

Estudio de factibilidad de la energía eólica en Boyacá

Wind Power Feasibility Study in Boyacá

Juan Pablo González G.
Ingeniero Civil
Universidad Santo Tomás Tunja
Correo-e: juanp.gonzalezg@usantoto.edu.co

Resumen

En nuestro medio las fuentes de energía eléctrica no son óptimas por los materiales y cambios que se hacen al medio ambiente, por ende, es necesario buscar metodologías que no afecten e influyan en el cambio climático. Para ello, se debe utilizar energías renovables como el viento. El departamento de Boyacá posee una topografía de montañas y vientos grandilocuentes lo cual lo hace una condición favorable en recursos renovables de energía asociados al viento, contando con velocidades de vientos iguales o superiores a 5 m/s en varios meses del año es por esto que representa una opción idónea para la implementación de nuevas Fuentes No Convencionales de Energía Renovable como lo es la energía eólica, gracias a que contribuye a mejorar los niveles de contaminación y a amortiguar los cambios climáticos efectuados desde cierta responsabilidad por el ser humano. Se identificaron oportunidades de desarrollo eólico mediante el planteamiento de cuatro parques eólicos en distintos municipios del departamento boyacense con capacidad total instalada de 52,5 MW mediante 21 aerogeneradores de potencia nominal de 2,5 MW año con factores de carga superiores al promedio global ponderado del 2017 para la energía eólica "onshore". En la evaluación de los proyectos se obtienen indicadores financieros positivos que hacen atractivos los proyectos generando empleos, calidad de vida y yendo de la mano con el medio ambiente para el Departamento de Boyacá.

Palabras clave: Medio ambiente, energía eólica, fuentes de energía, vientos.

Abstract:

In our environment, electrical energy sources are not the most optimal due to the materials and changes made to the environment, therefore, it is necessary to look for methodologies that do not affect and influence climate change, for this, renewable energies such as the wind, The Department of Boyacá has a topography of mountains and bombastic winds, which makes it a favorable condition in renewable energy resources associated with the wind, with wind speeds equal to or greater than 5 m/s in several months of the year. For this reason, it represents an ideal option for the implementation of new Non-Conventional Sources of Renewable Energy such as wind energy, thanks to the fact that it contributes to improving pollution levels and mitigating climate changes made from a certain responsibility by human beings. Opportunities for wind development were identified through the proposal of four wind farms in different municipalities of the Boyacá Department with a total installed capacity of 52.5 MW through 21 wind turbines of nominal power of 2.5 MW per year with load factors higher than the global weighted average of the 2017 for onshore wind energy. In the evaluation of the projects, positive financial indicators are obtained that make the projects attractive, generating jobs, quality of life and going hand in hand with the environment for the Department of Boyacá.

Keywords: Environment, wind energy, energy sources, winds.

Para citar este artículo: González G., J.P. "Estudio de Factibilidad de la Energía Eólica en Boyacá" In L'Esprit Ingenieux. Vol. 12-1, pp. 54-69.

1. INTRODUCCIÓN

Desde los inicios de la civilización, la humanidad ha utilizado la energía eólica para producir potencia mecánica. Anteriormente lo hacían activando un sistema de propulsión de acción como lo es la vela y hace dos milenios lo hacían activando turbinas de acción como lo son los molinos de vientos. La vela como sistema propulsivo de embarcaciones y el molino de viento como motor industrial se desarrollaron sobre bases netamente empíricas y se perfeccionaron en numerosas variantes. No obstante, se dejaron de utilizar para la mayoría de las aplicaciones productivas cuando el desarrollo de las máquinas térmicas permitió al hombre aprovechar las grandes reservas de energía química almacenadas en los combustibles fósiles, convirtiéndolo a fuerza motriz y energía eléctrica. El problema empezó cuando se descubre que estas fuentes de energía se encuentra en una cantidad limitada y una vez se consume en su totalidad, no se puede sustituir, ya que no existe una forma de producción o una extracción viable (Universidad Libre, 2020). Es allí donde nos devolveremos a la evolución del aprovechamiento de la energía eólica, en donde tuvo que intervenir Poul La Coure, un meteorólogo en donde su pasión era el viento. Él construyó su propio túnel de viento y usaba la electricidad producida por sus turbinas para obtener hidrógeno de la electrólisis y alimentar las lámparas de su escuela, donde enseñaba cómo producir electricidad del viento. Pues bien, los daneses fueron pioneros en este campo, en la década de 1890. La Coure construyó varios generadores de gran tamaño en su escuela de Askov Folk. En 1904 fundó la Sociedad de Electricistas del Viento y publicó una revista. Gracias a sus esfuerzos, en 1918 había unas 120 empresas en Dinamarca que se proveían de electricidad, un 3 por ciento del consumo total del país. Una cierta tendencia a la baja quedó compensada por las penurias de la Segunda Guerra Mundial, en los años cuarenta del siglo XX, la compañía F. L. Smith empezó a construir aerogeneradores de dos y de tres palas, siendo los de tres más eficientes. En 1950, el ingeniero Johannes Jul., alumno de La Coure, inventó un sistema para obtener corriente alterna de los aerogeneradores. Su diseño más conocido es el tripala Gedser de 200 Kw, construido entre 1956-1957, muy por encima ya de los 12 Kw que obtenía Brush en Cleveland. Incluso la NASA utilizó este modelo para el nuevo programa estadounidense de energía eólica. La crisis del petróleo de 1973 obligó a construir grandes aerogeneradores. En los años 1980 se instalaron miles de ventiladores gigantes en California, pero el que más energía obtiene del viento en relación con su consumo sigue siendo Dinamarca, con unos 5.500 aerogeneradores que producen unos 3.000 Mw. En la actualidad se fabrican turbinas tan grandes que son capaces de producir ellas solas hasta 2,5 Mw de energía, con rotores de hasta 80 metros de diámetro (CurioSfera, 2020). Por otra parte, según la historia y la información recopilada, los cambios climáticos y ambientales que ha hecho el ser humano en el transcurrir de su historia demuestra que debemos pausar y pensar en otras fuentes inagotables como lo es la energía eólica. Por tanto, se opta por estudiar y comparar las ventajas de utilizar los diferentes tipos de energías alternativas (eólica) en el departamento de Boyacá. Pues bien, se ha venido estudiando acerca de la factibilidad de la energía renovable, no ha salido a flote gracias a la mediocridad y falta de interés por parte del gobierno. Otro factor ha sido el comportamiento de los vientos ya que no son constantes a lo largo del tiempo, de ahí que no se haya dado por aceptada su factibilidad. El fin de este proyecto es basarse en identificar las ventajas y desventajas en la implementación de la energía eólica para el departamento de Boyacá e indagar qué factores afectarían en el ámbito ambiental por parte de la construcción en estas desde el punto de ingeniería civil. Por medio de fuentes secundarias e información de estudios realizados anteriormente este proyecto es netamente investigativo por ende no implica la implementación de ningún equipo o técnica para la medición y la toma de datos en campo.

2. MÉTODOS ESTANDARIZADOS PARA LA MEDICIÓN DE PARÁMETROS

Para nuestro proyecto se van a realizar la medición de la velocidad del viento y Dirección del viento. Para la velocidad del viento se pueden utilizar dos técnicas, la más común es por medio del uso mecánico, donde por medio de aspas separadas en ángulo de 120°, por acción del viento se mueven alrededor del eje vertical activando un contador de revoluciones para así poder determinar la velocidad del viento exacta. En segunda opción, podemos utilizar la escala de Beaufort para indicar la dirección y la intensidad medida en nudos del viento. Este método cuantifica la velocidad desde 0 hasta 12, donde 0 se denomina calma total y su velocidad es menor a 1,9 Kilómetros por hora y 12 se denomina fuerza de un huracán con velocidades superiores a 119 Kilómetros por hora en adelante (Rico, 2018).

2.1 Conceptos

Algunos conceptos que nos permitirán familiarizarnos con la energía eólica y a comprender de qué trata el trabajo:

Aerogenerador: es un dispositivo mecánico que convierte la energía del viento en electricidad. Sus precedentes directos son los molinos de viento que se empleaban para la molienda y obtención de harina. En este caso, la energía eólica, en realidad la energía cinética del aire en movimiento mueve la hélice y, a través de un sistema mecánico de engranajes, hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador trifásico, que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica. Los aerogeneradores se agrupan en parques eólicos distanciados unos de otros, en función del impacto ambiental y de las turbulencias generadas por el movimiento de las palas (Moreno-Cortés, 2013).

Aspas: la parte de la turbina que recibe directamente la energía del viento; los diseños avanzados están orientados a aprovechar al

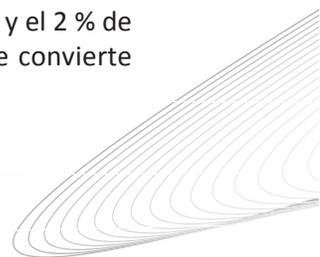
máximo esta energía. Un rotor está compuesto, generalmente, por dos o tres aspas cuyo tamaño comercial oscila entre los 25 y 50 metros y pueden pesar más de 900 Kg cada una (Universidad Nacional de Colombia, 2018).

Combustibles Fósiles: sustancias combustibles procedentes de residuos vegetales o animales almacenados en periodos de tiempo muy grandes. Son el petróleo, gas natural, carbón, esquistos bituminosos, pizarras y arenas asfálticas (Benavides, 2018).

Controles: los diversos sistemas de control son coordinados y monitoreados por una computadora y puede tenerse acceso a ellos desde una ubicación remota. El control de ajuste gira las aspas para mejorar el desempeño a diferentes velocidades de viento. Otro control pone a la turbina en la dirección del viento. Los controles electrónicos mantienen un voltaje de salida constante ante los cambios de velocidad. El generador de velocidad variable es una parte importante que permite diseñar sistemas efectivos desde el punto de vista económico (Guerrero Hoyos, 2019).

Energías Renovables: son aquellas que se producen de forma continua y son inagotables a escala humana. El sol está en el origen de todas ellas porque su calor provoca en la Tierra las diferencias de presión que dan origen a los vientos, fuente de la energía eólica. El sol ordena el ciclo del agua, causa la evaporación, que provoca la formación de nubes y, por tanto, las lluvias. También del sol procede la energía hidráulica. Las plantas se sirven del sol para realizar la fotosíntesis, vivir y crecer. Toda esa materia vegetal es la biomasa. Por último, el sol se aprovecha directamente en las energías solares, tanto la térmica como la fotovoltaica (Guerrero Hoyos, 2019).

Eólica: la energía eólica es la energía producida por el viento. Como la mayor parte de las energías renovables, la eólica tiene su origen en el sol, ya que entre el 1 y el 2 % de la energía proveniente del sol se convierte



en viento, debido al movimiento del aire ocasionado por el desigual calentamiento de la superficie terrestre (Benavides, 2018).

Generador: aparato que produce energía eléctrica a partir de otro tipo de energía; puede ser de tipo mecánico (alternador y dinamo) o químico (pila) La alta velocidad de rotación que se obtiene del sistema de transmisión se conecta al generador que produce electricidad a partir del movimiento, como en los tradicionales sistemas de vapor.

Mapa Eólico: mapa en donde se representan sobre un determinado territorio velocidades medias del viento, direcciones predominantes, ráfagas, etc. Las líneas del mapa que unen puntos de igual velocidad media se denominan isoventas.

Rotor: está compuesto por las aspas y el eje al que están unidas.

Torre: existen dos tipos de torres; de mono tubo o tubo sólido de acero y de armadura. Las alturas varían con el tamaño del rotor entre los 25 y 50 m.

Transmisión: la potencia se transfiere mediante el eje de rotación a una serie de engranes, o transmisión, que aumentan la baja velocidad de rotación de las aspas, del orden de las 60 revoluciones por minuto (rpm), a una velocidad de entre 1,500 y 2,000 rpm.

3. FACTIBILIDAD Y ALCANCE

Este proyecto es posible gracias a la energía eólica la cual es una fuente inagotable y ayuda a apaciguar el agotamiento de combustibles fósiles y el cambio climático. Es una tecnología de aprovechamiento totalmente madura y puesta a punto. La energía eólica ha probado ser más confiable que la energía solar en montañas altas y nubladas como pueden ser la topografía de Boyacá generalmente presenta buen régimen de vientos aproximadamente 5m/s. Ahora bien, la ocupación de la energía eólica

en diferentes partes del mundo (Europa, Estados Unidos y países latinoamericanos) nos demuestra lo factible que puede llegar a ser, esta energía está presente en un total de 79 países; 24 de ellos tienen más de 1.000 megavatios instalados.

En términos de acumulación de megavatios, los cinco mercados principales son China, Estados Unidos, Alemania, España e India. Gracias a esto sabemos que grandes potencias la han venido utilizando y cambiando a este bando de energía renovable y amigable con el medio ambiente. En cuanto a Boyacá, sabemos que para el año 2021 en Aquitania, Duitama y Samacá se construirían cuatro parques eólicos como complemento a la actual oferta de energía convencional generada por hidroeléctricas y con el objetivo de mitigar riesgos ante la vulnerabilidad del servicio durante temporadas de sequía. Para elegir estos tres municipios, se tuvo en cuenta que estuvieran ubicados en zonas con alta irradiación solar y velocidad del viento, lo cual fue corroborado por 26 estaciones meteorológicas. Además, era indispensable contar con una zona amplia para la construcción de las plantas de energía. Para la construcción de este importante **parque eólico**, se necesitará una inversión de 45 millones de dólares, los cuales saldrán del gobierno departamental, mientras que el restante, que puede ser unos 150 millones de dólares, los colocará el Estado. Por ahora, el proyecto se encuentra en la fase de factibilidad y licenciamiento. Los parques eólicos tendrían capacidad de generar aproximadamente 52,5 megavatios, de las cuales dos proyectos en Samacá proporcionarían 20 megavatios cada uno. El estudio partió del registro de velocidad y dirección del viento en Boyacá, tomados en 26 estaciones meteorológicas con datos desde 1969 a 2015. De ellas, 23 son del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y los tres restantes de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR).

4. ESTADO DEL ARTE

Según Benavides, a nivel mundial hay una concientización cada vez mayor sobre la importancia de la energía renovable y la eficiencia energética, las cuales buscan no sólo para atender el cambio climático, sino crear nuevas oportunidades económicas y proporcionar acceso a la energía a miles de millones de personas que aún no cuentan con servicios modernos para el suministro de energía, junto con la reducción de la contaminación del aire a nivel local, la seguridad energética y la generación de empleos a nivel local (Benavides, 2018).

Por consiguiente, la caracterización del potencial eólico según la ingeniera Renata, la energía eólica en el mundo presentó un crecimiento en el año 2016, incrementando su capacidad en 55 GW, equivalentes a un aumento del 12 % respecto a la energía estimada para el año 2015, obteniendo un total mundial de alrededor de 487 GW. Más de la mitad de la capacidad de generación de energía eólica del mundo se ha producido durante los últimos cinco años. A finales del año 2016, más de 90 países se encontraban desarrollando proyectos eólicos, mientras que 29 países de todas las regiones del mundo lograron tener más de una GW en operación (Benavides, 2018).

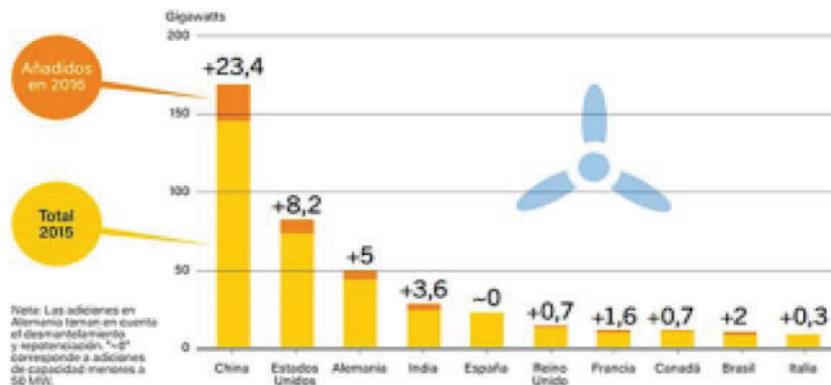
El 2016 fue un buen año para los mejores fabricantes de aerogeneradores. Al mismo tiempo, la innovación tecnológica continuó en cara a la rivalidad con el gas natural de bajo costo y la competencia cada vez mayor con la energía solar FV. Por otro lado, se siguieron abriendo mercados nuevos alrededor del mundo. La energía eólica marítima vio la puesta en marcha de los primeros proyectos comerciales en la República de Corea y en Estados Unidos; Alemania, China y Países Bajos también realizaron adiciones sustanciales de nueva capacidad. Al menos 24 países cubrieron el 5 % o más de su demanda anual de electricidad por medio de energía eólica en 2016, y por lo menos 13 cubrieron más del 10 % 28 Identificación de proyectos con potencial de generación de energía eólica como complemento a otras fuentes de generación eléctrica en el departamento de Boyacá. En cada vez más lugares la energía eólica es la opción menos costosa para capacidades nuevas de generación de energía; mientras que en África, Asia y América Latina siguen surgiendo mercados nuevos, China se mantuvo como el mercado más grande, rebasando a Europa en capacidad total (Ver Figura 1.), según la información presentada en el Reporte de la Situación Mundial de las Energías Renovables del año 2017 de REN 21 (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century) 18 (Benavides, 2018).

Figura 1. Capacidad Mundial de Energía Eólica



Fuente: (Benavides, 2018) Capacidad mundial de Energía Eólica. *Crecimiento Anual, 2006-2016*.
Recuperado de: <http://bdigital.unal.edu.co/64252/3/1018424888.2018.pdf>

Figura 2. Capacidad de energía eólica y adiciones de los diez países líderes



Fuente: (Benavides, 2018) Capacidad de Energía Eólica y adiciones para los 10 países líderes en el año 2016. Recuperado de: <http://bdigital.unal.edu.co/64252/3/1018424888.2018.pdf>

No obstante, el mercado latinoamericano para el año 2016 fue uno de los mercados de más crecimiento en energía eólica y energía solar fotovoltaica. Ocho países de Latinoamérica agregaron más de 3,5 GW de capacidad en 2016, con lo que la capacidad total de la región alcanzó 18,6 GW al final del año. Brasil continuó liderando en la región en energía eólica y también figuró entre los 10 primeros productores mundiales de electricidad a partir de esta fuente. En 2016, Brasil instaló 2 GW, alcanzando una capacidad instalada total superior a 10,7 GW; el país cubrió el 5,7 % de su demanda eléctrica de ese año gracias al viento. Otros países de la región que añadieron capacidad incluyen Chile (0,5 GW), que tuvo un año récord; México (0,5 GW), que realizó su primera subasta en 2016; Uruguay (0,4 GW) y Perú (0,1 GW). Tanto Chile como Uruguay superaron la marca de 1 GW de capacidad total instalada. Argentina no puso en marcha nueva capacidad, pero creó una sólida cartera de más de 1,4 GW de proyectos a lo largo del año en respuesta a las subastas (Benavides, 2018). Pues bien, todo esto generó que los precios de compra fuesen más bajos, debido en parte al aumento en recursos energéticos renovables de la región. Los costos variaron ampliamente de acuerdo con el recurso eólico, la reglamentación propia de cada país, el costo de la inversión, las restricciones de generación, entre otros. Para el año 2016, las mejoras tecnológicas y la disminución en los costos totales de instalación generaron que la energía eólica terrestre estuviera dentro del mismo rango de costos o incluso inferior, a la nueva generación con recursos fósiles (Benavides, 2018). La ingeniera Renata explica que al igual que los principales países de Latinoamérica, Colombia buscó aprovechar el potencial de generación con fuentes no convencionales. Desde el año 1999 Empresas Públicas de Medellín presentó un estudio de viabilidad técnica, económica y ambiental, con el fin de desarrollar nuevas tecnologías de generación para el país, el cual para el año 2000 tuvo apoyo del programa TERN –Technical Expertise for Renewable Energy Application- del gobierno alemán para el fomento de la energía eólica, y que logró materializarse para el 30 de mayo de 2004 con la identificación de proyectos con potencial de generación de energía eólica como complemento a otras fuentes de generación eléctrica en el departamento de Boyacá año 2004, cuando se realizó la instalación de su primer parque eólico “JEPIRACHI”, ubicado en las proximidades de Puerto Bolívar en el departamento de La Guajira, el cual cuenta con un potencial de 19,5 MW, está conformado por 15 aerogeneradores Nordex N60/250 que producen 1,3 MW cada uno (juntos generan un total de 19,5 MW) y están distribuidos en un terreno de 1,2 km² paralelo a la costa de la Guajira Colombiana (Benavides, 2018).

“En Colombia existe un potencial extraordinario por desarrollar principalmente en el Departamento de la Guajira y, en menor grado, en otras regiones del país. Suponiendo una densidad conservadora de 4,9 MW/km², entonces el potencial a instalar para la generación con energía eólica sería de 99 GW, en donde los recursos más promisorios para la generación de electricidad estarían ubicados principalmente en la Costa Atlántica (UPME, 2010). Generadores como Electro-Wayúu E.S.P e ISAGEN, y EE.PP.M han manifestado disposición para incursionar en proyectos en el departamento de la Guajira debido a su alto potencial. Adicionalmente, se cuenta con iniciativas privadas de capacidad menor o igual a 5 kW, como Isla Fuerte en el departamento de Córdoba, que en 2008 se embarcó en el proyecto, de un sistema Híbrido Solar Fotovoltaico y participación Eólica con apenas 2 kW y un sistema de generación eólica de 7 MW y una planta de procesamiento de residuos sólidos y generación con una capacidad de 1 MW en San Andrés. (UPME, 2010). En este sentido, las investigaciones realizadas hasta ahora en Colombia se enfocan en las zonas costeras (Guajira), zonas bajas y cálidas (Cúcuta) y la isla de Providencia. Se requiere de estudios adicionales para evaluar el potencial eólico con mayor precisión y considerando factores tales como la existencia de redes de transmisión, accesibilidad a la región e incidencia sobre la confiabilidad del SIN. El avance más importante respecto a su caracterización del recurso eólico en Colombia ha sido la publicación del Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia desarrollado por la UPME y el IDEAM y publicado en el año 2006 y actualizado en versión interactiva para el año 2015. Dicho estudio se constituye en la herramienta básica para la estimación preliminar del potencial y la identificación en el territorio nacional de zonas que mantienen velocidades de viento altas y persistentes a lo largo del año” (Benavides, 2018).

Según Benito, un mercado energético como el colombiano, en donde la energía eléctrica es producida principalmente por hidroeléctricas, está obligado a contar con plantas de

generación de energía firme que suplan la demanda energética en caso de sequías. El gobierno colombiano se propone que en 2020 el 6,5 % de la capacidad instalada en el SIN y el 30 % de la generación eléctrica del país (conectada y no conectada) sea generada a partir de fuentes renovables. Sin embargo, la entrada de las energías renovables al mercado energético colombiano ha tenido que enfrentar múltiples barreras. Entre estas barreras identificadas, se encuentran: la alta inversión inicial, el débil marco legal o la falta de políticas energéticas, la falta de incentivos financieros, la deficiente infraestructura, el rechazo cultural o la aceptación social y la información limitada del recurso viento disponible (Rosso-Cerón, et al., 2015). Algunas de las barreras mencionadas pueden enfrentarse a partir de la elección de sitios apropiados para la generación eólica. Por ejemplo, los proyectos deberían situarse cerca de la infraestructura (vías y redes de transmisión eléctrica) que se encuentra actualmente construida; de esta forma también se disminuyen los costos asociados al transporte de los equipos y a la conexión a la red eléctrica. El rechazo social se puede afrontar ubicando los proyectos eólicos lo suficientemente alejados de zonas pobladas (Guerrero Hoyos, 2019).

El Departamento de Boyacá cuenta adicionalmente con el estudio del potencial de generación de energía eólica en la zona del Páramo de Chontales en los municipios de Paipa y Sotaquirá en el departamento de Boyacá en el año 2012. En dicho estudio se realizó la instalación de una estación de monitoreo en la zona para el periodo junio 2010 – enero 2011 y que junto con información de cuatro estaciones meteorológicas del IDEAM, permitieron estimar que la velocidad promedio para el periodo analizado, en meses de altos vientos (junio-septiembre) y meses bajos vientos (diciembre-enero) es de 4,5 m/s, lo cual indica que a lo largo del año podría existir un importante potencial de energía eólica aprovechable ya sea para bombeo de agua o para generación de energía eléctrica. La potencialidad de producción energética neta de acuerdo con el promedio de velocidad



del viento obtenida para la zona es de 11,95 W/m². Los vientos máximos analizados sugieren que en todos los meses analizados pudieran existir horas durante el día de generación importante de energía eléctrica que pudiera ser acumulada en baterías para ser aprovechada en horas de baja intensidad de los vientos (Avellaneda, 2012). A partir de los resultados encontrados en el estudio el autor afirma que existe un recurso energético suficiente para satisfacer las necesidades básicas de la población rural de la zona de estudio. Debido a que la disponibilidad de información de registros de velocidad y dirección del viento en el departamento ha aumentado con la instalación de nueve estaciones automáticas a partir del año 2004 por parte del IDEAM, las cuales no fueron consideradas en los estudios descritos y que todas las estaciones convencionales medidoras de viento no fueron empleadas en la elaboración del Atlas de Viento y Energía Eólica, se plantea la necesidad de realizar una identificación de proyectos con potencial de generación eólica con una caracterización actualizada y más completa del comportamiento del viento en el Capítulo 3.33 Departamento y a partir de la cual se realice un planteamiento preliminar de los parques eólicos requeridos para el aprovechamiento del recurso (Benavides, 2018).

Ahora bien, algo que no podemos ocultar es el cambio climático. Benavides nos indica que se ha venido configurando como uno de los principales desafíos para las sociedades contemporáneas, en los próximos años, lejos de disminuir el consumo de energía, vamos a necesitar más. Por lo anterior, el país no puede seguir dependiendo del recurso hídrico para generar electricidad ni seguir quemando combustibles fósiles, debido a que dentro de las consecuencias del cambio climático se prevé una disminución en las precipitaciones en diversas áreas de Colombia. Esto tendría un impacto negativo en la generación de electricidad mediante centrales hidroeléctricas (Paredes, Ramírez, 2017). Para afrontar problema del cambio climático es necesario un cambio importante en los sistemas energéticos actuales. Colombia ha venido avanzando

de gran manera con la generación de información dando cumplimiento de los compromisos adquiridos con la firma y aprobación de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático – CMNUCC, generando las Comunicaciones Nacionales de Cambio Climático, un proceso de construcción colectiva interinstitucional que lideran el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS, el Departamento Nacional de Planeación - DNP y la Cancillería de Colombia; con el apoyo permanente del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD y del Fondo para el Medio Ambiente Mundial - FMAM, estas comunicaciones son la principal fuente de 36 Identificación de proyectos con potencial de generación de energía eólica como complemento a otras fuentes de generación eléctrica en el departamento de Boyacá información y conocimiento técnico para apoyar la toma de decisiones de las instituciones, los sectores, las regiones y otros interesados, sobre los potenciales efectos del cambio climático en Colombia, de modo que se contribuya a la construcción de un futuro sostenible que mejore el bienestar humano de los colombianos.

Adicionalmente, se han producido estudios como el Inventario nacional y departamental de Gases Efecto Invernadero en el marco de reducción de las emisiones de Gases Efecto Invernadero - GEI en un 20 % de manera voluntaria, como aporte a la meta de evitar llegar a un incremento de 2 grados en la temperatura media global. Colombia se posiciona como un país ambicioso y propositivo en estos temas, de manera articulada al Acuerdo de París que plantean desafíos en el largo plazo, los cuales tienen como fin atender las bases estructurales de la problemática global que impiden el desarrollo y el crecimiento económico. Durante los últimos años, nuestro país se ha visto cada vez más afectado por la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos que han impactado con más frecuencia y severidad a nuestra sociedad, nuestra economía y nuestro ambiente. Solo por mencionar los

más recientes, el fenómeno de La Niña 2010-2011 y el fenómeno de El Niño 2015-2016 reportaron cuantiosas pérdidas para el país (IDEAM et al., 2016). Debido al aumento de temperatura con reducción significativa de lluvias, el fenómeno de El Niño amenaza la seguridad en el suministro por reducción de la oferta e incremento de la demanda. Igualmente genera pérdidas económicas por el pago de electricidad con altos precios y amenaza los ingresos de los generadores hidroeléctricos por una menor generación (UPME, 2013).

Como consecuencia a estas situaciones, las centrales termoeléctricas generan más continuamente, estas representan el 36 % promedio de las emisiones del país del sector económico de minas y energía, el cual representa el 10 % de las emisiones totales del país (IDEAM et al., 2016). Por lo anterior es importante realizar inversiones en nuevos proyectos de generación y obras de transmisión asociadas a fin de recuperar los niveles de confiabilidad que la normatividad señala y reducir las emisiones del sistema (UPME, 2015). Respecto a las investigaciones realizadas en el mundo se encontró que debido al cambio climático se podría alterar la distribución geográfica y/o la variabilidad intra e interanual de los recursos eólicos, así como la calidad de esos recursos y/o la prevalencia de los fenómenos meteorológicos extremos que pudieran afectar al diseño y funcionamiento de las turbinas Capítulo 3 37 eólicas. Las investigaciones realizadas hasta la fecha parecen indicar que es improbable que los valores plurianuales de la velocidad media anual del viento varíen en más de un $\pm 25\%$ en la mayor parte de Europa y América del Norte durante el presente siglo, y en otras zonas se encuentran realizando estudios más detallados para definir estas variaciones (IPCC, 2011). El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) afirma que los principales beneficios medioambientales de la energía eólica se obtienen por desplazamiento de la electricidad generada mediante combustibles fósiles, resulta un tanto difícil estimar su cuantía, debido a las características

operacionales del sistema eléctrico y a las decisiones de inversión adoptadas en relación con las nuevas centrales.

A corto plazo, el aumento del componente eólico desplazará a las operaciones de las centrales alimentadas por combustibles de origen fósil. A largo plazo, sin embargo, se necesitarán nuevas centrales, y la presencia de la energía eólica podrá influir en los tipos de centrales que se construyan (IPCC, 2011). En términos generales, la literatura indica que hay diversas opciones para disminuir las emisiones de gases efecto invernadero de los sistemas energético, sin dejar por ello de cubrir la demanda mundial de servicios energéticos. Entre las principales opciones se encuentran la conservación y eficiencia energética, el reemplazo de combustibles de origen fósil, la inclusión de energías renovables, la energía nuclear, o la captura y el almacenamiento del dióxido de carbono. Para evaluar completamente una cartera de opciones de mitigación habría que evaluar sus respectivos potenciales de mitigación, su contribución al desarrollo sostenible y todos los riesgos y costos asociado.

5. RESULTADOS Y DATOS

Según la Unidad de Planeación Minero-Energética (Upme), el número de propuestas para la ejecución de **proyectos de energía renovable** aumentó en un 53 % en comparación con 2018. “En el último año emitimos aval para el montaje de 171 proyectos de energía renovable a 130 empresas, cuya potencia agregada suma 2.379 Mw, principalmente en iniciativas de energía solar fotovoltaica de pequeña escala y de energía eólica, con un beneficio potencial en exclusión de IVA estimado en \$66.000 millones de pesos”, explicó a Portafolio Ricardo Ramírez, director de la Upme. (UPME) Los vientos en Colombia están entre los mejores de Sudamérica. Regiones en donde se han investigado, como lo es el caso de la Guajira, han sido clasificados vientos de clase (cerca de los 10 m por seg. (m/s)). Y en la zona de Boyacá 5m/s. Colombia tiene un potencial estimado

de energía eólica de 21GW solamente en el departamento de la Guajira (lo suficiente para satisfacer casi 2 veces la demanda nacional de energía). Sin embargo, en Colombia solamente se ha instalado 19.5MW en energía eólica, explotando 0.4 % de su potencial teórico. Esta capacidad la aprovecha principalmente el Parque de Jepirachí, realizado por Empresas públicas de Medellín (EPM) bajo Carbón Financie, un mecanismo anexo al Banco Mundial. También hay varios propósitos bajo consideración, incluyendo un parque eólico de 200MW en Ipapure 22 Realizando la respectiva comparación entre los diferentes tipos de energías utilizadas en Colombia, se encontró lo siguiente: Colombia cuenta con una capacidad instalada de energía de aproximadamente 20 MW, la cual es generada un 70 % de hidráulica y un 30 % fósil, en cuanto a los costos de inversión para las tecnologías de energía renovable en Colombia según un estudio realizado por el Ministerio de Minas y Energía en el 2005 mencionaron los siguientes:

Tabla 1. Costos de inversión para las tecnologías de energía renovable en Colombia

FUENTE DE ENERGÍA	TECNOLOGÍA	COSTO EN DÓLARES POR KILOVATIO (US\$/KW)
Hidroeléctricas	Embalse (represa)	700-1,700
Energía solar	Sistemas solares fotovoltaicos	5,000-10,000
Viento (en costas)	Generación de electricidad	800-1,200 (a gran escala)
		hasta 3,000 (pequeña escala)
Energía geotérmica	Bombas	1,500-4,000
	Generación de Electricidad	3,000-5,000 (pequeña escala)
		1,500-2,500 (Gran Escala)
Biomasa	Combustión directa	2,800-5,000

Fuente: Moreno, 2013

Como se puede ver, los costos de inversión para obtener energía eléctrica a partir de las fuentes renovables son demasiado altos, y se puede analizar que, como se mencionó anteriormente, Colombia va por buen camino al generar la mayor parte de su energía. Gracias a la energía renovable hidráulica, puesto que es la energía más económica contribuyendo, de esta forma, a mejorar las condiciones ambientales a nivel mundial. Si se analiza desde una perspectiva nacional, se encuentra que para la respectiva construcción de centrales hidroeléctricas se necesitan grandes tendidos eléctricos. Además, los embalses producen pérdidas de suelo productivo y fauna terrestre debido a la inundación del terreno destinado para ello. También provocan la disminución del caudal de los ríos, arroyos bajo la presa alterando de esta forma la calidad de las aguas. Ahora, bien, si se analiza y se realiza un análisis comparativo entre la energía eólica y la energía renovable "Geotérmica". A pesar de las grandes ventajas de este tipo de energía, es relativamente fácil de obtener. El flujo de producción de energía es constante a lo largo del año, puesto que no depende de variaciones climáticas, es un completo ideal para las plantas hidroeléctricas, con una explotación cuidadosa se puede tener un recurso casi permanente. Algunas de sus desventajas son: los costos de construcción e instalación de este tipo de plantas son bastante altos por su alto costo de perforación de roca a altas temperaturas, al mismo tiempo que los sitios primarios de extracción se encuentra considerablemente alejados de las ciudades ocasionando grandes pérdidas de transmisión de electricidad y que en ciertos casos las emisiones de ácido sulfúrico pueden afectar la salud de los seres vivos ya que este ácido es muy corrosivos e irritante y afecta directamente el área de la 34 piel, los ojos, y de

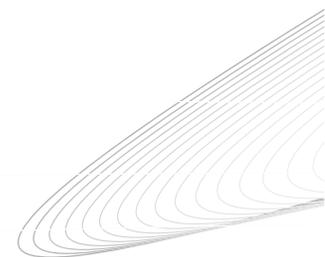
las vías respiratorias y el tubo digestivo con la que entran en contacto si ocurre exposición a concentraciones suficientes 20. Es por esto que se determina que entre estos dos tipos de energía, la energía geotérmica y la energía eólica, se concluye que es más amigable con el ambiente la energía eólica, puesto que no emite a la atmósfera ningún tipo de contaminante y si volvemos a analizar los datos mencionados en la tabla de los costos de producción de la energía renovable, encontramos que la energía eólica es mucho más económica que la energía geotérmica, y que teniendo en cuenta que la energía eólica presenta una condición inagotable esto según la zona en que se instale (Moreno, 2013).

Pues bien, en el último año emitimos aval para el montaje de 171 proyectos de energía renovable a 130 empresas, cuya potencia agregada suma 2.379 Mw, principalmente en iniciativas de energía solar fotovoltaica de pequeña escala y de energía eólica, con un beneficio potencial en exclusión de IVA estimado en \$66.000 millones de pesos (UPME). La matriz energética del país se abastece principalmente de energía hidráulica llegando a tener cerca de un 70 % de la capacidad instalada en grandes centrales hidroeléctricas, debido a los inconvenientes que produce los fenómenos climatológicos (como el fenómeno del niño), la reducción de los costos de las tecnologías de las FNCER y a los acuerdos y metas que tiene el país para la reducción de gases de efecto invernadero como es el acuerdo de París. Se genera un ambiente adecuado para la inclusión de energías menos contaminantes dentro de la matriz energética como lo es la energía eólica. Desde 2003 se tiene una capacidad instalada en el país de 19,5 MW conectados al SIN los cuales no se han incrementado. Al comparar a Colombia con el resto del mundo, el país no cuenta con los mejores vientos para implementar estas tecnologías, en casos específicos como La Guajira y gran parte de la región Caribe al igual que zonas específicas de Risaralda, Tolima, Valle del Cauca y Boyacá cuentan con recursos aprovechables. Los potenciales para las regiones en el país se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Potenciales para diferentes zonas de la Región Central.

Área	Potencial eólico (MW de capacidad instalable)
Costa Norte	20000
Santanderes	5000
Boyacá	1000
Risaralda – Tolima	1000
Huila	2000
Valle del Cauca	500

Fuente: (Grupo de Investigación XUE, 2020)



Los proyectos con vigencia activa inscritos en la UPME se presentan de forma más detallada en la Tabla 3.

Tabla 3. Proyectos con vigencia inscritos en la UPME.

Nombre Proyecto	Capacidad MW	Departamento	Municipio
PUNTA COCOS	362.25	LA GUAJIRA	URIBIA
RICOURTE	125.00	BOYACA	SAMACA
SAN MARTIN ENERGY GREEN	200.00	ATLANTICO	PIOJO
PARQUE EÓLICO GUAJIRA I	20.00	LA GUAJIRA	URIBIA
PROYECTO EÓLICO UIRRAICHI - CHEMESKY	98.00	LA GUAJIRA	URIBIA
ACACIA 2	80.00	LA GUAJIRA	MAICAO
CAMELIA 1	52.00	LA GUAJIRA	MAICAO
CAMELIA 2	99.00	LA GUAJIRA	URIBIA
CAMELIA	99.00	LA GUAJIRA	URIBIA
PARQUE EÓLICO CARRIZAL	195.00	LA GUAJIRA	URIBIA
PARQUE EÓLICO CASA ELÉCTRICA	180.00	LA GUAJIRA	URIBIA
PARQUE EÓLICO IRRRAIPA	99.00	LA GUAJIRA	URIBIA
PARQUE EÓLICO APOTOLORRU	75.00	LA GUAJIRA	URIBIA
PARQUE EÓLICO GUAJIRA II	325.00	LA GUAJIRA	MAICAO
PARQUE EÓLICO VIENTOS GALERAZAMBA	9.90	BOLIVAR	SANTA CATALINA
PARQUE EÓLICO MAGDALENA	99.90	MAGDALENA	SITIONUEVO
PARQUE EÓLICO CULANTRAL	99.90	MAGDALENA	SITIONUEVO
PARQUE EÓLICO VIENTOS DE GALERAZAMBA II	60.00	BOLIVAR	SANTA CATALINA
PARQUE EÓLICO BOCA TOCINO	9.90	ATLANTICO	PIOJO
PARQUE EÓLICO COLIBRI III	92.00	BOYACA	RAQUIRA
PARQUE EÓLICO COLIBRI II	73.00	BOYACA	SACHICA
PARQUE EÓLICO DIVIDIVI	150.00	LA GUAJIRA	URIBIA
EO200I	201.00	LA GUAJIRA	URIBIA
ANDREAS JUSAYU (ANTES CERRITO)	378.00	LA GUAJIRA	URIBIA
PARQUE EÓLICO EL AHUMADO	50.00	LA GUAJIRA	RIOHACHA
ALPHA	212.00	LA GUAJIRA	MAICAO
SAN JUAN EÓLICO	103.20	LA GUAJIRA	FONSECA
EÓLICO CARRETO	9.90	ATLANTICO	JUAN DE ACOSTA

Fuente: (Grupo de Investigación XUE, 2020)

De los 28 proyectos eólicos vigentes inscritos en la UPME, tan solo tres se encuentran dentro de la Región Central, estos están ubicados en el departamento de Boyacá. La suma de potencias de los proyectos eólicos ubicados en Boyacá da 290 MW, lo que representa el 2 % de la capacidad instalada de los proyectos eólicos en vigencia inscritos en la UPME. En la Tabla 4 se muestran algunas especificaciones de estos proyectos.

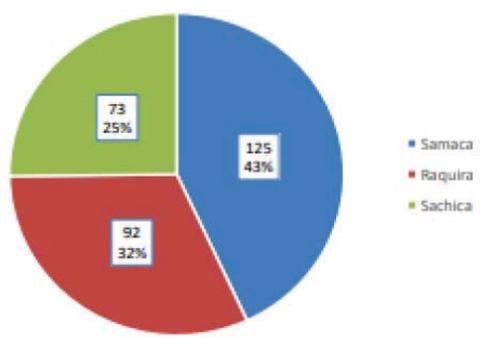
Tabla 4. Proyectos con vigencia inscritos en la UPME, Región Central.

Nombre Proyecto	Capacidad MW	Departamento	Municipio
RICAUORTE	125,00	BOYACA	SAMACA
PARQUE EÓLICO COLIBRÍ III	92,00	BOYACA	RAQUIRA
PARQUE EÓLICO COLIBRÍ II	73,00	BOYACA	SACHICA

Fuente: (Grupo de Investigación XUÉ, 2020)

Samacá es el municipio con mayor capacidad instalada en los proyectos inscritos en la UPME con el 43%, seguido de Ráquira con el 32 % y por último Sáchica con el 25 % que equivale a 73 MW, como se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Capacidad de proyectos con vigencia inscritos en la UPME, Región Central.



Fuente: (Grupo de Investigación XUÉ, 2020)

6. CONCLUSIONES

La viabilidad económica en el escenario de energía eólica, en el departamento de Boyacá, aún no tiene un carácter económico fuerte para ser competitiva frente a las energías utilizadas por el departamento. Esto se debe a que los precios de operaciones existentes son más altos que los precios en bolsa, esto según una viabilidad económica de los dos escenarios, los proyectos no se ven viables ya que no poseen una recuperación en lo largo del plazo ya sea por no alcanzar un mínimo de ventas requeridas o por falta del capital necesario para recuperar pasivos generados en la deuda.

Los estudios y resultados obtenidos en el estudio de impactos ambientales fueron positivo, ya que los impactos al ambiente son manejables, bajo las condiciones actuales la implantación de parques eólicos en nuestro departamento no es económicamente factible pese a contar con una enorme reserva energética por las velocidades del viento presentadas en el Departamento de Boyacá.

Se necesitan políticas y apoyo del gobierno nacional para incentivar este tipo de proyectos con regulaciones que disminuyan y subsidien el valor tanto de compra de los equipos como el de infraestructura y puesta en marcha de los proyectos (tecnologías).

Colombia debe presentarse a entidades internacionales como el BID (Banco Internacional de Desarrollo), países desarrollados u a las organizaciones unidas y plantar un proyecto en cara a las energías eólicas que contribuyan al mejoramiento de la crisis ambiental que estamos pasando en todo el mundo, para poder lograr o aportar en uno de los 17 objetivos de desarrollo sostenible de las naciones unidas logrando esto gracias a su amplia experiencia en la utilización de este tipo de energía, fomentando el desarrollo de estos proyectos y además dando la posibilidad de condonar parte de la deuda bajo una serie de condiciones u aplicaciones en el medio ambiente o en las poblaciones vulnerables.

Gracias al siglo 21 y el pensamiento abierto de toda la sociedad, se están utilizando nuevos métodos de apoyo para el estudio de factibilidad de proyectos como este, los cuales contemplan una serie de factores económicos y de experiencia junto a otras opciones que serían consideradas como positivas y reales. Pese a que ya existen parques eólicos en Boyacá no son suficientes para ser competencia frente a las energías utilizadas por el departamento.

7. REFERENCIAS

Amézquita Pardo, L. G. y Cepeda Jiménez, J. E. (2021). Energía eólica, una alternativa ambientalmente sostenible desde el Ejército Nacional de Colombia. *Revista Brújula de Investigación*, 9(17). 48-66. <https://doi.org/10.21830/23460628.93>

Benavides, R. C. (2018). Identificación de proyectos con potencial de generación de energía eólica como complemento a otras fuentes de generación eléctrica en el departamento de Boyacá. Universidad Nacional de Colombia.

CurioSfero Historia. (28 de julio de 2020). Historia de la energía eólica. CurioSfera. <https://curiosfera-historia.com/historia-de-la-energia-eolica/> (Citado el 15 de octubre de 2020).

Rico, G. (6 de junio de 2018). Título del artículo. MONGABAY. <https://es.mongabay.com/2018/06/hidroelectricas-colombia-hidroituango/> (Citado el 5 de octubre de 2020).

Entrada bibliográfica: PORTAFOLIO. (17 de julio de 2019). Título del artículo. PORTAFOLIO. <https://www.portafolio.co/economia/boyaca-nuevo-foco-para-las-fuentesde-energia-renovable-531662>.

Moreno-Cortés, P.A. (2013). Energía eólica: ventajas y desventajas de su utilización en Colombia. Universidad Libre, 28. (Citado el 16 de octubre de 2020).

Moreno, J., Rodríguez, C., y Suesca, R. (2006). Generación híbrida de energía eléctrica como alternativa para zonas no interconectadas. *Ingeniería*, 12(1), 57-63.

Benavides, R. C. (2018). Identificación de proyectos con potencial de generación de energía eólica como complemento a

otras fuentes de generación eléctrica en el departamento de Boyacá. Universidad Nacional de Colombia.

Universidad Nacional de Colombia. (16 de julio de 2018). Tres municipios de Boyacá con potencial para generar energía eólica. *MEDIOAMBIENTE*, págs. 1-1.

Guerrero Hoyos, Benito y Vélez Macías, Fabio y Quintero, Diana. (2020). Energía eólica y territorio: sistemas de información geográfica y métodos de decisión multicriterio en La Guajira (Colombia). *Ambiente y Desarrollo*. 23. 10.11144/Javeriana.ayd23-44.eets.

Grupo de Investigación XUÉ, S. D. (2020). Potencial energético eólico para la Región Central *Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, 45-95.

IDEAM, 2016. Boletín de_Predicción Climática, 12, (1).

(IPCC) denhofer, Ottmar y Madruga, R.P. y Sokona, Youba y Seyboth, K. y Matschoss, Patrick y Kadner, Susanne y Zwickel, T. y Eickemeier, P. y Hansen, Gerrit y Schlömer, Steffen y Stechow, Christoph. (2011). *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 1-1075. 10.1017/CBO9781139151153.

Salamanca-Ávila, S. (2017). Propuesta de diseño de un sistema de energía solar fotovoltaica. Caso de aplicación en la ciudad de Bogotá. *Revista Científica*, 30 (3), 263-277.

Universidad Libre. Energía eólica: ventajas y desventajas de su utilización en Colombia. <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/10602/Monograf%C3%ADa.pdf?sequence=1> (Citado el 15 de octubre de 2020).

