

Plan estratégico para la implementación de energía eólica en campos de hidrocarburos.

Oscar Mauricio Alba Torres

Trabajo de grado

Director

Érik Giovany Montes Páez

Magíster en Ingeniería de Hidrocarburos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Especialización en Gerencia de hidrocarburos

Bucaramanga

2023

DEDICATORIA

Esta especialización se la dedico a Dios que con sus bendiciones me dio lucidez, fuerza y tenacidad para lograr esta meta.

También quiero dedicarlo a mi familia papá, mamá y mi hermana quienes en todo momento me estuvieron apoyando e incentivando para lograr este objetivo, que como ellos saben cuándo me propongo algo por difícil que sea con la ayuda de Dios lo saco adelante.

A mi abuelita, a mis tíos y demás familiares quienes con su afecto y cariño siempre están pendientes de mis logros académicos y que en lo personal estoy seguro me abrirá las puertas para mi desarrollo profesional.

Mil gracias.

Tabla de contenido

Pág.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
2. ALCANCE	4
3. JUSTIFICACIÓN.....	4
4. OBJETIVOS.....	5
4.1 Objetivo general.....	5
4.2 Objetivos específicos	5
5. MARCO DE REFERENCIA.....	6
6. IMPLEMENTACIÓN Y DESARROLLO UN CAMPO DE ENERGÍA EÓLICA.....	18
6.1. Energía Eólica	19
6.2 Identificación Del Consumo De Energía Eléctrica De Un Campo Petrolero Estándar	29
6.3. Factores Críticos Para La Implementación De La Energía Eólica.....	32
6.4 Propuesta Plan Estratégico General Para Viabilizar Proyectos De Energía Eolica	39
6.5 Estimación De Potenciales Eólicos.....	42
7. CONCLUSIONES	43
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43

1. Planteamiento del problema

Con el claro objetivo a nivel mundial, que busca frenar o por lo menos ralentizar el calentamiento global y cambio climático, una de las dificultades actuales que se presenta es el desconocimiento general, con relación a como ejecutar la transición energética de forma realista, viable y sostenible. En este sentido, los campos de hidrocarburos requieren con urgencia, analizar la viabilidad de implementar energías alternativas que puedan coexistir de manera eficiente en los campos productores.

Con esto en mente, se evidencia que actualmente no se cuenta con una metodología de selección de las diferentes alternativas de energía eólica que puedan utilizarse como parte integral de la ejecución de una o mas campos petroleros.

2. Alcance

Partiendo del análisis de casos de implementación de energías renovables en campos de hidrocarburos, el alcance de esta Monografía es proponer un plan estratégico que permita a las empresas del sector hidrocarburos, determinar el potencial de implementar la energía eólica en los campos productores, teniendo en cuenta tanto los posibles factores críticos y rango de operación de un campo, como los factores ambientales que puedan afectar favorable o desfavorablemente el aprovechamiento de dicha energía, concluido de análisis de estos factores.

3. Justificación

Teniendo en cuenta el calentamiento global y cambio climático que día a día exige a los diferentes gobiernos, junto a las diferentes industrias tomar acción en pro de desarrollar maneras sostenibles de interactuar con el planeta. para la industria petrolera, cada vez es más necesario e importante generar ideas y conocimientos en relación con energías limpias, renovables y alternativas, que permitan la consolidación de una industria energética más diversa y sostenible.

En este sentido, la industria de los hidrocarburos, al desarrollar actividades tanto en On shore como en Off shore, podría contemplarse, como una de las energías que posiblemente mayores beneficios y rangos de aplicabilidad presente, es la energía eólica, y enfocar estudios y esfuerzos para desarrollo de esta energía dentro de la industria.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Proponer un plan estratégico que permita viabilizar la implementación de la energía eólica en campos de hidrocarburos.

4.2 Objetivos específicos

- Analizar los casos de estudio a nivel mundial de implementación de energía eólica on shore y off shore en la industria petrolera, junto con las nuevas tecnologías en el campo de dicha energía.

- Identificar las características comunes que inciden en la implementación y desarrollo un campo de energía eólica.
- Determinar los factores críticos para la implementación energía eólica on shore y off shore en campos de hidrocarburos
- Propuesta del plan estratégico partiendo de los resultado y conclusiones definidas en los capítulos previos.

5. Marco de referencia

5.1. Marco Conceptual

Para el planteamiento, lectura y comprensión del presente trabajo investigativo, es necesario definir los conceptos básicos principales, los cuales constituyen las herramientas claves para el desarrollo de este:

- Plan estratégico:

Para dar definición al presente concepto, al ser de naturaleza compuesta, lo más correcto y prudente es partir definiendo las expresiones que lo componen. Estas palabras son Plan y Estrategia. Una definición aceptada por la real academia de la lengua española para este concepto es - Modelo sistemático de una actuación pública o privada, que se elabora anticipadamente para dirigirla y encauzarla. Con esto en mente se puede entender la palabra Plan como un paso a paso previamente estructurado, con el fin de lograr uno o varios objetivos.

Por otra parte, según Andrew. K (1971) “la Estrategia es modelo de objetivos, propósitos o metas y de las principales políticas y planes para alcanzarlos, planteados de tal manera que definen en que negocio esta o va a estar la compañía y la clase de compañía que es o va a ser”. Esta Expresión tiene un enfoque netamente empresarial, que deja en claro todos los aspectos principales que caracterizan.

Hay tantas definiciones para estos conceptos como formas de interpretar los mismos, por ende, la información frente a estas definiciones es mucha y muy variable. Por lo cual, para este proyecto se entenderá como Plan Estratégico al conjunto de conceptos o elementos que integra y dan Coherencia a las decisiones tomadas frente a un jefe o proyecto.

- Energías renovables:

Se entiende como energías renovables, aquellas energías cuya fuente principal cumple un ciclo mediante el cual, a lo largo de un determinado tiempo se restablezca el mismo, generando en teoría un menor impacto al medio ambiente.

No obstante, dentro de las mismas, podemos encontrar energías que no cumplen en el estricto sentido estas afirmaciones -como, por ejemplo, la energía geotérmica o la energía solar que no poseen un ciclo de renovación, como si lo tendrían la energía eólica, la oceánica y la mareomotriz.

DOCUMENT CHANNEL (15 marzo 2017). Mareomotriz, Energías Renovables. DOCUMENTAL. <https://www.youtube.com/watch?v=x0f-uPeB9P4>

- Energía eólica:

La energía eólica se explica por si sola, es la energía que proviene del aprovechamiento de la corriente de aire, esta energía es de las que mayores esfuerzo y estudios, en pro de su desarrollo presenta actualmente.

Se pueden encontrar 2 tipos de campos eólicos a nivel general, al igual que la industria petróleo, actualmente el desarrollo de campos eólicos se presenta tanto en on shore como en off shore.

Si bien ambos tipos de campos tienen el mismo fin, la forma, el medio y los resultados que generan cada una de estos, son muy diferente al igual que su desarrollo, por lo que hay que abordarlos de forma separada.

5.2. Coexistencia energética en campos de hidrocarburos nacionales

Con el fin de brindar herramientas que permitan que cada vez, sea más rentable y viable la opción de implementar energías renovables dentro de nuestra industria.

a continuación, se presentan algunos casos exitosos de coexistencia de energías renovables en campos de hidrocarburos, los cuales pueden considerarse como los primeros pasos en Colombia hacia la transición energética. Estos casos de estudio buscan la coexistencia y desarrollo tanto de energías renovables como de las operaciones en la industria petrolera, los cuales pueden ser la base para la masificación de ideas similares, por ejemplo, para el caso de la implementación de energía eólica en campos de hidrocarburos, foco principal de esta Monografía. Todas estas iniciativas permitirán la creación de nuevas alternativas dentro del territorio nacional, y de esta forma contribuir progresivamente y de manera eficiente con la transición energética.

- Caso Campo Castilla – Ecopetrol

En Colombia Ecopetrol fue la primera empresa en dar el paso hacia una transición energética, con una gran apuesta en descarbonización, electrificación y sostenibilidad. Hoy en día, la Compañía cuenta con un parque solar en operación, cuya obra se ejecutó en un tiempo récord de 7 meses, sin incidentes incapacitantes y generó empleo para 388 personas. Cuenta con una potencia instalada de 21 megavatios (MWp), equivalente a la capacidad para energizar una ciudad de 27.000 habitantes, por medio de la cual abastece parte de la energía que requiere el campo petrolero de Castilla, el segundo más grande de Colombia, con una producción cercana a los 115 mil barriles de petróleo por día. Esto significa que el 67% de la energía anual que consume el Campo proviene de una fuente renovable, y a su vez contribuye con una reducción anual de emisiones de CO₂ de más o menos 1036.13 Ton.

Ecopetrol. (3 octubre 2018) Ecopetrol y AES pusieron en operación Parque Solar Castilla.

https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/?page=detalleNoticias&urile=wcm:path%3A%2FEcopetrol_WCM_Library%2FAS_en%2FNoticias%2Fecopetrol-launches-ronda-campos-2020

Figura 1. Panorámica Campo Castilla



Tomado de la página oficial de Ecopetrol

https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/?page=detalleNoticias&urile=wcm:pa th%3A%2FEcopetrol_WCM_Library%2FAS_en%2FNoticias%2Fecopetrol-launches-ronda-campos-2020

- Caso Campo Maracas – Parex Resources

En marzo de 2021, Parex Resources y la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín pusieron en funcionamiento el primer proyecto de generación eléctrica a partir de energía geotérmica del país, con 100 kW de potencia instalada es capaz de generar hasta 72.000 kWh/mes, este equipo de generación geotérmico fue construido por el fabricante español de ORC Rank. El proyecto se ejecutó en el Campo Maracas de Casanare y su implementación lograra reducir hasta 550 toneladas de CO2 por año.

•piensageotermia.com. (28/03/2021) Inaugurada primera planta de energía geotérmica en Colombia <https://www.piensageotermia.com/inaugurada-primer-planta-de-energia-geotermica-en-colombia/>

Figura 2. - Panorámica Campo Maracas



Tomado de Piensa en Geotecnia <https://www.piensageotermia.com/inaugurada-primer-planta-de-energia-geotermica-en-colombia/>

- Campo La Rumba – Parex Resources

Este proyecto, busca aprovechar las altas temperaturas y volúmenes de agua producidos en la extracción de hidrocarburos; producirá aproximadamente 100 kW efectivos de energía eléctrica, capaz de generar hasta 72.000 kWh/mes, lo que reemplazará un 5% de

la energía generada de combustibles fósiles, y ayudará a reducir las emisiones de la generación de energía en alrededor de 550 toneladas de CO2 anuales.

Este proyecto es similar al implementado en el campo Maracas, ya que cuenta con el mismo tipo de equipo de generación geotérmico y mantiene las mismas especificaciones con relación a la generación eléctrica y la disminución de CO2.

•elcolombiano.com. (21/07/2022) Las cuatro petroleras que apuestan por las energías renovables <https://www.elcolombiano.com/negocios/las-cuatro-petroleras-que-apuestan-por-las-energias-renovables-KK18121803>

Figura 3. Panorámica Campo la Rumba



Tomado de la página web HalconesyPalomas.com

Por otra parte, en el ámbito nacional, cabe resaltar el convenio firmado entre la ANH y la DIMAR para impulsar proyectos de Energía Eólica en el territorio colombiano.

Con la suscripción del Convenio, la ANH podrá para elaborar los pliegos y bases de condiciones específicas del proceso competitivo, evaluar los proponentes sus ofertas, y seleccionar a las empresas que podrán poseer los permisos de ocupación temporal.

DIMAR, como Autoridad Marítima Colombiana, adjudicará los permisos de ocupación temporal a las compañías seleccionadas por la ANH.

En resumen, la ANH fungirá como administradora del proceso teniendo en cuenta la experiencia, capacidad técnica y financiera que ha desarrollado en sus 20 años como administradora de los recursos hidrocarburíferos del país, mientras la Dirección General Marítima – DIMAR pone a disposición del país, su experiencia, conocimiento científico y rigor técnico en la administración de las áreas marítimas.

Este convenio es una gran noticia para los desarrollos de energía eólica off shore en Colombia, los cuales tendrán un papel fundamental para la Transición Energética, en este sentido es de vital importancia una sinergia entra la ANH, la DIMAR y las entidades que ejecute estos proyectos.

Convenio entre la DIMAR y la ANH da vía libre al inicio del proceso competitivo de energía eólica costa afuera (Bogotá, 12 de julio de 2023)

5.3. Campos petroleros internacionales con energía eólica

Con el fin de conocer algunos detalles de coexistencia de energía eólica en campos de hidrocarburos, a continuación, se mencionan algunos casos exitosos a nivel mundial, donde se ha

implementado este energético, objeto principal de esta Monografía, con el fin de visualizar aspectos que pudieran ser aplicados en campos del territorio nacional.

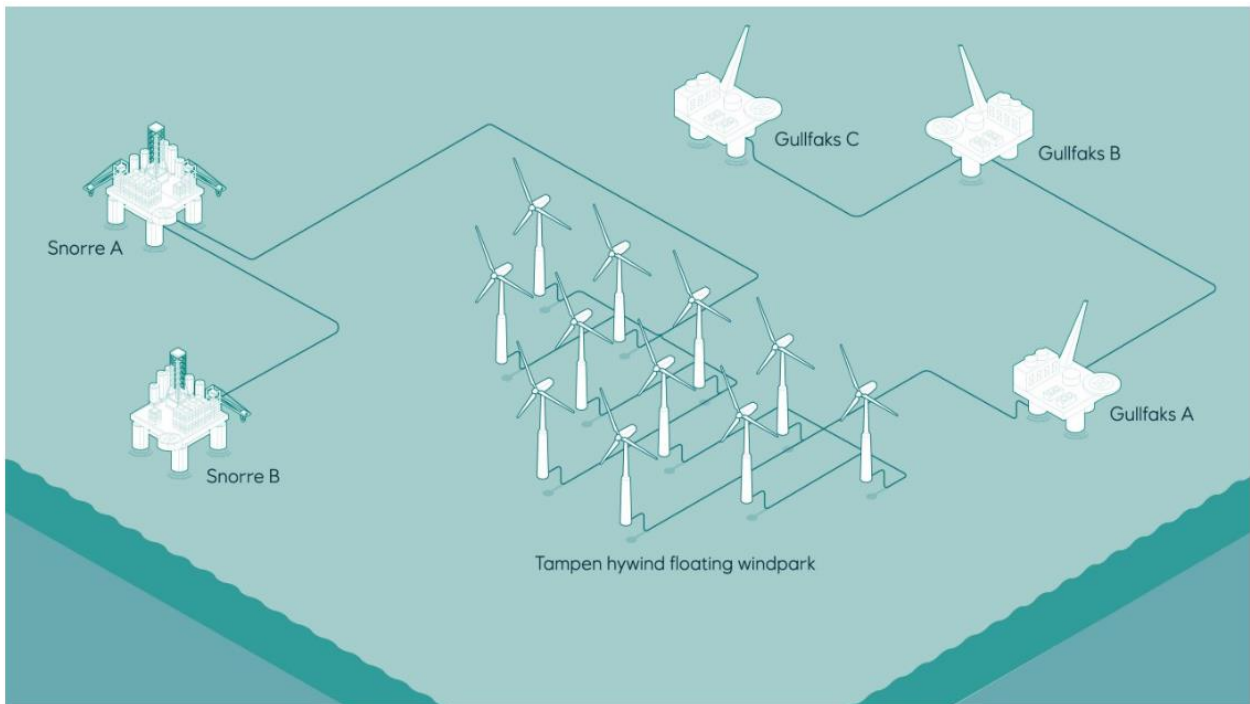
- Caso “Hywind Tampen”

La petrolera Equinor en el año 2022 comenzó a instalar 11 aerogeneradores en la costa norte de Noruega, se estima generar 94,6 MW que ofrecerán el 35% de energía necesaria para satisfacer sus plataformas de petróleo. Equinor pretende que la energía que generen las turbinas de los molinos de Hywind Tampen se aproveche para ayudar a Snorre A y B, y Gullfalks A, B y C, que son plataformas de petróleo y gas que se sitúan en el Mar del Norte del país noruego.

Equinor. (10/08/2021) Equinor.com <https://www.equinor.com/news/archive/2020-04-08-hywind-tampen-approved>

A continuación, se presenta un esquema general de la estructura del campo, con los aerogeneradores.

Esquema sistema parque eólico Hywind Tampen y plataformas de perforación



Tomado de la página oficial Equinor <https://www.equinor.com/news/archive/2020-04-08-hywind-tampen-approved>

- Caso “Parque Eólico Manantiales Behr”

El Parque Eólico Manantiales Behr se ubica en el Yacimiento Manantiales Behr, departamento Escalante a 40 km de la ciudad de Comodoro Rivadavia. Cuenta con 30 aerogeneradores con una capacidad de generación de 3,3 MW cada uno. La potencia total aproximada del Parque es de 99 MW, la cual se ha dividido por fines constructivos en dos etapas idénticas de 50 MW aproximadamente. La energía proveniente de los aerogeneradores se transporta a través de líneas de media tensión hacia la Subestación (S/E) Manantiales Behr donde se eleva la tensión para posteriormente transmitir en alta tensión hasta la Subestación Escalante.



Tomada del INFORME PARA LA COMUNIDAD mes de julio 2023 vinculado en la pagina oficial <https://www.ypluz.com/Activo/ManantialesBehr>

- Caso “Parque eólico marino de Penglai”

El proyecto piloto del parque eólico marino de Penglai es una inversión conjunta entre ConocoPhillips China y China National Offshore Oil Corporation que alimentará de energía eólica el yacimiento petrolífero del mismo nombre, al noroeste del mar de China. Se estima que con cuatro aerogeneradores habrá una capacidad total instalada de 34 megawatt (MW) a plena capacidad, y podrá cubrir más del 30 % de la energía necesaria para las operaciones del yacimiento, lo que disminuirá anualmente miles de toneladas de carbono.

Además de la energía eólica marina, las dos empresas están evaluando las oportunidades de energía desde tierra, así como la captura y almacenamiento de carbono (CCS) y la captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS). ConocoPhillips cree que, si se demuestra que son viables desde el punto de vista técnico y económico, estas soluciones energéticas de baja emisión de carbono ayudarán a transformar Penglai en un yacimiento petrolífero marino con emisiones nulas.

World energy trade (07 NOVIEMBRE 2022) <https://www.worldenergytrade.com/oil-gas/offshore/un-yacimiento-petrolifero-en-china-se-alimentara-de-energia-eolica>



Tomada de Perú Energía 2023. <https://peruenergia.com.pe/yacimiento-petrolifero-en-china-se-alimentara-de-energia-eolica/>

6. IMPLEMENTACIÓN Y DESARROLLO UN CAMPO DE ENERGÍA EÓLICA

Para entender cómo funciona la energía eólica y que aspectos se deben tener en cuenta, para una posible implementación en un campo de hidrocarburos, es necesario conocer algunos aspectos generales relacionados con el viento, impactos ambientales, energía producida, principio operacional, entre otros, los cuales se describen a continuación:

6.1. Energía Eólica

Los principales elementos para el análisis de la energía eólica son los siguientes:

- **El viento:**

Es producto del calentamiento dispar de la superficie terrestre por acción de la radiación solar. En las regiones ecuatoriales se produce una mayor absorción de radiación solar que en las polares; el aire caliente que se eleva en los trópicos es reemplazado por las masas de aire fresco superficiales provenientes de los polos. El ciclo se cierra con el desplazamiento, por la alta atmósfera, del aire caliente hacia los polos. Esta circulación general, que sería la observada si la tierra no girase, se ve profundamente alterada por el movimiento de rotación de la tierra generando zonas de vientos dominantes que responden a patrones definidos.(J. Moragues et al.2023)

A lo largo de un año las variaciones estacionales de la radiación solar incidente provocan variaciones en la intensidad y dirección de los vientos dominantes en cada uno de los puntos de la corteza terrestre. Además del movimiento general de la atmósfera, que define los vientos dominantes en las grandes regiones de la tierra, al estar ésta más caliente, existen fenómenos de características locales que originan estructuras particulares de los vientos. Tal es el caso de las brisas de tierra y de mar, motivadas por el calentamiento desigual de las masas de aire.

- **Impacto ambiental de la energía eólica:**

Como es bien sabido, en todo sistema las innovación y cambio siempre se presentan impactos tanto positivos como negativos, y la energía eólica no es la excepción. A continuación, se muestran de manera general los principales impactos ambientales que derivan de la implementación de esta energía, en cualquier lugar:

Tabla 1 Principales impactos de los proyectos eólicos

Principales impactos ambientales de los proyectos eólicos	
Impactos Positivos	Reducción del consumo de agua en la producción de energía eléctrica
	Reducción de emisiones de contaminantes (CO ₂ , NO _X , SO ₂)
	Impactos socioeconómicos en las comunidades
Impactos Negativos	Impactos a la vida silvestre (principalmente a aves, murciélagos y algunos reptiles)
	Contaminación auditiva
	Impacto visual
	Cambios en el uso de la tierra
	Deforestación y erosión del suelo
	Cambios en el clima local

Tomada de B. Guerrero, Evaluación Del Potencial Eólico Basada En Sistemas De Información Geográfica Y Métodos De Decisión Multicriterio En El Departamento De La Guajira, Colombia, 2019

Los anteriores impactos ambientales incluyen los impactos positivos y los impactos negativos. Entre los positivos se pueden mencionar: la disminución en el consumo de agua durante la producción de energía eléctrica y la disminución de las emisiones de dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre. El consumo de agua de los proyectos eólicos se estima en 0.004 l/kWh, mientras que en otras plantas generadoras es

sensiblemente mayor. Por ejemplo, las plantas de carbón consumen 1.9 l/kWh producido y las de petróleo consumen 1.6l/kWh producido (Saidur et al., 2011). En cuanto a la disminución de emisiones se estima que un sistema de 2.5kW puede disminuir las emisiones en 1– 2 toneladas de CO₂. Mientras que un sistema de 6 kW puede disminuir las emisiones en 2.5 – 5 toneladas de CO₂ si los comparamos con plantas energética de combustibles fósiles (Saidur et al., 2011).

La mitigación de impactos ambientales negativos comienza desde la selección de la ubicación del proyecto. Los principales efectos de los proyectos eólicos sobre los ecosistemas incluyen colisión con aves y mamíferos voladores, deforestación, erosión del suelo, ruido, contaminación visual, interferencia electromagnética, usos de la tierra y cambio climático local (S. Wang & Wang, 2015).

Algunos estudios estiman que en Estados Unidos mueren entre 140,000 y 328,000 aves al año a causa de colisiones con turbinas de viento (Loss, Will, & Marra, 2013) y que en promedio la tasa de mortalidad de aves por la misma causa es 2.3 por turbina por año (Saidur et al., 2011). Otros efectos negativos sobre las aves son la destrucción del hábitat y cambios en los patrones de crianza y alimentación (Dai et al., 2015). La contaminación auditiva es quizás el impacto ambiental más crítico de los proyectos eólicos (Saidur et al., 2011). De acuerdo con Van Den Berg (2004) durante las noches, cuando se presentan mayores velocidades del viento, las personas a 1,900 m de distancia expresaron molestias debido al ruido generado por un parque eólico. Otros estudios recientes mostraron que el nivel de ruido producido por 10 turbinas de viento a una distancia de 500 m varía entre 35 y 40 dB (Dai et al., 2015).

El impacto visual es considerado un impacto subjetivo y es uno de los factores que influyen en la decisión de la ubicación de un parque eólico (Dai et al., 2015). La visibilidad de una turbina de viento depende de la posición del observador. Sin embargo, algunos estudios han mostrado que pueden llegar a ser visibles a distancias de hasta 30 km (Bishop, 2002; Wrózyński, Sojka, & Pyszny, 2016). Según han indicado diversos estudios teóricos, la instalación de parques eólicos ocasionan cambios en la meteorología local y regional y puede afectar el clima (Abbasi, Tabassum-Abbasi, & Abbasi, 2016). Wang y Prinn (2009) usaron un modelo climatológico para simular los cambios en temperatura en áreas con gran cantidad de turbinas de viento instaladas. Los resultados de la simulación mostraron que si en el 2100 el 10% de la demanda energética es suplida por energía eólica es posible un aumento de temperatura de más de 1 °C en las zonas donde están ubicados los parques eólicos. Zhou et al. (2012) analizaron datos satelitales de ocho años que mostraron un aumento de la temperatura de hasta 0.72 °C por década en áreas cercanas a parques eólicos. Además, los autores observaron que este calentamiento es más frecuente durante la noche.

Los efectos adversos de proyectos de generación eólica son menores si los comparamos con los de otras acciones humanas o formas convencionales de generación de energía. Por ejemplo, las tasas de mortalidad de aves en Estados Unidos debido a la caza, la agricultura o el uso de pesticidas son mayores a las tasas debido a colisiones con turbinas de viento (S. Wang & Wang, 2015).

- **Energía obtenible del viento:**

La siguiente expresión muestra la energía máxima teórica que puede ser extraída de una masa de aire en movimiento:

Figura 1.

$$E_c = \frac{1}{2} mV^2$$

- E_c = Energía cinética [joule/s]
- m = Flujo de aire [kg/s]
- V = Velocidad del viento [m/s]

Elaboración propia a base de la información presentada en J. Moragues 2003

Suponiendo un área barrida por las palas o área de captación (A), perpendicular a la dirección del viento, el flujo de aire que circula a través de las mismas será:

Figura 2.

$$m = \delta AV$$

- m = Flujo de aire [kg/s]
- δ = Densidad del aire [kg/m³]
- V = Velocidad del viento [m/s]
- A = Área de captación [m²]

Elaboración propia a base de la información presentada en J. Moragues 2003

La energía teórica máxima por unidad de tiempo y de área ($A=1$) que podremos extraer de una masa de aire en movimiento, será entonces:

Figura 3.

$$P_m = \frac{1}{2} \delta V^3$$

- P_m = Potencia meteorológica [W/m²]
- δ = Densidad del aire [kg/m³]
- V = Velocidad del viento [m/s]

Elaboración propia a base de la información presentada en J. Moragues 2003

Betz demostró que la máxima energía recuperable o aprovechable, con un aerogenerador ideal, es igual a 16/27 es decir cerca del 60% de la energía total del viento; esto basados en el comportamiento del aire; como la velocidad del viento, luego de atravesar la superficie de captación, no es nula y aún conserva, la potencia dada por la expresión anterior no será totalmente aprovechable.

Tomando en cuenta que ningún sistema es ideal, para caracterizar el sistema es necesario conocer la eficiencia o rendimiento del rotor (η). La potencia obtenible por unidad de área de rotor, medida en W/m², puede expresarse como:

Figura 4.

$$P_a = \frac{1}{2} \eta \delta V^3$$

- P_a = Potencia por unidad de área [W/m²]
- δ = Densidad del aire [kg/m³]
- η = Eficiencia del rotor
- V = Velocidad del viento [m/s]

Elaboración propia a base de la información presentada en J. Moragues 2003

Es decir, la potencia total para el área generada por las palas al girar, $A = \pi R^2 = \pi D^2/4$, en W/m^2 , queda como:

Figura 5.

$$P_t = \frac{1}{2} \eta \delta (\pi D^2 / 4) V^3$$

- P_t = Potencia total [W/m²]
- δ = Densidad del aire [kg/m³]
- η = Eficiencia del rotor
- V = Velocidad del viento [m/s]
- D y R = Diámetro y Radio del rotor [m]

Elaboración propia a base de la información presentada en J. Moragues 2003

Teniendo en cuenta que la densidad media del aire es 1,25 kg/m³, al operarla en la ecuación por $\pi/4$ da aproximadamente 1. Por lo tanto, podemos expresar la potencia obtenible de una máquina eólica, tomando el diámetro en metros y la velocidad en metros por segundo, como:

Figura 6.

$$P = \frac{1}{2} \eta V^3$$

Elaboración propia a base de la información presentada en J. Moragues 2003

El rendimiento η depende del tipo de máquina y de las condiciones de operación.

El problema radica en que la velocidad del viento no es constante y, por lo tanto, es necesario conocer su evolución temporal para estimar la energía útil que una turbina eólica es capaz de entregar en un período determinado.

- **Principio operacional de las maquinas eólicas**

En esencia, los aerogeneradores también conocidos como molinos de viento o aeromotores funcionan convirtiendo la energía cinética del flujo del aire en energía mecánica. Existen dos tipos básicos de molinos, los de eje horizontal y los de eje vertical; el principio de operación de estos es esencialmente el mismo. La captación de la energía eólica, se realiza mediante la acción del viento sobre las **palas** o **hélices**, las cuales están unidas al eje a través de un elemento denominado **cubo** (conjunto conocido como **rotor**). Según el principio aerodinámico, el aire que es obligado a fluir por las caras superior e inferior de un perfil inclinado, genera una diferencia de presiones entre ambas caras, dando origen a una fuerza resultante (**R**) que actúa sobre el perfil. (J. Moragues 2003)

Descomponiendo esta fuerza en dos direcciones se obtiene:

- La fuerza de sustentación (**S**), de dirección perpendicular al viento
- La fuerza de arrastre (**A**), de dirección paralela al viento.

Para favorecer la circulación del aire sobre la superficie de las palas, evitar la formación de torbellinos y maximizar la diferencia de presiones, se eligen perfiles de pala con formas convenientes desde el punto de vista aerodinámico. Según como estén montadas las palas con respecto al viento y al eje de rotación, la fuerza que producirá el par motor será predominantemente la fuerza de arrastre o la de sustentación. En la mayoría de las

máquinas modernas la fuerza dominante es la de sustentación pues permite obtener mayores potencias por unidad de área del rotor, con menor peso y costo.

Por otra parte, si el viento no supera la velocidad de puesta en marcha (valor mínimo necesario para vencer los rozamientos y comenzar a producir trabajo útil) no es posible el arranque de un molino. Con velocidades mayores comenzará a girar entregando una potencia que responde a la ley del cubo de la velocidad. Esto será así hasta que se alcance la potencia nominal, generalmente la máxima que puede entregar, punto en que comienzan a actuar mecanismos activos o pasivo de regulación para evitar que la máquina trabaje bajo condiciones para las cuales no fue diseñada. Continuará operando a velocidades mayores, aunque la potencia entregada no será muy diferente a la nominal, hasta que se alcance la velocidad de corte donde, por razones de seguridad, se detiene.

- **Tipos de Aerogeneradores**

Desde los comienzos de la utilización de la energía eólica se han desarrollado gran cantidad de máquinas de los tipos más variados. Se dice que los pedidos de patentes superan a las de cualquier otro dispositivo que se haya ideado. De todos ellos, son relativamente pocos los que se generalizaron y alcanzaron escala de producción comercial.

Se acostumbra a clasificar las máquinas eólicas según la posición del eje de rotación con respecto a la dirección del viento, pudiéndolos dividir en dos categorías principales:

- Molinos de eje horizontal: Máquinas eólicas en las cuales el eje de rotación es paralelo a la dirección del viento.

- Molinos de eje vertical: Máquinas eólicas en las cuales el eje de rotación es perpendicular a la superficie terrestre y a la dirección del viento.

A continuación, se presenta un gráfico resumiendo las principales características de los rotores eólicos más utilizados:

Tabla 2. Características de rotores eólicos

Eje	Tipo de Rotor	Rendimiento Máximo	Características
HORIZONTAL	Holandés	0,17	30-60 kW Alto par de arranque Velocidades medias Diseño ineficiente de las palas 4 palas
	Multipala Americano	0,15	0,4-6 kW Alto par de arranque Bajas velocidades Muchas pérdidas 12-15 palas
	Perfil Aerodinámico (hélices)	0,47	0,5-3.200 kW Bajo par de arranque Altas velocidades Alto rendimiento 1 a 3 palas
VERTICAL	Savonius	0,3	0-1,5 kW No requiere ser orientado Alto par de arranque Bajas velocidades 2 a 4 palas
	Darrieus	0,35	5-500 kW No requiere ser orientado No arranca solo Altas velocidades Buen rendimiento 2 a 3 palas

Tomada de (J. Moragues 2003)

6.2 Identificación Del Consumo De Energía Eléctrica De Un Campo Petrolero Estándar

Con el fin de identificar y tipificar el consumo de energía eléctrica se deben reconocer las características del campo en estudio. Debido a la complejidad que presenta la adquisición de datos tan específicas en los campos petrolero, el presente trabajo tomara la información de un trabajo de grado titulado como “Análisis del uso de energía solar y eólica como fuente de energía eléctrica para la operación de un campo petrolero” (Álvarez Carreño, 2019); en este se utiliza un campo con una producción aproximada de 1 013 BOPD en el año 2 012 junto a una evaluación de eficiencia energética de consumos de energía eléctrica realizada en el mismo durante ese año, para la Caracterización general de un campo petrolero.

- **Características generales campo Petrolero**

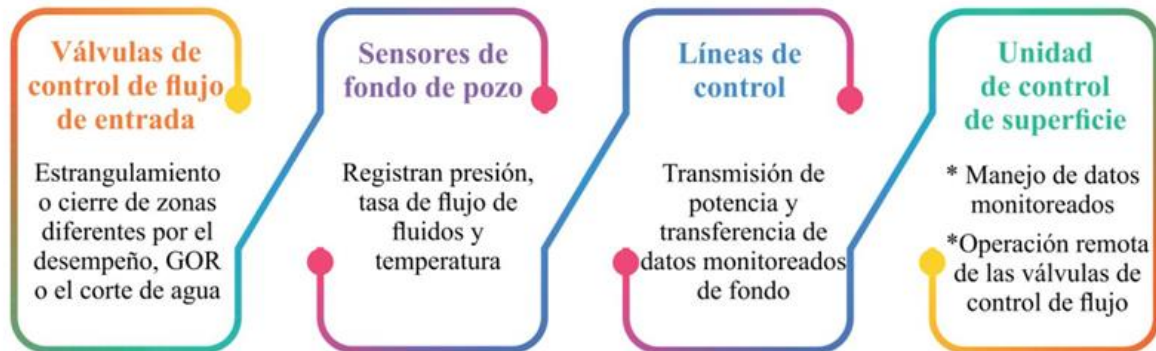
En esencia el objetivo de una instalación de producción petrolera es separar la corriente del pozo en sus tres componentes o fases (petróleo, gas y agua), y procesarlos en pro de obtener productos comercializables o eliminarlos de una manera ambientalmente aceptable (Arnold & Stewart, 2008). Generalmente la composición de un campo de petróleo se base en facilidades de producción asociadas al manejo de fluidos tales como recolección, tratamiento, separación y sistema de levantamiento artificial; urbanismos o en otras palabras un área civil con caminos de acceso, campamentos, y básicamente facilidades destinadas al cubrimiento de necesidades vitales y satisfacción de los trabajadores; adicionalmente debe contar con un área administrativa de manejo y control del campo en ocasiones lejos de la ubicación de este.

El reconocimiento de las características generales del campo es de suma importancia para la evaluación de los procesos que utilizan energía eléctrica. Y la determinación de factores críticos a la hora de evaluar las posibilidades de implementar energías alternativas en el mismo.

- **Área de producción:** Todo yacimiento cuenta con una energía natural que empuja los fluidos a superficie, en el preciso momento en que esta energía deja de ser suficiente, inicia la fase más costosa de la explotación del yacimiento; ya que, se recurre a métodos artificiales para continuar con la extracción del petróleo.
- **Área de tratamiento:** Esta área se compone de diferentes subáreas como área de proceso, almacenamiento y despacho; compuesta de diversas facilidades, se utilizan separadores, el gas es despedido de los líquidos y el agua libre se separa del aceite. El tratamiento del aceite también se puede realizar mediante el asentamiento o en tanques de cañón, que tienen botas de gas internas o externas. Cualquier sólido producido con la corriente del pozo también debe separarse, limpiarse y eliminarse de manera que no viole los criterios ambientales; se pueden utilizar tanques de sedimentación, hidrociclones, filtros, etc. (Arnold & Stewart, 2008).
- **Área civil:** Existen las funciones principales de una instalación de producción, pero es importante tener en cuenta que también existen sistemas auxiliares que soportan funciones que a menudo requieren más tiempo y esfuerzo de ingeniería que la producción misma; estos incluyen:
 - Desarrollar un sitio con carreteras y cimientos si la producción es en tierra, o con una plataforma, camión cisterna o alguna estructura si la producción es en alta mar.

- Proporcionar servicios públicos para que el proceso funcione: generar y distribuir electricidad; suministro y tratamiento de gas combustible o diésel; suministro de instrumentos y potencia de aire; tratamiento de agua y alimentación de calderas, etc.
 - Proporcionar instalaciones para el personal, incluidos cuartos, salas de control, talleres, grúas, unidades de tratamiento de aguas residuales, agua potable, etc.
 - Proporcionar sistemas de seguridad para detectar peligros potenciales, para combatir situaciones peligrosas cuando ocurran, y para protección y escape del personal (Arnold & Stewart, 2008).
-
- **Área de control o monitorización:** Esta área parte de las mediciones y muestreos precisos del crudo (Arnold & Stewart, 2008); verificando en perforación y en mantenimiento la presión de formación debajo de la presión ejercida por el gradiente hidrostático con el fin de evitar patada de pozo; además de evaluar continuamente la situación en la cual el pozo y el yacimiento se encuentra (Eck et al., 2000). Un sistema de monitorización permanente de pozo está compuesto por los elementos de la Figura 7, denominándose así pozo monitorizado. Esta monitorización se utiliza comúnmente en pozos multilaterales, donde válvulas hidráulicamente independientes controlan el flujo de cada lateral y en pozos de aguas profundas, donde a menudo las operaciones de intervención de pozos tienen costos prohibitivos. La monitorización permanente de pozos, ayuda a evitar altos costos de una intervención del pozo, también ayuda a maximizar la producción y a optimizar la recuperación (Schlumberger, 2019).

Figura 7.



Componentes de un sistema de monitoreo permanente de pozos. Toma de Álvarez Carreño, 2019 quien lo adaptó de Schlumberger, 2019

6.3. Factores Críticos Para La Implementación De La Energía Eólica

Diferentes estudios muestran que la implementación de la energía eólica depende de varios factores críticos, los cuales definen la eficiencia de generación de energía, tales como: el impacto visual, la velocidad del viento, distancia del parque eólico a las líneas de transmisión eléctrica, entre otros factores.

En este sentido, la literatura, la integración de Sistemas De Información Geográfica (SIG) con Métodos De Decisión Multicriterio (MDMC) ha sido empleada en diferentes estudios para determinar la ubicación de proyectos de energías renovables. En la siguiente tabla se puede observar un resumen de estos estudios y los factores que analizaron:

Tabla 3. Factores críticos según diferentes autores.

Autores	Tegou et al. - 2010	Atici et al. - 2015	Mentis et al. - 2015	Latinopoulos et al. (2015)	Siyal et al. - 2015	Höfer et al. - 2016	Noorollahi et al. -2016	Sanchez-Lozano et al. -2016
Metodología y técnica multi-criterio empleada	SIG-AHP	SIG-ELECTRE-AHP	SIG-AHP	SIG-WLC-AHP	SIG-AHP	SIG-AHP	SIG-WIO	SIG-FAHP-FTOPSIS
Distancia a áreas residenciales (urbanas y rurales)	X	X	X	X	X	X	X	X
Distancia autopistas, carreteras, caminos	X	X		X	X	X	X	X
Distancia a ferrovías		X		X	X	X	X	
Distancia a aeropuertos	X	X		X	X		X	X
Ríos, lagos, líneas costeras (cuerpos de agua)	X	X	X	X	X	X	X	X
Distancia a aéreas protegidas (naturales, militares)	X	X	X	X	X	X	X	X
Distancia a áreas de interés nacional (culturales, arqueológicos, religiosos, recreacionales)	X			X	X	X	X	X
Fallas		X					X	
Distancia a líneas de transmisión eléctrica	X	X	X		X	X	X	X
Velocidades de viento (Potencial eólico)	X	X	X	X	X	X	X	X
Elevación		X	X		X		X	
Pendiente (%)	X	X	X	X	X	X	X	X
Usos de la tierra	X		X	X		X		
Demanda de electricidad	X							
Factor de capacidad		X						
Distancia a sitios de minería		X						
Distancia a estaciones de TV o radio		X						X

Tomada de B. Guerrero 2029

Estos estudios presentan diferentes metodologías de acuerdo con el tipo de energía o la zona de estudio. En general, los resultados obtenidos corresponden a mapas de la distribución de zonas factibles para instalar turbinas de viento. Las zonas potenciales son elegidas conforme a criterios de restricción y evaluación y su importancia. La selección de estos criterios debe ser analizada cuidadosamente para cada área de estudio y los resultados obtenidos dependen directamente de los criterios seleccionados. Dado el uso de los SIG la calidad de los resultados depende de la calidad de los datos de entrada utilizados, en cuanto a resolución o escala, procedencia, distribución espacial, concordancia temporal y consistencia lógica.

En la Tabla 3 se observan los criterios de restricción y evaluación elegidos por diferentes autores en trabajos donde se integran los SIG con los MDMC para seleccionar sitios apropiados en donde ubicar proyectos de energías renovables, además se muestran las metodologías utilizadas en los estudios. Todo estudio de selección y evaluación de áreas con potencial eólico

debe tener en cuenta, además de los impactos ambientales, aspectos técnicos y económicos (Tegou et al., 2010).

Desde el punto de vista tecno-económico, presentados en la tabla anterior, coinciden en que la velocidad promedio del viento es uno de los criterios más importantes. A mayores velocidades de viento, mayor rentabilidad económica podrán tener los parques eólicos. En algunos estudios se excluyeron áreas con velocidades de viento menores a 6 m/s (Höfer et al., 2016). La pendiente del terreno es otro criterio tecno-económico ampliamente utilizado (ver Tabla 3). Esto debido a las dificultades y altos costos que conllevaría construir en zonas con altas pendientes. Los autores de los estudios revisados consideraron zonas con valores de pendientes de hasta 30%. La distancia a las carreteras o caminos también se ha tenido en cuenta para seleccionar la ubicación de parques eólicos. En la mayoría de los estudios las zonas más alejadas de las vías eran consideradas menos viables debido a los altos costos de construcción. La densidad del aire es inversamente proporcional a la altitud, es por esto por lo que zonas muy elevadas tendrían un menor potencial eólico y por lo tanto son consideradas menos viables. Aunque este es un factor técnico muy importante no todos los estudios lo tuvieron en cuenta. La distancia del parque eólico a las líneas de transmisión eléctrica es otro de los criterios económicos señalados en la literatura.

Los parques eólicos deberían estar situados cerca de las líneas de transmisión para evitar sobre costos del proyecto. Tegou, Polatidis y Haralambopoulos (2010) desarrollaron una metodología que integraba SIG con el método AHP por sus siglas en inglés (Analysis Hierarchy Process o en español Proceso de Análisis Jerárquico) para situar granjas de viento en la isla griega de Lesbos. Los autores evaluaron la importancia de los criterios de acuerdo con su experiencia. En este trabajo se realizó un análisis de sensibilidad en donde se evaluaron cuatro

escenarios. En cada escenario variaron los pesos asignados a los criterios. Los mapas resultantes para los cuatro escenarios presentaron cambios considerables. Esto demostró que los pesos asignados tienen influencia directa en el mapa de factibilidad como era de esperarse.

Por otro lado, Uyan (2013) determinó sitios viables para implementar granjas solares en una región de Turquía usando SIG y el AHP. El autor estableció cinco criterios de restricción y evaluación y asignó pesos a cada uno por medio del método AHP. Las áreas viables fueron clasificadas de acuerdo con un índice de factibilidad.

Atici, Simsek, Ulucan y Tosun (2015) propusieron una metodología de dos etapas para determinar zonas viables para proyectos de generación eólica en el occidente de Turquía. El área de estudio fue dividida en celdas y estudiada a nivel micro (celda) y macro (conjunto de celdas). Los MDMC fueron usados para clasificar y organizar las zonas a través de los criterios seleccionados. En la etapa de evaluación, el método de Eliminación y Selección Expresando la Realidad (ELECTRE) es utilizado para realizar los análisis a nivel micro, ELECTRE III para clasificar y ELECTRE- TRI para organizar. A nivel macro, el método de evaluación utilizado fue el SMAA-TRI (Stochastic Multiobjective Acceptability Analysis). Estos métodos requieren de quien toma la decisión, los valores límite de aceptabilidad. Dichos límites fueron asignados de acuerdo con la opinión de una empresa contratista. Los pesos de los criterios fueron calculados por el método AHP. Los resultados obtenidos mostraron consistencia entre los métodos utilizados. En este trabajo la integración de la empresa de consultores y la experiencia de los autores al seleccionar los criterios de restricción y sus valores límite es importante para modelar de manera más adecuada el problema. Sin embargo, la elección de valores límite conservadores puede eliminar del análisis zonas con alto potencial.

Noorollahi et al. (2016) plantearon una metodología para evaluar la cantidad del recurso eólico y encontrar la distribución de áreas potenciales para ubicar un parque eólico en la provincia de Markazi en el occidente de Irán. Para ello integraron los SIG con métodos analíticos de restricción y clasificación. Para la realización del mapa final de clasificación superpusieron las capas de mapas generadas a partir de cada criterio por medio del método WIO (Weighted Index Overlay). Las zonas de factibilidad para granjas de viento resultantes fueron clasificadas en tres categorías de acuerdo con su prioridad. En este estudio la selección de los criterios de restricción fue basada en estudios previos y en las leyes y regulaciones locales y nacionales en la provincia de Markazi e Irán, respectivamente. Sin embargo, no es claro cómo realizaron la asignación de pesos a los criterios tecno-económicos usados para evaluar las zonas ni durante la aplicación del método WIO.

Tabla 3. Factores críticos según diferentes autores.

Autores	Tegou et al. - 2010	Atici et al. - 2015	Mentis et al. - 2015	Latinopoulos et al. (2015)	Siyal et al. - 2015	Höfer et al. - 2016	Noorollahi et al. - 2016	Sanchez-Lozano et al. - 2016
Metodología y técnica multi-criterio empleada	SIG-AHP	SIG-ELECTRE-AHP	SIG-AHP	SIG-WLC-AHP	SIG-AHP	SIG-AHP	SIG-WIO	SIG-FAHP-FTOPSIS
Distancia a áreas residenciales (urbanas y rurales)	X	X	X	X	X	X	X	X
Distancia autopistas, carreteras, caminos	X	X		X	X	X	X	X
Distancia a ferrovías		X		X	X	X	X	
Distancia a aeropuertos	X	X		X	X		X	X
Ríos, lagos, líneas costeras (cuerpos de agua)	X	X	X	X	X	X	X	X
Distancia a aéreas protegidas (naturales, militares)	X	X	X	X	X	X	X	X
Distancia a áreas de interés nacional (culturales, arqueológicos, religiosos, recreacionales)	X			X	X	X	X	X
Fallas		X					X	
Distancia a líneas de transmisión eléctrica	X	X	X		X	X	X	X
Velocidades de viento (Potencial eólico)	X	X	X	X	X	X	X	X
Elevación		X	X		X		X	
Pendiente (%)	X	X	X	X	X	X	X	X
Usos de la tierra	X		X	X		X		
Demanda de electricidad	X							
Factor de capacidad		X						
Distancia a sitios de minería		X						
Distancia a estaciones de TV o radio		X						X

Tomada de B. Guerrero 2029

Otros autores propusieron metodologías en donde representan los criterios como conjuntos difusos (Aydin et al., 2010; Latinopoulos & Kechagia, 2015; Sánchez-Lozano et al., 2016). En un conjunto difuso a cada elemento del universo se le asigna un grado de pertenencia a dicho conjunto. Este grado de pertenencia es un número en el intervalo $[0,1]$ y está definido por una función de pertenencia (Zadeh, 1965). Mientras el grado de pertenencia sea más cercano a 1 más pertenecerá el elemento al conjunto y mientras sea más cercano a 0 menos pertenecerá el elemento al conjunto.

Para representar los criterios como conjuntos difusos los autores definieron funciones lineales de pertenencia. Latinopoulos y Kechagia (2015) en su análisis no tuvieron en cuenta la distancia a las líneas de transmisión de energía eléctrica, un criterio importante en este tipo de estudios. Además, no se identifica que métodos usaron para la asignación de los grados de pertenencia, ni para definir los parámetros límite en las funciones de pertenencia definidas. En este trabajo para seleccionar las zonas con mayor prioridad aplicaron una Combinación Lineal Ponderada (WLC por sus siglas en inglés), el método consiste en asignar pesos a cada atributo de acuerdo con su importancia, para luego calcular un índice de factibilidad. El cálculo de los pesos se realizó proponiendo tres escenarios. En el escenario 1 asumieron que los criterios tienen igual importancia y por lo tanto los mismos pesos. En el escenario 2 priorizaron los criterios socioambientales y en el escenario 3 prevalecieron los criterios técnicos y económicos. Los pesos para cada escenario fueron calculados por medio del método AHP para los escenarios 2 y 3. Los valores de las comparaciones pareadas fueron asignados de acuerdo con la experiencia del autor teniendo en cuenta el escenario estudiado.

Finalmente, los mapas de factibilidad para los tres escenarios fueron creados. Como se mencionó anteriormente no se tuvo en cuenta la distancia a las líneas de transmisión, este

aspecto, de no analizar la distancia a las líneas de transmisión puede generar que zonas muy lejos de la red sean calificadas como viables, aumentando el costo de transmisión de un hipotético parque eólico. En este trabajo no se tienen en cuenta la distancia a zonas urbanas como criterio de evaluación sino solo de restricción. Es significativo tener en cuenta este criterio para la evaluación debido a los efectos generados a las comunidades, como el impacto visual y la contaminación auditiva. Otra limitación en este estudio es que en los casos en donde se aplica el método AHP no integran la opinión de personal experto para determinar estos parámetros.

Como se puede observar en la Tabla 3, en la literatura no existe un consenso en torno a la definición de los criterios o su clasificación en importancia. Sin embargo, se puede notar que el método AHP es el MDMC más utilizado. La mayoría de los estudios revisados presentan una deficiencia común en la asignación de pesos, que representan la importancia relativa de cada criterio, y es que los pesos son asignados de acuerdo con la experiencia de los autores. La asignación de los pesos, al igual que la selección de los criterios de restricción y/o valores límite, debe hacerse teniendo en cuenta la opinión de expertos. Por ejemplo, Sánchez-Lozano, García-Cascales y Lamata (2016) evaluaron las alternativas para situar parques eólicos utilizando la teoría de conjuntos difusos por medio el método FTOPSIS (Fuzzy Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution). Los autores realizaron encuestas a cinco expertos para la asignación de pesos durante la aplicación del método FAHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process). Höfer, Sunak, Siddique y Madlener (2016) elaboraron entrevistas a un grupo de 22 expertos relacionados con el sector eléctrico y eólico. Entre los que se encontraban empresarios, científicos y asociaciones ambientales. A estos se les solicitó llenar una encuesta con las comparaciones pareadas de los criterios seleccionados en su investigación.

6.4 Propuesta Plan Estratégico General Para Viabilizar Proyectos De Energía Eolica

Aunque existen diversas metodologías que permiten viabilizar la implementación de proyectos de energía eólica, el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP por sus siglas en inglés) fue desarrollado por Saaty (1980) y es uno de los MDMC más utilizados en la ubicación de proyectos de energía eólica de acuerdo con la revisión de la literatura. El AHP es un método diseñado para resolver problemas complejos que implican múltiples criterios u objetivos (Tegou et al., 2010). En la aplicación de este método quien toma la decisión debe comparar la importancia de un criterio con respecto a otro. Con esto se obtiene una jerarquización de las alternativas posibles. Para aplicar el AHP se requiere: a) definir el objetivo del problema, así como los criterios y las alternativas. Además, se requiere estructurar el problema de decisión como una jerarquía, b) crear una matriz de comparación por pares, en donde se compara la importancia de un criterio frente a otro, c) calcular el vector de prioridades que indica la importancia relativa de los diferentes criterios y d) validar la consistencia de los resultados (R. W. Saaty, 1987; T. L. Saaty, 1980).

La comparación por pares es la base fundamental del AHP. De acuerdo con Saaty (1980), para n criterios es posible construir una matriz $\mathbf{A} = [a_{ij}]$ con $i, j = 1, 2, \dots, n$. El valor de cada a_{ij} corresponde a la importancia relativa del criterio $C(i)$ (fila i) sobre el criterio $C(j)$ (columna j) según la escala fundamental propuesta por Saaty (ver Tabla 4). Cuando $i = j$, el valor de a_{ij} será igual a 1 ya que estamos comparando un criterio con el mismo.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & 1 & a_{2n} \\ \vdots & \dots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Tabla 4. Escala fundamental de acuerdo con Saaty.

Intensidad de la importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Dos criterios o elementos contribuyen de igual forma al cumplimiento del objetivo.
3	Importancia moderada de un criterio sobre otro	La experiencia y el juicio favorecen levemente a una actividad sobre la otra
5	Importancia esencial o fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre la otra
7	Importancia muy fuerte o demostrada	Una actividad es mucho más favorecida que la otra y su predominancia se demostró en la practica
9	Importancia extrema o absoluta	La evidencia que favorece una actividad sobre la otra es absoluta y totalmente clara.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes	Cuando es necesario un término medio entre dos de las intensidades.

Fuente: R. W. Saaty (1987).

El AHP está basado en cuatro axiomas: el axioma del recíproco, el axioma de homogeneidad, el axioma de síntesis y el axioma de las expectativas (R. W. Saaty, 1987). El axioma del recíproco dice que la matriz $A = [a_{ij}]$ se construye a partir de comparaciones por pares recíprocas, es decir, $a_{ij} = 1/a_{ji}$. El axioma de homogeneidad se refiere a que los elementos que se comparan son del mismo orden o jerarquía. El axioma de síntesis define que un nivel inferior depende de un nivel superior, y a su vez que un nivel superior no depende de un nivel inferior. El axioma de las expectativas postula que los individuos que realizan las comparaciones deben asegurarse de que sus ideas sean representadas adecuadamente por el modelo (R. W. Saaty,

1987). Luego de construir la matriz de comparación por pares se procede a calcular el vector de prioridades. El vector de prioridades indica la influencia de un criterio sobre el objetivo global, en estos casos la ubicación óptima de un parque eólico. Existen múltiples formas de calcular este vector, una de ellas es usando el método del vector propio principal w tal que:

$$A \times w = \lambda_{\max} \times w, \text{ donde } \lambda_{\max} \text{ es el máximo valor propio.}$$

Finalmente se verifica la consistencia de la matriz de comparaciones pareadas. La matriz A es consistente si $a_{ij} \cdot a_{jk} = a_{ik}$ para $i, j, k = 1, 2, \dots, n$. Para validar la consistencia razonable de los juicios en la matriz de comparación por pares se calcula el índice de consistencia (IC) y la razón de consistencia (RC). La razón de consistencia (RC) se calcula a partir de un índice de consistencia aleatorio (IA) que varía de acuerdo con el tamaño de la matriz A (ver Tabla 5). La matriz se considera consistente si $RC < 0.1$, en caso contrario se considera inconsistente y se aplica la corrección de consistencia planteada por Saaty (T. L. Saaty, 2003).

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad (2)$$

Tabla 5. Índice de consistencia aleatoria.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
IA	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,4	1,45	1,49	1,52	1,54

Fuente: R. W. Saaty (1987).

6.5 Estimación de potenciales eólicos

La estimación de potenciales eólicos está basada en observaciones meteorológicas de la velocidad del viento durante largos periodos de tiempo. Para una apropiada estimación del potencial eólico de una zona es necesario conocer la distribución de frecuencia de la velocidad del viento. En la literatura, múltiples funciones de densidad de probabilidad (FDP) han sido utilizadas en la estimación de potenciales eólicos. Entre estas las más utilizadas son las distribuciones de Weibull y Rayleigh (Allouhi et al., 2017; Mentis, Hermann, Howells, Welsch, & Siyal, 2015).

En Colombia, Pinilla (2008) estima que se pueden instalar 20 GW en parques eólicos en la región del Caribe y que podrían ser más de 50 GW si se expandieran a zonas de playa o marinas. Otros estudios estimaron el potencial eólico total de Colombia en aproximadamente 27 GW (Quijano H, Botero B y Domínguez B, 2012). Ordóñez, Osma, Vergara y Rey (2014) evaluaron el potencial eólico y solar en la ciudad de Bucaramanga con base en observaciones realizadas durante tres años (2010-2012). Para ello, tuvieron en cuenta mediciones de la velocidad del viento y demostraron la inviabilidad económica de la zona para la instalación de aerogeneradores. Realpe, Diazgranados y Acevedo (2012) realizaron modelos y simulaciones de producción de energía a partir del viento en áreas desconectadas (ZNI) donde la velocidad media anual del viento es superior a 4 m/s. Las áreas de estudio se encuentran en los departamentos de Boyacá, Nariño, Huila, La Guajira y en las islas de San Andrés y Providencia. Los resultados

muestran que la mayor producción de energía se daría en las estaciones Gacheneca (Boyacá), El Embrujo (Providencia) y Sesquicentenario (San Andrés).

7. CONCLUSIONES

- Los factores medio ambientales, la ubicación de campo petrolero y la relación entre el requerimiento energético y el potencial de generación, solo los principales factores que determinan la viabilidad de implementar la energía eólica en campos petroleros.
- A día de hoy, los métodos analíticos y de multi-criterio, siguen siendo los principales actores en la determinación de la viabilidad técnica y la estimación de potenciales de generación de energía eólica.
- Colombia tiene gran potencial para desarrollar proyectos que fomenten la coexistencia entre las energías tradicionales y las energías renovables en proyectos onshore u offshore.
- El paso a paso para determinar la viabilidad de un proyecto que busque la implementación de energía eólica en un campo petrolero, tiene una estructura de pirámide invertida. Donde se inicia con 2 procesos separados que convergen y resultan en la viabilización o no del proyecto.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- K. R. Andrews, *The concept of corporate strategy*. Homewood, Ill: Richard D. Irwin, 1980.
- Martínez, T. E. A. (2001). METODOLOGIA PARA ELABORAR UN PLAN ESTRATEGICO Y REDISEÑO ORGANIZACIONAL DE UNA UNIDAD DE PRODUCCION AGROPECUARIA. *Revista Mexicana de Agronegocios*, (9).

- Cedecom. (Productor). 2019. ENERGÍAS RENOVABLES.
<https://www.youtube.com/watch?v=fAc2QSk07D0>
- Faro. (Productor). 2000. ENERGÍAS MAREOMOTRIZ.
<https://www.youtube.com/watch?v=x0f-uPeB9P4>
- UNIVERSIDAD AMÉRICA. EXPEU ENERGIAS UAMERICA. BOGOTÁ. 2020
- Duque Escobar, G. (2022). La geotermia: Alternativa energética renovable y amigable. Instituto de Estudios Ambientales IDEA - Sede Manizales.
- Plata, K. J. (2017). Planteamiento de alternativas energéticas para Campo Castilla - Ecopetrol. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12749/1478>.
- Yang, Y., Huo, Y., Xia, W., Wang, X., Zhao, P., & Dai, Y. (2017). Construction and preliminary test of a geothermal ORC system using geothermal resource from abandoned oil wells in the Huabei oilfield of China. *Energy*, 140, 633–645.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.013>
- Xin, S., Liang, H., Hu, B., & Li, K. (2012). A 400 kW geothermal power generator using co-produced fluids from Huabei oilfield. *Transactions - Geothermal Resources Council*, 36 1, 219–223
- Li, K., Zhang, L., Ma, Q., Liu, M., Ma, J., & Dong, F. (2007). Low temperature geothermal resources at Huabei oilfield, China. *Transactions - Geothermal Resources Council*, 31, 609–613.
- Equinor. (10/08/2021) Equinor.com <https://www.equinor.com/news/archive/2020-04-08-hywind-tampen-approved>

- Ecopetrol. (18/10/2019) Ecopetrol y AES pusieron en operación Parque Solar Castilla https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/?page=detalleNoticias&urile=wcm:path%3A%2FEcopetrol_WCM_Library%2FAS_en%2FNoticias%2Fecopetrol-launches-ronda-campos-2020
- halconesypalomas.com (16/06/2021) Segunda apuesta de generación de energía geotérmica de Parex en el Campo Rumba en Casanare <https://www.halconesypalomas.com/2021/06/16/segunda-apuesta-degeneracion-de-energia-geotermica-de-parex-en-el-campo-rumba-en-casanare/>
- piensageotermia.com. (28/03/2021) Inaugurada primera planta de energía geotérmica en Colombia <https://www.piensageotermia.com/inaugurada-primera-planta-de-energia-geotermica-en-colombia/>
- piensageotermia.com. (07/10/2021) Reutilización planificada de pozos de petróleo para geotermia en Nottinghamshire <https://www.piensageotermia.com/reutilizacion-planificada-de-pozos-de-petroleo-para-geotermia-en-nottinghamshire/>
- elcolombiano.com. (21/07/2022) Las cuatro petroleras que apuestan por las energías renovables <https://www.elcolombiano.com/negocios/las-cuatro-petroleras-que-apuestan-por-las-energias-renovables-KK18121803>
- Saidur et al, Environmental impact of wind energy . 2011
- Wang, S., & Wang, S. (2015). Impacts of wind energy on environment: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 437-443. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.137>

- Loss, S. R., T. Will, and P. P. Marra. 2013. The impact of free ranging domestic cats on wildlife of the United States. *Nature Communications* 4:1396. <https://doi.org/10.1038/ncomms2380>
- Dai et al., 2015. Ambient air pollution, temperature and out-of-hospital coronary deaths in Shanghai, China, *Environmental Pollution*, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.03.050>.
- Van den Berg, H. (2004) IPM Farmer Field Schools: A Synthesis of 25 Impact Evaluations. Global IPM Facility, Rome.
- J. Moragues et al, ENERGIA EOLICA. IAE- Instituto Argentino de la Energía, 2023
- Sojka, M., Wrózyński, R. y Pyszny, K. (2020). Aplicación de software gráfico 3D y SIG en la evaluación visual de impacto de líneas aéreas de transmisión de alta tensión. Web de Conferencias E3S .
- Abbasi, S.A. & Tabassum-Abbasi, & Abbasi, Tasneem, 2016. "Impact of wind-energy generation on climate: A rising spectre," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier,
- Wang, C. y Prinn, RG (2009) Impactos climáticos potenciales y confiabilidad de los parques eólicos a muy gran escala. Informe No. 175, MIT, Cambridge.
- Zhou, T., M.A. Geller, and W. Lin, 2012: An observational study on the latitudes where wave forcing drives Brewer-Dobson upwelling. *J. Atmos. Sci.*, **69**, 1916-1935, doi:10.1175/JAS-D-11-0197.1.
- Arnold, K. y Stewart, M. (2008) Operaciones de producción en superficie. 3.^a edición, Gulf Professional Publishing, Texas.

- R. W. SAATY (1997) THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS-WHAT IT IS AND HOW IT IS USED
- Saaty, T.L. (1980) The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill, New York.
- Zhou, L., Tian, Y., Baidya Roy, S., Thorncroft, C., Bosart, L. F., & Hu, Y. (2012). Impacts of wind farms on land surface temperature. Nature Climate Change, 2(7), 539–543. <https://doi.org/10.1038/nclimate1505>
- Tegou, L.-I., Polatidis, H., & Haralambopoulos, D. A. (2010). Environmental management framework for wind farm siting: Methodology and case study. Journal of Environmental Management, 91(11), 2134–2147. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.05.010>
- Uyan, M. (2013). GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapinar region , Konya / Turkey. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 28, 11– 17. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.042>
- Noorollahi, Y., Yousefi, H., & Mohammadi, M. (2016). Multi-criteria decision support system 89 for wind farm site selection using GIS. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 13, 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2015.11.007>