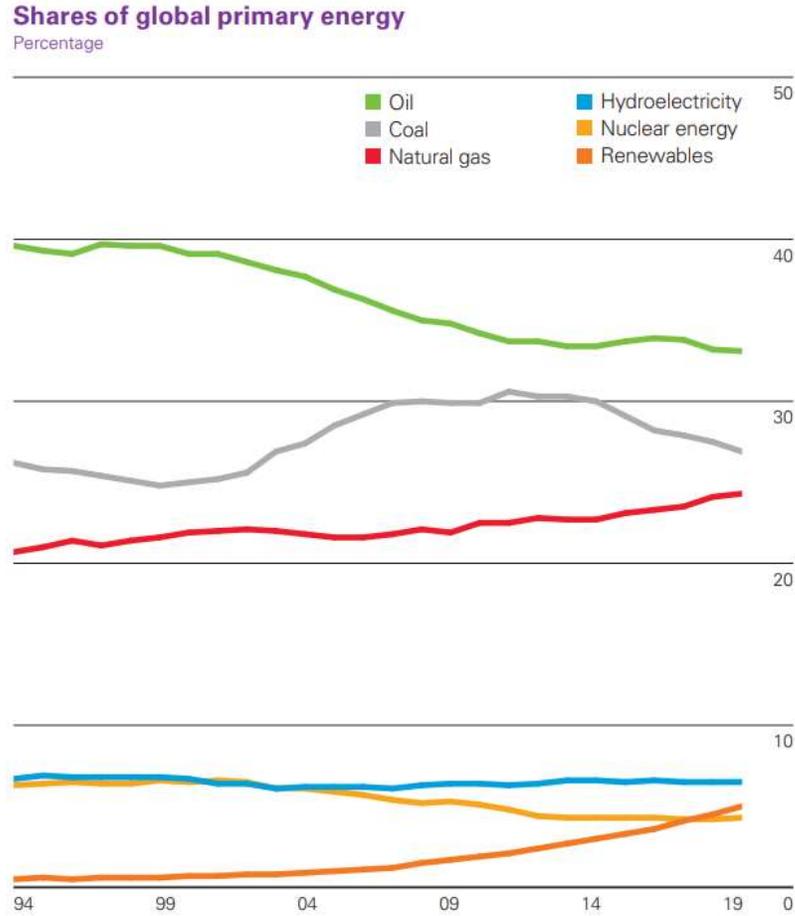
Los avances tecnológicos a través de los años han permitido ampliar la obtención de servicios energéticos necesarios de formas eficientes y mucho más amigables con el ambiente, reflejando impactos reducidos sobre el entorno. Las industrias de todos los campos se han visto forzadas a renovar y aumentar la eficiencia de procesos para continuar la producción y adaptarla a la amplia gama de posibilidades tecnológicas que se encuentran disponibles para la implementación.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La energía primaria describe la cantidad de energía disponible en la naturaleza antes de ser convertida en energía final, la cual se suministra al consumidor; las fuentes de energía primaria se dividen en dos grupos: energías primarias renovables y energías primarias no renovables. La matriz energética primaria mundial se compone principalmente de seis participantes: petróleo, gas natural, carbón, energía nuclear, energía hidroeléctrica y el conjunto de energías renovables, donde se evidencia un predominio de las energías no renovables.

Figura 1.

Cuotas de participación de energía primaria global.



Nota. *Cuotas de participación de energía primaria global. Tomado de: BP, “Statistical Review of World Energy globally consistent data on world energy markets . and authoritative publications in the field of energy The Statistical Review world of World Energy and data on world energy markets from is The Review has been providing,” p. 66, 2020, [Online]. Available: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>.*

Dentro de la matriz energética primaria disponible, el petróleo toma la mayor ponderación (33.1%), seguido por el carbón (27.0%), el cual ha entrado en un desuso acelerado entrado el 2019 debido a la gran cantidad de emisiones en su explotación y uso para generación de energía eléctrica.

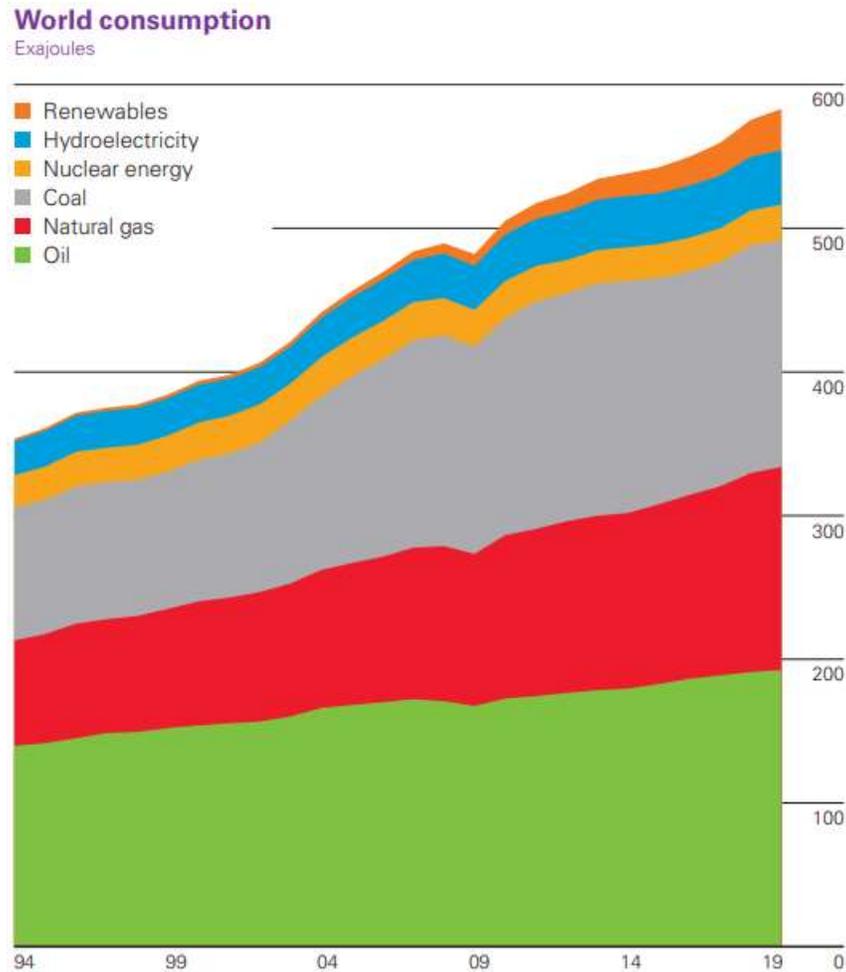
El gas natural hace parte de los tres principales participantes de la matriz energética actual, con una ponderación de 24.2%, evidenciando un crecimiento notable en su disponibilidad como energía primaria. Posteriormente, se sitúan: energía hidroeléctrica, energía nuclear y energías renovables, con ponderaciones de 6%, 4.3% y 5% respectivamente.

Se evidencia un crecimiento prometedor de las energías renovables como fuente de energía primaria, sobrepasando la cuota de la energía nuclear, mientras que la energía hidroeléctrica se mantiene estable desde hace varios años. Es importante resaltar que a medida que se logren avances tecnológicos relevantes en materia de aprovechamiento de energías renovables, la cantidad de energía primaria disponible aumentará considerablemente y, a su vez, la energía final y el consumo de esta.

Respecto al consumo energético mundial, el panorama no es distinto, las energías no renovables constituyen la mayor parte del consumo mundial debido a su explotación extensiva, costo de producción razonable y avances tecnológicos que aumentan cada vez la eficiencia y rentabilidad. El consumo energético mundial presenta un notable crecimiento, impulsado en parte por un aumento en el consumo de gas natural y energías renovables, acompañadas por el crecimiento estable del consumo de petróleo. El carbón, por su parte, constituye el principal recurso energético en Asia/Pacífico empleado en su mayoría para la generación de electricidad.

Figura 2.

Consumo mundial de energía primaria.



Nota. Consumo mundial de energía primaria. Tomado de: BP, “Statistical Review of World Energy globally consistent data on world energy markets . and authoritative publications in the field of energy The Statistical Review world of World Energy and data on world energy markets from is The Review has been providing,” p. 66, 2020, [Online]. Available: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>.

De acuerdo con los datos proporcionados por **BP plc** en su reporte *Statistical Review of World Energy 2020 69th edition*, el petróleo constituye la principal fuente de energía primaria, reportando un total de reservas probadas de 1733.9 miles de millones de barriles a nivel mundial para el cierre del 2019, de las cuales, Sur y Centroamérica poseen el 18.7% (324.1 miles de millones de barriles) y puntualmente Colombia, el 0.1% de las reservas globales al cierre del 2019, con 2.0 miles de millones de barriles, sujetos a un ratio Reservas/Producción de 6.1 años; por su parte, la ratio R/P mundial arroja un resultado de 49.9 años al cierre de 2019.

Se resalta la importancia del petróleo en la economía mundial y la cantidad de reservas económicamente recuperables en las condiciones existentes, dando oportunidad de innovar en la industria petrolera para aprovechar dichas reservas y asegurar un suministro constante de la fuente energética mediante la mejora de las condiciones, aumentando la cantidad de hidrocarburo recuperable a un costo razonable.

Atendiendo la necesidad de recuperar petróleo a un costo razonable, se implementan los sistemas de levantamiento artificial. Se emplean para elevar el crudo desde la formación a una determinada tasa, cuando el pozo no tiene la energía suficiente para producir los fluidos naturalmente, o cuando la tasa de producción es menor a la deseada. [2]

Un aspecto clave a abordar desde el presente proyecto es el consumo de energía de los sistemas de levantamiento artificial, y el origen de dicha energía eléctrica. Donde se debe asegurar un suministro constante y confiable a costo razonable, con el valor agregado de generar cantidades de emisiones contaminantes mínimas, o no perceptibles.

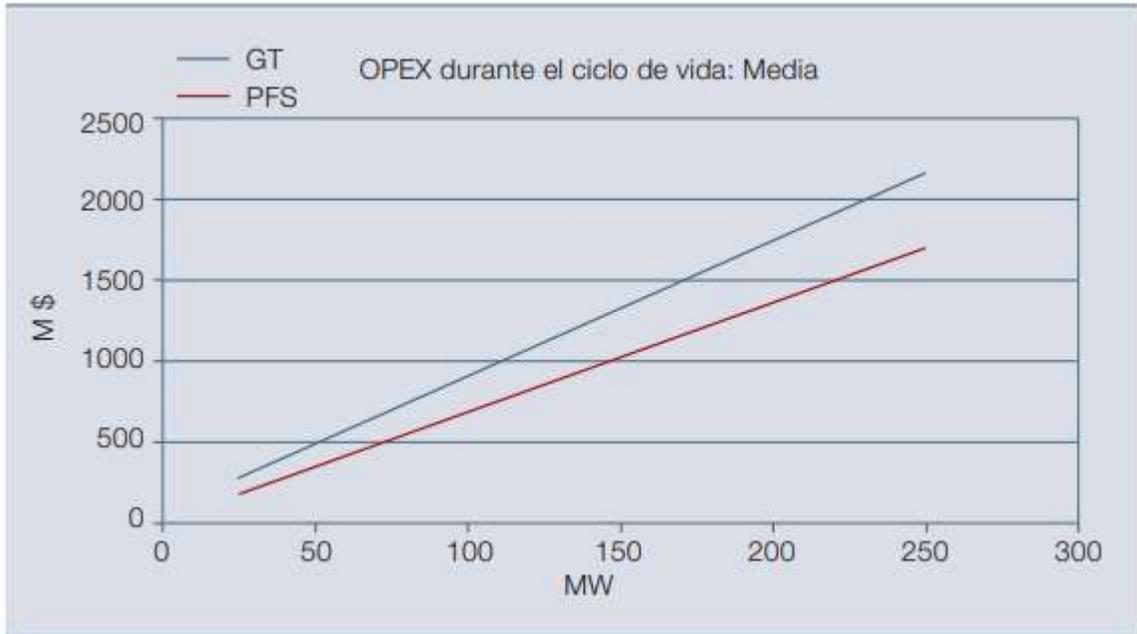
Comúnmente, una plataforma semisumergible se abastece energéticamente por medio de generadores diésel de gran tamaño, aunque se presentan dos soluciones más novedosas, como la conexión a redes eléctricas de territorios continentales a través de cables submarinos, y el uso de generadores de combustión interna que emplean el gas asociado de petróleo como combustible.

Las alternativas presentan una reducción sustancial en el impacto ambiental, y en algunos casos, un impacto positivo a la rentabilidad. Por su parte, HVDC Light ® brinda información comparativa de las turbinas de gas (GT) o generadores diésel, y la solución

de energía proveniente de la costa (PFS), destacando la posibilidad de proveer mayor potencia eléctrica a un costo menor.

Figura 3.

OPEX del ciclo de vida para regiones promedio: GT frente a PFS.



Nota. Comparación de opex de regiones promedio para suministro de energía eléctrica por turbinas de gas (GT) vs energía proveniente de la costa (Power From Shore). Tomado de: R. Chokhawala, "Suministro de energía eléctrica a las plataformas," ABB, 2008, [Online]. Available:

https://library.e.abb.com/public/e498bdb06e6d0eafc125742700418fda/52-561M811_SPA72dpi.pdf.

Adicionalmente, se destacan las estimaciones en la reducción anual de CO₂ en plataforma con PFS (power from shore).

Tabla 1.

Reducción anual de CO2 en plataforma con PFS.

Reducción anual de CO2 en plataforma	Media toneladas
250 MW, 50 km	153.300
100 MW, 100 km	613.200
250 MW, 300 km	1.533.000

Nota. Reducción anual de toneladas de CO2, categorizada por proyectos PFS de distinta magnitud en potencia y distancia. Tomado de: R.

Chokhawala, "Suministro de energía eléctrica a las plataformas," ABB, 2008, [Online]. Available:

https://library.e.abb.com/public/e498bdb06e6d0eafc125742700418fda/52-56_1M811_SPA72dpi.pdf.

En paralelo, Aggreko, uno de los principales proveedores de equipos de generación de energía temporal, plantea la generación de energía a partir del gas asociado de petróleo, aportando a la iniciativa "Eliminación de la quema de gas asociado para el 2030". Los beneficios que plantea esta solución van desde la reducción de la huella de carbono al evitar la quema de este gas, comúnmente considerado residual; hasta la transformación de la industria mediante la monetización de este gas, bien sea para la generación de energía o la venta del gas procesado a terceros.

Ambas alternativas constituyen una reducción sustancial del impacto ambiental, sin embargo, el impacto se percibe aún, desde las emisiones del gas asociado de petróleo, y desde la modificación de cuerpos de agua para generar energía mediante centrales continentales.

Teniendo en cuenta las intenciones de los principales gobiernos de minimizar el impacto ambiental, y el crecimiento sustancial que han tenido las energías renovables durante los últimos años, se aprecia una oportunidad de incentivar el desarrollo de energías

alternativas no convencionales y la necesidad de estudiar su viabilidad como opciones innovadoras en diversos campos; para este caso, en la industria petrolera costa afuera.

Es así, que se pretende **Evaluar la energía undimotriz como una alternativa sustentable para alimentación de un sistema de levantamiento artificial en una plataforma semisumergible.**

1.1. Antecedentes

El interés por el estudio de la energía undimotriz nace formalmente a partir de José Barrufet, quien ideó un sistema de aprovechamiento del oleaje en Barcelona, España, en el año 1885. El diseño consistió en un dispositivo llamado “marmotor”, el cual transformaba la oscilación vertical del oleaje en energía mecánica, que a su vez era transformada en energía eléctrica.

Con la intención de maximizar el rendimiento de su prototipo, Barrufet realiza un estudio previo de las olas y sus características, clasificándolas en tres categorías: olas transitorias, olas de traslación y olas coexistentes. Cada una de ellas respondiendo a distintos estados del mar [4].

El prototipo desarrollado por Barrufet llegó a funcionar, convirtiendo energía de las olas en energía eléctrica, aunque con una baja eficiencia. Además, los efectos del mar sobre el artefacto, como corrosión, radiación solar, y demás, limitaron el funcionamiento.

Con una perspectiva más actual sobre la energía undimotriz, se destaca el dispositivo Pelamis, desarrollado por la empresa Pelamis Wave Power (ahora Ocean Power Delivery); el proyecto fue el primer parque del mundo que aprovechaba la energía de las olas, constituido por una serie de dispositivos Pelamis con una capacidad instalada total de 2.25MW. La apertura del parque fue en septiembre de 2008, en cercanías a la costa de Aguçadoura, Portugal.

Desafortunadamente, a pesar de lo innovador del proyecto, tuvo que ser desmontado dos meses después de su inauguración y puesta en funcionamiento, debido a problemas técnicos de los dispositivos y problemas financieros. [5]

Sin embargo, Pelamis no es el único sistema de conversión de energía undimotriz; en Australia se presentó un caso de éxito en 2015: la empresa Carnegie Wave Energy inauguró su proyecto “Perth”, una estación de energía en tierra alimentada por una matriz de energía undimotriz, empleando tecnología CETO, exclusiva de Carnegie. El sistema se mueve con las olas del océano para impulsar bombas ancladas al lecho marino; su funcionamiento bajo el agua le brinda protección frente a tormentas y corrosión (puntos débiles del sistema Pelamis).

Las bombas submarinas surten agua a alta presión a la estación en tierra, para proceder a la generación de energía eléctrica, además de incluir procesos de desalinización. Cabe aclarar que fue el primer conjunto de generadores de energía undimotriz conectado a una red eléctrica, y que tenía propósito comercial, vendiendo energía al Departamento de Defensa de Australia, para abastecer la base naval más grande del país [6].

A pesar de constituir un caso de éxito, el sistema no cuenta con la flexibilidad suficiente para aprovechar el potencial de la energía de las olas en ubicaciones prometedoras, pues requiere instalarse cerca de la costa para surtir eficientemente agua a presión a la planta transformadora. De otra forma, el suministro de agua a presión se vería comprometido -o sería muy costoso- a causa de las largas distancias y características del lecho marino.

Ahora bien, respecto a la energía undimotriz, “debemos recordar que las energías renovables se caracterizan por su variabilidad e intermitencia, pero, en el caso de la energía undimotriz, existe un consenso internacional respecto de su consistencia pues en determinadas regiones oceánicas, se produce una marcada persistencia durante mayor parte del año lo que garantiza el permanente funcionamiento de los equipos” [7].

Como resaltan los autores, parte del potencial de la energía undimotriz es su consistencia (focalizada en regiones específicas), frente a otras fuentes de energía renovable, como la fotovoltaica o eólica, que presentan grandes fluctuaciones en función de la variabilidad natural de los recursos en un momento determinado.

Adicionalmente, brindan una perspectiva del potencial de la energía undimotriz al comparar el indicador Potencia/unidad de superficie (W/m²) con otras fuentes de energía renovables:

Tabla 2.

Cuadro comparativo potencia/unidad de superficie de fuentes energéticas renovables más usadas vs energía undimotriz.

Fuente energética	Potencia/m² (W/m²)
Biomasa	0.6
Solar	200
Eólica	400 a 600
Undimotriz	2000 a 3000

Nota. Cantidad de potencia sobre metro cuadrado de distintas opciones de energía renovable. Tomado de: M. Pelissero, P. A. Haim, G. Oliveto, F. Galia, and R. Tula, "Aprovechamiento de la Energía Undimotriz.Pdf." 2011.

Una mayor potencia por unidad de superficie por parte de la energía undimotriz la presenta como una alternativa prometedora; sin embargo, los avances tecnológicos al momento de algunos de sus proyectos limitaron el aprovechamiento de esta cualidad.

Tal es el caso del dispositivo Pelamis, anteriormente mencionado que, en su diseño, se buscó un equilibrio entre aprovechamiento de la energía undimotriz y durabilidad ante condiciones climáticas adversas, apuntando a maximizar la durabilidad del equipo mientras se asegura un suministro constante de energía eléctrica.

El documento **Modelado numérico de convertidores de energía undimotriz Técnicas de vanguardia para dispositivos y matrices individuales**, editado por Matt Folley. En el año 2016, expone la complejidad para desarrollar modelos numéricos para los convertidores de energía de las olas, denota la información de los modelos numéricos de WEC, la historia, técnicas y matrices usadas. Se compone de varias secciones, tales como: modelos numéricos para flujo lineal, modelos no basados en teorías de flujo lineal y la implementación de los modelos para el diseño de WEC o granjas de obtención de energía eléctrica por la energía cinética de las olas. [8]

En el documento **Efectos del hielo marino en la distribución del flujo de energía de las olas en el mar de Bohai Zhang**, realizado por Na, Li, Shuai, Wu, Yongsheng, Wang, Keh-Han, Zhang, Qinghe, You, Zai-Jin, Wang y Jin. 2020 habla del flujo de energía de las olas del mar de Bohai en temporada de invierno, se evalúa tomando en cuenta el efecto del hielo marino formado en la superficie oceánica, que se deriva de modelos numéricos acoplados. Se tomaron patrones de simulación que concuerdan con los datos medidos directamente de las olas y las imágenes de las capas de hielo. Denotan como resultado disminución en la producción de energía eléctrica captada de las olas, teniendo como causal principal la capa de hielo presente en la superficie, reduciendo la efectividad del viento y su energía proporcionada al oleaje. Para el comportamiento típico de la dinámica marina con capas de hielo de 2011 a 2012 se obtienen pérdidas potenciales del 80% de producción eléctrica en la bahía de Liaodong, y pérdidas hasta del 50% en zonas costeras como la de Bohai y Laizhou. Evidencia que el diseño aplicado para las producciones de energía eléctrica y las ubicaciones usadas en el mar de Bohai tiene falencias y son mayormente denotadas en regiones cubiertas de hielo. [9]

En el documento **Mejora de la generación de energía eléctrica de un convertidor de energía undimotriz independiente mediante un control óptimo de la carga eléctrica**, autores: Wang, LiGuo, Lin, MaoFeng, Tedeschi, Elisabetta, Engström, Jens, Isberg y Jan. 2020. En este artículo se investiga la dinámica eléctrica para optimizar el funcionamiento de un convertidor de energía undimotriz que usa un generador de imanes como sistema de toma de fuerza por ondas regulares o irregulares, en la que se consideran las condiciones de funcionamiento del mismo, para así, ajustar el dispositivo a los diferentes estados del mar, para lo cual desarrollan un modelo numérico con el fin de generar rutinas de optimización, para proponer un dominio mayor de la producción eléctrica, simulando las respuestas hidrodinámicas para los convertidores de energía de las olas. Finalmente presentan resultados en los que se muestran mejoras significativas bajo condiciones y olas irregulares. [10]

En el documento **Un estudio de optimización paramétrica para el diseño preliminar de convertidores de energía undimotriz de tipo absorbedor puntual adecuados para las costas turcas del Mar Negro**, realizado por Erselcan, İlkay Özer, Kükner y

Abdi. 2020. Se lleva a cabo estudios de optimización para encontrar un diseño para capturar la mayor cantidad de energía en la costa turca de mar negro, utilizando unos convertidos de energía undimotriz, realizando análisis con diferentes geometrías, dimensiones y parámetros de fuerza hidráulica para la boya. Se comparan los diferentes diseños de flotadores sobre la energía generada por las olas, los análisis exponen que, para la sección transversal del pistón hidráulico, se puede realizar la selección del fluido hidráulico para mejorar el funcionamiento de los WEC con respecto a la dinámica del mar anual en cada uno de los estados del mar observados para el área objetivo, evaluando el costo energético del WEC con la diferencia geométrica del flotador. [11]

1.2. Pregunta de investigación

Por lo tanto, surge la pregunta de investigación **¿Bajo qué criterios es la energía undimotriz una alternativa energética sustentable para su uso en un sistema de levantamiento artificial en plataformas semisumergibles?**

1.3. Justificación

Evaluar la generación de energía undimotriz como una alternativa sustentable para el suministro de energía eléctrica en un sistema de bombeo electro-sumergible en una plataforma petrolera tipo SS.

Como se precisa en el planteamiento del problema, las fuentes de energía fósiles constituyen una parte de suma importancia en la matriz energética mundial, bien sea como energía primaria o por su aprovechamiento y conversión, además de los miles de derivados del petróleo que se consumen cotidianamente.

A pesar del interés generalizado por preservar el medio ambiente reduciendo la contaminación y la emisión de gases de efecto invernadero, pasar del consumo de energías fósiles a energías renovables, no parece ser viable a corto y mediano plazo, debido a su uso extendido y las limitaciones tecnológicas que mantienen a las energías tradicionales como la opción más confiable en la gran mayoría de los casos.

Es por ello, que se propone mediante esta investigación, aportar al sector de hidrocarburos mediante el estudio de una alternativa energética que disminuya considerablemente el impacto ambiental de la extracción de petróleo y gas costa afuera

y, en lo posible, que sea redituable económicamente, o competitiva a nivel económico con alternativas tradicionales.

Dicha energía es la energía undimotriz, que hace parte de las energías renovables no convencionales y, que a pesar de que no ha presentado avances tan significativos como otras energías renovables, su potencial es reconocido, principalmente por su disponibilidad, su concentración de potencia y la cantidad de energía aprovechable con mecanismos adecuados.

Finalmente, se plantea la evaluación de la alternativa energética mediante un enfoque de sustentabilidad sectorial, donde se tienen en cuenta factores ambientales y económicos, y se caracteriza el posible aporte a la industria de los hidrocarburos costa afuera.

1.4. Objetivo general

Evaluar la generación de energía undimotriz como una alternativa sustentable para el suministro de energía eléctrica en un sistema de bombeo electro-sumergible en una plataforma petrolera tipo SS.

1.5. Objetivos específicos

- Determinar la potencia óptima de operación del bombeo electro-sumergible en una plataforma tipo SS mediante la metodología usada en la industria de los hidrocarburos.
- Estimar el potencial de generación eléctrica de la energía undimotriz a través de simulación numérica computacional para el diseño de esquema y geometría del generador.
- Validar que el potencial de oferta de generación eléctrica cumpla con la demanda requerida para el abastecimiento de energía del sistema de levantamiento artificial.
- Comparar la generación de energía del sistema undimotriz frente a otras alternativas energéticas tradicionales mediante análisis de costos, indicadores financieros y parámetros ambientales.

2. METODOLOGÍA

La metodología de la presente investigación se estructura en tres fases: exploratoria, descriptiva, y de diseño, mediante las cuales se plantean las actividades y procedimientos a realizar para dar cumplimiento a los objetivos del proyecto.

2.1. Tipo y método de investigación

La presente investigación es de carácter cualitativo, soportada en el método inductivo.

2.2. Fuentes de información

Se empleará información de fuentes secundarias, como artículos de revistas científicas, libros, tesis de pregrado y posgrado, artículos de revistas, periódicos y páginas web.

2.3. Fases

A continuación, se presentan las fases que componen la investigación y los conjuntos de actividades comprendidas en cada fase para dar cumplimiento a los objetivos planteados.

2.3.1. Fase exploratoria

En la fase exploratoria se identifica el problema de forma preliminar, se identifican las herramientas de búsqueda de información y los casos del uso de energía undimotriz para la generación de energía eléctrica.

La fase exploratoria comprende las siguientes actividades:

- Definir el requerimiento energético del SLA.
- Definir los parámetros ambientales mediante los cuales se evaluará el sistema de energía undimotriz.
- Recopilar información sobre los parámetros ambientales para la simulación del sistema undimotriz.
- Recopilar información relativa a los costos del sistema undimotriz simulado.
- Recopilar información de alternativas tradicionales respecto a parámetros ambientales, costos y parámetros de rentabilidad.

2.3.2. Fase descriptiva

En la fase descriptiva se realiza una caracterización del objeto de estudio, se definen las variables y los requerimientos del proyecto.

La fase descriptiva comprende las siguientes actividades:

- Determinar las características del bombeo electro-sumergible de acuerdo con las necesidades del pozo.
- Emplear la metodología usada en la industria de los hidrocarburos para la determinación de la potencia óptima de operación del SLA.
- Definir el sistema de energía undimotriz más eficiente en costo y generación de energía eléctrica mediante simulación en SAM.
- Caracterizar las condiciones de operación del sistema undimotriz.
- Definir la inversión inicial del proyecto de energía undimotriz.
- Definir costos operativos.

2.3.3. Fase de diseño

En la fase de diseño se determinan las características principales del proyecto, tanto el modelamiento del sistema de energía undimotriz, como la proyección del flujo de caja del proyecto.

La fase de diseño comprende las siguientes actividades:

- Simular condiciones de operación mediante software especializado para la obtención del potencial de generación eléctrica estimado.
- Caracterizar el potencial de generación del sistema de energía undimotriz.
- Simular las condiciones de suministro energético.
- Proyectar un flujo de caja con datos obtenidos de la simulación.
- Definir los parámetros de análisis financiero y de rentabilidad.
- Analizar la viabilidad económica del proyecto mediante los parámetros establecidos.

3. MARCO REFERENCIAL

En la presente sección, se recopilan los conceptos, teorías, referentes históricos y antecedentes legales que fundamentan la investigación.

3.1. Marco conceptual

En el presente marco conceptual, se presenta el conjunto de palabras clave, términos y conceptos necesarios para abordar el problema de investigación.

3.1.1. *Energía renovable*

Desde un enfoque en derecho y regulación energética, el Doctor en Derecho Víctor Rafael Hernández Mendible, aporta la definición:

«las energías renovables comprenden todas aquellas que se extraen de fuentes que se regeneran de manera natural, lo que garantiza que no se agoten y que se consideren en principio limpias o verdes, porque contaminan muy poco, y no emiten los gases que producen el efecto invernadero.»

A lo cual, Hernández Mendible complementa con:

«El principal beneficio que producen las energías renovables frente a las tradicionales, es que disminuyen la dependencia de éstas, las van sustituyendo de forma progresiva y contribuyen a mantener la calidad de vida de las personas actuales, garantizando un ambiente ecológicamente más equilibrado, lo que permite preservar el ambiente sano para las generaciones presentes y futuras y contribuir a la disminución del calentamiento global.» [12, p. 3]

Dicho lo anterior, se entiende por las definiciones aportadas por Hernández Mendible que la transición a energías renovables debe ser enfocada a la sustitución de energías tradicionales contaminantes y la disminución de la dependencia respecto a dichas energías tradicionales.

Por otro lado, un correcto aprovechamiento de las energías renovables hace un gran aporte a la conservación del medio ambiente y su equilibrio, asegurando que las interacciones entre el medio ambiente y las generaciones presentes y futuras sean de

mutuo beneficio; es decir, sin comprometer la calidad del medio ambiente ni el acceso a recursos y calidad de vida de las personas.

En paralelo, y con un enfoque a la aplicabilidad, Estrada Gasca y Aranciba Bulnes aportan:

«Las fuentes renovables de energía (FRE) son aquellas que por su cantidad en relación con los consumos que los seres humanos pueden hacer de ellas son inagotables y su propio consumo no afecta el medio ambiente.» [13, p. 4]

Una de las premisas de las energías renovables es aprovechar la energía disponible en el medio ambiente sin generar afectaciones significativas al mismo. En este sentido, y en concordancia con las definiciones citadas, las energías renovables constituyen una oportunidad esencial para satisfacer las necesidades actuales y venideras, procurando una interacción armónica entre las personas y el medio ambiente.

3.1.2. Energía undimotriz

La energía undimotriz es aquella generada por el movimiento de las olas.

Para efectos del presente trabajo, se entenderá la energía undimotriz desde el enfoque de energías renovables y generación de energía eléctrica.

3.1.3. Sustentabilidad

En el Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo “*Nuestro futuro común*”, también conocido como Informe Brundtland, define el desarrollo sustentable como:

«el desarrollo que satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades. Encierra en sí, dos conceptos fundamentales:

- El concepto de “necesidades”, en particular las necesidades esenciales de los pobres a los que debería otorgarse prioridad preponderante;
- La idea de limitaciones impuestas por el estado de la tecnología y la organización social entre la capacidad del medio ambiente para satisfacer las necesidades presentes y futuras.» [14]

En ese sentido, el desarrollo sustentable consiste, en parte, de ser comprometidos con el futuro, en tanto a que la generación presente desarrolle los medios para aprovechar los recursos actuales de una forma responsable, asegurando que las siguientes generaciones hereden los mismos recursos y la misma capacidad de aprovecharlos.

El desarrollo sustentable, al tener una definición tan amplia, puede ser abordado desde varias perspectivas, dentro de las cuales se encuentran las propuestas por el doctor Paolo Bifani en su obra *Medio Ambiente y Desarrollo*; a saber, el enfoque ecologista, el enfoque intergeneracional, el enfoque económico, y el enfoque sectorial.

Para efectos del presente proyecto, se adoptará la definición de desarrollo sustentable desde el enfoque sectorial, en donde la sustentabilidad constituye una de las propiedades o criterios para medir el desempeño de una actividad productiva en concreto, tomando como ejes principales el impacto mínimo de las actividades productivas al medio ambiente y, a la vez, que sea redituable en lo económico.

Si bien, este enfoque es restringido tanto en alcance (no contempla plenamente el factor social) como en número de individuos (es sesgado al ámbito empresarial en tanto a que sus proyectos impacten lo mínimo al medio ambiente y sean atractivos económicamente), resulta llamativo al considerar la posibilidad de generar innovaciones con un impacto ambiental mínimo que se fortalezcan con un aumento de la productividad y ventajas económicas respecto a soluciones tradicionales.

Por otro lado, el enfoque sectorial ha sido la única manera de hacer operativas algunas ideas de la sustentabilidad; por ejemplo, la agricultura sustentable, el ecoturismo, las cadenas de valor de ciclo cerrado, entre otras, han sido resultados del abordaje de la sustentabilidad desde un enfoque sectorial. [14]

3.1.4. Sistema de levantamiento artificial

«Es cualquier sistema que agrega energía a la columna de fluido de un pozo con el objetivo de iniciar y mejorar la producción del pozo. Los sistemas de levantamiento artificial utilizan una diversidad de principios de operación.» [15]

En otras palabras, los sistemas de levantamiento artificial se emplean para aumentar la producción del pozo, bien sea para un aumento de la productividad o para alcanzar la

tasa de producción deseada. El uso de sistemas de levantamiento artificial, de cierta manera aumenta la cantidad de hidrocarburo recuperable a costo razonable.

Dichos sistemas poseen varios principios de operación, en función de las características del pozo.

Los principios de operación son:

- Bombeo de cavidad progresiva
- Bombeo electrosumergible
- Bombeo mecánico
- Gas lift
- Bombeo hidráulico

3.1.5. Plataforma semisumergible

«Un tipo especial de embarcación flotante sustentada principalmente en estructuras grandes de tipo pontón, sumergidas por debajo de la superficie del mar. Las cubiertas de operación se encuentran elevadas unos 100 o más pies por encima de los pontones en grandes columnas de acero. Este diseño presenta la ventaja de tener sumergida la mayor parte del área de los componentes en contacto con el mar y de minimizar la carga proveniente de las olas y el viento. Las embarcaciones semisumergibles pueden operar en un amplio rango de profundidades de agua, incluida el agua profunda. Generalmente se anclan con seis a doce anclas amarradas con cadenas fuertes y cables, controlados por computadoras para mantener la posición. Las embarcaciones semisubmergibles (denominadas "semisubs" o simplemente "semis" en idioma inglés) pueden ser utilizadas para operaciones de perforación, reparación y para las plataformas de producción, dependiendo del equipo del que están provistas.» [16]

3.1.6. Costo nivelado de energía

«Es una métrica generalizada, basada en el costo unitario que describe a un proyecto generador de electricidad y que comúnmente es usada como criterio para la selección de proyectos de inversión.» [17, p. 11] Es comúnmente usado para comparar la eficiencia financiera de los diferentes tipos de energía renovable.

Básicamente, el costo nivelado de energía (LCOE) se emplea como un indicador que expresa cuánto cuesta la generación de energía eléctrica, expresado en \$/MWh.

Suele ser empleado tanto en proyectos de energías tradicionales, como en proyectos de energías renovables y energías renovables no convencionales, complementando índices de evaluación como el valor presente neto y la tasa interna de retorno, entre otros.

3.2. Marco teórico

En relación con los conceptos anteriormente expuestos en el marco conceptual, se presentan en el marco teórico, las corrientes teóricas que fundamentan la investigación.

3.2.1. Energías renovables

Respecto a energías renovables, se considera fundamental su definición como fuentes de energía virtualmente inagotables en relación con el uso que los humanos pueden hacer de ellas, además que su explotación y consumo no afecta al medio ambiente, o su impacto es relativamente bajo.

A su vez, el aporte de Hernández Mendible guía en parte la orientación de la investigación; destaca que el principal beneficio a raíz del uso de energías renovables es que pueden sustituir de forma progresiva las fuentes tradicionales y disminuyen la dependencia de estas, haciendo hincapié en el equilibrio medioambiental y la satisfacción de las necesidades de las personas en el contexto actual y en generaciones futuras.

Si bien, la propuesta de emplear una energía renovable como insumo para la extracción de fuentes de energía tradicionales como petróleo y gas, no asegura y no apunta a la sustitución del uso de dichas fuentes tradicionales, sí se enfoca en disminuir el impacto medioambiental en procesos de extracción costa afuera y en constituir una alternativa innovadora para la industria de los hidrocarburos. En otras palabras, y entendiendo que los hidrocarburos continuarán abasteciendo energéticamente al mundo por unos años más, esta propuesta se fundamenta en la reducción del impacto de la extracción, junto con un aseguramiento de las necesidades energéticas actuales y próximas, en cuanto a petróleo se refiere.

3.2.2. Sustentabilidad

Como se acotó en el marco conceptual, el concepto de sustentabilidad se abordará desde un enfoque sectorial, propuesto por el doctor Paolo Bifani, donde se analiza la sustentabilidad de un proyecto mediante dos ejes principales: un impacto mínimo de las actividades productivas en el medio ambiente, y la característica de que el proyecto sea redituable económicamente. [14]

Por lo tanto, dichos ejes principales se abordarán de la siguiente manera:

3.2.3. Huella de carbono

La huella de carbono es un indicador que se ha desarrollado para cuantificar la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) generados y emitidos, bien sea por una empresa o por un producto, contemplando su cadena productiva y, en ocasiones, su tratamiento una vez sale de la fábrica, desde su uso y/o consumo hasta su recuperación una vez finalizada su vida útil y su eliminación.

De acuerdo con el Protocolo de Kioto, se establecen 6 tipos de gases de efecto invernadero (GEI):

- Dióxido de carbono (CO₂)
- Metano (CH₄)
- Óxido nitroso (N₂O)
- Hidrofluorocarbonos (HFC)
- Perfluorocarbonos (PFC)
- Hexafluoruro de azufre (SF₆)

Cuyas fuentes principales son:

- Dióxido de carbono (CO₂)
 - ✓ Combustibles fósiles, deforestación, cemento
- Metano (CH₄)
 - ✓ Rellenos sanitarios, fermentación entérica, arroz, combustibles fósiles
- Óxido nitroso (N₂O)
 - ✓ Combustibles fósiles, fertilizantes, fibras sintéticas, estiércol

- Hidrofluorocarbonos (HFC)
 - ✓ Gases refrigerantes, fundición de aluminio, productos semiconductores
- Perfluorocarbonos (PFC)
 - ✓ Producción de aluminio, productos semiconductores
- Hexafluoruro de azufre (SF₆)
 - ✓ Transmisión y distribución de electricidad, disyuntores, producción de magnesio.

La huella de carbono se mide en toneladas equivalentes de dióxido de carbono (tCO₂e), y a su vez, el CO₂e resulta de la multiplicación de las emisiones de cada uno de los seis gases de efecto invernadero por su potencial de calentamiento global al cabo de 100 años.[18]

El presente proyecto abordará la medición de la huella de carbono desde el punto de vista logístico, cuantificando las emisiones de los buques PSV necesarios para el transporte, instalación y mantenimiento del sistema de energía undimotriz.

3.2.4. Análisis de costos y desempeño financiero

- Capex, *capital expenditure*, inversiones en bienes de capital o gastos en capital, son inversiones en capital destinadas a crear beneficios, usualmente ejecutadas cuando una empresa adquiere activos fijos o realiza algún proyecto que involucre activos fijos para agregar valor a los mismos, siempre con una vida útil mayor a un año; por ello, el costo debe ser capitalizado, donde los costos correspondientes se amortizan o deprecian a lo largo de la vida útil del activo en el cual se invierte.
- Opex, conocido como *operational expenditures*, o gastos operacionales, corresponde a un costo permanente para el funcionamiento de un producto, negocio o sistema.

Tanto Capex como Opex constituyen un aspecto clave a analizar en este proyecto, debido a que varias alternativas tradicionales de suministro energético a plataformas semisumergibles, y alternativas modernas, incluyen estos valores en sus comparaciones, principalmente para describir qué tan competitivas son respecto a las demás en cuanto a reducción de la inversión inicial y eficiencia en gastos operacionales para determinados niveles de suministro energético.

- Indicadores de desempeño financiero

Un indicador financiero es una operación matemática entre dos cantidades tomadas de los estados financieros, bien sea balance general y estado de resultados, y otros informes y datos complementarios. Su propósito es brindar datos para analizar la situación de las finanzas de una empresa, o también para ser usados como indicadores de gestión.[19, p. 121]

Según Diego Baena Toro, los indicadores financieros se pueden clasificar en cinco grupos:

- Liquidez (capacidad de afrontar nuevos compromisos)
- Endeudamiento (oportunidades de financiación)
- Actividad, eficiencia, o rotación (capacidad de controlar la inversión)
- Rentabilidad (grado de generación de utilidades)
- Mercado (sistema de valor agregado) o de valor

Dentro de cada grupo se plantea una serie de indicadores orientados a describir el comportamiento de la empresa en determinados aspectos, teniendo siempre la precisión de que un indicador debe interpretarse acompañado, bien sea por otros indicadores del mismo grupo, o además por series de indicadores de otros grupos.

Para efectos del presente proyecto, se propone el uso de indicadores referentes a liquidez, endeudamiento, actividad, y rentabilidad, además de los bien conocidos índices de evaluación de proyectos de inversión, como lo son el valor presente neto (VPN), tasa interna de retorno (TIR), periodo de recuperación (Payback), relación beneficio costo (R b/c), entre otros.

3.2.5. Energía undimotriz

La energía undimotriz hace parte del grupo de fuentes energías renovables marinas, acompañada de la energía mareomotriz, generada por las mareas; la termomotriz o térmica oceánica; el gradiente salino y las corrientes marinas, como lo menciona Hernández Mendible.

Por su parte, la energía undimotriz se refiere a la energía contenida en las olas, la cual puede ser convertida a energía mecánica mediante sistemas de aprovechamiento de la energía undimotriz, que posteriormente la transforman en energía eléctrica.

Como se menciona en el capítulo de antecedentes, gran parte del potencial de la energía undimotriz está dado por su concentración de energía por unidad de superficie (W/m^2) que toma valores entre 2000 y 3000 W/m^2 en función de las condiciones climáticas. Esto contrasta con la concentración de energía por unidad de superficie de otras energías renovables de uso más extendido, como la solar fotovoltaica y la eólica, con resultados de 200 y 400 a 600 W/m^2 respectivamente. [7]

Se ha desarrollado una serie de sistemas para el aprovechamiento de esta energía mediante la conversión a energía eléctrica. A continuación, se realiza una breve revisión de los sistemas más significativos para la investigación.

3.2.6. *Sistemas de levantamiento artificial*

Los datos que se emplearán corresponden a un pozo con una profundidad mayor a 2.000 ft, por lo que los sistemas más eficientes en costo para tal profundidad son:

- Bombeo electrosumergible
- Gas Lift

3.3. Marco histórico

La energía undimotriz ha presentado algunos avances considerables en materia de tecnología en los últimos veinte años, siendo protagonistas países como Portugal, Noruega, Reino Unido, España y Dinamarca, como principales desarrolladores de equipos de aprovechamiento de la energía undimotriz.

En el año 2004, el dispositivo Pelamis entró en funcionamiento en la costa de Portugal; un dispositivo en forma de serpiente compuesta por segmentos articulados entre sí. El movimiento de las olas provoca ondulaciones en el mecanismo, lo que mueve las articulaciones que poseen un mecanismo de pistón que inyecta aceite a presión a una turbina acoplada a un generador eléctrico. Su potencial de generación se calculó en 750 kW.

Posteriormente, Ocean Power Technology instaló un prototipo nuevo en las costas de Hawaii, en el año 2009. El dispositivo consiste en una mono boya anclada al lecho marino. El principio de operación de este dispositivo es similar al dispositivo Pelamis, pues entre la boya y la columna que la ancla al lecho marino, hay un sistema de pistón que inyecta aceite a presión a una turbina acoplada a un generador eléctrico.

En Dinamarca, en el año 2010 se instaló un prototipo de pruebas, el equipo undimotriz consiste en una estructura de cuatro columnas con desplazamiento vertical para protección del equipo ante imprevistos climáticos como tormentas y aumentos repentinos de la marea. Por lo demás, tiene bastantes similitudes frente a los demás mecanismos, pues se acciona un sistema de aceite hidráulico que es dirigido a una turbina acoplada a un generador eléctrico.

Para el año 2014, se instaló un prototipo de boya con un brazo que acciona un sistema hidráulico de pistones; este sistema emplea agua dulce en un circuito cerrado, que alimenta una turbina Pelton anclada a un generador eléctrico.[20]

Ahora bien, respecto a los costos, varios autores han tomado como referencia el costo nivelado de energía (LCOE) dando cuenta de la factibilidad de proyectos de energía undimotriz en función de su ubicación y tamaño. Por ejemplo, en Chile se ha realizado un estudio sobre el tema, estableciendo diversos escenarios, tamaños de proyecto, dispositivos y ubicaciones, dando como resultado los siguientes valores:

Para proyectos de demostración (1 unidad), el costo nivelado de energía oscila entre 220 y 1400 USD\$/MWh.

Para proyectos de mediana escala (10 unidades (3-4MW)) oscila entre 124 y 884 USD\$/MWh

Y, para proyectos de gran escala (100 unidades(30-40MW) oscila entre 70 y 710 USD\$/MWh. [21, p. 14]

Respecto a la integración de la energía undimotriz en la industria de los hidrocarburos, recientemente se ha dado a conocer un proyecto de la petrolera noruega Lundin Energy en colaboración con Ocean Harvesting Technologies, que inicialmente constituye un

estudio sobre cómo la instalación de convertidores de energía de las olas podría proporcionar electricidad limpia, estable y rentable a una plataforma de petróleo y gas en alta mar.

El propósito de Lundin Energy Norway es descarbonizar las actividades de extracción y producción, buscando ser una de las primeras compañías de petróleo y gas en lograr la neutralidad de carbono a partir de 2025.[22]

3.4. Marco normativo

Se crea la Ley 1715 de 2014, "Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional.", que busca, además, promover la gestión eficiente de la energía, que comprende tanto la eficiencia energética como la respuesta de la demanda.

En Brasil la institución actualmente vigente, encargada de las regulaciones legales de producción de energía eléctrica es la ANEEL (Brazilian Electricity Regulatory Agency), agencia que categoriza las regulaciones en tres formas: Regulación técnica de patrones de servicio (G, T, D, C), regulación económica (Tarifas y mercado) y regulación de los proyectos de investigación, desarrollo y eficiencia energética. La compra y distribución de energía se adjudican por medio de subastas, luego de obtener las licencias ambientales correspondientes. Las subastas se dividen según la naturaleza del proyecto, A-5 (Proyectos hidroeléctricos con plazo de entrega de 5 años), A-3 (Proyectos hidroeléctricos con plazo de entrega de 3 años), A-4 o energía de reserva (Proyectos sin periodicidad definida y se usan para generación a partir de fuentes alternativas) y las líneas de transmisión o subestaciones (Se realizan licitaciones cada seis meses con contratos de 30 años).

El sistema eléctrico brasileño (SEB) con el fin de garantizar el suministro y sostenibilidad de la distribución eléctrica nacional realiza reformas legales que fueron plasmadas en la ley 10.847 del 14 de marzo de 2004 por la cual se autoriza la creación de la EPE (Empresa de pesquisa energética) vinculada con el ministerio de minas y energía, con el objetivo de promover y estudiar un planeamiento energético de mayor eficiencia. La ley 10.848 del 14 de marzo de 2004 en la que se estructura el sector eléctrico brasileño (Política, regulación y supervisión fiscal, mercado y agentes

institucionales). El decreto número 5163 del 30 de julio de 2004 que reglamenta la comercialización de energía eléctrica, proceso por el cual se otorgan las concesiones y la producción de energía eléctrica.

4. DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA ÓPTIMA DE OPERACIÓN

4.1. Selección de la bomba electro sumergible

Para realizar la selección de la bomba electrosumergible se usaron los datos base proporcionados del pozo c en producción offshore donde se implementa una plataforma semisumergible en Brasil con una lámina de agua aproximada de 200 m, con los cuales se realiza un análisis previo adecuado para así llegar a resultados funcionales y aptos para las condiciones de reservorio, estado mecánico y producción actual del pozo.

Tabla 3.

Propiedades del caso de estudio.

Properties of the case studies.

Characteristics	Pozo c
Number of wells	1
Production oil flow (Bbl/day)	300
Well depth (ft)	7000
Casing diameter (OD)	7
Temperature (°F)	152
Reservoir Pressure (psi)	2800
Bubble point pressure (psi)	1700
Completion type	Simple
Recovery method	Primary
Basic Sediment and Water (%)	15
Presence of corrosive fluids	No
Abrasive sand content (ppm)	No
GOR (scf/stb)	250

Nota. *En esta tabla se presentan los datos de propiedades del pozo junto con las características del yacimiento.*

La tabla 3 presenta datos de importancia y de gran relevancia para la investigación del caso 3 el cual va a ser tomado como referencia. De dicha información se destacan las

presiones, de esta manera se comprueba que la producción del pozo está dada en estado monofásico ($p_{wf} > p_b$), la profundidad del pozo es de 7000 ft con un diámetro de casing de 7 pulg con un completamiento simple y producción de 300 barriles por día (Bbl/D).

Tabla 4.

Fluido de producción.

Specific gravity, oil density and density of the mixture

Properties	Pozo c
API	18
GE	0.95
Oil density (lbs/gal)	7.88
Mixture density	7.88

Nota. Se exponen las propiedades del fluido de producción

Tabla 5.

Condiciones de producción.

Productivity index and Pwf.

Characteristics	Pozo c
Ko (mD)	100
h (ft)	220
Bo	1.21
u (cp)	21.46
re (ft)	744.73
rw (ft)	0.42
S	0
Porosity (%)	11
J	0.89
Pwf (psi)	2463.16

Nota. Propiedades del reservorio.

La tabla 4 y 5 se conceden valores que pueden indicar la eficiencia de la producción, tomando en cuenta el API del crudo (18) que lo clasifica como crudo pesado, el factor volumétrico (1.21 bbl/STB) y datos exclusivos del reservorio tales como la permeabilidad, espesor de arena productora, porosidad y presión de fondo inicial del yacimiento.

Tomando en cuenta la información del pozo se implementaron los nueve (9) pasos de Baker Hughes [27], de esta manera iniciando con el punto óptimo de operación del pozo por medio de análisis nodal realizando la curva IPR y VLP. Teniendo en cuenta las condiciones de reservorio se usa el método de Vogel para fluidos en producción monofásica, ya que, la presión de fondo fluyente del yacimiento en producción es superior al punto de burbuja.

Tabla 6.

Curva VLP.

VLP	
qo (BPD)	Pwf* (psi)
800	1800
1000	1840
1500	1880
2000	1920
3000	2080

Nota. Resultados graficados para la curva VLP.

Tabla 7.

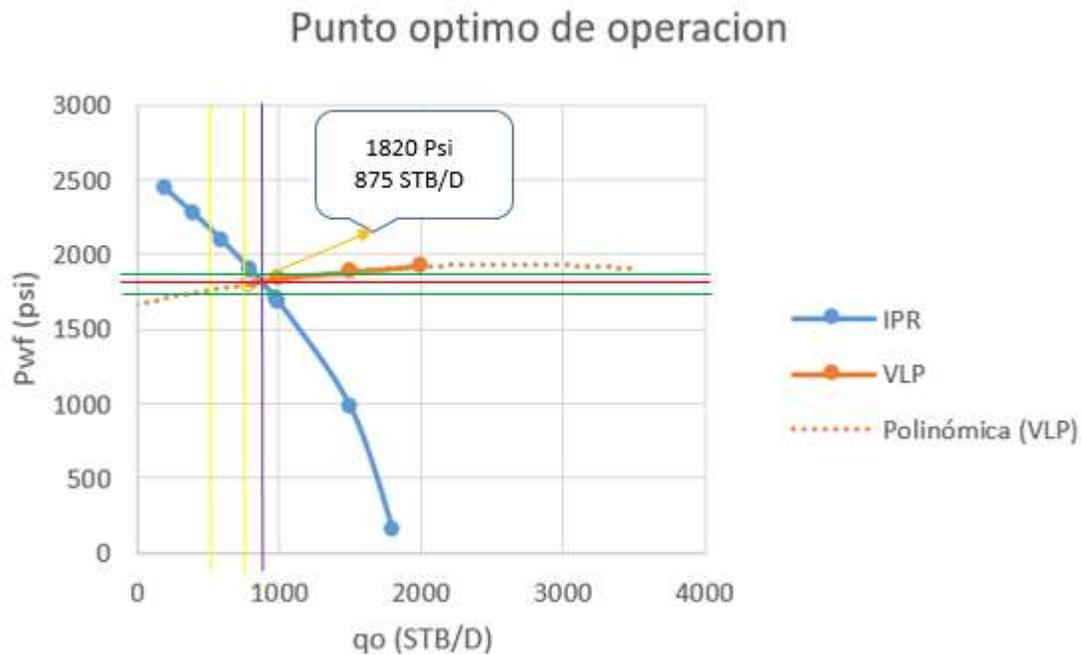
Curva IPR.

IPR	
qo (STB/D)	Pwf (psi)
200	2434.42543
400	2266.86933
600	2087.13698
800	1892.11119
979,693623	1700
1000	1677.06245
1500	980.433883
1800	154.485354

Nota. Resultados graficados para la curva IPR.

Figura 4.

Punto optimo de operacion.



Nota. Grafica obtenida del punto óptimo de operación.

Para la realización de la figura 4 es necesario tener en cuenta todos los datos del pozo, ya que se realiza un análisis de producción global del pozo y se evalúa el punto de producción con mayor rentabilidad según el estado mecánico del pozo y la capacidad del yacimiento sin llegar a afectar la operación o la integridad de la locación. Posteriormente se realizan los cálculos necesarios para los valores de la curva IPR (Tabla 7) en donde se aplica análisis nodal y el método de Vogel para el caso correspondiente. Para los datos de la VLP (Tabla 6) se utilizan las gráficas de gradientes de presión, en donde se ubican los diámetros de la tubería de producción y se realizan las lecturas respectivas de presión de fondo y cabeza de pozo según corresponda a la profundidad (7000ft).

Teniendo en cuenta el punto óptimo de operación junto con los datos iniciales del pozo se realiza la búsqueda y selección de la bomba, usando como valores prioritarios el caudal y la presión de producción. Para esta selección se usan los catálogos de Novomet y tomando los valores de ingeniería como referencia se elige la bomba NF (900-1300) H pump a una frecuencia de 60 Hz.

Realizando los cálculos y lectura grafica pertinente se definen las etapas de bombeo necesarias para la producción obteniendo como resultado una bomba funcional y eficiente para el pozo en el que se va a implementar, dando como resultado 183 etapas de la bomba las cuales serán sobre dimensionadas en un 5% para asegurar la producción junto con la integridad y rango de operación, de esta manera, obteniendo un total de 193 etapas, adicionalmente dicha bomba está diseñada para operar con un motor clamp 338...449 series 5 ton para lograr el objetivo de producción asegurando un rango de eficiencia financieramente mucho más rentable.

Tabla 8.

Datos operativos de la bomba.

ENGINEERING DATA NF(900-1300)H, 60 HZ

Maximal ESP System OD (incl. MLE AWG#5, 4kV)	4.70 in	119.3 mm	Rotational Direction		CW	
Housing Diameter	3.62 in	92 mm	Shaft Power Limit	Standard (S13)	105 hp	78 kW
Recommended Operating Range	604-1359 bpd	96-216 m ³ /day		High Strength (S14)	121 hp	90 kW
Shaft Diameter	0.55 in	14 mm		Ultra High Strength (S16)	137 hp	102 kW
Shaft Cross Sectional Area	0.24 in ²	154 mm ²	Max Housing Burst Pressure Limit		6000 psi	414 bar

Nota. Límites operativos de la bomba. Tomado de: D. Stop, “Product Catalog Product Catalog,” Measurement, no. September, pp. 36–39, 2013.

Tabla 9.

Accesorios de la bomba.

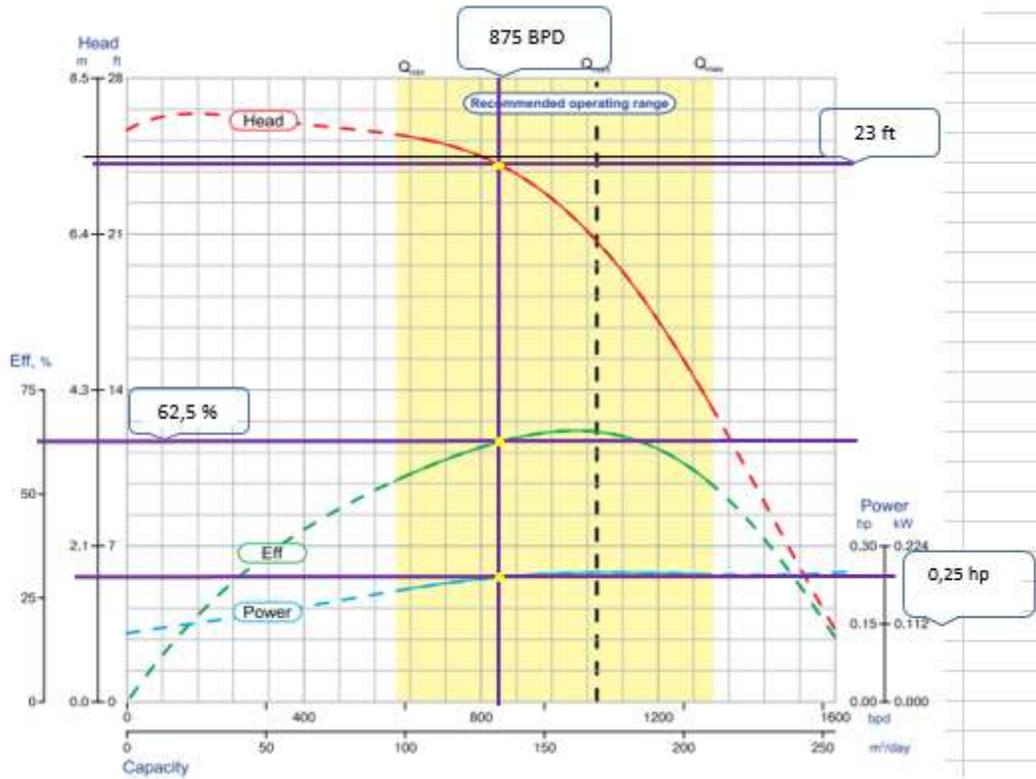
PUMP ACCESSORIES

Description	Length		Weight		Part Number
	ft	m	lb	kg	
BOH 2-7/8"-6RD EJE-362SERIES CR0	0.68901	0.21	10.143	4.6	2013070049
SPLINE COUPLING 0.55"-0.55" CMP (FOR CMP PUMPS)	0.31	0.09	0.5	0.2	2024010381
999.350.0020 _INSTALLATION PARTS KIT. CR0	-	-	-	-	2138030003
PUMP/MOTOR CLAMP 338..449SERIES 5TON	-	-	29.8	13.5	3020010007

Nota. Accesorios para la instalación de la bomba. Tomado de: D. Stop, “Product Catalog Product Catalog,” Measurement, no. September, pp. 36–39, 2013.

Figura 5.

Grafica de la bomba.



Nota. Rangos de eficiencia para la operatividad de la bomba. Tomado de: D. Stop, "Product Catalog Product Catalog," *Measurement*, no. September, pp. 36–39, 2013.

Tabla 10.*Resultados operativos de la bomba.*

qo (STB/D)	875
H etapa (ft de agua/etapa)	23
API	18
GE	0.94648829
H etapa (ft de hidrocarburo/etapa)	24.3003534
Pwf (psi)	1820
H de la columna de hidrocarburo (ft)	4440.87189
Numero de etapas calculado	182.749272
Numero de etapas de la bomba	183
Porcentaje de sobre dimensión	5%
Numero de etapas totales sobre dimensionadas en la operación	193
Eficiencia (%)	62.5
Potencia por etapa (hp)	0.25
Potencia de la bomba para el qo (hp)	45.75
Potencia por etapa (Kw)	0.19
Potencia de la bomba para el qo (Kw)	34.77

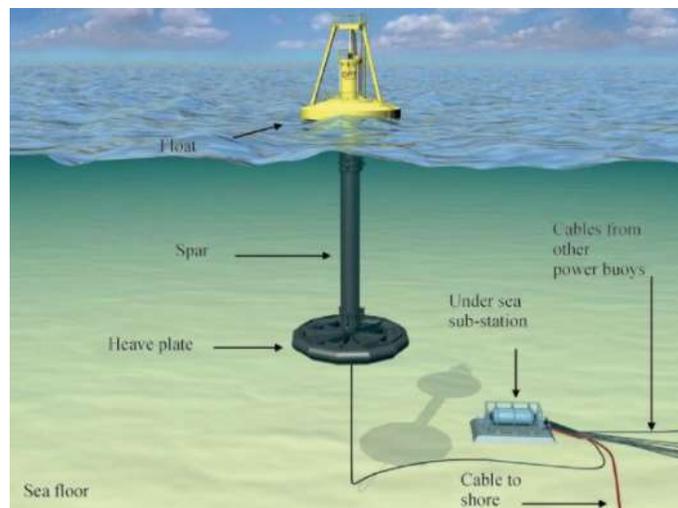
Nota. *Parámetros de operatividad de la bomba para el pozo.*

5. ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DEL SISTEMA UNDIMOTRIZ

La energía proporcionada al sistema de levantamiento artificial es tomada de un mecanismo de energías renovables basándose en el principio de la energía undimotriz, para lo cual, se implementan boyas de volumen variable o también llamadas convertidores de energía de boyas oscilantes que producen energía eléctrica por medio de un sistema de flujo hidráulico por cada oscilación realizada, de esta manera provocando el movimiento de turbinas hidráulicas generando energía eléctrica, cada uno de los dispositivos o boyas instalados cuentan con características como con un diámetro aproximado de 20 metros, peso estructural de 681 kg, son de tipo flotante estática, con anclajes a fondo marino, fabricada en acero A36.

Figura 6.

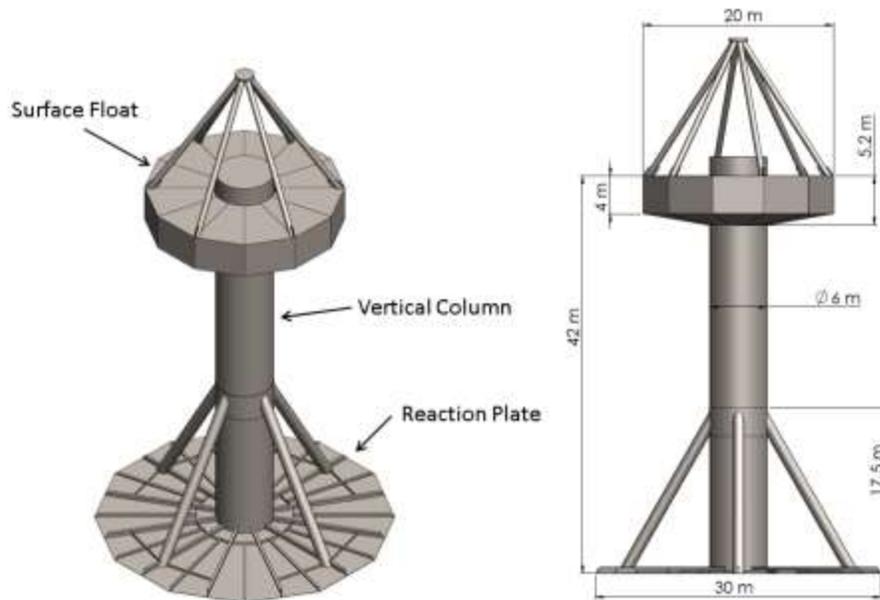
Dispositivo.



Nota. *Boya de volumen variable. Tomado de: C. Gustavo, G. Bustos, Á. Alejandro, and V. Musalem, "Diseño Y Arreglo De Boyas," 2017.*

Figura 7.

Partes del dispositivo.



Nota. Dispositivo RM3 Wave point absorber. Tomado de: V. S. Neary et al., "Methodology for Design and Economic Analysis of Marine Energy Conversion (MEC) Technologies," Sandia Natl. Lab., no. March, p. 261, 2014.

El motor clamp 338...449 series 5 ton utilizado para la operatividad de la bomba NF (900-1300) H pump de la empresa Novomet se va a poner en funcionamiento con 120 hp (Caballos de fuerza), de esta manera generando la potencia suficiente para el funcionamiento del sistema de levantamiento artificial. Adicionalmente dicho motor tendrá un consumo eléctrico de 75.42 Kw, teniendo en cuenta una eficiencia del motor del 75% los cuales serán proporcionados por el sistema de producción de energía alternativa.

Tabla 11.

Funcionamiento de la bomba.

BOMBA			Datos de placa motor				Datos de operación	
Carcasa	Etapas totales	Modelo	cantidad	hp	voltaje	amperios	Hz	Amperios
4	183	NF(900-1300)H	1	120	810	25.4	60	13.26

Nota. *Parámetros operativos del motor para el pozo.*

Tabla 12.

Consumo electrico.

Voltaje en watts	75426
Voltaje en Kw	75.42

Nota. *Requerimiento eléctrico para el funcionamiento del motor.*

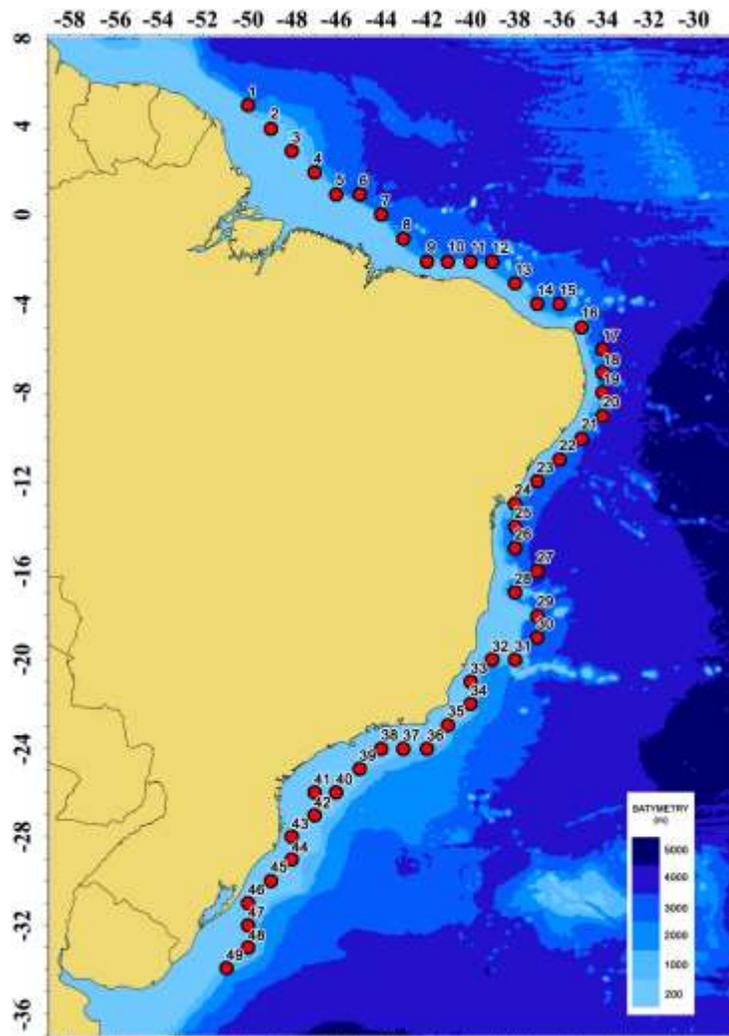
Para dar inicio a la simulación de SAM es necesario tener en cuenta la ubicación de la zona de interés, ya que de este factor depende la dinámica marina y por ende la energía de las olas. En la base de datos actual disponible en el software para la energía undimotriz se encuentran exclusivamente ubicaciones en distintas costas de estados unidos en el océano pacífico y en el Océano Atlántico.

Tales ubicaciones son completamente dependientes de las matrices probabilísticas generadas por NREL para poder obtener los resultados más cercanos a la realidad, las matrices probabilísticas no permiten modificar los datos de la energía del oleaje, ya que al funcionar con bases de datos específicas y matrices probabilísticas predeterminadas se generan errores junto con las modificaciones, por lo tanto, no es posible generar una simulación con datos o tendencia obtenidas de las costas y cuencas Brasileñas en donde se encuentra en campo de estudio (Pozo c).

Para obtener los resultados de la simulación y poder llegar a valores cercanos a la realidad de la aplicación del proyecto se correlaciona el comportamiento de la dinámica marina en Brasil expuesto en el artículo publicado en la revista Plos one llamado “Wave energy resource of Brazil: An analysis from 35 years of ERA-Interim reanalysis data” en donde por medio de cálculos matemáticos y la información de la zona con la metodología expuesta en el documento logran llegar a las matrices de probabilidad que representan la energía oceánica a lo largo de la costa de Brasil en donde se abarcan varias cuencas de explotación petrolera en el offshore de dicho país.

Figura 8.

Costa de Brasil.



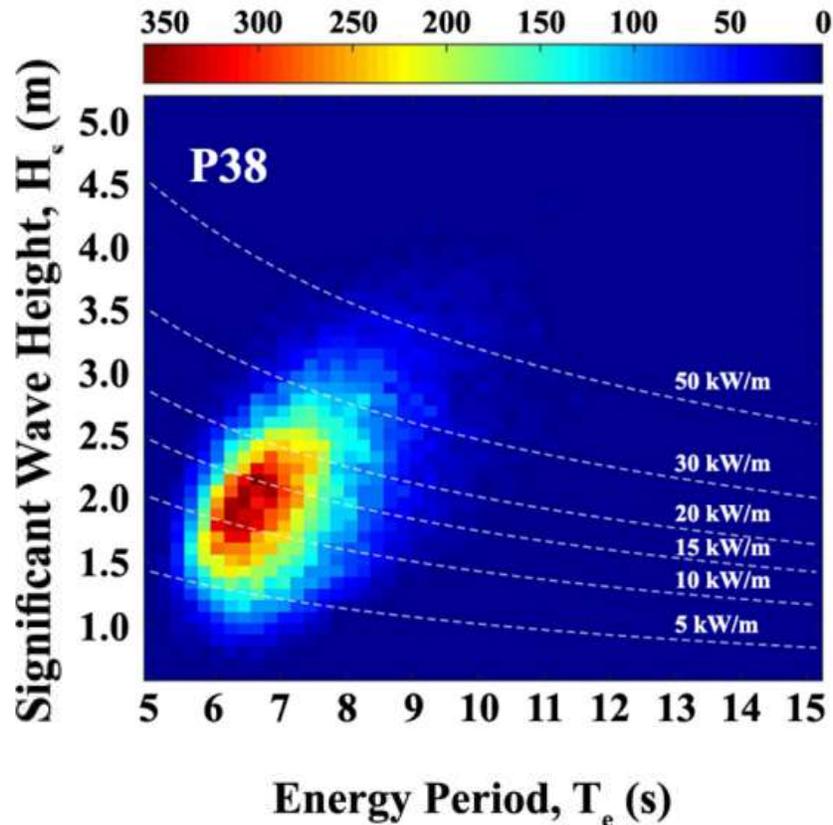
Nota. Mapa de ubicación de los puntos de estudio. Tomado de: V. S. Neary et al., “Methodology for Design and Economic Analysis of Marine Energy Conversion (MEC) Technologies,” Sandia Natl. Lab., no. March, p. 261, 2014.

En la figura 8 se representan y se enumeran los puntos de estudio en donde fueron tomados los datos base para llegar a las matrices finales de simulación para la costa de Brasil. Para el presente proyecto de investigación se usó el pozo c, el cual corresponde a una ubicación aproximada al punto de estudio número 38 ilustrado en la imagen 3, en donde se tiene en operación de producción una plataforma semisumergible con una

lámina de agua aproximada de 200 metros y una distancia intermedia a la costa con respecto a los otros puntos estudiados.

Figura 9.

Punto de estudio P38.



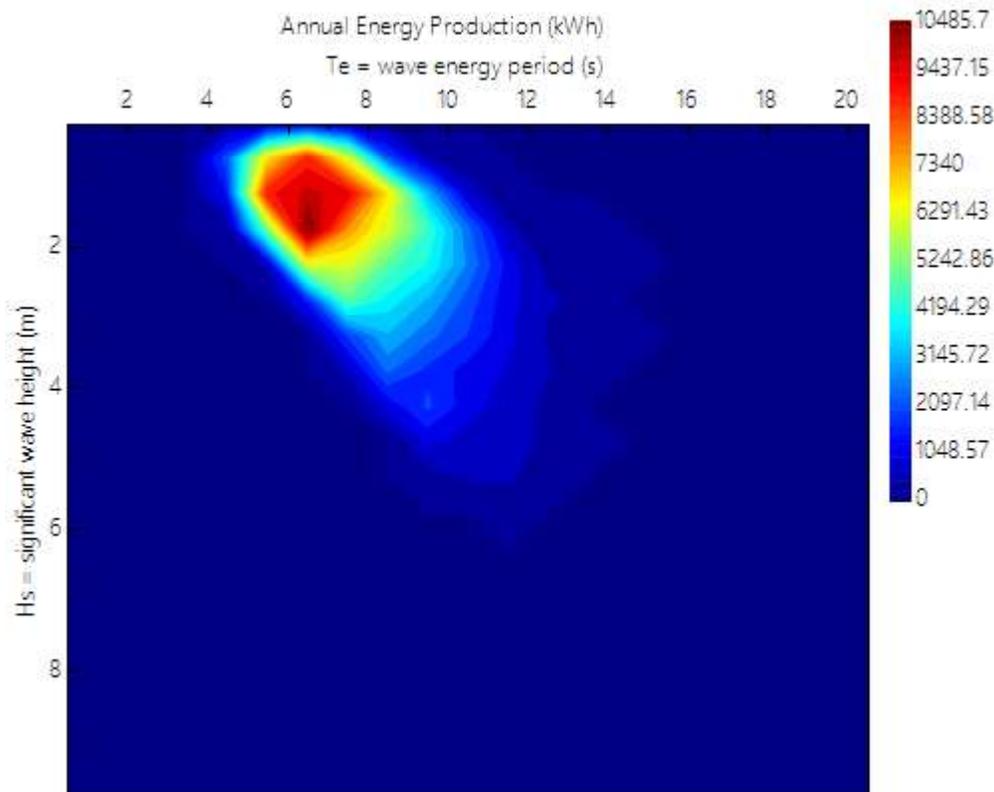
Nota. *Energía de las olas en P38. Tomado de: V. S. Neary et al., “Methodology for Design and Economic Analysis of Marine Energy Conversion (MEC) Technologies,” Sandia Natl. Lab., no. March, p. 261, 2014.*

La figura 9 representa la energía del oleaje en la zona de estudio p38, la cual corresponde a la ubicación aproximada del campo c. Observando la tendencia del comportamiento en la gráfica de calor (figura 9) se realiza la búsqueda en la base de datos del software SAM una ubicación predeterminada que tenga una tendencia similar a la de p38, para así llegar a los resultados más óptimos y con menor grado de incertidumbre posible. La ubicación predeterminada del software que fue seleccionada para la simulación corresponde a Jennette’s Pier en la ciudad de Nags Head en el estado de Carolina del

Norte en Estados Unidos, en dicha ubicación se tiene una tendencia muy similar a la de p38 (figura 9) que puede ser observada en la figura 10, para observar la tendencia y comportamiento correctamente es necesario rotar los ejes en la misma posición de la figura 9, en este punto se podrá divisar correctamente la similitud de las dos graficas (figura 9 y figura 10).

Figura 10.

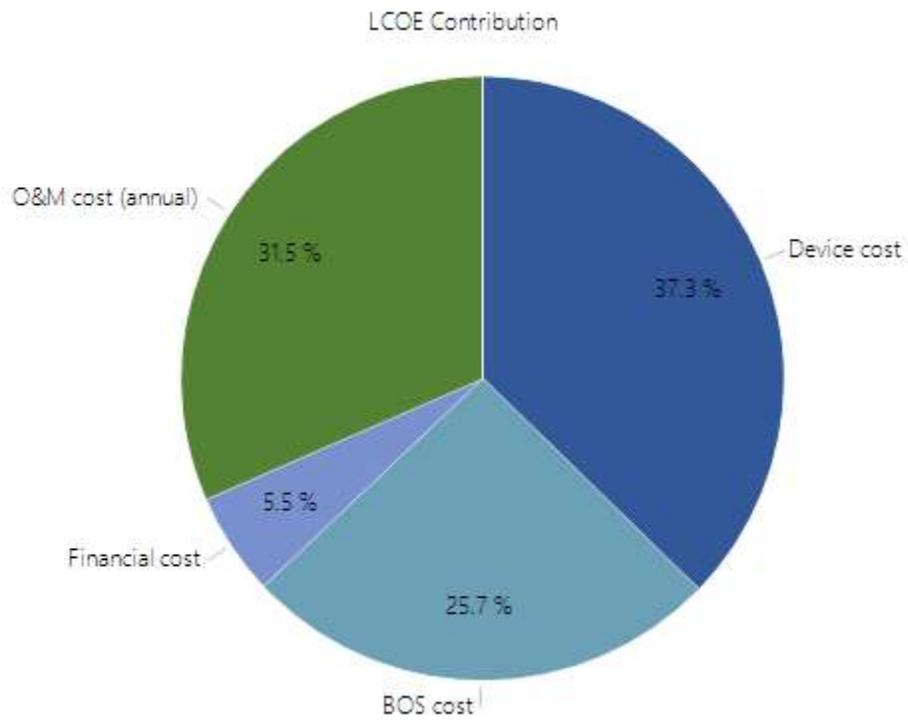
Zona de interes.



Nota. *Actividad del oleaje para la zona de interés. Tomado de: Software SAM.*

Figura 11.

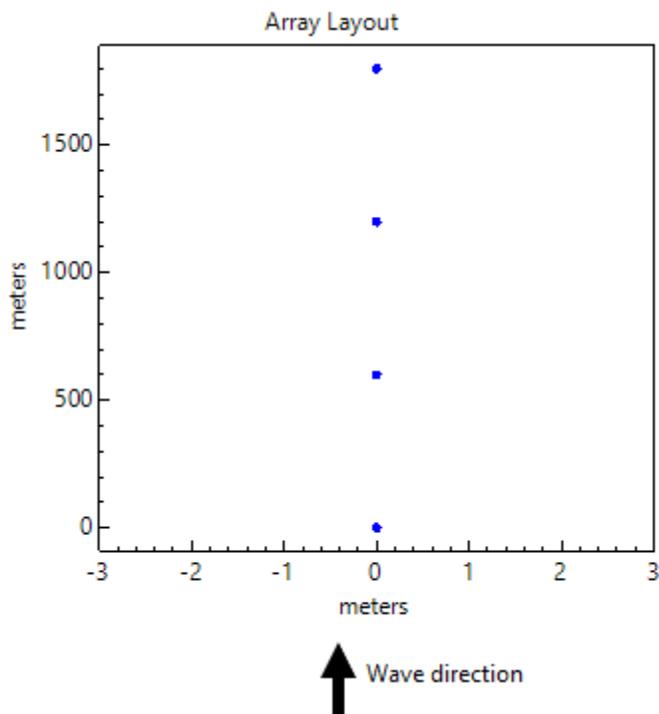
Costos.



Nota. Distribución del análisis financiero. Tomado de: Software SAM.

Figura 12.

Diseño.



Nota. Arreglo de boyas. Tomado de: Software SAM.

En la ubicación planteada se realiza la simulación en el software para cuatro (4) dispositivos, es decir para 4 boyas de volumen variable, las cuales son representadas en la figura 12. Los resultados del funcionamiento de ese dispositivo es representado en la tabla 13, en donde se evidencia que la capacidad de producción máxima del sistema es de 1144 Kw de los cuales se produce un promedio real de 20 Kw por dispositivo, es decir, en total se producen 80 Kw tomando en cuenta los 4 dispositivos con un factor de capacidad del 6% y con un costo nivelado de energía de 671.10 ¢/Kwh. Adicionalmente en la tabla 14 se representan los costos de inversión y mantenimiento para la aplicación e instalación del dispositivo.

Tabla 13.

Simulación.

Metric	Value
Annual energy production	645,539 kWh
Average power per device	20 kW
System capacity	1,144 kW
Capacity factor	6 %
Levelized cost of energy	671.10¢/kWh

Nota. Resultados de la simulación para la energía undimotriz. Tomado de: Software SAM.

Tabla 14.

Costos de inversión.

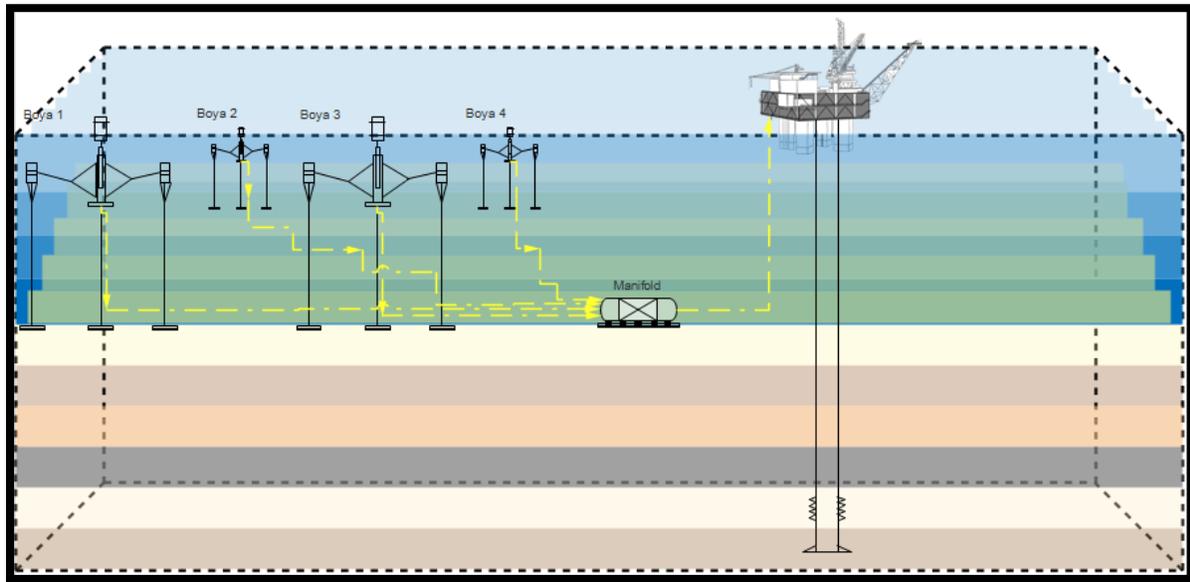
Costs	\$ million	\$/kW	LCOE
Capital cost	27.46 \$mill	24,005 \$/kW	4.59 \$/kWh
- Device cost	14.95 \$mill	13,072 \$/kW	2.50 \$/kWh
- Balance of system cost	10.30 \$mill	8,999 \$/kW	1.72 \$/kWh
- Financial cost	2.21 \$mill	1,934 \$/kW	0.37 \$/kWh
O&M cost	1.37 \$mill/yr	1,194 \$/kW/yr	2.12 \$/kWh

Nota. Costos de inversión. Tomado de: Software SAM.

6. VALIDACIÓN DEL SUMINITRO DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ

Figura 13.

Ilustración.

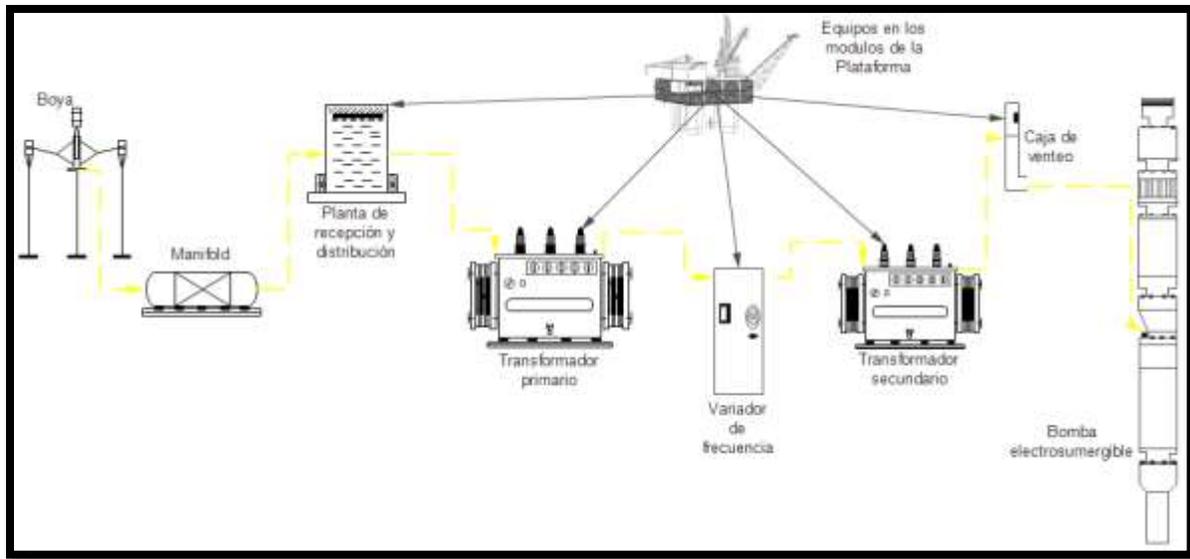


Nota. Esquema ilustrativo del proyecto.

En la figura 13 se representa el diseño esquemático de la instalación y puesta en operación de la energía undimotriz, en este caso usándola de mecanismo de producción eléctrica principal para el funcionamiento de una bomba electrosumergible en la plataforma offshore, es realizada en perspectiva por medio de un cubo en donde se realiza un corte transversal de la sección correspondiente a la zona de interés circundante al pozo c.

Figura 14.

Diagrama de procesos.



Nota. *Diagrama de procesos para la operación de la bomba.*

La figura 14 corresponde al diagrama de procesos en donde se representan los equipos y conexiones necesarias para llevar paso a paso y de forma adecuada la energía eléctrica producida, tomando en cuenta que es generada de forma limpia y amigable con el medio ambiente desde su punto de origen en las boyas de volumen variable o convertidores de energía de las olas hasta el objetivo final que es el sistema de levantamiento artificial, en este caso la bomba electrosumergible implementada.

Teniendo en cuenta la dinámica marina de la ubicación del pozo C, los periodos de energía de las olas y la altura del oleaje se van a instalar el total de 1 boya que en total van a producir 645.539 Kwh con un costo nivelado de energía de 671.10 ¢/Kwh, anclado a un transformador trifásico. De esta manera se puede validar que la oferta de producción eléctrica proporcionada por la energía undimotriz cumple con la demanda de electricidad para el correcto funcionamiento de la bomba electrosumergible como sistema de levantamiento artificial para el pozo C y es aplicable desde el punto de vista de la operatividad.

7. COMPARACIÓN AMBIENTAL Y FINANCIERA

7.1. Análisis ambiental del sistema undimotriz

Para el análisis ambiental del sistema undimotriz, se empleó la matriz Conesa Fernández simplificada, un método semi-cuantitativo que permite evaluar los impactos ambientales (tanto positivos como negativos) de un proyecto en función de sus etapas, las acciones comprendidas en dichas etapas, el medio en que se manifiesta el impacto y una serie de características que califican el impacto de acuerdo con distintos niveles de afectación. [24]

Una de las ventajas que ofrece el método simplificado de Conesa Fernández, es que el análisis de impactos ambientales se ajusta puntualmente a las características del proyecto a analizar; es decir, para cada proyecto se deben definir una serie de parámetros relativos a sus etapas, medios y acciones.

Con ese propósito, a continuación se enlistan las fases del proyecto y sus acciones correspondientes.

7.1.1. Etapas del proyecto:

Etapa de construcción:

- Preparación de la zona
- Emplazamiento de los anclajes
- Transporte del sistema undimotriz
- Instalación del sistema undimotriz
- Adecuación de la infraestructura eléctrica

Etapa de operación:

- Operación del sistema
- Mantenimiento y servicios logísticos

A su vez, el modelo requiere una categorización de los medios en los que se puede manifestar un impacto ambiental del proyecto, los cuales se enlistan a continuación:

7.1.2. Factores susceptibles de impacto

- Medio físico: El impacto ambiental se manifiesta físicamente en el medio inerte, el medio biótico y el medio perceptual.
 - ✓ Medio inerte: Se toman en consideración el aire, que puede ser impactado por contaminación por material particulado y por emisión de gases, y el agua, que puede ser impactada por contaminación de diversos tipos y la accesibilidad de los servicios a la plataforma.
 - ✓ Medio biótico: Se toma en consideración la fauna, que puede ser impactada por alteración del ecosistema, tanto en la etapa de construcción como en la etapa de operación.
 - ✓ Medio perceptual: Se evalúa el factor paisaje, potencialmente impactado por la modificación del entorno y la vista.
- Medio Socio-económico y Cultural: El impacto ambiental se manifiesta en la infraestructura, el medio social, el medio económico y el medio cultural.
 - ✓ Medio infraestructura: Se toman en cuenta factores como la infraestructura eléctrica de la plataforma semisumergible, la cual debe ser modificada para su acople con el sistema de energía undimotriz, y el factor accesibilidad y tránsito, debido a la naturaleza invasiva del proyecto y las limitaciones transitorias que pueda acarrear en materia logística.
 - ✓ Medio social: Se toma en cuenta el factor población, y se evalúa mediante el impacto del proyecto en el empleo.
 - ✓ Medio económico: Toma en consideración las oportunidades de inversión que puede brindar el proyecto, por su carácter de innovación, de responsabilidad con el medio ambiente y el desarrollo sostenible. Se evalúa cualitativamente como las posibilidades de ser atractivo financieramente y de incentivar el desarrollo e implementación de energías renovables.

- ✓ Medio cultural: Considera los valores culturales y humanos, y se evalúa, en concordancia con la naturaleza del proyecto y los resultados de los factores ambientales previos, el carácter de compromiso con el medio ambiente, y su naturaleza y grado de innovación.

De esta manera, se procede con la construcción de la matriz resultante de impactos ambientales, que relaciona el medio, factor y subfactor ambiental en que se manifiesta el efecto, con las acciones correspondientes a las etapas del proyecto, como se muestra a continuación.

Tabla 15.

Matriz de impactos ambientales del proyecto

FACTORES \ ACTIVIDADES				ETAPA DE CONSTRUCCIÓN				ETAPA DE OPERACIÓN	
				Preparación de la zona	Emplazamiento de los	Transporte del sistema	Instalación del sistema	Adecuación de la infraestructura	Operación del sistema
Medio físico	Medio Inerte	Aire	Contaminación sonora						
			Emisión de gases						
	Agua	Contaminación							
		Accesibilidad servicios plataforma							
	Medio Biótico	Fauna	Alteración del ecosistema						
	Medio perceptual	Paisaje	Modificación entorno y vista						
Medio Socio-Social	Medio Social	Población	Empleo						

	Medio Económico	Oportunidades de inversión	Incentivo de energías renovables							
	Medio Cultural	Valores culturales y humanos	Compromiso con el ambiente							
			Innovación							

Nota. Matriz de consolidación de impactos ambientales del proyecto.

La anterior tabla, recopilará los datos obtenidos en cada interrelación, asignando una calificación al valor registrado de acuerdo con los siguientes rangos:

Tabla 16.

Intervalos de impacto ambiental.

Impacto Positivo Crítico	Impacto Negativo Crítico	> 75
Impacto Positivo Severo	Impacto Negativo Severo	50 - 75
Impacto Positivo Moderado	Impacto Negativo Moderado	25 - 50
Impacto Positivo Irrelevante	Impacto Negativo Irrelevante	< 25

Nota. Intervalos de clasificación de impactos ambientales. Tomado de: J. M. Jáuregui, "Evaluación del impacto ambiental potencial que podría producirse por la instalación y funcionamiento de un dispositivo electromecánico capaz de aprovechar la energía undimotriz en la escollera sur del puerto de Quequén," 2016, [Online]. Available: <http://ria.utn.edu.ar/handle/123456789/2781>.

Para proceder con el relacionamiento de los impactos ambientales, es importante tener en cuenta cada uno de los criterios propuestos en la metodología y la fórmula mediante la cual se calcula el impacto ambiental de una acción del proyecto en un sub-factor ambiental. A continuación se tabulan los criterios propios de la metodología:

Tabla 17.

Criterios de evaluación de impactos ambientales Metodología Conesa Fernández

NATURALEZA			
Impacto beneficioso +			
Impacto perjudicial -			
INTENSIDAD (IN)		EXTENSIÓN (EX)	
(Grado de destrucción)		(Área de influencia)	
Baja o mínima	1	Puntual	1
Media	2	Parcial	2
Alta	4	Amplio o extenso	4
Muy Alta	8	Total	8
Total	12	Crítico	(+4)
MOMENTO (MO)		PERSISTENCIA (PE)	
(Plazo de manifestación)		(Permanencia del efecto)	
Largo plazo	1	Fugaz o efímero	1
Medio plazo	2	Momentáneo	1
Corto plazo	3	Temporal o transitorio	2
Inmediato	4	Pertinaz o persistente	3
Crítico	(+4)	Permanente y constante	4
REVERSIBILIDAD (RV)		SINERGIA (SI)	
(Reconstrucción por medios naturales)		(Potenciación de la manifestación)	
Corto plazo	1	Sin sinergismo o simple	1
Medio plazo	2	Sinergismo moderado	2
Largo plazo	3	Muy sinérgico	4
Irreversible	4		
ACUMULACIÓN (AC)		EFECTO (EF)	
(Incremento progresivo)		(Relación causa-efecto)	

Simple	1	Indirecto o secundario	1
Acumulativo	4	Directo o primario	4
PERIODICIDAD (PR)		RECUPERABILIDAD (MC)	
(Regularidad de la manifestación)		(Reconstrucción por medios humanos)	
Irregular (aperiódico y esporádico)	1	Recuperable de manera inmediata	1
Periódico o de regularidad intermitente	2	Recuperable a corto plazo	2
		Recuperable a medio plazo	3
Continuo	4	Recuperable a largo plazo	4
		Mitigable, sustituible y compensable	4
		Irrecuperable	8
Importancia del impacto $I = \pm[3IN + 2EX + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + MC]$			

Nota. Criterios de evaluación de impactos ambientales Metodología Conesa

Fernández. Tomado de: J. M. Jáuregui, "Evaluación del impacto ambiental potencial que podría producirse por la instalación y funcionamiento de un dispositivo electromecánico capaz de aprovechar la energía undimotriz en la escollera sur del puerto de Quequén," 2016, [Online]. Available: <http://ria.utn.edu.ar/handle/123456789/2781>.

Naturaleza (+ ó -): Describe la condición de beneficioso o perjudicial del impacto ambiental sobre el factor ambiental. Impacto positivo: + Impacto negativo: -.

Intensidad (IN) (Grado de destrucción): Expresa el grado de destrucción que puede ocasionar la acción evaluada en el factor ambiental considerado.

Extensión (EX) (Área de influencia): Es el área de influencia del impacto en el entorno y factor ambiental en que se manifiesta.

Momento (MO) (Plazo de manifestación): Describe el plazo de manifestación del impacto, es decir, el tiempo entre el inicio de la acción y el inicio de efectos en el medio donde se manifiesta.

Persistencia (PE) (Permanencia del efecto): Es el tiempo teórico en el que el efecto permanecería en el medio o factor ambiental, contemplando la cualidad del medio o factor de retornar a las condiciones iniciales naturalmente.

Reversibilidad (RV) (Reconstrucción por medios naturales): Dada la condición de que el efecto cese su manifestación en el medio o factor ambiental, se describe la posibilidad del medio o factor de retornar a por sí mismo a las condiciones naturales previas a la manifestación del efecto.

Sinergia (SI) (Potenciación de la manifestación): Contempla el fortalecimiento de dos o más efectos simples. La manifestación de dos efectos simples en simultáneo puede tener más efecto en el ambiente, que manifestaciones no simultáneas e independientes.

Acumulación (AC) (Incremento progresivo): Describe la posibilidad de incremento progresivo de la manifestación del efecto cuando la acción se hace repetidamente, o con una persistencia considerable.

Efecto (EF) (Relación causa-efecto): Describe una relación de causa-efecto entre la consecuencia de una acción y la forma de manifestación del efecto en el medio o factor ambiental.

Periodicidad (PR) (Regularidad de la manifestación): Se refiere a la regularidad de la manifestación del efecto.

Recuperabilidad (MC): Da cuenta de la posibilidad de retorno a las condiciones iniciales del medio o factor afectado, sujeta a medidas correctoras o intervención humana. Es importante mencionar que la intervención humana en la recuperación ambiental puede impactar favorablemente la reversibilidad y esta, a su vez, reducir la persistencia del efecto.

Una vez definidas las etapas del proyecto con sus acciones correspondientes, el medio y los factores ambientales en que se manifestará el efecto, y teniendo en cuenta los

critérios definidos en la metodología, se procede a elaborar las matrices que permiten evaluar las interrelaciones de las acciones del proyecto en los distintos factores ambientales, como se muestra a continuación.

Tabla 18.

Matriz de interrelaciones agua - contaminación

Valor de importancia del impacto		Medio:	Inerte	Factor:	Agua	Subfactor:	Contaminación						
Criterios de evaluación		IN	EX	MO	PE	RV	SI	AC	E F	PR	MC	Importancia del impacto	
Acciones del proyecto													
ETAPAS	CONSTRUCCIÓN	Preparación de la zona	1	2	3	2	2	2	4	1	1	2	-24
		Emplazamiento de los anclajes	2	1	0	1	1	1	1	1	1	1	-15
		Transporte del sistema undimotriz	2	1	3	2	3	1	4	1	1	3	-26
		Instalación del sistema undimotriz	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	-15
		Adecuación de la infraestructura eléctrica											0
	OPERACIÓN	Operación del sistema											0
		Mantenimiento y servicios logísticos	1	1	2	2	3	1	1	1	2	2	-19

Nota. Matriz de interrelaciones.

Esta matriz corresponde a las interrelaciones del proyecto en el medio inerte, factor agua y subfactor contaminación del agua. En la columna “Importancia del impacto” se

registra el resultado de la fórmula que opera los puntajes obtenidos bajo los criterios ambientales que establece la metodología. Dichos resultados se consolidarán en la matriz principal (véase tabla X) para establecer el impacto ambiental del proyecto según la metodología de matriz simplificada de Conesa Fernández.

7.1.3. Puntuación de las interrelaciones

En este aparte del capítulo, se procede al diligenciamiento de las matrices de interrelaciones entre las acciones del proyecto y los factores ambientales definidos anteriormente, tomando como base la revisión de la literatura acerca del impacto ambiental de la energía undimotriz en distintos escenarios.

Para efectos de simplicidad, se opta por clasificar en anexos las tablas diligenciadas, mientras se brinda en el capítulo, el detalle de los estudios consultados y los resultados obtenidos al puntuar las interrelaciones.

- *Impacto aire – contaminación sonora*

Esta interrelación tiene en cuenta aquellas emisiones sonoras esperadas que podrán percibirse fuera del agua, como ruido de los motores de la maquinaria, acciones mecánicas de las distintas acciones del proyecto, como el ruido proveniente de la instalación del sistema undimotriz, ruido perceptible en la superficie generado por la operación continua de los dispositivos undimotrices, y la contaminación sonora esporádica a causa del mantenimiento del sistema undimotriz y los servicios logísticos asociados a este.

Tomando como referencia el nivel de ruido estimado por el oleaje (80 dB), se califica el impacto de las acciones del proyecto mediante la contaminación sonora manifestada en el medio aéreo, evidenciando un impacto negativo moderado en cada una de las etapas y acciones del proyecto, pues cada una de ellas empleará maquinaria especializada que genera una cantidad de ruido considerable, que puede rondar los 150 dB, lo que se traduce en un impacto negativo moderado. [24]

En cuanto a la operación del dispositivo, si bien, la intensidad de la contaminación sonora en la superficie puede ser considerablemente menor a la generada por buques de servicio y demás maquinaria especializada requerida por el proyecto, el sistema operará

continuamente durante largos periodos de tiempo, siendo interrumpido generalmente por condiciones climáticas adversas que comprometan la integridad de los dispositivos, o por mantenimientos programados. Opiniones de habitantes acerca de dispositivos ubicados en la costa, indican que se convierten en una molestia debido a la recurrencia y continuidad del ruido [24, p. 81].

En este sentido, la contaminación sonora provocada por la operación de los dispositivos toma relevancia, puntuando un valor de -35, para un impacto negativo moderado.

Sin embargo, debido al contexto del presente trabajo de investigación, es importante tomar en cuenta las actividades que rodean al sistema undimotriz, que operará junto a una plataforma semisumergible, donde la contaminación sonora puede ser mucho más alta, con recurrencia considerable, y el personal debe portar los elementos de protección personal, el impacto ambiental del sistema undimotriz en cuanto a contaminación sonora en la superficie, puede verse disminuido, e incluso, superado y camuflado por las operaciones de la plataforma semisumergible.

Tabla 19.

Matriz de interrelaciones contaminación sonora - aire.

Valor de importancia del impacto			Medio: Inerte Factor: Aire									Subfactor	Contaminación sonora
Criterios de evaluación			IN	EX	MO	P E	RV	SI	AC	E F	PR	MC	Importancia del impacto
Acciones del proyecto													
ETAPAS	CONSTRUCCIÓN	Preparación de la zona	1	2	4	2	1	2	1	4	1	2	-24
		Emplazamiento de los anclajes	2	2	4	2	1	2	1	1	1	1	-23
		Transporte del sistema undimotriz	2	2	4	2	1	2	1	4	1	2	-27
		Instalación del sistema undimotriz	1	2	4	2	2	2	4	4	1	2	-28
		Adecuación de la infraestructura eléctrica	1	2	4	2	2	2	4	1	1	2	-25
	OPERACIÓN	Operación del sistema	3	2	4	4	1	2	1	4	4	2	-35
		Mantenimiento y servicios logísticos	2	2	4	2	1	2	1	4	1	2	-27

Nota. Matriz de interrelaciones.

- *Impacto aire – emisión de gases*

Una segunda forma de manifestación del impacto ambiental por medio del factor aire, es la contaminación por emisión de gases producto del funcionamiento de motores de combustión interna, empleados en labores de preparación de la zona para el transporte del personal y maquinaria y equipo especializado; en el uso de maquinaria como piloteadoras flotantes y bases que las movilizan; y especialmente el transporte del sistema undimotriz y los servicios logísticos asociados a este.

Se presta especial atención al transporte del sistema undimotriz, el cual se haría por medio de un buque PSV (Platform Supply Vessel) y que tendría un impacto ambiental moderado en cuanto a emisión de gases.

Tabla 20.

Matriz de interrelaciones emisión de gases - aire

Valor de importancia del impacto			Medio: Inerte Factor: Aire									Subfactor	Emisión de gases
Criterios de evaluación			IN	EX	MO	PE	RV	SI	AC	EF	PR	MC	Importancia del impacto
Acciones del proyecto													
ETAPAS	CONSTRUCCIÓN	Preparación de la zona	1	2	2	1	3	1	4	1	1	3	-23
		Emplazamiento de los anclajes	1	2	2	2	3	1	2	2	1	3	-23
		Transporte del sistema undimotriz	2	4	2	2	3	1	3	1	1	3	-30
		Instalación del sistema undimotriz											0
		Adecuación de la infraestructura eléctrica											0
	OPERACIÓN	Operación del sistema											0
		Mantenimiento y servicios logísticos	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	-19

Nota. Matriz de interrelaciones emisión de gases vs aire.

- *Impacto agua – contaminación*

En el medio de manifestación agua, se evalúa la contaminación del recurso hídrico mediante material particulado, fluidos contaminantes, levantamiento de material particulado del lecho marino y plástico resultante de las actividades propias del proyecto. Si bien, es esencial darle un manejo adecuado a cada uno de estos residuos, resulta importante plantear un escenario probable en donde no se realice una correcta gestión de los contaminantes, claramente no intencionada.

Focalizando la contaminación del agua por residuos líquidos, es importante tener en cuenta los llamados *Slop* y *Sludge*. Para efectos del presente estudio ambiental, se contempla únicamente la posibilidad de vertimientos no intencionales de *sludge*, el cual agrupa el conjunto de líquidos contaminantes provenientes de las máquinas de los barcos. (El *slop* proviene de los tanques de cargamento de buques que transportan químicos o combustibles).

La acción que refleja un mayor impacto es el transporte del sistema undimotriz, claramente contemplando una posibilidad reducida de vertimientos no intencionales de residuos líquidos.

Por otro lado, en [24, p.84] se menciona el estudio de composición del agua que se realizó posterior a la remodelación y prolongación de la escollera sur en Argentina, donde se halló que el sistema no presentó afectación biológica por contaminantes disueltos ni presentó alteraciones por la intervención de los pilotes en el lecho marino.

Tabla 21.

Matriz de interrelaciones contaminación - agua

Valor de importancia del impacto		Medio: Inerte Factor: Agua Subfactor: Contaminación										Importancia del impacto	
		IN	EX	MO	PE	RV	SI	AC	EF	PR	MC		
Acciones del proyecto													
ETAPAS	COSNTRUCCIÓN	Preparación de la zona	1	2	3	2	2	2	4	1	1	2	-24
		Emplazamiento de los anclajes	2	1	0	1	1	1	1	1	1	1	-15
		Transporte del sistema undimotriz	2	1	3	2	3	1	4	1	1	3	-26
		Instalación del sistema undimotriz	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	-15
		Adecuación de la infraestructura eléctrica											0
	OPERACIÓN	Operación del sistema											0
		Mantenimiento y servicios logísticos	1	1	2	2	3	1	1	1	2	2	-19

Nota. Matriz de interrelaciones Contaminación vs agua.

Se analiza el impacto del proyecto en la accesibilidad de la plataforma petrolera a servicios logísticos. Cada una de las acciones del proyecto tiene un impacto en este aspecto, limitando moderadamente el acceso a la plataforma; sin embargo, la acción que refleja un impacto mayor es la instalación del sistema undimotriz, puesto que tiende a tomar más tiempo que las demás acciones periódicas o esporádicas.

Por su parte, se plantea la premisa de que la operación del sistema debe afectar mínimamente la accesibilidad a la plataforma petrolera, con lo cual se lograría un impacto poco relevante.

Tabla 22.

Matriz de interrelaciones accesibilidad - agua

Valor de importancia del impacto		Medio:	Inerte	Factor:	Agua	Subfactor:	Acceso servicios plataforma						
Criterios de evaluación		IN	EX	MO	PE	RV	SI	AC	EF	PR	MC	Importancia del impacto	
Acciones del proyecto													
ETAPAS	CONSTRUCCIÓN	Preparación de la zona	1	1	3	2		2	1	4	1	1	-19
		Emplazamiento de los anclajes	2	2	3	2		2	1	4	1	1	-24
		Transporte del sistema undimotriz	4	3	4	2		2	1	4	1	1	-33
		Instalación del sistema undimotriz	4	4	4	2		2	1	4	1	2	-36
		Adecuación de la infraestructura eléctrica	2	1	3	2		2	1	1	1	2	-20
	OPERACIÓN	Operación del sistema	2	2		4		2	1	1	4	3	-25
		Mantenimiento y servicios logísticos	2	2	3	1		1	1	1	1	1	-19

Nota. Matriz de interrelaciones.

- Interrelación Medio Biótico – Alteración del Ecosistema

El punto de partida del análisis de la interacción es la modificación del ecosistema a partir de la instalación y funcionamiento del sistema undimotriz, considerando también aquellas tareas previas o complementarias que tienen recurrencia variable y que pueden manifestar una afectación transitoria del ecosistema; por ejemplo, los servicios logísticos y de mantenimiento, que pueden ocasionar obstrucciones, emisiones de gases, sólidos y líquidos contaminantes, y emisión de ondas electromagnéticas, mecánicas y sonoras que pueden afectar el comportamiento de la fauna circundante.

Si bien, aún son pocas las investigaciones experimentales acerca del impacto ambiental de un sistema undimotriz en el medio biológico que lo rodea, las investigaciones que se han desarrollado en torno al tema, arrojan resultados sustanciales junto con recomendaciones para tener en cuenta a la hora de la ubicación, instalación y puesta en marcha de estos dispositivos.

Literatura consultada al respecto, brinda análisis del potencial impacto a grupos de animales marinos, como peces, cardúmenes de peces, aves marinas, organismos pelágicos, organismos bentónicos, entre otros.

Por ejemplo, las ondas acústicas que emite el sistema undimotriz en el agua, pueden afectar la cadena alimenticia, pues algunos peces son muy sensibles a la acústica, al igual que algunos mamíferos marinos, por lo cual se pueden generar barreras que evitarán, cambiando sus hábitos migratorios, de localización y de alimentación. [25, p. 7]

Este efecto se intensifica cuando el sistema undimotriz consta de más módulos, que, con la particularidad del movimiento aleatorio de las olas del mar, genera una sincronía de las boyas difícil de simular, resultando en efectos negativos más significativos.

Tabla 23.

Matriz de interrelaciones alteración ecosistema - fauna

Valor de importancia del impacto		Medio: Biótico Factor: Fauna Subfactor :										Alteración del ecosistema	
Criterios de evaluación		IN	EX	MO	P E	RV	SI	AC	EF	PR	MC	Importancia del impacto	
Acciones del proyecto													
ETAPAS	CONSTRUCCIÓN	Preparación de la zona	1	2	3	1	1	1	1	1	1	3	-19
		Emplazamiento de los anclajes	1	2	3	4	2	1	1	1	1	4	-24
		Transporte del sistema undimotriz	2	2	2	2	2	1	1	1	1	3	-23
		Instalación del sistema undimotriz	2	2	3	2	2	1	1	1	1	3	-24
		Adecuación de la infraestructura eléctrica											
	OPERACIÓN	Operación del sistema	2	2	3	3		4	1	4	4	4	-33
		Mantenimiento y servicios logísticos	2	2	2	2	2	2	1	2	1	3	-25

Nota. Matriz de interrelaciones.

- Impacto paisaje – modificación entorno y vista

En la interrelación paisaje – modificación entorno y vista, únicamente se tiene en cuenta el impacto que puede causar el sistema de energía undimotriz en su operación, pues las demás acciones son transitorias y no representan una modificación del paisaje de alta relevancia, entendiendo que el entorno donde operará el sistema undimotriz se ve intervenido recurrentemente por los requerimientos logísticos y demás de la plataforma semisumergible.

Por lo anterior, el impacto del sistema undimotriz en cuanto al paisaje observable desde la plataforma semisumergible será moderado, pues la mayor parte del cuerpo del dispositivo se encuentra sumergida.

Tabla 24.

Matriz de interrelaciones modificación entorno y vista - paisaje

Valor de importancia del impacto		Medio:		Perceptual		Factor: Paisaje		Subfactor		Modificación entorno y vista			
Criterios de evaluación		IN	EX	MO	PE	RV	SI	AC	E F	PR	MC	Importancia del impacto	
Acciones del proyecto													
ETAPAS	CONSTRUCCIÓN	Preparación de la zona										0	
		Emplazamiento de los anclajes										0	
		Transporte del sistema undimotriz										0	
		Instalación del sistema undimotriz										0	
		Adecuación de la infraestructura eléctrica										0	
	OPERACIÓN	Operación del sistema	1	3	4	3	4	1	1	4	4	2	-32
		Mantenimiento y servicios logísticos											0

Nota. Matriz de interrelaciones.

- Impacto población – empleo

Cada una de las acciones del proyecto requiere mano de obra e intervención humana, por lo que se convertiría en un claro generador de empleo. Si bien, gran parte de la mano de obra puede ser tercerizada, o de ser el caso, ofrecida por la empresa que construye, distribuye e instala sistemas de energía renovable con aprovechamiento de la energía del mar, también está la posibilidad de que parte del personal de la plataforma semisumergible participe en las acciones del proyecto, o incluso, integrando a personal capacitado que resida en la región objetivo y no tenga relación alguna con las operaciones de la plataforma semisumergible.

Es decir, la materialización del proyecto tendrá un impacto favorable en la generación de empleo. Cabe aclarar que la naturaleza de las acciones determina las necesidades de cualificación de personal y el plazo de su intervención; por ejemplo, acciones como preparación de la zona, emplazamiento de los anclajes, transporte del sistema undimotriz, entre otras, requerirán personal durante su desarrollo pero, finalizada la actividad, el personal deberá trasladar sus esfuerzos a otra actividad del proyecto, o a una actividad similar en un proyecto paralelo.

En cambio, en acciones continuas o periódicas, como la operación de los dispositivos y el mantenimiento y servicios logísticos, se requiere personal disponible de manera indefinida mientras se mantenga la operación del sistema.

Para estas actividades, se estima una necesidad de personal de un supervisor, un analista de datos y monitoreo, un equipo de mantenimiento con un supervisor (puede ser tercerizado) y la tercerización de un servicio de transporte para efectos de necesidades logísticas.

La estimación del impacto del proyecto en el empleo se presenta a continuación:

Tabla 25.

Matriz de interrelaciones empleo - población

Valor de importancia del impacto		Medio:	Social	Factor:	Población	Subfactor:	Empleo						
Criterios de evaluación		IN	EX	MO	PE	RV	SI	AC	EF	PR	MC	Importancia del impacto	
Acciones del proyecto													
ETAPAS	CONSTRUCCIÓN	Preparación de la zona	1	1	4	2		1	1	4	1	2	20
		Emplazamiento de los anclajes	2	2	4	2		2	1	4	1	2	26
		Transporte del sistema undimotriz	1	4	4	2		2	1	4	1	2	27
		Instalación del sistema undimotriz	4	4	4	2		4	4	4	1	2	41
		Adecuación de la infraestructura eléctrica	1	1	4	2		2	1	4	1	2	21
	OPERACIÓN	Operación del sistema	1	1	4	4		1	1	4	4	3	26
		Mantenimiento y servicios logísticos	2	4	2	2		2	1	4	2	3	30

Nota. Matriz de interrelaciones.

- Impacto Oportunidades de inversión – Incentivo de energías renovables

Tabla 26.

Matriz de interrelaciones oportunidades de inversión

Valor de importancia del impacto												Medio:	Económico	Factor:	Oportunidades de inversión	Subfactor :	Incentivo de energías renovables
Criterios de evaluación		IN	EX	MO	PE	RV	SI	AC	EF	PR	MC	Importancia del impacto					
Acciones del proyecto																	
ETAPAS	CONSTRUCCIÓN	Preparación de la zona															
		Emplazamiento de los anclajes															
		Transporte del sistema undimotriz															
		Instalación del sistema undimotriz															
		Adecuación de la infraestructura eléctrica															
	OPERACIÓN	Operación del sistema	4	4	2	4	4	4	4	1	4	4	47				
		Mantenimiento y servicios logísticos															

Nota. Matriz de interrelaciones.

- Impacto valores culturales y humanos – compromiso con el ambiente

Tabla 27.

Matriz de interrelaciones compromiso con el ambiente - cultura

Valor de importancia del impacto		Medio:		Cultural		Factor:		Valores culturales y humanos			Subfactor:		Compromiso con el ambiente
		IN	EX	MO	PE	RV	SI	AC	EF	PR	MC	Importancia del impacto	
ETAPAS	CONSTRUCCIÓN	Preparación de la zona											
		Emplazamiento de los anclajes											
		Transporte del sistema undimotriz											
		Instalación del sistema undimotriz											
		Adecuación de la infraestructura eléctrica											
	OPERACIÓN	Operación del sistema	4	4	2	3		2	4	4	4	4	43
		Mantenimiento y servicios logísticos											

Nota. Matriz de interrelaciones.

- Impacto valores culturales y humanos – Innovación

Tabla 28.

Matriz de interrelaciones innovación - cultura

Valor de importancia del impacto		Valores culturales y humanos										Importancia del impacto	
		Medio: Cultural	Factor: culturales y humanos	Subfactor: Innovación									
Criterios de evaluación		IN	EX	MO	PE	RV	SI	AC	EF	PR	MC	Importancia del impacto	
Acciones del proyecto													
ETAPAS	CONSTRUCCIÓN	Preparación de la zona											
		Emplazamiento de los anclajes											
		Transporte del sistema undimotriz											
		Instalación del sistema undimotriz	4	4	2	2		2	4	1	1	4	36
		Adecuación de la infraestructura eléctrica											
	OPERACIÓN	Operación del sistema	8	4	2	3	4	4	4	4	4	4	61
		Mantenimiento y servicios logísticos											

Nota. Matriz de interrelaciones.

7.1.4. Impacto ambiental del sistema undimotriz

A continuación se muestra el impacto ambiental resultante de la consolidación de los datos registrados en las interrelaciones de las acciones del proyecto de energía undimotriz, con los medios y factores ambientales determinados.

Tabla 29.

Matriz de consolidación de impactos ambientales energía undimotriz.

FACTORES \ ACTIVIDADES				ETAPA DE CONSTRUCCIÓN					ETAPA DE OPERACIÓN	
				Preparación de la zona	Emplazamiento de los	Transporte del sistema	Instalación del sistema	Adecuación de la infraestructura	Operación del sistema	Mantenimiento y servicios logísticos
Medio físico	Medio Inerte	Aire	Contaminación sonora	-24	-26	-27	-28	-25	-35	-27
			Emisión de gases	-23	-23	-30				-19
	Agua	Contaminación	-24	-15	-26	-15			-24	
		Accesibilidad servicios plataforma	-19	-24	-25	-36	-20	-25	-19	
	Medio Biótico	Fauna	Alteración del ecosistema	-19	-24	-23	-24		-33	-25
	Medio perceptual	Paisaje	Modificación entorno y vista						-32	

Medio Socio-económico y Cultural	Medio Social	Población	Empleo	20	26	27	41	21	26	30
	Medio Económico	Oportunidades de inversión	Incentivo de energías renovables						47	
	Medio Cultural	Valores culturales y humanos	Compromiso con el ambiente						43	
			Innovación				36		61	

Nota. Matriz de consolidación de impactos ambientales energía undimotriz.

Es importante partir de la premisa de que, cualquier intervención humana en la naturaleza, provocará cambios e impactos ambientales los cuales pueden ser positivos o negativos.

Para efectos del proyecto en cuestión, los impactos negativos se encuentran dentro de los rangos: impacto negativo irrelevante e impacto negativo moderado, tomando una mayor ponderación la serie de impactos negativos irrelevantes (20) versus la serie de impactos negativos moderados (10).

Por su parte, los impactos positivos registran en intervalos de impacto positivo irrelevante, moderado y severo, con mayor participación de los impactos positivos moderados a causa de la generación potencial de empleos, el incentivo del desarrollo de energías renovables mediante la inversión en proyectos de este tipo, la concientización sobre el cuidado del medio ambiente y el factor de innovación intrínseco en la implementación de un sistema de energía undimotriz para el abastecimiento energético de un sistema de levantamiento artificial, ligado a las posibilidades y oportunidades que tiene esta energía renovable en la industria petrolera offshore y en la transición energética.

7.1.5. Análisis ambiental alternativa tradicional

Para el desarrollo de un comparativo entre el impacto ambiental estimado del sistema undimotriz y una alternativa energética tradicional vigente en el mercado, se estructuró una matriz simplificada de Conesa Fernández para estimar el impacto ambiental de la alternativa tradicional, empleando los mismos medios y factores ambientales susceptibles de impacto.

La alternativa tradicional seleccionada corresponde a generadores diésel empleados en las plataformas petroleras, los cuales constituyen una opción llamativa cuando se trata de oportunidad, fiabilidad y potencia en el suministro de energía eléctrica; pero tienen un impacto considerable en cuanto a emisiones de gases de efecto invernadero.

Para efectos de simplicidad, se adjuntan los resultados en la matriz consolidada, y las tablas de interrelaciones se presentan como anexos.

Tabla 30.

Matriz de consolidación de impactos ambientales, generador diésel.

FACTORES \ ACTIVIDADES				Transporte del generador	Instalación del generador	Operación del generador	Mantenimiento y servicios logísticos
				Medio físico	Medio Inerte	Aire	Contaminación sonora
Emisión de gases	-30		-41				-28
Agua	Contaminación	-26				-24	
	Accesibilidad servicios plataforma	-25					
Medio Biótico	Fauna	Alteración del ecosistema	-23			-45	-28
Medio perceptual	Paisaje	Modificación entorno y vista					
Medio Socio-económico y Cultural	Medio Social	Población	Empleo		11	11	18
	Medio Económico	Oportunidades de inversión	Incentivo de energías renovables			-42	-43
	Medio Cultural	Valores culturales y humanos	Compromiso con el ambiente	-43		-43	-43
			Innovación				

Nota. Matriz de consolidación de impactos ambientales, generador diésel.

En comparación con los resultados obtenidos en el análisis de impactos ambientales del sistema undimotriz, se evidencia que el empleo de una alternativa tradicional de capacidad energética similar, genera un mayor número de impactos ambientales negativos, que a su vez, se ubican en su mayoría dentro del intervalo de impacto negativo moderado.

Sin embargo, presenta como impacto positivo la generación de empleo, aunque a una escala mucho más pequeña que la evidenciada en el análisis del sistema undimotriz.

Es de especial atención mencionar los efectos potenciales del empleo continuado de energías tradicionales, en factores como el incentivo de energías renovables, el compromiso con el medio ambiente y la innovación, que claramente buscan ser favorables.

Cabe aclarar que, si bien se analizó una alternativa tradicional como lo es un generador diésel, existen alternativas derivadas del mismo principio de funcionamiento pero que buscan la optimización de recursos y la reducción del impacto ambiental, como por ejemplo, aquellos generadores que emplean gas asociado de petróleo para reducir los costos de producción de energía, reducir las emisiones y aprovechar residuos de la extracción de petróleo.

7.2. Análisis económico de las alternativas

Se tomó un horizonte de evaluación de 8 años inicialmente, para evaluar el desempeño financiero del sistema de energía undimotriz, empleando los datos de costes proporcionados por el software SAM.

Costos proporcionados por la simulación (USD):

Tabla 31.*Costos del sistema undimotriz*

Ensamblaje estructural	\$	10.471.210
Sistema de despegue de potencia	\$	2.352.159
Anclaje y subestructura	\$	2.130.474
Costo total del dispositivo (capital)	\$	14.953.843
Desarrollo	\$	3.415.480
Gestión e Ingeniería	\$	917.918
Infraestructura eléctrica	\$	2.232.284
Puesta en servicio de la planta	\$	393.365
Accesos al sitio	\$	270.438
Ensamblaje e instalación	\$	3.065.779
Otras infraestructuras	\$	-
Total balance de costos del sistema (BOS) (capital)	\$	10.295.264
Presupuesto de contingencia del proyecto	\$	1.229.265
Seguro durante la construcción	\$	245.853
Cuentas de reserva	\$	737.559
Otros costos financieros (capital)	\$	-
Total costos financieros	\$	2.212.677
Operación	\$	915.032
Mantenimiento	\$	451.342
Total operación y mantenimiento	\$	1.366.374
Costo fijo operacional (anual)	\$	1.366.374
Costo de capital (Inversión inicial)	\$	27.461.782

Nota. Costos del sistema de energía undimotriz.

Con los cuales se proyectó un flujo de caja con las siguientes condiciones:

Tabla 31.

Condiciones.

Margen esperado kWh	30%
LCOE Cent/kWh	671,1
TIO	12%
Número de periodos	8

Nota. *Condiciones para proyección del flujo de caja del sistema undimotriz.*

Tabla 33.*Flujo de caja.*

Flujo de Caja	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
Costo de capital (Inversión inicial)	-\$ 27.461. 782								
Costo fijo operacional (anual)		-\$ 1.366.3 74	-\$ 1.366.3 74	-\$ 1.366.3 74	-\$ 1.366.374 74	-\$ 1.366.3 74	-\$ 1.366.3 74	-\$ 1.366.3 74	-\$ 1.366.3 74
Ingresos operacionales		\$ 5.685.0 05	\$ 5.685.0 05	\$ 5.685.0 05	\$ 5.685.005 05	\$ 5.685.0 05	\$ 5.685.0 05	\$ 5.685.0 05	\$ 5.685.0 05
Flujo de Caja Neto	-\$ 27.461. 782	\$ 4.318.6 31	\$ 4.318.6 31	\$ 4.318.6 31	\$ 4.318.631 31	\$ 4.318.6 31	\$ 4.318.6 31	\$ 4.318.6 31	\$ 4.318.6 31

Nota. Flujo de caja del sistema undimotriz.

Resultando en los indicadores financieros:

Valor Presente Neto (VPN): -\$ 6.008.378,21**Tasa Interna de Retorno (TIR): 5,4042%**

Por lo cual, se presenta como una alternativa no viable financieramente, pues no genera un rendimiento esperado del capital, aun cuando se cobra por la energía generada.

Las causas directas de la inviabilidad financiera son los altos costos de mantenimiento, la gran inversión inicial y el elevado costo nivelado de energía (LCOE) que para este caso se empleó como parámetro para fijar el precio del kWh aplicando un margen del 30%.

Por otro lado, el reducido avance tecnológico asociado a la energía undimotriz, y en general, a las energías oceánicas, genera una gran limitante a la hora de competir en costo con otras energías renovables que han tenido un avance notorio en los últimos años.

En paralelo, se realizó un flujo de caja para un generador diésel con potencial de generación eléctrico de igual magnitud al simulado con el sistema undimotriz, donde se llegó a la viabilidad financiera con mucha más facilidad, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 35.*Flujo de caja.*

Flujo de caja - Generador diésel	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
Inversión inicial	-\$ 22.535								
Costos de operación		\$ 85.052							
Costos de mantenimiento		-\$ 4.507							
Ingresos operacionales		\$ 98.811							
Flujo de caja neto	-\$ 22.535	\$ 18.266							

Nota. *Flujo de caja generador diésel.*

Tabla 34.

Condiciones.

LCOE USD/kWh	0,10846005
Margen	30%
TIO	12%
Número de periodos	8

Nota. *Condiciones para proyección del flujo de caja del generador diésel.*

Resultando en los indicadores financieros:

Valor Presente Neto (VPN): \$ 68.205

Tasa Interna de Retorno (TIR): 80%

Indicando que por el momento, esta alternativa energética tradicional genera unos mayores beneficios económicos frente a la energía undimotriz, o por lo menos, es considerablemente más económica, fácil de disponer, instalar y mantener. Sin embargo, no siempre se tiene en cuenta el costo ambiental que genera el uso de esta forma de transformación de energía.

8. CONCLUSIONES

Las energías oceánicas, dentro de las cuales se encuentra la energía undimotriz, tienen un alto potencial debido a su disponibilidad, densidad de potencia, previsibilidad y cantidad de zonas geográficas con oportunidad de aprovechamiento. Sin embargo, se presenta una gran limitante debido al avance tecnológico en torno a estas energías, con especial atención en la undimotriz.

Hasta el momento, no existe un portafolio de dispositivos comerciales lo suficientemente grande para incentivar la competencia y desarrollo de este tipo de energía, o adquirirla para su consumo; en contraste, otras energías renovables como la energía solar fotovoltaica y eólica, han tenido avances muy favorables que les permiten competir directamente con alternativas no renovables.

Es posible que en un futuro los esfuerzos orientados al desarrollo y mejoramiento de la energía undimotriz logren posicionarla como un participante importante de la matriz energética de algunos países, llegando a ser competitiva en costo y fiabilidad.

La energía undimotriz empleada como fuente de energía para un sistema de levantamiento artificial, es una opción ambientalmente sustentable, pues tiene impactos positivos interesantes de magnitud considerable, y los impactos negativos son en su mayoría poco relevantes.

Sin embargo, a la hora de analizar el desempeño económico, no es sustentable por el momento, pues el valor de los dispositivos, los costos de operación, instalación, mantenimiento y demás son demasiado altos para dar luz verde a su implementación.

Cuando se hace uso de la energía undimotriz para alimentar solo el sistema de levantamiento artificial se reduce el alcance del proyecto y la rentabilidad. Si se realizara la implementación de la energía undimotriz como mecanismo de obtención principal de energía eléctrica desde el inicio de la operación en la etapa de perforación se haría más rentable el proyecto, ya que se observa que el costo nivelado de energía disminuye notoriamente con el aumento del número de dispositivos o boyas implementadas, es decir, es inversamente proporcional, adicionalmente se estaría financiando el proyecto

en la totalidad de la operación, de esta manera amortizando en mayor periodo de tiempo la inversión y obteniendo mayor beneficio y provecho de la instalación de los dispositivos.

Las energías alternativas más allá de ser una opción de obtención de electricidad con menos impacto ambiental y social pueden ser una oportunidad de la industria petrolera para generar mayor aceptación por parte de los habitantes de una locación, en donde se podría ampliar los alcances de la industria y mejorar la imagen de la misma. Es necesario iniciar con proyectos de transición energética para así llegar en un futuro a prácticas más seguras y limpias, en donde se impacte de forma reducida el medio ambiente y sean los impactos positivos mayores que los negativos. Adicionalmente desde el punto de vista financiero en unos años puede ser más rentable a largo plazo para la explotación de hidrocarburos abandonar el uso de energías convencionales en sus procesos de perforación y producción.

BIBLIOGRAFIA

- [1] BP, "Statistical Review of World Energy globally consistent data on world energy markets . and authoritative publications in the field of energy The Statistical Review world of World Energy and data on world energy markets from is The Review has been providing," p. 66, 2020, [Online]. Available:
<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>.
- [2] S. A. Corredor García and R. Gómez Galindo, "Identificación de los sistemas de levantamiento artificial aplicables a yacimientos de crudo pesado a alta profundidad sometidos a un proceso de combustión in situ," 2018, [Online]. Available:
http://awsassets.wfnz.panda.org/downloads/earth_summit_2012_v3.pdf%0Ahttp://hdl.handle.net/10239/131%0Ahttps://www.uam.es/gruposinv/meva/publicaciones/jesus/capitulos_espanyol_jesus/2005_motivacion_para_el_aprendizaje_Perspectiva_alumnos.pdf%0Ahttps://www.re.
- [3] R. Chokhawala, "Suministro de energía eléctrica a las plataformas," *ABB*, 2008, [Online]. Available:
https://library.e.abb.com/public/e498bdb06e6d0eafc125742700418fda/52-561M811_SPA72dpi.pdf.
- [4] J. M. Torres Martínez, "Estudio de las centrales de aprovechamiento de la energía mareomotriz," 2012, [Online]. Available:
<http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/17550>.
- [5] Power Technology, "Pelamis, World's First Commercial Wave Energy Project, Agucadoura," *Power Technology*, 2019.

- [6] S. Vorrath, "World's first grid-connected wave energy array switched on in Perth," *Renew Economy*, 2015.
- [7] M. Pelissero, P. A. Haim, G. Oliveto, F. Galia, and R. Tula, "Aprovechamiento de la Energía Undimotriz.Pdf." 2011.
- [8] M. Folley, *Numerical Modelling of Wave Energy Converters*. 2016.
- [9] N. Zhang *et al.*, "Effects of sea ice on wave energy flux distribution in the Bohai Sea," *Renew. Energy*, vol. 162, pp. 2330–2343, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.10.036.
- [10] L. Wang, M. Lin, E. Tedeschi, J. Engström, and J. Isberg, "Improving electric power generation of a standalone wave energy converter via optimal electric load control," *Energy*, vol. 211, p. 118945, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118945>.
- [11] İ. Ö. Erselcan and A. Kükner, "A parametric optimization study towards the preliminary design of point absorber type wave energy converters suitable for the Turkish coasts of the Black Sea," *Ocean Eng.*, vol. 218, p. 108275, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108275>.
- [12] V. R. Hernández Mendible, "HACIA UNA REGULACIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES Y LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Víctor Rafael Hernández-Mendible □," 2011.
- [13] Claudio A. Estrada Gasca y Camilo A. Arancibia Bulnes, "Las Energías Renovables: la Energía Solar y sus Aplicaciones," *Rev. Digit. Univ.*, pp. 1–27, 2010, [Online]. Available: <http://www.revista.unam.mx/vol.11/num10/art96/index.html?>
- [14] A. Ramírez Treviño, J. M. Sánchez Núñez, and A. García Camacho, "El

Desarrollo Sustentable: Interpretación y Análisis,” 2004.

- [15] Schlumberger Oilfield glossary, “Levantamiento artificial” 1.S., Terminación de pozos, 2021, [Online]. Available: https://glossary.oilfield.slb.com/es/terms/a/artificial_lift
- [16] Schlumberger Oilfield glossary, “Semisumergible” 1.S., Perforación, 2021, [Online]. Available: <https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/terms/s/semisubmersible>
- [17] D. H. Morales Sánchez and D. F. Ramirez Contreras, “PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DEL COSTO NIVELADO DE ENERGÍA (LCOE) EN PROYECTOS DE GENERACIÓN RENOVABLE, BASADO EN EL FLUJO DE CAJA FINANCIERO.” Bucaramanga, 2020, [Online]. Available: https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/7332/2020_Tesis_Duban_Herley_Morales_Sanchez.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [18] A. Frohmann, “Cálculo y etiquetado de la huella de carbono,” *Semin. CEPAL - PromPerú*, 2013.
- [19] D. Baena Toro, *Análisis financiero Enfoque y proyecciones*, vol. 53, no. 9. 2010.
- [20] M. Pelissero, P. A. Haim, G. Oliveto, F. Galia, and R. Tula, “Aprovech De La Energia Und (1).Pdf.” 2011.
- [21] G. Carreras *et al.*, “Energía undimotriz - tecnología argentina para la generación de energía eléctrica,” *Asades*, vol. 44, pp. 39–47, 2019.
- [22] “Energías marinas Estudio de costo nivelado de energía en Chile Análisis de la cadena de suministro,” 2018.
- [23] J. A. Roca, “Energía de las olas, una nueva forma de suministrar electricidad

verde a la plataformas de petróleo,” Apr. 2021.

- [24] J. M. Jáuregui, “Evaluación del impacto ambiental potencial que podría producirse por la instalación y funcionamiento de un dispositivo electromecánico capaz de aprovechar la energía undimotriz en la escollera sur del puerto de Quequén,” 2016, [Online]. Available: <http://ria.utn.edu.ar/handle/123456789/2781>.

- [25] G. W. Boehlert, “Ecological effects of wave energy development in the Pacific Northwest,” *Boehlert, G.W, G.R.McMurray C.E.Tortorici*, p. 174, 2007, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/1957/9426>.

- [26] D. Entrepreneurs, “The 9 Steps,” p. 9, 2018.

- [27] D. Stop, “Product Catalog Product Catalog,” *Measurement*, no. September, pp. 36–39, 2013.

- [28] C. Gustavo, G. Bustos, Á. Alejandro, and V. Musalem, “Diseño Y Arreglo De Boyas,” 2017.

- [29] V. S. Neary *et al.*, “Methodology for Design and Economic Analysis of Marine Energy Conversion (MEC) Technologies,” *Sandia Natl. Lab.*, no. March, p. 261, 2014.