

Avances en las tecnologías para obtención de energía eléctrica por medio de sistemas de aprovechamiento por energía solar fotovoltaica y eólica

Daniela Juliana Rey Benavides, Edwin Ayala Mogollón, Julián Barney Jáimes
Corporación Universidad de Ciencia y Desarrollo UNICIENCIA

Fecha de Recepción: 11/02/17 – Fecha de Aceptación: 15/04/17

Resumen

En Colombia, se está concientizando al sector energético nacional, en la transición del uso de combustibles fósiles (petróleo y carbón) a la energía de fuentes renovables para la producción de energía eléctrica. Otro antecedente importante es que el 70 % de la energía producida en el país es de tipo hidráulica. Y de acuerdo con el fenómeno del niño presentado en el año 2016, que dejó al país al borde de racionamiento eléctrico por el bajo nivel de los embalses. Este trabajo presenta una revisión bibliográfica de las tecnologías para obtención de energía eléctrica por medio de sistemas de aprovechamiento que involucran las dos fuentes de energías renovables más ampliamente utilizadas mundialmente, la energía eólica y la energía solar fotovoltaica con lo cual se estudian sus principios físicos y térmicos, además de cómo están compuesto el sistema y sus variables críticas de análisis para el diseño y la simulación de este tipo de sistemas.

Palabras clave: Aerogenerador, Batería, Energía eólica, Fotovoltaica, Inversor, Potencial Energético.

Abstract:

In Colombia, the national energy sector is becoming aware of the transition from the use of fossil fuels (oil and coal) to energy from renewable sources energy to produce electricity. Another important precedent is that 70% of the energy produced in the country is hydraulic. And according to the boy phenomenon presented in 2016, which left the country on the verge of electric rationing due to the low level of reservoirs. This work presents a bibliographic review of the technologies for obtaining electrical energy by means of utilization systems that involve the two most widely used renewable energy sources worldwide, wind energy and photovoltaic solar energy, with which their physical principles are studied. In addition to how the system and its critical analysis variables are composed for the design and simulation of this type of systems.

Keywords: Battery, Energy Potential, Wind Turbine, Wind Energy, Photovoltaics.

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático ya palpitable en toda la geografía del planeta. Inviernos y veranos más intensos en los trópicos, y lluvias cada día más fuertes en la zona ecuatorial. Una población mundial de más de 8 billones de habitantes, cuyas necesidades energéticas son cada día más grande que la que jamás pudieron consumir, las anteriores generaciones. Actualmente según el Energy Outlook Review [1], la población mundial está proyectada a aumentar en 1.5 billones de personas, alcanzando 8.8 billones por el año 2035 [1]. La demanda de petróleo continúa aumentando, aunque es probable que el ritmo de crecimiento disminuya a medida que los vehículos se vuelven más eficientes y las mejoras tecnológicas, como los vehículos eléctricos, la conducción autónoma y el uso compartido del automóvil, anuncian una revolución de la movilidad.

El petróleo, el gas y el carbón siguen siendo las principales fuentes de energía que impulsan la economía mundial, y representan más de las tres cuartas partes del suministro total de energía en 2035 (frente al 85% en 2015). Fuera de estos, el gas es el combustible de más rápido crecimiento (1.6% por año.), y su participación en la energía primaria aumenta a medida que supera al carbón para ser la segunda fuente de combustible más grande para 2035. El petróleo continúa creciendo (0.7% por año), aunque se espera que su ritmo de crecimiento disminuya gradualmente. Se prevé que el crecimiento del carbón disminuirá drásticamente: 0.2% por año comparado con 2.7% por año en los últimos 20 años: se espera que el consumo de carbón llegue a su punto máximo a mediados de la década de 2020. El sector del transporte consume la mayor parte del combustible líquido del mundo, y su porción de la demanda mundial permanece un poco por debajo del 60% con respecto a Outlook [1].

El transporte representa casi dos tercios del crecimiento de la demanda general (10 Mb/d), con ese aumento dividido aproximadamente de manera uniforme entre: automóviles (4 Mb / d); camiones (3 Mb/d); y barcos, trenes y aviones (3 Mb / d). Pero el estímulo de la demanda de transporte se desvanece gradualmente, a medida que la eficiencia del combustible mejora significativamente y aumenta la penetración de los combustibles no petroleros. La

electricidad, los biocombustibles, el carbón y el gas natural en conjunto representan el 13% de la demanda de combustible para el transporte en 2035, frente al 7% en 2015. La desaceleración de la demanda de transporte de petróleo hace que el crecimiento de la demanda total de petróleo disminuya gradualmente, cayendo desde alrededor de 1 Mb / d p.a. en el corto plazo a 0.4 Mb / d p.a. para el 2035 [2].

La importancia de las energías en el mundo ha incrementado de forma acelerada, principalmente en el sector eléctrico, la rentabilidad de las tecnologías ha aumentado significativamente. En el año 2015 se dio la 21a Conferencia de las Partes en París (COP21), Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, donde 195 países acordaron mitigar y limitar el calentamiento global muy por debajo de los 2 grados centígrados. Sobre las contribuciones previstas y determinadas a nivel nacional, los compromisos fueron en mejorar la eficiencia energética, impuestos sobre combustibles fósiles. En el 2014, la energía renovable generó un estimado del 19.2% en el consumo final mundial de energía; mientras que en el 2015 continuó el crecimiento en la capacidad y generación. El año 2016 vio varios desarrollos y tendencias en curso que todos tienen incidencia en la energía renovable, incluido la continuación de los precios comparativamente bajos de los combustibles fósiles; la disminución dramática de los precios de varias tecnologías de energía renovable; y un aumento continuo en la atención al almacenamiento de energía.

La capacidad de electricidad renovable, incluyendo la energía hidráulica fue de 1849 en el 2015 distribuida en 1064 GW, que corresponden a la energía hidráulica, 106 GW de capacidad de bioenergía, 13,2 GW de capacidad geotérmica, 227 GW de energía solar fotovoltaica, 4,8 GW de energía solar térmica de concentración y 433 GW de capacidad de energía eólica. En Calor, la capacidad de calentamiento solar de agua es de 435 GW. En transporte la producción de etanol es de 98,3 billones y producción de biodiesel 30.1 [2].

La participación energética de las energías no renovables para el 2015 fue de 76.3 %, y para las renovables del 23.7%, el cual está distribuida en 16.6 energía hidráulica, 3.7% en eólica, 2.0% en Bioenergía. 1.2% Energía Solar Fotovoltaica y 0.4 % en energía geotérmica, energía solar de concentración. Hasta el año 2015 se han invertido un total de 286 miles de millones de dólares, en energías y combustibles renovables. Siendo China y Europa, los que mayores recursos han destinado para proyectos de investigación e implementación de energías renovables [2].

Las energías renovables producen 8.1 millones de empleos, y la que más lo produce es la energía solar fotovoltaica, seguida de la energía eólica. Por tercer año consecutivo, el carbono global relacionado con la energía las emisiones de

dióxido de combustibles fósiles y la industria eran casi planas en 2016, debido en gran parte a la disminución del uso de carbón en todo el mundo, pero también debido a las mejoras en la eficiencia energética y al uso creciente de energía renovable. A partir de 2015, la energía renovable proporcionó un estimado 19.3% de consumo global final de energía y crecimiento en capacidad y la producción continuó en 2016. El sector de la energía experimentado los mayores aumentos en la capacidad de energía renovable en 2016, Considerando que el crecimiento de las energías renovables en la calefacción y la refrigeración y el sector del transporte fue comparativamente lento. La mayoría de la nueva capacidad de energía renovable se instala en países en desarrollo países, y principalmente en China, el mayor desarrollador individual de energía renovable y calor en los últimos ocho años. En 2016, la energía renovable se extendió a un número creciente de países en desarrollo y economías emergentes, algunas de las cuales se han vuelto importantes mercados. Al finalizar 2016 la capacidad de energías renovables a nivel global era de 2.017 GW. Si se excluyen los proyectos de hidroeléctrica el total es de 921 GW. Desde luego las centrales hidráulicas dominan el sector, con 1.096 GW, pero el resto de segmentos aumentan a buen ritmo. La eólica es la siguiente, con 487 GW, seguida de la solar, que cuenta ya con 303 GW de capacidad [2].

La capacidad instalada a nivel solar fotovoltaica se convirtió en la estrella del año 2016, ya que representa aproximadamente un 47% de las adiciones totales, seguida por la energía eólica y a energía hidráulica con un 15,5%. [1].

En América Latina, la energía eólica es una fuente de energía renovable relativamente poco explotada especialmente en relación con su enorme potencial. Los cambios en la política energética tienen que superar el paradigma que ha dominado el sector en toda su historia en América Latina y el Caribe: la obsesión por la generación hidroeléctrica [3]. Brasil, es el país de América Latina con más capacidad instalada de energía eólica al año 2015, con 9810 MW en 350 parques eólicos. Le sigue Chile con 933 MW en 29 parques eólicos, Uruguay con 38 parques eólicos que generan 900 MW de energía eléctrica, Argentina posee el mejor potencial eólico del mundo, pero por lo pronto cuenta solamente con 280 MW en 22 parques eólicos. Y por último Costa Rica que con 13 parques eólicos genera 288 MW, y siendo un ejemplo debido a que es un país pequeño en comparación a los anteriores [4].

Colombia ha venido siendo considerado como un modelo para la implementación de proyectos con energía solar fotovoltaica, ya que cuenta con condiciones favorables para generar este tipo de energía, lo cual lo convierte en un firme competidor a nivel de costos en tarifas de la red eléctrica. Además, pese a la recientemente promulgada Ley 1715 expedida el 13 de mayo de 2014 [3], la cual favorece la integración de las energías renovables al sistema energético

nacional, existe todavía demasiada desconfianza en lo concerniente a la implementación de este tipo de proyectos, así como a la adopción en cuanto a las tarifas y la seguridad en el suministro de energía en el entorno de nuestro país. La generación de energía solar fotovoltaica en el sector colombiano se focaliza en los tejados del sector residencial, que contribuye con un 40% de la demanda total de electricidad, donde el 70% de las viviendas son casas superando el número de apartamentos y brindan gran facilidad para instalar este tipo de sistemas [4].

En Colombia, el proyecto más destacado en energía eólica, es el parque eólico Jepirachi con una capacidad instalada de 19,5 MW de potencia nominal, con 15 aerogeneradores de 1,3 MW cada uno, sometidos a los vientos alisios que soplan casi todo el año en esta parte de la península, a un promedio de 9,8 metros por segundo. Las máquinas están distribuidas en dos filas de ocho y siete máquinas respectivamente, en un área aproximada de un kilómetro de largo en dirección paralela a la playa [5].

Este trabajo inicia con una introducción sobre el contexto de las energías renovables en el mundo, en Colombia y las potencialidades de implementar proyectos de energía eólica y solar fotovoltaica, luego en la unidad 2 que consiste en el desarrollo contiene el marco teórico conceptual, que contiene las definiciones sobre los principios físicos de la energía solar fotovoltaica, energía eólica y evaluación del recurso solar y eólico, la descripción de los componentes de cada uno de los sistemas y una revisión de avances tecnológicos e investigativos en la mejora de la eficiencia de producción de energía eléctrica de estos sistemas. Por último, las conclusiones sobre la importancia de seguir implementando sistemas de energía solar y eólica que permitan ampliar la oferta energética del país, y disminuir la dependencia a las fuentes de energía no renovables como carbón y gas, y ratificar el compromiso por un desarrollo sostenible.

II. ENERGIA SOLAR

A. Radiación solar directa

Es aquella radiación que proviene directamente del sol a través de la atmósfera sin sufrir alteración alguna. La radiación solar directa se mide mediante un pirheliómetro, el cual generalmente es un sensor que está provisto de un visor en el que un pequeño punto luminoso coincide con una marca situada en el centro del mismo, cuando la superficie receptora se halla en posición exactamente perpendicular al haz solar directo [6].

B. Pirheliómetro

Es un dispositivo que mide la intensidad de la radiación solar directa recibida en la superficie de la tierra, posee una superficie receptora que se orienta hacia los rayos solares

incidentes. Está compuesto por un largo tubo sellado con aire seco que permite eliminar la absorción de la radiación incidente generada por el vapor de agua, el cual se encarga de captar un estrecho haz de luz. El interior del tubo está pintado de color negro para evitar absorber cualquier radiación incidente y en el fondo de este hay un sensor o termopila formado por pares termoelectrónicos que mide la intensidad de la radiación solar. A diferencia del piranómetro el pirheliómetro cuenta con un sistema para seguir el sol con gran precisión [7].

C. Radiación solar difusa

Es aquella radiación que es dispersada por la atmósfera. La radiación solar difusa se mide mediante un instrumento denominado piranómetro que permite medir la radiación solar incidente sobre la Tierra (vatios por metro cuadrado), expresando su salida en mV según la intensidad del Sol. [8]. A continuación, se presentan dos tipos de piranómetros utilizados para medir la radiación difusa:

D. Piranómetro Térmico

Un ejemplo de piranómetro es el de Kipp y Zonen, que se constituye por una pila termoelectrónica contenida en un alojamiento con dos semiesferas de cristal. La pila termoelectrónica está constituida por una serie de termopares colocados horizontalmente, cuyos extremos están soldados con unas barras de cobre verticales solidarias a una placa de latón maciza. El conjunto está pintado con un barniz negro, para absorber la radiación. El flujo de calor originado por la radiación se transmite a la termopila, generándose una tensión eléctrica proporcional a la diferencia de temperatura entre los metales de los termopares. Para medir la radiación difusa es necesario tapar el sensor de radiación directa mediante una pantalla parasol, midiendo la irradiancia solar difusa [8].

E. Piranómetro Fotovoltaico

En este dispositivo el principio de funcionamiento no es térmico como en el caso anterior; sino que tiene como fundamento el efecto fotoeléctrico. Es un sensor diseñado para medir la densidad del flujo de radiación solar en un cuerpo de 180°, posee una termopila formada por sectores blancos y negros, la cual es capaz de absorber la radiación solar en un rango entre 300 y 2800 nm. Las bandas negras de la termopila permiten absorber la radiación solar la cual se transforma en calor, el cual fluye por los sensores hacia el cuerpo del piranómetro, lo que permite generar una señal eléctrica proporcional a la radiación incidente. La radiación incide sobre un fotodiodo que es capaz de diferenciar el espectro solar por la frecuencia de la onda electromagnética, y de ese modo, mediante la lectura de voltaje, conocer los datos de radiación [8].

F. Radiación solar reflejada o de albedo

La Radiación reflejada es aquella que se recibe del sol, después de la reflexión y la dispersión por la atmósfera, la cual rebota en la superficie terrestre u otra superficie frente a un colector y luego incide sobre él [8].

G. Posición Solar

Tiempo solar: para poder expresar el tiempo solar se hace necesario realizar dos ajustes importantes, en primera instancia la longitud entre el meridiano del observador y el meridiano en el que se basa el tiempo estándar local y en segunda instancia corregir la ecuación del tiempo. A continuación, se presentan las fórmulas que permiten realizar los anteriores ajustes y por consiguiente poder obtener el cálculo del tiempo solar (1) (2) y (3):

$$Dt = (dia - 1) * \left(\frac{360}{365}\right) [o] \quad (1)$$

dia: corresponde al día.

$$Et = 229.2 * (0.000075 + 0.001868 * Cos(Dt) - 0.032077 * Sen(Dt) - 0.014615 * Cos(2 * Dt)) - 0.04089 * Sen(2 * (Dt)) [o] \quad (2)$$

Ecuación del tiempo solar (3):

$$St = hs + \frac{(4 * (L_{tz} - L_{ll})) + Et}{60} [hora] \quad (3)$$

St: es el tiempo solar.

hs: corresponde a la hora establecida por el meridiano de referencia.

Et: es la ecuación de tiempo.

L_{tz}: es el meridiano estándar para la zona horaria local.

L_{ll}: es la longitud del lugar.

Ángulo hora (Θ): el ángulo hora es el desplazamiento angular que realiza el Sol sobre el plano de la trayectoria solar, donde cada hora solar equivale a 15° (360°/24horas), y se puede calcular mediante la ecuación que se presenta a continuación (4):

$$\Theta = (St - 12) * 15 [o] \quad (4)$$

Θ es el ángulo hora, se representa por la letra griega teta y se expresa en grados.

St es la hora solar.

Declinación solar (δ): el ángulo de declinación solar corresponde a la posición angular del sol al medio día con respecto al plano del ecuador y se puede calcular mediante la ecuación que se presenta a continuación (5):

$$\delta = 23.45 * \text{sen} \left(360 * \frac{284+d}{365} \right) [o] \quad (5)$$

δ: Es el ángulo de declinación solar, se representa por la letra griega delta y se expresa en grados.

d: Corresponde al día del año.

Se debe tener en cuenta que la declinación solar en los equinoccios de primavera y otoño es igual a cero y presenta unos valores aproximados en el solsticio de verano de +23.45° y -23.45° en el solsticio de invierno.

Ángulo de elevación (α): el ángulo de declinación solar, corresponde al ángulo entre la dirección del sol y el horizonte, se puede calcular mediante la ecuación que se presenta a continuación:

$$\alpha = \text{ArcSen} [\text{Sen}(\delta) * \text{Sen}(\varphi) + \text{Cos}(\varphi) * \text{Cos}(\Theta)] [o] \quad (6)$$

α: Es el ángulo de elevación, se representa por la letra griega fi y se expresa en grados.

δ: Es el ángulo de declinación solar.

φ: Corresponde a la latitud local.

Θ: Es el ángulo hora.

Ángulo de azimut solar (Ψ): el ángulo de azimut solar, corresponde al ángulo formado por el sol y el eje horizontal, se puede calcular mediante la ecuación que se presenta a continuación:

$$\Psi = \text{ArcSen} \left[\text{Cos}(\delta) * \left(\frac{\text{Sen}(\Theta)}{\text{Cos}(\alpha)} \right) \right] [o] \quad (7)$$

Ψ: Es el ángulo de azimut, se representa por la letra griega psi y se expresa en grados.

α: Es el ángulo de elevación.

δ: Es el ángulo de declinación solar.

Θ: Es el ángulo hora.

Ángulo de cenit (β): es el ángulo que forma la línea recta que une la Tierra con el Sol y la vertical, se puede calcular mediante la ecuación que se presenta a continuación:

$$\beta = 90 - \alpha [o] \quad (8)$$

β: Es el ángulo de cenit, se representa por la letra griega beta y se expresa en grados.

α: Es el ángulo de elevación.

Ángulo de incidencia (Z): es el ángulo que se forma por el rayo incidente y la normal imaginaria de la superficie terrestre, se puede calcular mediante la ecuación que se presenta a continuación:

$$Z = \text{ArcCos} [\text{Cos}(\beta) * \text{Cos}(\rho) + \text{Sen}(\beta) * \text{Sen}(\rho) * \text{Cos}(\Psi - \Psi_p)] [o] \quad (9)$$

Z: Es el ángulo de incidencia, se representa por la letra griega zeta y se expresa en grados.
β: Es el ángulo de cenit.
ρ: Es la pendiente.
Ψ: Es el ángulo de azimut.
Ψp: Es el ángulo de azimut de la pared.

Razón de la radiación directa (Rd): es la relación de la radiación del haz en la superficie inclinada con respecto a la superficie horizontal en un instante determinado, se puede calcular mediante la ecuación que se presenta a continuación:

$$Rd = \frac{(\cos(\varphi - \rho) * \cos(\delta) * \cos(\theta)) + (\sin(\varphi - \rho) * \sin(\delta))}{(\cos(\varphi) * \cos(\delta) * \cos(\theta)) + (\sin(\varphi) * \sin(\delta))} \quad (10)$$

Dónde:

Rd: Es la razón de la radiación directa.
ρ: Es la pendiente.
φ: Es la latitud local.
δ: Es la declinación.
θ: Es el ángulo hora.

III. POTENCIAL PARA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN COLOMBIA

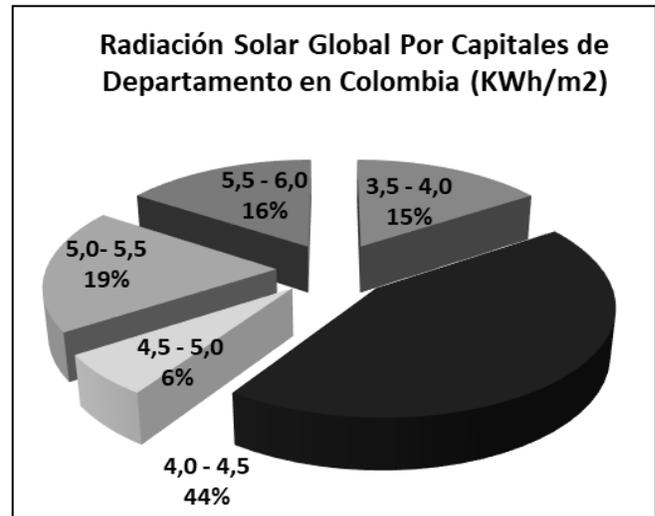
El potencial para energía fotovoltaica en el territorio Colombiano, según los datos suministrados por la unidad de planeación minero energética de Colombia (UPME) es el siguiente: se toma como base el dato promedio anual por capitales de departamento, el mayor potencial de radiación solar se presenta en 5 capitales, en el rango de 5.5 a 6.0 [Kwh/m²], con un porcentaje de participación del 16%, destacando que 14 capitales con un rango de radiación solar entre 4.0 y 4.5 [Kwh/m²] presentan el mayor porcentaje de participación con un 44% según la figura 1.

En el mes de enero el mayor potencial de radiación solar se presenta en 4 capitales del país con un potencial de radiación solar entre 5.5 a 6.0 [Kwh/m²], con un porcentaje de participación del 13%, resaltando que 10 capitales con un rango entre 4.0 a 4.5 [Kwh/m²] que equivalen al 31% del porcentaje de participación total. En el mes de febrero el mayor potencial de radiación solar se presenta en 4 capitales del país con un potencial de radiación solar entre 6.0 a 6.5 [Kwh/m²], con un porcentaje de participación del 13%, resaltando que al igual que el mes anterior 10 capitales presentan un 31% del porcentaje de participación total, con un rango entre 4.0 a 4.5 [Kwh/m²]. En el mes de marzo se mantienen 4 capitales con el mayor potencial de radiación solar entre 6.0 a 6.5 [Kwh/m²], con un porcentaje de participación del 13%, mientras que en el rango de radiación solar entre 4.0 a 4.5 [Kwh/m²] se representa en 11 capitales que equivalen 34% del total de participación. Para el mes de Abril incrementa a 5 capitales El mayor potencial de

radiación solar entre 6.0 a 6.5 [Kwh/m²], en un porcentaje de participación del 16%, mientras que en el rango de radiación solar entre 4.0 a 4.5 [Kwh/m²] se representa un incremento a 14 capitales que equivalen 44% del total de participación. En el mes de mayo se presenta una disminución del potencial de radiación solar, del rango entre 6.0 a 6.5 [Kwh/m²] al comprendido entre 5.5 a 6.0 [Kwh/m²], con 5 capitales de departamento que equivalen a un 16% de la participación total. Cabe resaltar que el número de capitales en el rango de radiación solar entre 4.0 a 4.5 [Kwh/m²] presenta una considerable disminución de 14 a 8 capitales, lo que equivale a un 25% de la participación, también es notorio el incremento de capitales que disminuyen su potencial de radiación solar al rango entre 3.5 a 4.0 [Kwh/m²], lo cual equivale al 31% de la participación porcentual total.

Para el mes de junio el rango de mayor potencial de radiación solar se mantiene entre 5.5 a 6.0 [Kwh/m²], pero con una disminución de 5 a 3 capitales, lo que representa el 9% de participación, resaltando que el potencial de radiación solar entre 3.5 a 4.0 [Kwh/m²], prácticamente se mantiene con una disminución de 10 a 9 capitales, que representan el 28% del porcentaje total de participación.

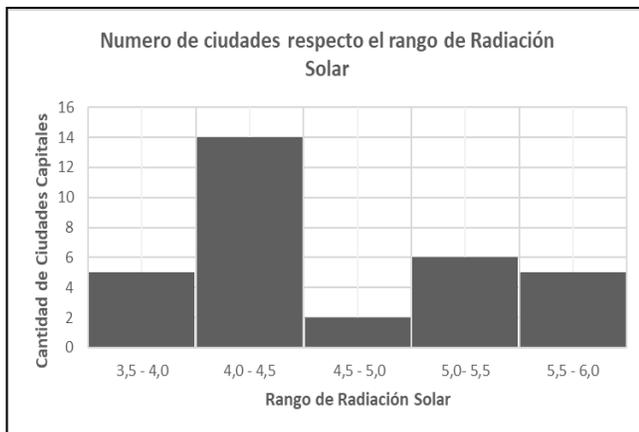
Figura 1. Gráfico de rangos de radiación solar global por capitales en Colombia (porcentajes)



En el mes de julio se presenta un incremento representativo en el porcentaje de capitales con una radiación solar en el rango de 6.0 a 6.5 [Kwh/m²], con un total de 6 que equivalen a un 19% de participación. Es de anotar que respecto al mes de junio el rango de radiación solar de 4.5 a 5.0 [Kwh/m²] presenta un incremento de 4 capitales a 12, lo cual representa el 38% de participación total. Para el mes de agosto se presenta una notable disminución en el porcentaje de capitales con una radiación solar en el rango de 6.0 a 6.5 [Kwh/m²], de 6 a 1 con una disminución del 19% al 3% de la participación, también es notoria la disminución de capitales de 12 a 7, en el rango de radiación solar de 4.5 a 5.0 [Kwh/m²] de un 38% a un 22% del total de

participación. Resaltando que en este mes el mayor porcentaje de capitales con mejor radiación solar es de 9, que equivalen al 28% de la participación total.

Figura 2. Gráfico sobre rangos de radiación solar global vs el número de ciudades



En el mes de septiembre se presenta un gran cambio en el potencial de radiación solar, presentándose los porcentajes más altos en los rangos de 4.5 a 5.0 [Kwh/m²] con 12 capitales equivalente a un 38% y de 4.0 a 4.5 [Kwh/m²] con 10 capitales que representan el 31% del total de participación. Para el mes de octubre el potencial de radiación solar presenta una notable disminución en cuanto al número de capitales del rango comprendido de 4.5 a 5.0 [Kwh/m²] de 12 a 6, disminuyendo del 38% al 19% y presentando el mayor porcentaje de participación con un 44% y 14 capitales de departamento el rango comprendido de 4.0 a 4.5 [Kwh/m²]. En el mes de noviembre los porcentajes más altos en el potencial de radiación solar se presenta en los rangos de 3.5 a 4.0 [Kwh/m²] y de 4.0 a 4.5 [Kwh/m²] con 11 capitales y el 34% para cada uno de ellos, lo cual representa el 68% del total de participación. Para el mes de diciembre la variación del potencial de radiación solar frente al mes anterior es muy mínima, ya que los rangos de 3.5 a 4.0 [Kwh/m²] y de 4.0 a 4. [Kwh/m²] con 10 capitales y el 31% para cada uno de ellos, representan el valor más representativo con un 62% del total de participación.

Según el análisis realizado se demuestra que la radiación diana media anual de Colombia, es de 4.0-4.5 [Kwh/m²], lo cual hace propicio el territorio nacional para la amplia utilización e implementación de la energía solar fotovoltaica. La región caribe e insular es la que presenta el mayor potencial debido a que presenta zonas con radiación de 5.5- 6.0 [Kwh/m²], lo cual hace propicio el desarrollo de proyectos de energía solar fotovoltaica y también energía solar de concentración para aplicaciones de alta temperatura y las regiones Andina, Pacífica, Llanos orientales y Amazonía se ubican en un potencial con radiación de 4.0-4.5 [Kwh/m²] [9].

IV. FOTOEMISIÓN Y ENERGÍA SOLAR

La fotoemisión es la liberación de electrones de una superficie sólida a gas o vacío debido a la luz incidente de suficiente longitud de onda relativamente corta. La noción de usar la foto emisión para generar poder tal vez se remonta a Nikola La patente de Tesla que describe un " Método de Utilizar Energía Radiante " (Patente de los Estados Unidos 685958). Esto fue otorgado en 1901, en realidad antes de la famosa discusión de Einstein del efecto fotoeléctrico en términos de luz quanta y el trabajo función de un cátodo de metal [10].

Dispositivos fotoeléctricos de energía solar, que usualmente permiten el transporte de carga desde el fotocátodo a un ánodo a través de un vacío, han aparecido en la patente desde la década de los años sesenta, pero esta idea se ha mantenido fuera de la investigación y desarrollo de la energía fotovoltaica. Respecto al transporte de cargas eléctricas un dispositivo fotoeléctrico que funciona con energía solar es muy diferente de cualquier dispositivo solamente fotovoltaico. Sin embargo, en ambos tipos de dispositivos la carga es liberada gracias a la energía de un fotón que llega para disolver la barrera energética [6].

En un dispositivo solar fotoeléctrico, la barrera energética antes mencionada en vez de ser de ser un espacio en la banda del semiconductor, es la función de trabajo ϕ . La función de trabajo es la que gobierna las pérdidas de espectro del dispositivo de potencia solar fotoeléctrica de una manera similar a la fotovoltaica convencional, y esto proporciona la base para el cálculo de la eficiencia de conversión de potencia. Aquí presentamos un modelo de dispositivo de energía solar fotoeléctrica que no requiere transporte de carga a través del vacío, lo que abre la posibilidad de una fabricación de menor costo. Se deriva un límite equivalente al límite de Shockley-Queisser. El límite de eficiencia teórica para este dispositivo de energía solar fotoeléctrica es de casi 57%, pero los dispositivos reales deben estar a la altura debido a varios factores, siendo los más importantes las propiedades materiales del fotocátodo y ánodo transparente. Se han llevado a cabo pocas investigaciones sobre los fotocátodos que funcionan a alta presión, y el conductor de la energía solar fotoeléctrica y otras aplicaciones relacionadas con la energía pueden motivar más trabajo en este campo [10].

Un condensador de placa paralela de polarización automática puede actuar como un dispositivo sencillo de energía solar fotoeléctrica, en el cual la carga es transportada desde un fotocátodo hasta un ánodo transparente a través de un gas a través de la presión atmosférica inerte de gas. En términos prácticos, un paquete similar a las típicas ventanas de doble acristalamiento, incluyendo materiales simples captadores, sería suficiente para mantener pureza del gas y evitar la captura de electrones por oxígeno y vapor de agua. Simulaciones de transporte de carga en gas tienen una larga historia en el

diseño de dispositivos de física de partículas con herramientas validadas y eficaces que estén completamente disponibles para los investigadores, por ejemplo, Garfield ++. Es esencialmente un ánodo plano transparente y fotocátodo separado por una brecha de longitud d . La luz solar atraviesa el ánodo transparente y una fracción de estos fotones incidentes causa fotoemisión del fotocátodo. Los electrones liberados se difunden a través del gas inerte, y esos electrones que alcanzan el ánodo transparente pueden completar el circuito por flujo de corriente I a través de una resistencia a la carga externa RL . El poder es generado en la resistencia de carga de acuerdo a $P = IVR$, donde VR es un sesgo inverso acumulado hasta la corriente en el dispositivo está en equilibrio con el flujo de fotones entrantes [10].

La energía solar es una energía limpia y renovable, que es obtenida a partir de la radiación electromagnética procedente del sol, la radiación solar ha venido siendo aprovechada en conjunto con diferentes tecnologías desarrolladas en células o paneles solares fotovoltaicos que permiten convertirla en energía eléctrica para el consumo de la humanidad.

El aprovechamiento de la energía solar ha generado grandes ventajas como fuente de creación de energías renovables, ya que no contamina el medio ambiente, es una fuente de energía inagotable, generando de esta forma una gran alternativa para el suministro y aprovechamiento en zonas donde no hay cobertura de energía eléctrica, en la medida que la tecnología avanza permite disminuir el costo para la implementación de este tipo de sistemas, mientras que los sistemas de energía eléctrica cada vez se hacen más costosos por la disminución de los recursos naturales que permiten su generación.

Para aprovechar al máximo la energía solar, la superficie de los sistemas de energía solar deben estar posicionados perpendicularmente respecto a los rayos solares. Debido a esta razón, unas gamas amplias de sistemas de rastreo solar han sido propuestas por diversos autores. Estos sistemas están clasificados de acuerdo al mecanismo de orientación, grados de libertad que poseen y control electrónico. Cuando se habla de mecanismos de orientación se hace referencia al tipo de mecanismo que debe ser aplicado para la rotación y posición del sistema. Existe una amplia y diversa gama de mecanismos propuestos que involucran engranajes, poleas, sistemas hidráulicos, cilindros y motores [11].

Los autores han demostrado que estos parámetros son críticos respecto a la competitividad y rentabilidad de los sistemas solares. Los autores estudiaron las estrategias de uso de mecanismos de rastreo solar, el consumo de energía, mantenimiento, fallas, la deformación estructural y vulnerabilidad frente a corrientes de viento fuertes, puesto que los vientos ejercen un gran impacto en el sistema. En aplicaciones aeroespaciales (satélites), los autores investigan cual es la manera más eficaz de tener control sobre el movimiento del satélite y sobre el sistema de rastreo solar.

Para este caso. Ellos han tomado en cuenta el diseño, los materiales de los cuales está hecho, el peso y el uso que se le está dando al satélite. El segundo aspecto, los grados de libertad, hace referencia a los tipos de movimientos que los mecanismos de seguimiento del sol y los sensores que detectan la posición del sol tienen que realizar. Los sistemas solares deben rotar o seguir al sol desde el este hasta el oeste o desde el norte hasta la posición sur. De acuerdo con los autores este aspecto juega un papel importante en los costos de inversión, costos operacionales y en la precisión del seguimiento solar [11].

Finalmente, la atención que se debe dar al control electrónico ha ido aumentando en los últimos años. Los autores han discutido acerca del uso actuadores, el sol, sensores de posición o modelos matemáticos astronómicos y técnicas de control que deberían ser usadas en el sistema de rastreo solar. Muchos estudios relacionados con el tema han implementado modelos matemático astronómicos en sistemas solares, gracias a los costos, y su muy fácil implementación. La principal desventaja es que no se considera la influencia de los vientos sobre el sistema, daños causados por sobrecalentamiento u otras anomalías térmicas y métodos no muy buenos en cuanto a su instalación, entre otros. En este caso, algunos autores han implementado sensores que detectan la posición del sol, los cuales permiten seguir el Sol con un alto grado de precisión e interactuar con la estructura del sistema solar. Las ventajas que este dispositivo de rastreo ofrece son las siguientes: fácil implementación, un sencillo diseño, bajo costo y adaptabilidad [12].

En 2007, Luque et al. [13] usó un sensor que rastrea la posición del sol CON EL FIN DE posicionar paneles fotovoltaicos perpendiculares a la luz solar. Este sensor estaba básicamente compuesto por un tubo de colimación, un detector sensible a la posición (PSD) que mide la posición del Sol en dos direcciones (Norte-Sur y Este-Oeste), una estructura, un accionamiento mecánico y un sistema de control (microcontrolador electrónico), como se muestra en la Figura 3. El funcionamiento principio se basa en la medición de la diferencia en fotocorrientes generado por los PSD, cuando la luz pasa a través de la apertura del tubo de colimación e impacta a los fotodiodos

V. LOS MÓDULOS O PANELES FOTOVOLTAICOS

Los módulos o paneles fotovoltaicos son dispositivos conformados por un conjunto de células fotovoltaicas compuestas de material semiconductor, que permiten tomar la luz irradiada por el sol, la cual contiene fotones que al ser absorbidos por las celdas y entrar en contacto con los electrones permiten generar la energía eléctrica mediante un efecto denominado fotoeléctrico, que consiste en la emisión de electrones por un material cuando este es iluminado. Existen diferentes tipos de paneles solares fotovoltaicos en

función de los materiales semiconductores, métodos que se utilizan para su fabricación y la forma, pueden clasificarse de la siguiente manera:

A. Tipos de paneles solares fotovoltaicos

Paneles solares fotovoltaicos monocristalinos de celdas de silicio

Estos tipos de paneles solares fotovoltaicos están compuestos generalmente de celdas monocristalinas de silicio de alta pureza los cuales se obtienen a través de una técnica como la denominada *czochralski* o el método de la zona flotante, que se identifican por su forma octagonal redondeada, este tipo de paneles ofrecen unas magníficas características técnicas en climas donde se presentan nubosidades y tormentas. El silicio utilizado en este tipo de célula presenta alta pureza y una estructura cristalina perfecta. Como resultado del proceso de fabricación, las células tienen alrededor de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ y $350 \mu\text{m}$ de espesor, con una eficiencia de uso directo entre el 14-17% [14].

B. Paneles solares fotovoltaicos policristalinos de silicio

Los paneles solares fotovoltaicos policristalinos se obtienen a través de la combinación de varios cristales de silicio, mediante un proceso de solidificación direccional, donde las células de silicio policristalino que forman el panel solar policristalino se generan enfriando de forma controlada una célula monocristalina, formando múltiples cristales con orientación cristalográfica diferente formando lo que se conoce con el nombre de silicio multicristalino, posteriormente es cortado en placas que forman los módulos fotovoltaicos en los paneles solares policristalinos. La eficiencia de operación en este tipo de paneles es menor que con los monocristalinos, en pruebas de laboratorio presenta un rendimiento entre un 19% y 20% y una eficiencia directa entre un 11% a un 14% [14].

C. Paneles solares fotovoltaicos de capa fina o amorfos

En tipo de paneles solares fotovoltaicos conocidos también como *thin film*, las células de película delgada que los conforman son generalmente de silicio o se producen a partir de nuevos materiales, como el arseniuro de galio, telurio de cadmio o el Cobre Indio Diselenido. Estas células también llamadas amorfas están protegidas por medio de encapsulación con vidrio frontal y uno de protección posterior. Un módulo de capa fina o amorfo brinda un porcentaje de eficiencia menor a un 10% [14].

D. Paneles solares fotovoltaicos de células orgánicas

En este tipo de módulos fotovoltaicos la fabricación se basa en material orgánico formado principalmente por el carbono, polímeros y el uso de semiconductores orgánicos en reemplazo del silicio. Las películas orgánicas son preparadas por métodos tradicionales como la centrifugación, usando distintos disolventes y empleando diferentes concentraciones de moléculas y polímeros que son depositados por evaporación térmica [15]. Este tipo de células solares han aportado una gran alternativa para disminuir los costos de fabricación, de producción masiva y de mínima generación de residuos contaminantes, lo que ha permitido generar un menor impacto ambiental por su bajo consumo energético en el proceso de fabricación. Este tipo de células solares han venido evolucionado en los últimos años, por presentar ventajas como: bajo costo en la fabricación y elaboración de módulos más livianos, de menor dimensión y mayor flexibilidad, lo que ha permitido que se puedan incorporar en la elaboración de ventanas, edificios, prendas, maletines, portafolios, entre otros, facilitando que puedan doblarse y transportar con gran facilidad [15].

Actualmente, en gran cantidad de laboratorios a nivel mundial se viene trabajando en la optimización de procesos de fabricación de celdas orgánicas, buscando implementar nuevas técnicas que permitan incrementar la eficiencia y estabilidad de este tipo de módulos fotovoltaicos con el fin de aumentar la producción a gran escala de este tipo de celdas. Los módulos solares orgánicos presentan la desventaja de tener una baja eficiencia; sobre este tema se ha venido mejorando paulatinamente a nivel científico lo que ha permitido el progreso de la tecnología en celdas solares orgánicas en los últimos años, logrando un incremento de la eficiencia del 1% al 11.1% [15].

E. Factores que afectan la eficiencia en los módulos fotovoltaicos

Los sistemas de energía no convencional son cada vez más populares debido a su diversificación y fácil accesibilidad, pero existen varios factores ambientales en el rendimiento de la energía solar en los módulos solares fotovoltaicos que influyen y pueden afectar el rendimiento en la eficiencia de forma considerable, como son la suciedad producida por el polvo, el efecto producido por las sombras, las variaciones climáticas, la alta temperatura de las células solares, entre otros.

F. Suciedad generada por el efecto del polvo

La acumulación de polvo en los módulos de un sistema solar fotovoltaico es un proceso que se da de forma natural, este polvo hace que se presente una notable disminución en la radiación que llega a la célula solar, produciendo pérdidas a nivel de la potencia que genera, diferentes tipos de polvo generados por arcilla, arena, polvos de talco y otros medios de contaminación como la generada por aves, la caída de

hojas, crecimiento del musgo, entre otros, pueden reducir la eficiencia reduciendo la salida de potencia total del sistema solar fotovoltaico [16].

G. Efecto producido por las sombras

El efecto producido por las sombras en los paneles solares fotovoltaicos no permite que la luz del sol llegue de forma directa sobre la superficie del módulo, lo cual genera alteraciones en la corriente y el voltaje y por consiguiente fallas en la eficiencia del sistema de energía solar. Las sombras que se generan son producidas por árboles, estructuras físicas u otros factores externos que impiden que la luz del sol llegue uniformemente sobre la superficie del módulo. Este efecto hace que se presenten pérdidas en la recolección de la energía y de esta forma reduzca la potencia de salida y la eficiencia en el proceso de conversión de la energía en el módulo solar fotovoltaico. Cuando un módulo solar recibe el efecto producido por las sombras no permite recolectar la energía de forma uniforme, lo cual conlleva a que se generen variaciones respecto a la potencia que debe entregar y por consiguiente se puedan presentar daños a nivel físico en componentes como el inversor o las baterías [14].

H. Efecto de las variaciones climáticas

La eficiencia de las células fotovoltaicas está sujeta a las variaciones de temperatura, condiciones de la radiación solar y la temperatura ambiente, dichos factores climáticos en los sistemas solares fotovoltaicos hacen que se presente una variación en su punto máximo de potencia, lo cual genera que se presenten cambios en la curva de corriente-voltaje (I-V) [14]. Existen numerosas técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), que han sido desarrolladas para mejorar el rendimiento de los sistemas solares fotovoltaicos, que permiten que el sistema siempre esté en su máximo punto de potencia. En la actualidad existen varios métodos como son: Hill climbing (HC), logaritmo de perturbación y observación (P&O), logaritmo de conductancia incremental (INC), redes neuronales, algoritmos genéticos (GA), controladores difusos (FC). Sin embargo el método más utilizado es el de logaritmos de perturbación y observación (P&O) [14].

VI. TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO DEL MÓDULO SOLAR FOTOVOLTAICO

En un módulo solar fotovoltaico factores como en el proceso de conversión de la energía, el rendimiento eléctrico y la potencia de salida del módulo, juega un papel fundamental dependen fundamentalmente de la temperatura de funcionamiento del módulo. Los módulos solares absorben en promedio el 80% de la irradiación solar recibida, sin

embargo, una parte de esta irradiación se convierte en electricidad y la restante en calor. La fracción que se convierte en calor aumenta la temperatura del módulo solar fotovoltaico, lo que genera que se formen concentraciones de portadores intrínsecos produciendo una mayor saturación de corriente, lo que provoca una reducción en la eficiencia y deterioro en el módulo fotovoltaico [14].

Para regular la temperatura de los módulos solares fotovoltaicos son utilizados diferentes métodos con el fin de mejorar su eficiencia y controlar el aumento de la temperatura de los módulos fotovoltaicos son: Aire acondicionado, enfriamiento a base de agua, enfriamiento por inmersión líquida, refrigeración termoeléctrica, refrigeración del tubo de calor, micro-canales, intercambiadores de calor mejorado, enfriamiento por chorros, micro-canales híbridos y sistemas de cambio de fase [14].

Pruebas realizadas a nivel de rendimiento energético y térmico en sistemas solares fotovoltaicos naturalmente ventilados en Izmir (Turquía), arrojaron resultados con una notoria mejora en la eficiencia de hasta un 4% y un aumento en la generación anual de electricidad del sistema solar fotovoltaico entre 4.7% a 5.7%. También un estudio comparativo que se realizó entre un módulo fotovoltaico refrigerado por ventilación natural y el mismo módulo refrigerado con agua, la temperatura del módulo fotovoltaico refrigerado por agua fue menor que la del módulo fotovoltaico refrigerado por ventilación natural. El resultado mostró que el módulo refrigerado por agua genera una potencia eléctrica mayor y por consiguiente una mayor eficiencia del módulo fotovoltaico. A su vez una investigación realizada mediante el efecto del enfriamiento evaporativo sobre un módulo solar fotovoltaico, usando calor disipado para un ciclo de refrigeración, se encontraron mejoras entre el 4.9% y 7.6% en la eficiencia eléctrica del sistema solar fotovoltaico [14].

A. Baterías

En los sistemas solares fotovoltaicos la función fundamental de una batería es acumular la energía que se produce durante las horas de mayor intensidad de la luz solar, para que pueda ser suministrada en los periodos que el sistema requiera. Las baterías más utilizadas en instalaciones solares fotovoltaicas son las siguientes:

De plomo ácido: en las baterías de plomo ácido, el electrodo positivo (ánodo) se compone de una placa de dióxido de plomo recubierta por óxido de plomo y el electrodo negativo (cátodo) de plomo esponjoso y un electrolito de ácido sulfúrico diluido en agua. Además de ser utilizadas en automóviles, las baterías de plomo ácido son muy utilizadas en instalaciones solares fotovoltaicas que requieran el uso de baterías para el almacenamiento de energía, como

instalaciones solares fotovoltaicas autónomos off-grid. Si se colocan las celdas en serie, alternando positivo y negativo, podremos sumar las tensiones de cada una de ellas, y finalmente obtener un voltaje más alto (6 V, 12 V, 24 V). Si, por el contrario, colocamos las celdas en paralelo, positivos al lado de positivos, y negativos al lado de negativos, conseguiremos aumentar la intensidad de la batería [17]. Cuando la batería está completamente descargada y los electrodos han cambiado su naturaleza. Para volver a su estado inicial, se proporciona energía eléctrica a la batería para cargarla, de esta manera se permite que la corriente circule en el sentido contrario al habitual, recomponiendo los electrodos y de esta forma volver al estado inicial, para que la batería continúe suministrando la electricidad necesaria [17].

De níquel-cadmio: las baterías de Níquel-Cadmio están conformadas por unas placas positivas que contienen hidróxido de Níquel y por unas placas negativas que incorporan óxido de cadmio. El electrolito es de hidróxido de Potasio. El voltaje nominal de un elemento de batería de Ni-Cadmio es de 1,2 Voltios. Las baterías de Ni-Cd soportan procesos de congelación y descongelación sin generar efecto alguno en su funcionamiento. Soportan altas temperaturas, sobrecargas, pueden descargarse en su totalidad sin sufrir daño alguno, no presentan sulfatación, su capacidad para aceptar un ciclo de carga es independiente de la temperatura y los valores de auto descarga oscilan entre un 3 y 6% al mes [5]. El mantenimiento de este tipo de baterías es menor respecto a otras, como por ejemplo las de Plomo-ácido. Su ciclo de vida útil es más largo, lo anterior hace que se recomienden para implementaciones de sistemas fotovoltaicos en sectores aislados o de difícil acceso, por consiguiente, hace que sean más costosos en el mercado de las baterías [18].

De gel: las baterías de gel contienen un electrolito en forma de gel, lo que permite que la evaporación de éste sea menor, haciendo que aumente su durabilidad y permite un mayor número de ciclos de carga y descarga, respecto a baterías como las AGM o las de plomo ácido. También soportan descargas más profundas y son de mayor resistividad a vibraciones, golpes o elevadas temperaturas. Las baterías de Gel necesitan ser cargadas a baja tensión y el cargador debe estar apropiadamente ajustado para la carga. Su tasa de auto descarga es mínima, puede permanecer hasta 6 meses sin ser utilizada conservando el 80% de su carga. Durante la descarga presentan un voltaje más estable e ideal para su uso con inversores [17]. Este tipo de baterías ofrece también ventajas como estar libres de mantenimiento, y ser mucho más limpias que las baterías convencionales, ya que se eliminan por completo los escapes de ácido. Las baterías de gel pueden colocarse en cualquier posición, sin presentar escapes de líquido o gas, lo que permite que sean usadas con gran facilidad en espacios reducidos. Son útiles para instalaciones solares fotovoltaicas aisladas y muy recomendables para usos de una gran exigencia donde la

batería se convierte en un elemento indispensable para el óptimo funcionamiento del equipo o dispositivo que requiera se alimentado. Las baterías de gel son más costosas que otros tipos de baterías como por ejemplo las de plomo ácido clásicas [17].

AGM: las baterías tipo AGM fueron creadas en la década de los años 80, para su uso en la aviación militar, donde se necesitaban mayores rendimientos. Están compuestas por láminas de fibra de vidrio sobre electrodos, producen una migración más rápida del ácido lo que permite que puedan absorber o entregar cantidades superiores de corriente eléctrica durante su carga y descarga que otros tipos de baterías. Las baterías AGM pueden cargarse con una tensión normal lo cual permite que, en sistemas fotovoltaicos ya instalados, no haya necesidad de volver a realizar calibración alguna o adicionar algún tipo de cargador especial de baterías [4]. Estas baterías tienen la ventaja que pueden ser utilizadas para sistemas de arranque, ya que pueden proporcionar grandes cantidades de energía en periodos cortos de tiempo, y son una buena opción en el caso de que se tenga espacios reducidos, ya que ellas pueden ser instaladas en la posición que se desee. Las baterías AGM son también conocidas como baterías de funcionamiento en seco, ofrecen prestaciones muy superiores a las baterías de plomo ácido normales, y pese a utilizar una tecnología más avanzada, el precio de las baterías AGM, es muy similar que el de las baterías plomo ácido normales [17].

B. Inversor

Se encarga de convertir la corriente continua en corriente alterna, el inversor, se selecciona fundamentalmente en función de la sumatoria de las potencias de las cargas con las cuales fue dimensionado el sistema solar fotovoltaico. Si además, entre dichas cargas tenemos máquinas o equipos que demandan una intensidad de corriente de arranque superior a la intensidad de corriente nominal de los mismos, se deberá tener en cuenta que el inversor seleccionado posea las características apropiadas para tal fin [19]. Cuando se realiza la selección del inversor, se debe tener en cuenta adicionar una cantidad de reserva considerable, con el objetivo que sea capaz de entregar cierta cantidad de energía que inicialmente pudo no ser incluida en el diseño original; es decir que se tiene que considerar que el sistema de generación se puede ampliar en determinado momento [20]. Existen en el mercado inversores de onda senoidal modificada o también llamados cuasi senoidal, e inversores de onda senoidal pura. Los primeros, son más económicos, pero presentan la particularidad que en determinados equipos como televisores, radios o computadores, entre otros, generan ruido electrónico, lo cual hace que la calidad tanto de la imagen como del sonido, no sea óptima, basados en lo anterior lo más conveniente es seleccionar un inversor de onda senoidal pura [19].

Las variables a tener en cuenta a la hora de realizar la selección de un inversor para una instalación solar fotovoltaica son los siguientes:

Tensión Nominal: es la tensión que se debe aplicar a los terminales de entrada del inversor.

Potencia Nominal: es la potencia que puede suministrar el inversor de forma continua.

Capacidad de sobrecarga: hace referencia a la capacidad del inversor para suministrar una potencia considerablemente superior a la nominal, así como el tiempo que puede mantener esta situación.

Forma de onda: es la señal alterna que aparece en los terminales de salida del inversor, que se caracteriza por su forma de onda y los valores de tensión eficaz y frecuencia de la misma.

Eficiencia o rendimiento: hace referencia a la relación expresada en tanto por ciento, entre las potencias presentes a la salida y a la entrada del inversor. Su valor depende de las condiciones de carga del mismo, es decir de la potencia total de los equipos de consumo alimentados por el inversor en relación con su potencia nominal [21].

C. Regulador o controlador de carga

Es un dispositivo electrónico, que cumple con una labor fundamental en un sistema solar fotovoltaico, ya que permite realizar el control y la supervisión de la carga de las baterías, ya que pueden presentar sobrecargas que puedan afectar el desempeño del sistema y por consiguiente el ciclo de vida útil de las mismas y hacer que sea más corto de lo presupuestado, el regulador de carga permite controlar la descarga realizada por las baterías al punto que si es superado el rango de la capacidad nominal, permita efectuar la desconexión del consumo. El regulador también permite controlar el flujo de corriente de carga desde los módulos solares fotovoltaicos hacia las baterías y también el flujo de corriente de descarga desde las baterías hacia los equipos que se encuentran efectuando el consumo de energía [19].

D. Parámetros para la selección de un regulador de carga

Para realizar una buena elección de un regulador de carga, es necesario tener en cuenta ciertas características, con el objetivo de tener un funcionamiento óptimo del sistema fotovoltaico, a continuación, se mencionan los siguientes:

- Protección contra sobrecarga.
- Posibilidad de carga con batería descargada (9,5V).
- Protección contra descarga profunda.
- Óptima carga bajo diferentes temperaturas.
- Protección contra corto circuitos.

- Protección contra polaridad inversa.
- Display indicativo de estado de carga de baterías.
- Que el regulador esté adecuado bajo condiciones ambientales de temperatura y humedad (IP=65).
- Evaluar la posibilidad del seguidor de punto de máxima potencia (MPPT) (30% más energía) [19].

E. Sistemas fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos dependiendo de las necesidades, la situación geográfica de la zona y el acceso a la red eléctrica convencional, pueden clasificarse en sistemas fotovoltaicos On Grid y en sistemas fotovoltaicos autónomos (Off Grid).

Sistemas fotovoltaicos On Grid

Son aquellos sistemas donde la energía que se genera a través de los módulos solares fotovoltaicos, no se almacena mediante baterías y se entrega directamente a la red eléctrica para su consumo (figura 3).

Criterios pre diseño en sistemas fotovoltaicos On Grid

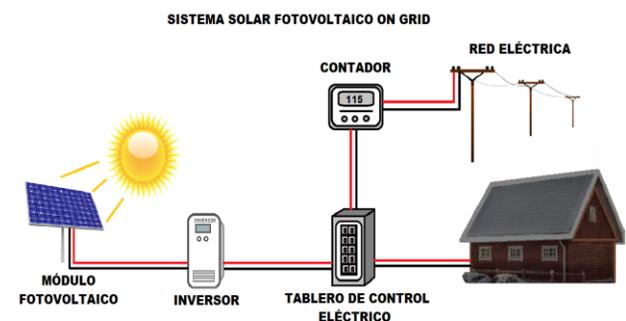
En el pre diseño de este tipo de sistemas se deben considerar los siguientes criterios:

Compensación por autoconsumo: las cargas que se quieren compensar; sólo iluminación; cargas día, o sólo un porcentaje del consumo.

Disponibilidad de recursos: teniendo en cuenta el recurso económico disponible, se podrá definir el alcance del sistema a instalar y el aporte de energía para el autoconsumo. El costo junto a la simulación de autoconsumo e inyección de excedentes, pueden ayudar a conocer el periodo de retorno de la inversión a realizar.

Análisis energético: se debe realizar una simulación de la generación fotovoltaica día, mes y año para conocer la energía generada, la energía fotovoltaica consumida y la posible inyección de excedentes [19].

Figura 3. Esquema de un sistema solar fotovoltaico On Grid



Etapas de diseño en sistemas fotovoltaicos On Grid

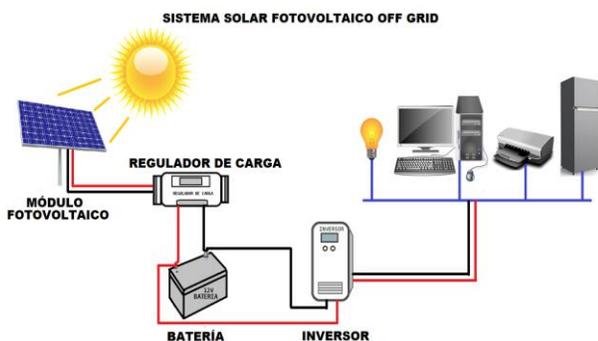
Respecto a los sistemas fotovoltaicos autónomos, este tipo de sistemas son más accesibles, ya que permiten eliminar el sistema de acumulación en baterías, permitiendo reducir de forma considerable el costo inicial del sistema en torno a un 30% (. Las etapas a tener en cuenta en el diseño de este tipo de sistemas son las siguientes:

- Analizar tanto la demanda, como el consumo eléctrico que requiere el usuario.
- Definir el valor correspondiente a la energía de autoconsumo.
- Considerar la localización de la instalación: energía solar, sombras, superficie disponible y la inclinación y orientación del sistema solar fotovoltaico.
- Establecer las características eléctricas y técnicas del sistema solar fotovoltaico.
- Definir el tipo de inversor a utilizar en la implementación del sistema solar fotovoltaico.
- Realizar tanto los cálculos para la operación del sistema en un día, como para un mes de operación y los demás meses a futuro [19].

Sistemas fotovoltaicos autónomos (Off Grid)

En este tipo de sistemas la energía que se genera a través de los módulos solares fotovoltaicos, se almacena a través de un banco de baterías, que en conjunto con un regulador de carga y un inversor el cual permite convertir la corriente directa (DC) en corriente alterna (AC) y de esta forma poder brindar el suministro de energía necesario (figura 4).

Figura 4. Esquema de un sistema solar fotovoltaico Off-Grid



Criterios pre diseño en sistemas fotovoltaicos Off Grid

En el pre diseño de este tipo de sistemas se deben considerar los siguientes criterios:

- Realizar implementación de un plan de eficiencia energética, con el objetivo de reducir al mínimo el consumo requerido.
- Tener en cuenta que equipos generadores de calor eléctricos como hervidores, microondas, hornos eléctricos, entre otros tienen un alto nivel de energía y potencia.
- Teniendo en cuenta los anteriores criterios llevarán a la reducción del presupuesto de los costos de inversión y operación directamente [19].

Etapas de pre diseño autónomo

- Conocer la demanda y consumo de energía eléctrica en kWh que se quiere compensar.
- Dimensionado de baterías, voltaje del sistema y capacidad de baterías que se requieren, tomando en cuenta las diferentes variables que implica la selección de las baterías.
- Diseño del sistema de generación fotovoltaica, potencia nominal según inclinación (latitud), azimut (= 0, porque corresponde a un módulo orientado al norte geográfico).
- Dimensionado de otros componentes, tales como: controlador de carga; inversor de corriente y voltaje; protecciones.
- Estimación de costos: permite saber el período de retorno de la energía generada [19].

Hay que tener en cuenta que, de los dos tipos de sistemas fotovoltaicos mencionados con anterioridad, en el diseño del sistema fotovoltaico autónomo y el dimensionamiento del banco de baterías, se requiere un gran conocimiento a nivel técnico con el objetivo de escoger la batería indicada.

VII. ENERGÍA EÓLICA

La energía eólica no contamina, es inagotable y frena el agotamiento de combustibles fósiles contribuyendo a evitar el cambio climático. Es una tecnología de aprovechamiento totalmente madura y puesta a punto. La energía eólica es considerada limpia, utilizando un recurso completamente natural como el viento. Las turbinas eólicas no producen emisiones a la atmósfera, con lo cual no causa lluvia ácida ni gases de efecto invernadero. Es una clase de energía que genera bajos costos de producción por [Kwh], respecto a los otros sistemas que generan energía a través de fuentes renovables. Los sistemas de energía eólica de gran capacidad son instalados en sectores rurales, permitiendo un crecimiento considerable de la economía rural. Entre sus desventajas se encuentra que el costo inicial es muy alto respecto a la generación por medio de combustibles fósiles. Otro aspecto es que se debe ser riguroso en el procedimiento

de la evaluación del potencial eólico del lugar donde se realizará el proyecto. La opción del almacenamiento de energía en los bancos de baterías va más allá límites económicamente viables para grandes aerogeneradores.

La energía eólica, depende de los gradientes de temperatura que permiten los movimientos del aire atmosférico, dado por la incidencia del sol en la superficie de la tierra [22]. Las regiones ubicadas dentro de la línea ecuatorial, a 0° de latitud son calentadas por el sol, en mayor proporción que en el resto de la tierra. El aire caliente es menos denso que el aire frío, por lo que subirá hasta alcanzar una altura aproximada de 10 km y se extiende hacia el norte y hacia el sur. Debido a la rotación del globo, cualquier movimiento en el hemisferio norte es desviado hacia la derecha, y en el hemisferio sur es desviado hacia la izquierda. Esta curvatura es llamada fuerza de Coriolis [23]. Para el aprovechamiento energético de los vientos se clasifican en dos:

Viento valle-montaña: los valles reciben más incidencia de los rayos solares que las montañas dando lugar a diferencias de temperatura. El aire caliente del valle asciende hacia la cima de las montañas, lo que provoca las corrientes que mueven las palas de las máquinas eólicas. Durante la noche el efecto se invierte, dando lugar a los denominados vientos de cañón, con las mismas posibilidades de aprovechamiento.

Brisa marina: es la corriente de aire que se produce por la diferencia de temperatura entre el agua del mar y la superficie de la tierra. Durante el día la mayor temperatura de la tierra da lugar a ascensiones del aire calentado que son rápidamente compensadas por la llegada de aire frío procedente del mar o grandes lagos. Al anochecer hay un periodo de calma cuando las temperaturas se igualan [23].

En el aprovechamiento de la energía eólica, las dos variables predominantes para el cálculo del potencial eólico son la velocidad y la dirección del viento.

La velocidad del viento es el parámetro más importante para determinar la viabilidad del uso de la tecnología de turbinas eólicas. Dependiendo donde se requiera la medición de la velocidad del viento, en la superficie se mide en m/s o Km/h y en la navegación marítima en millas/s o millas/h. Usualmente según la velocidad del viento, se puede clasificar en una escala, llamada Escala de Beaufort en honor a Francis Beaufort, quien en 1805 desarrolló una expresión matemática (1) para calcular la velocidad del viento.

$$V = \frac{0.837B^3}{2} \text{ [m/s]} \quad (11)$$

Tabla 1. Escala de Beaufort para la clasificación del viento según la velocidad [23].

Escala	Nombre	Velocidad en Km/h	
		Nudos	Metros/seg
0	Calma	1	0-0.2
1	Ventolina	1-3	0.3-1.5
2	Brisa muy débil	4-6	1.6-3.3
3	Brisa débil	7-10	3.4-5.4
4	Brisa Moderada	11-16	5.5-7.9
5	Brisa Fresca	17-21	8.0-10.7
6	Brisa Fuerte	22-27	10.8-13.8
7	Viento Fuerte	28-33	13.9-17.1
8	Temporal o Viento Duro	34-40	17.2-20.7
9	Viento muy fuerte	41-47	20.8-24.4
10	Temporal duro	48-55	24.5-28.4
11	Borrasca	56-63	28.5-32.6
12	Huracán	Más de 64	Más de 32.7

Otra particularidad de la velocidad del viento es su variación respecto a la altura.

La variación o gradiente de velocidad con respecto a la altura depende esencialmente de la rugosidad del terreno. Superficies lisas, como superficies de agua, terrenos llanos sin arbolado o llanuras nevadas, producen un gradiente suave, al contrario que las superficies de gran rugosidad, como edificaciones urbanas, terrenos muy irregulares o superficies boscosas.

Para caracterizar las condiciones de un terreno, se define el parámetro z_0 , denominado longitud de rugosidad, como la altura respecto al nivel del suelo expresada en metros, donde la velocidad del viento es nula. De esta forma, una superficie lisa, por ejemplo, un lago presenta una longitud de rugosidad muy pequeña (prácticamente la velocidad se puede suponer nula en la propia superficie del agua), mientras que un terreno boscoso o con edificios presenta un valor elevado (la velocidad del viento se hará nula en una zona próxima a la superficie de las copas de los árboles). En función del valor z_0 se puede clasificar el terreno, según el Mapa Eólico Europeo (WAsP) (tabla 2), en clases y longitudes de rugosidad [24].

La turbulencia disminuye la posibilidad de utilizar la energía en el viento de manera efectiva. Para una turbina de viento la turbulencia impone más rasgaduras y desgaste en la turbina eólica. Las torres para turbinas de viento son usualmente hechas lo suficientemente alto como para evitar la turbulencia del viento cerca del nivel del suelo [25].

Los obstáculos como los edificios, árboles y formaciones de roca pueden disminuir la velocidad del viento considerable y usualmente generan turbulencia en la vecindad. Habitualmente el viento fluye alrededor del obstáculo y la

zona de turbulencia se extiende a tres veces la altura del obstáculo. Esta zona de turbulencia es más pronunciada detrás del obstáculo. Por lo tanto, es mejor evitar los obstáculos más importantes cerca de las turbinas eólicas, particularmente si están en contra del viento en la dirección predominante del viento, es decir, "delante de" la turbina. Las torres de las turbinas eólicas son también obstáculos para aquellas que están detrás.

El efecto de ralentización en el viento de un obstáculo aumenta con la altura y la longitud del obstáculo. El efecto es obviamente más pronunciado cerca del obstáculo, y cerca del suelo. Entre más alta la turbina respecto al obstáculo menor será la sombra del viento producido. La sombra del viento sin embargo puede extenderse hasta cinco veces la altura del obstáculo a cierta distancia.

Tabla 2. Tabla de clases y longitud de rugosidad

Clases y longitudes de rugosidad		
Clase de rugosidad	Longitud de rugosidad (Z_0)	Índice de energía (%)
0	0.0002	100
0.5	0.0024	73
1	0.03	52
1.5	0.055	45
2	0.1	39
2.5	0.2	31
3	0.4	24
3.5	0.8	18
4	1.6	13

La distancia entre el obstáculo y la turbina es muy importante para efecto refugio. En general, el efecto refugio disminuirá a medida que uno se aleja del obstáculo, al igual que una columna de humo se diluye a medida que nos alejamos de una chimenea. En el terreno con muy baja rugosidad (por ejemplo, superficies de agua), el efecto de obstáculos (por ejemplo, una isla) pueden medirse hasta 20 km de distancia del obstáculo. Si la turbina está más cerca del obstáculo que cinco veces la altura del obstáculo, los resultados serán más incierto, ya que dependerá de la geometría exacta del obstáculo.

Desde que la turbina eólica genera la electricidad de la energía del viento, el viento deja la turbina tiene menos contenido energético que el viento que va llegando a la turbina. Las turbinas eólicas en parques son espaciados entre 5 y 9 el diámetro del rotor en la dirección del viento predominante. Mientras se camina entre edificios altos o en un paso de montaña estrecho, se puede notar que hay un incremento de la velocidad el aire se comprime en el lado ventoso de los edificios o montañas, y su velocidad aumenta considerablemente entre los obstáculos al viento. Esto es denominado como efecto túnel. Si la velocidad del viento es de 6 m/s en un terreno abierto, fácilmente puede alcanzar

hasta 9 m/s en un túnel natural. Ubicar una turbina eólica en un túnel es una manera inteligente para obtener mejores y más altas velocidades de viento que en las superficies de los alrededores. Para obtener un buen efecto túnel, la zona debe tener una turbulencia controlada, debido que la ventaja por el aumento de la velocidad se ve considerablemente afectada por la turbulencia [25].

Tabla 3. Tabla de clases y tipo de pesaje

Clase de rugosidad	Tipo de pasaje
0	Superficie del agua
0.5	Terreno completamente abierro con una superficie lisa. (Pistas de hormigón en los aeropuertos)
1	Área agrícola abierta sin cercado ni seto y con edificios muy dispersos. Sólo colinas suavemente redondeadas.
1.5	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aprox. de 1250 m.
2	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aprox. de 500 m.
2.5	Terreno agrícola con muchas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aprox. de 250 m.
3	Pueblos, ciudades pequeñas, terreno agrícola, con mucho p altos setos resguardantes, bosques y terreno accidentado y muy desigual.
3.5	Ciudades más grandes con edificios altos.
4	Ciudades muy grandes con edificios altos y rascacielos.

Así mismo es común ubicar las turbinas eólicas en las colinas o crestas con vistas al paisaje, en función de la dirección predominante del viento. El hecho de que el viento se comprima en el lado ventoso de la colina y una vez el aire alcanza la cresta puede expandirse y elevarse hacia el área de baja presión en el lado sotavento de la colina.

Para la selección del lugar de la instalación de la turbina eólica se debe considerar: a) las condiciones del viento, b) búsqueda de una vista y c) las condiciones del suelo y rutas de acceso. Las condiciones del viento son revisadas por datos meteorológicos, que lo ideal sería de los últimos 25 años, para realizar una predicción mucho más certera de la velocidad del viento y potencial eólico de la zona en particular. La variabilidad y aleatoriedad del viento según la estación, día y hora. Los efectos locales tales como orografía, rugosidad del terreno u obstáculos. La necesaria extrapolación para diferentes alturas respecto al nivel del suelo de las medidas tomadas a una altura determinada (generalmente 10m.).

La velocidad del viento se mide con un dispositivo llamado anemómetro. Los anemómetros más utilizados son de rotación. Están constituidos por tres o cuatro cazoletas que giran alrededor de un eje vertical por efecto de la acción del viento. Las cazoletas tienen forma esférica o cónica. En algunos casos en lugar de cazoletas, los anemómetros incorporan hélices. El anemómetro va dotado de un transductor que convierte velocidad de giro del sensor, en este caso las cazoletas, en una señal mecánica o eléctrica que permite su registro en banda de papel o bien directamente en soporte informático. En estaciones autónomas, no conectadas directamente a una red de captación y tratamiento de información, los datos se capturan, se guardan en un registrador de datos, y periódicamente se recogen para su posterior tratamiento.

Las principales características que debe presentar un anemómetro son: linealidad entre la velocidad del viento y la señal de salida. La medida de la velocidad no debe verse afectada por las variaciones de densidad, temperatura, presión y humedad del aire. Fiabilidad a largo plazo, es decir deben mantenerse las condiciones de calibración. Precisión, ya que, en aplicaciones de energía eólica, dado que la potencia es proporcional al cubo de la velocidad, un error del 10% en las medidas de velocidad puede traducirse en un error del 30% en la evaluación de potencia eólica. Este error se hace mucho mayor en los casos de extrapolar las medidas tomadas inicialmente a una determinada altura. La dirección acostumbra a medirse a través de una veleta [24].

VIII. FÍSICA ASOCIADA A LA ENERGÍA EÓLICA

La energía captada a través del viento, la cual es transferida al rotor depende de la velocidad del aire, la densidad del aire y el área del rotor.

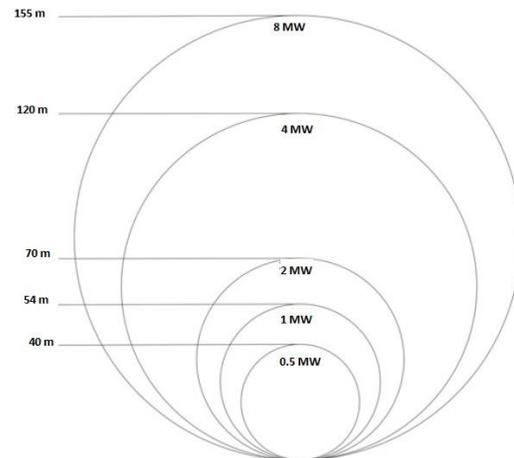
La densidad del aire es función de la presión atmosférica y de la temperatura del lugar donde se presenta instalar la turbina eólica. La densidad del aire disminuye con el aumento de la humedad. Y, por consiguiente, a grandes altitudes (cimas de las montañas), la presión atmosférica es menor, entonces el aire es menos denso [27].

El área de disco cubierta por el rotor y la velocidad del viento determina cuanta energía puede producirse en un audio. Si el diámetro aumenta al doble, la potencia producida aumenta cuatro veces.

Los diámetros de los rotores pueden variar un poco con respecto a las cifras indicadas anteriormente, ya que muchos fabricantes optimizan sus máquinas según las condiciones del viento local: un generador más grande, por supuesto, requiere más potencia (es decir, fuertes vientos) para poder girar. Entonces, si uno instala una turbina eólica en un área con poco viento, la producción anual se maximizará al usar

un generador bastante pequeño para un tamaño de rotor dado (o un tamaño de rotor mayor para un generador dado). En la figura 5, se puede observar la variación de la potencia en función del diámetro del rotor.

Figura 5. Variación del diámetro del rotor respecto a la potencia generada [22]



Una adecuada selección del diámetro del rotor, según el potencial eólico de la zona, permitirá que haya mayor cantidad de horas de producción de energía eléctrica a través de un sistema eólico [22].

Se considera un área A y aplicando una velocidad V, cambio de V respecto a la longitud y al tiempo [26]:

$$\Delta V = A * \Delta l \quad (12)$$

$$v = \frac{\Delta l}{\Delta t} \quad (13)$$

$$\Delta V = A * v * \Delta t \quad (14)$$

La energía del viento está presentada en forma de energía cinética [22]:

$$E = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad (15)$$

El cambio de la energía es proporcional al cambio en la masa del viento:

$$m = V * \rho_a \quad (16)$$

Reemplazando se tiene que la energía del viento en forma de energía cinética está en función del área del rotor, la densidad del aire y la velocidad de viento:

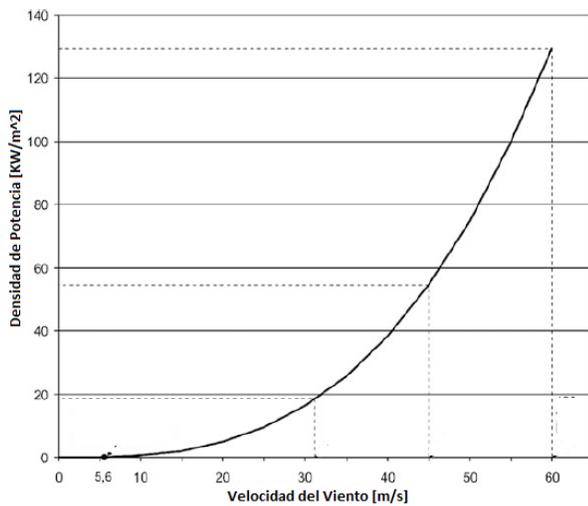
$$E = \frac{1}{2} * A * \rho_a * v^3 * t \quad [J] \quad (17)$$

Con lo cual se puede calcular la potencia generada así:

$$P = \frac{E}{t} = \frac{1}{2} * A * \rho_a * v^3 [W] \quad (18)$$

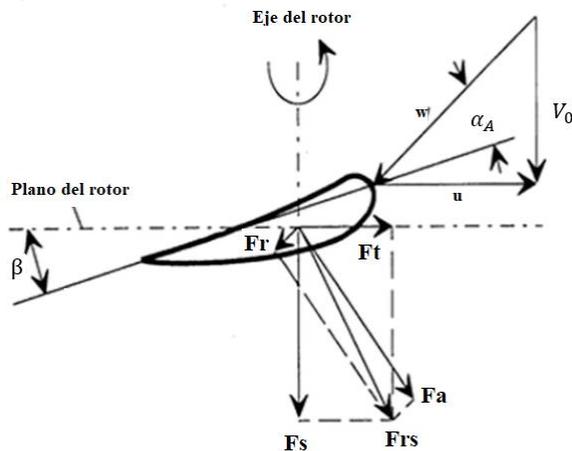
En la figura 6 se puede observar que la potencia generada por el rotor no es linealmente proporcional a la velocidad del viento. Es proporcional al cubo de la velocidad. Es mucho más rentable un convertidor de energía eólica colocarlo en una ubicación con velocidades eólicas ocasionalmente altas que en una ubicación donde haya una velocidad de viento constante.

Figura 6. Variación de la velocidad del viento respecto a la densidad de potencia [22]



En la generación de la potencia de la turbina eólica, la influencia de las siguientes fuerzas es fundamental y estas son producidas por el flujo de aire sobre el perfil aerodinámico (figura 7) [26].

Figura 7. Diagrama de fuerzas sobre el álabe del rotor de la turbina eólica [22]



Las mediciones en diferentes lugares muestran que la

distribución de la velocidad del viento en un año puede estar sujeta a una ecuación de Weibull. Esto significa que 2/3 de la energía producida será generada con un poco más del 1/3 de la velocidad del viento.

Desde el punto de vista mecánico, la densidad de potencia incrementa por mil para una variación de la velocidad del viento en un factor de 10. Por lo tanto, los sistemas convertidores de energía son construidos para aprovechar las velocidades del viento en las regiones superiores.

α_A es el ángulo de ataque

β es el ángulo de paso

u es la velocidad circunferencial promedio

V_0 es la velocidad del viento en el plano del rotor

w es la velocidad relativa de aproximación

F_R es la fuerza de arrastre

F_A es la fuerza de sustentación

FRs es la fuerza resultante

F_t es la componente tangencial

F_s es la componente axial

Fuerza de sustentación: está aplicada en la dirección perpendicular al flujo de aire incidente. La fuerza de sustentación es una consecuencia del diferencial de presión generado entre las superficies superior e inferior del perfil [27].

$$F_A = \frac{1}{2} * \rho_a * C_A * w^2 * A [N] \quad (17)$$

C_A es el coeficiente de la fuerza de elevación.

A es el área del rotor [m²]

w es la velocidad angular del rotor [rpm]

Fuerza de arrastre: la componente tangencial a la dirección del aire incidente. La fuerza de arrastre se presenta debido a las fuerzas de fricción en la superficie del perfil aerodinámico y al delta de presión que se produce en la superficie del perfil orientado hacia el viento de incidencia o de entrada [27].

$$F_R = \frac{1}{2} * \rho_a * C_R * w^2 * A [N] \quad (18)$$

C_R corresponde al coeficiente de la fuerza de arrastre.

La relación entre las dos fuerzas está dada por la razón

E_G :

$$E_G = \frac{C_A}{C_R} \quad (19)$$

La fuerza resultante corresponde a la suma de las fuerzas de sustentación y arrastre:

$$FRs = F_R + F_A \quad (20)$$

Y según las componentes tangenciales (plano del rotor) y axiales (eje del rotor) se tiene:

$$FRs = F_T i + F_S j \quad (21)$$

IX. COEFICIENTES DE POTENCIA Y PRINCIPIOS DE DISEÑO

El rotor de la turbina eólica captura el viento, frenándolo a causa de la conversión de la energía cinética a energía rotacional. De acuerdo con esto el movimiento del viento es más lento dejando el rotor comparado con el que tenía cuando entró en contacto con los álabes de la turbina. Más abajo la turbulencia en el viento más lento que está detrás de la turbina, se puede ocasionar una mezcla con el viento en movimiento en los alrededores. La sombra de viento detrás del rotor va disminuyendo a medida que el viento se aleje de la turbina.

La ley de Betz enuncia el grado de conversión de la energía cinética a energía mecánica. La ley de Betz establece un valor máximo de 59.25 % de la energía cinética del viento se puede convertir en energía mecánica por medio de una turbina eólica. Este es llamado coeficiente de potencia o número de Betz. Este número no es más alto porque el viento en el lado posterior del rotor debe tener una velocidad lo suficientemente alta como para alejarse y permitir más viento a través del plano del rotor. El coeficiente de potencia, es la eficiencia entre el álabes del rotor y el viento [26].

$$Cp = \frac{Pr}{P} \quad (22)$$

El máximo coeficiente de potencia está determinando por la razón $v_1/v_2=1/3$. Por lo tanto, una turbina ideal frenará al viento en $2/3$ de su velocidad original. Otro parámetro a destacar es la razón de velocidad de punta del extremo final del álabes de la turbina y la velocidad del viento V_0 , que llega de frente al rotor de la turbina eólica.

$$\lambda_s = \frac{Ue}{V_0} \quad (23)$$

Si λ_s es pequeña, entonces la velocidad angular es pequeña por lo tanto el ángulo de ataque se incrementa. Cuando el ángulo de ataque aumenta hasta un ángulo crítico, el flujo rompe el perfil laminar y se convierte en turbulento reduciendo drásticamente la fuerza de sustentación. Si la razón de la velocidad de la punta del álabes es muy grande, la fuerza de sustentación alcanza su máximo valor y luego disminuye reduciendo la eficiencia de potencia del convertidor.

La eficiencia de potencia del álabes del rotor está determinada por la relación entre el coeficiente de potencia y la relación de velocidad de la punta del álabes. También depende significativamente del ángulo de paso.

Además, el coeficiente de potencia C_p , la cual puede ser interpretada como la eficiencia entre los álabes del rotor y el viento, hay también pérdidas de energía en los componentes mecánicos del rotor y los engranajes del reductor de velocidad entre la turbina y la conexión con el generador.

$$\eta = Cp * \eta_m * \eta_{ge} \quad (24)$$

η_m es la eficiencia mecánica

η_{ge} es la eficiencia del generador acoplado

La eficiencia a su vez puede ser definida como la razón entre la potencia eléctrica y la potencia por la energía cinética del viento.

$$\eta = \frac{P_{el}}{\frac{1}{2} * A * v^3} \quad (25)$$

La velocidad del viento varía con la altura del eje del rotor de la turbina eólica. El perfil de viento muestra que se tiende a una velocidad más baja cuando se acerca al nivel del suelo, llamado cizalladura del viento. Este parámetro es importante para el diseño de la turbina eólica. La ley del perfil logarítmico indicada en la ecuación (#), establece la relación de la rugosidad del terreno:

$$v = v_{ref} * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) * \ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right) \left[\frac{m}{s}\right] \quad (26)$$

v es la velocidad del viento a la altura z sobre el nivel del suelo

v_{ref} : velocidad del viento de referencia respecto a la altura de referencia.

z es la altura sobre el nivel del suelo para una velocidad deseada v .

z_{ref} es la altura de referencia, en la cual está medida la velocidad de referencia.

z_0 es la longitud de rugosidad en la dirección del viento.

El promedio de las velocidades del viento a menudo disponibles provenientes de las observaciones meteorológicas con medidas a 10 m. La altura de los ejes de los rotores de turbinas eólicas modernas de 1000 a 3000 KW, son usualmente de 80-130 m. Usando la aproximación, se puede calcular la velocidad promedio. No es tan estrictamente válida para ubicaciones donde haya obstáculos cerca a la turbina o por una altura por encima de la altura del eje. Un estudio exhaustivo de la velocidad de viento. Es recomendable para la selección de la variación del lugar. Es muy importante entender de la energía eólica, que la variación de la velocidad del viento medida en periodos de

tiempo gobierna la producción energética [29].

La variación del viento para un sitio es usualmente descrita por la distribución de Weibull. La distribución estadística puede variar de un sitio a otro en su forma y en su valor medio, de acuerdo también con las condiciones climatológicas locales, el paisaje y la superficie. Hay dos parámetros que gobiernan la forma de la curva de distribución de Weibull, el parámetro de escala y el parámetro de forma [29].

$$P(V) = \frac{K}{C} * \left(\frac{V}{C}\right)^{k-1} * e^{-\left(\frac{V}{C}\right)^k} \quad (27)$$

P (V) es la probabilidad estadística de que ocurra una determinada velocidad V.

C es el factor de escala cuyo cercano a la desviación típica ya que tiene unidades de velocidad.

K es el factor de forma cuyo valor es cercano a la desviación típica y es a dimensional.

La probabilidad de que exista una velocidad del viento superior a una determinada velocidad Vx:

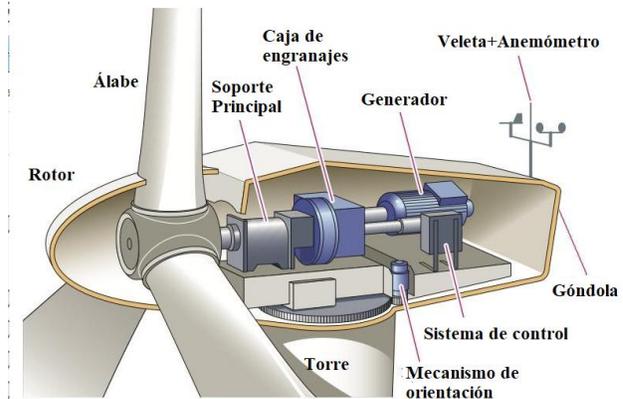
$$P(V \geq Vx) = e^{-\left(\frac{Vx}{C}\right)^k} \quad (28)$$

$$P(Vy \leq V \leq Vx) = e^{-\left(\frac{Vx}{C}\right)^k} - e^{-\left(\frac{Vy}{C}\right)^k} \quad (29)$$

Un alto valor del factor de forma entre 2 y 3 significa que la distribución está sesgada hacia las velocidades más altas de viento. Si el parámetro de forma está entre 1 y 2 significa que la distribución está sesgada hacia las bajas velocidades de viento, indicando que es más alta probabilidad de presentarse éstas. Los dos parámetros influyen la curva de distribución pico, pero uno de ellos tiene influencia en el valor promedio y el otro tiene influencia mayoritariamente el sesgo de la curva. Cuando el valor del parámetro de forma es igual a 2, se le denomina Distribución de Rayleigh [22].

Aerogenerador

Un aerogenerador es una máquina que permite la conversión energética de la fuerza del viento a energía eléctrica, por medio de una conversión mecánica. Los elementos más importantes de los aerogeneradores: los álabes de la turbina, el buje, el equipo multiplicador de potencia, los ejes de alta y baja velocidad, el generador, el controlador electrónico la torre (figura 8). Las turbinas eólicas actualmente trabajan en condiciones ambientales con vientos y direcciones de viento cambiantes, en el cual se deben tener consideraciones especiales. La baja presión es creada en la superficie superior del álabes, esto crea la fuerza de sustentación [22].



Escoger perfiles para álabes de turbinas involucra a un número de compromisos incluidos que permitan al perfil la habilidad de funcionar bien si tiene suciedad en su superficie. Un rotor está compuesto por un eje y el álabes, según la figura #, lo componen la línea principal de alta presión y el borde posterior de baja presión.

La potencia de la rotación del rotor de la turbina eólica es transferida al generador a través del eje principal, la caja de engranajes y el eje de alta velocidad. Con la caja de engranajes se obtiene un alto.

Los rotores modernos están fabricados de fibras de vidrio reforzada con plástico, epoxy y poliéster. En rotores de 3-8 MW de capacidad se utiliza la fibra de carbono y kevlar como material de refuerzo. Escoger los perfiles para los álabes del rotor involucra una serie de parámetros que permitan al perfil funcionar bien ante los agentes agresivos como el polvo, la suciedad y la lluvia.

La potencia de la rotación del rotor de la turbina eólica es transferida al generador por medio del equipo multiplicador de potencia, que, a través del eje principal, la caja de engranajes y el eje de alta velocidad. Las relaciones de velocidades en las turbinas eólicas están en el intervalo de 30-200 [22]. Uno de los aspectos más importantes en la caja de engranajes, es la lubricación, debido a sus cambios de temperatura. Ya que, en lugares como Europa y América de Norte, el lubricante tiende a congelarse, en lugares más tropicales y áridos tiende a degradarse por las altas temperaturas.

La torre, es la estructura dónde está montado el rotor de la turbina eólica. La torre evita las turbulencias de aire que puedan existir cerca del piso debido a obstrucciones y árboles. Por regla general se recomienda instalar la turbina en una torre en la cual la parte inferior del rotor quede a una altura de 30 metros por encima de cualquier obstáculo. Si una turbina se instala a 100 pies en vez de 60 pies puede incrementar la inversión en un 10%, pero la ganancia de generación de energía es de 25% [28].

Figura 8. Partes de un aerogenerador [30]

Las torres para grandes turbinas eólicas deben ser torres de acero tubulares, torres de celosía y o torres de concreto. Las torres abatibles. Las turbinas eólicas más grandes, son requeridas las torres de acero, las cuales son manufacturadas en secciones de 20-30 m con bridas en cada extremo y atornilladas juntas en el sitio. Las torres son cónicas (es decir, con su diámetro aumentando hacia el base) para aumentar su fuerza y ahorrar materiales al mismo tiempo [26].

Torres de celosía son fabricadas usando con perfiles de acero soldadas. La ventaja básica de las torres de celosía es su costo, de acuerdo con esto requiere la mitad del material que una torre tubular del mismo espesor [26].

La ventaja del bajo costo de una torre de celosía existe únicamente en países donde la mano de obra es económica. En países como Alemania, donde la mano de obra es costosa, en la cual lo que puede ser una ventaja por el ahorro del material, el costo puede incrementar en la construcción y el montaje de la torre. Otra desventaja de las torres de celosía es su apariencia antiestética. Estas torres son utilizadas en máquinas pequeñas por debajo del tamaño de las turbinas de MW de capacidad. Torres de concreto: recientemente, con miras al incremento en la altura más de 100 m, del suelo al eje del rotor, debido al incremento del precio del acero, son fabricantes empezaron a construir torres de concreto. Por lo tanto, en el futuro puede haber un tipo adicional de torre en el mercado de la energía eólica. Las torres abatibles son ancladas con cables metálicos. Su ventaja radica en el ahorro en el peso y en el costo. Pero en contraposición, es complicado ubicarlas en zonas de granjas. Son utilizadas para turbinas eólicas para tamaños que corresponden a capacidades de KW [22].

El generador de la turbina eólica convierte la energía mecánica a energía eléctrica. Los generadores de las turbinas eólicas son un poco inusuales, comparados con los generadores comúnmente utilizados en la red eléctrica. En grandes turbinas eólicas, el voltaje generador por la turbina es usualmente alrededor de 690 V trifásico, y luego la corriente es enviada a un transformador para elevar el voltaje a 10000 a 30000 voltios, dependiendo del estándar en la red eléctrica local. Los fabricantes suplen turbinas eólicas de 50 [Hz] y 60 [Hz] (América). Los generadores necesitan refrigeración mientras trabajan. La mayoría de las turbinas eólicas está encapsulado el generador en un ducto, usando un gran ventilador para refrigerar con el aire. Los fabricantes han propuesto usar refrigeradores hidráulicos. Los cuales son compactos, pero necesitan un radiador para transferir el calor hacia el exterior de la góndola [26].

La velocidad del generador la cual es directamente conectada es contante dictada por la frecuencia de la red. La relación entre la velocidad rotacional del generador y la frecuencia es gobernada por la fórmula:

$$\text{Rotación por segundo} = \frac{\text{Frecuencia por segundo}}{2 * \text{Número de Polos}} \quad (30)$$

El número de polos significa el número de bobinas en el estator del generador el cual, la potencia eléctrica es generada. Dos polos hacen un par de polaridad. El número de polos serán decididos para la construcción del generador. Por qué el hecho es que la red está operando en tres fases, el generador puede también producir una corriente trifásica alternativa. Cada polo consiste en la construcción de 6 magnetos.

Cuando el número de los pares de polos son duplicados en el estator de un generador sincrónico, la rotación será reducido a la mitad. En las turbinas eólicas con caja de velocidades, usan generadores con dos o tres pares de polos. La razón para ello es que las altas velocidades de los generadores influyen en el ahorro de tamaño y costo [30].

La gran mayoría de las turbinas eólicas de eje horizontal usan mecanismos de orientación que utilizan motores eléctricos y cajas de velocidades para mantener el plano del rotor, perpendicular a la dirección del viento. La mayoría de los fabricantes de turbinas eólicas donde el viento entra de frente a los alabes del rotor (upwind) prefieren aplicar frenos al mecanismo de orientación. Éste es activado por un controlador electrónico para chequear la posición de la veleta en la turbina muchas veces por minuto, cuando la turbina está en funcionamiento.

La acción de frenado es requerida por varias razones. Hay varios tipos de frenos para un rotor en una turbina eólica: frenos aerodinámicos, frenos eléctricos y frenos mecánicos. En caso de un freno aerodinámico, el álabe se gira en una dirección en el cual el efecto de la sustentación que causa la rotación no aparece. En el caso del freno electro-magnético, la energía producida por el generador de una turbina eólica, se vierte en un banco de resistores, por lo tanto, convirtiéndolo en calor. Otro tipo de frenada es el convencional de tipo mecánico, con frenos de disco que son dispuestos en la góndola [22].

Es esencial que las turbinas eólicas se frenen automáticamente en caso de un mal funcionamiento de un componente crítico, por ejemplo, si el generador se está sobrecalentando o es desconectado de la red eléctrica, el rotor se empezará a acelerar rápidamente en cuestión de segundos. Lo cual hace imprecisidible un sistema de sobre velocidades. La mayoría de las compañías proveen turbinas eólicas con dos mecanismos independiente para el frenado seguro de la turbina.

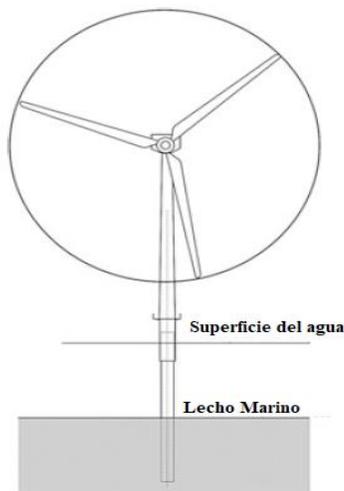
Las turbinas eólicas pueden ser bastante sensible a niveles de vibración muy altos. Debido a que la vibración causa cargas de fatiga que causan falla en los materiales. Otro

efecto que produce es la generación de ruido. Con lo cual las turbinas eólicas poseen sensores de vibración. Las turbinas eólicas modernas tienen un sistema de monitoreo de vibraciones, en el caso de un exceso de vibraciones, decide la operación de la máquina, con la ayuda del procesador [26].

Antes de la actuación de los sistemas de control, es necesario medir la velocidad y la dirección del viento. Con lo cual se hace necesario la utilización de un anemómetro de copa. Éste tiene un eje vertical con tres copas que capturan el viento.

Las partes móviles de una turbina, traen consigo la necesidad de lubricación. Hay dos tipos de sistemas de lubricación: el primero es un sistema de lubricación central, el cual envía el lubricante para todos los cojinetes. El otro sistema tiene un contenedor presurizado de lubricante para cada cojinete.

Figura 9. Cimentación monopila

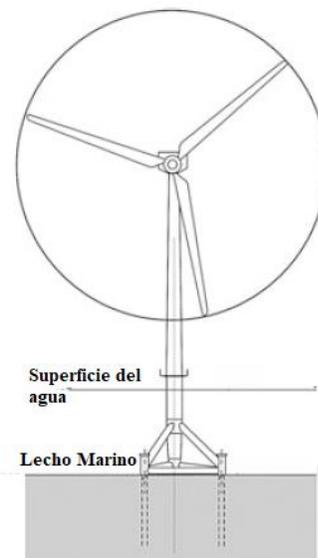


La cimentación se hace imprescindible debido a la altura y el peso de la torre, la góndola y el rotor. En las instalaciones en tierra (on-shore), el tipo de cimentación está gobernado por la naturaleza del suelo. En las instalaciones en el mar, está gobernado por la profundidad del mar [22]. Hay varios tipos de cimentación como:

Cimentación monopila: consiste en una pila de acero que se conduce aproximadamente 10-12 m en el fondo del mar (figura 9).

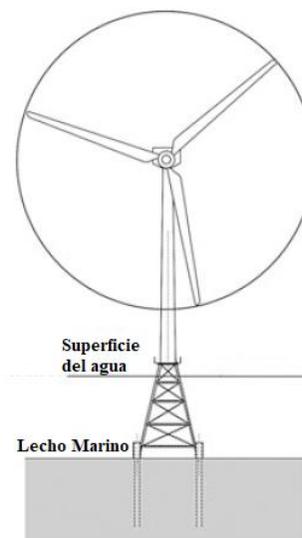
Cimentación trípode: las pilas en cada extremo generalmente se conducen a unos 10 m en el fondo del mar, dependiendo de las condiciones del suelo (figura 10).

Figura 10. Cimentación trípode



La cimentación jacked, tiene una torre abatible, que tiene cables metálicos anclados en el suelo marino (figura 11).

Figura 11. Cimentación jacked



Hay muchos sensores usados en la góndola, como termómetros electrónicos que verifican la temperatura del aceite en la caja de engranajes y la temperatura del generador. Otras medidas importantes que juegan un papel importante en la conexión y operación de una turbina eólica con rejilla: medición de frecuencia de voltaje, ángulo de fase medición, medición de revolución, medición de suministro de energía eléctrica. También están los sistemas de autocontrol con un enlace de telecomunicaciones a un servicio común punto. Todos estos hacen que la turbina eólica sea más eficiente y esté disponible para un tiempo máximo para la generación económica de energía.

Doak et. al [31] optimizó una turbina eólica tipo Darrieus, capaz de funcionar a bajas velocidades de viento. Este tipo de turbina está caracterizada por un bajo torque inicial comparado con el rotor Savonius. Por ello se permite operar por un periodo largo de tiempo. Se considera un sistema capaz de un auto comienzo cuando se presentan bajas velocidades. Este estudio consiste en tres partes: primero, un sistema de monitoreo y control del ángulo de ataque que permite el autoarranque a bajas velocidades, el cual es presentado aquí, luego presenta un método para obtener un perfil con un buen torque de arranque y la tercera parte presenta los resultados experimentales del impacto de la variación del ángulo de ataque, la velocidad del viento en la sustentación, las fuerzas y el torque. Se consideró un mecanismo que permite a los álabes pivotarse durante la rotación para que haya la máxima incidencia, para el incremento del torque de arranque. El óptimo máximo ángulo de ataque fue de 15°. Se observa que una vez alcanzado el estado estable la incidencia de la turbina eólica nunca excede 0.25 rad.

Fulzele y Daigavane [32] plantearon un trabajo de investigación que busca el diseño y la optimización de un sistema de energía renovable híbrido considerando el efecto de las variables sensibles como la radiación solar global, la velocidad del viento y el costo del panel fotovoltaico. El resultado muestra que para cada variable del sistema que consta de energía solar, viento con batería y convertidor, se obtiene la solución más económica y viable para el sitio propuesto. El principal objetivo de acoplar el sistema solar fotovoltaico, con el sistema eólico es optimizarlo para evaluar la viabilidad económica. La viabilidad económica tiene mayor prioridad que la viabilidad técnica en un país en desarrollo como la India.

X. CONCLUSIONES

A modo de conclusión se plantea que Colombia tiene un adecuado potencial para la implementación de las energías solar fotovoltaica y energía eólica, debido a la favorabilidad de la ubicación geográfica. El rango promedio de la radiación solar anual es de 4.0-4.5 [KWh/m²]. Las dos tecnologías eólicas y solar fotovoltaica son las que presentan más desarrollo, lo cual permite la reducción de los costos de producción de energía eléctrica, es decir un valor por kilowatio-hora competitivo, con las formas de generación eléctrica convencional. Este trabajo de investigación enunció las principales características de estos sistemas, la física asociada a ellos, los dispositivos y la forma como están acoplados y las variables que se deben tener en cuenta para una producción de energía eléctrica eficiente.

XI. REFERENCIAS

- [1] Energy Outlook 2017, British Petroleum Company, 2018. [Online]. Disponible: <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/energy-outlook-2017/bp-energy-outlook-2017.pdf>. [Consultado: 15- Feb- 2018].
- [2] "Global Status Report", Renewable Energy Policy Network for 21st Century, 2018. [Online]. Available: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf. [Accessed: 15- Feb- 2018].
- [3] C. Rufin. (2015, Sep.). Wind Energy in Latin America. *Harvard Review in Latin America: Energy, oil, gas and beyond*. [En línea]. 15, pp. 36-37. Disponible en: http://revista.drclas.harvard.edu/files/revista/files/energy_fall_2015.pdf?m=1442258744
- [4] L. Martinez, "La eólica crece en Latinoamérica", Revista Eólica y del Vehículo Eléctrico, vol. 84, 2016.
- [5] "Parque Eólico Jepirachi", Empresas Públicas de Medellín, 2018. [Online]. Disponible de: <https://www.epm.com.co/site/home/institucional/nuestras-plantas/energia/parque-eolico>. [Accessed: 20- Feb- 2018].
- [6] "Radiación Solar", Agencia Estatal de Meteorología. [Online]. Available: http://www.aemet.es/documentos/es/eltiempo/observacion/radiacion/Radiacion_Solar.pdf. [Accessed: 23- Feb- 2018].
- [7] J. Vargas Bautista and G. Navia A., "Desarrollo de un sistema de control para la captura y medición experimental de la eficiencia y curva característica i-v en tiempo real de un sistema fotovoltaico utilizando LABVIEW® y ARDUINO", Investigación & Desarrollo, vol. 15, no. 1, pp. 49-64, 2015.
- [8] "Piranómetro", Ecured, 2018. [Online]. Available: <https://www.ecured.cu/Piran%C3%B3metro>. [Accessed: 28- Feb- 2018].
- [9] "Mapas de Radiación Solar Global Sobre una Superficie Plana", Unidad Planeación Minero Energética UPME, 2010. [Online]. Available: http://www.upme.gov.co/docs/atlas_radiacion_solar/2-mapas_radiacion_solar.pdf. [Accessed: 09- Mar- 2018].
- [10] M. Jimenez, C. Franco and I. Dyrer, "Diffusion of renewable energy technologies: The need for policy in Colombia", Energy, vol. 111, pp. 818-829, 2016.
- [11] L. Salgado-Conrado, "A review on sun position sensors used in solar applications", Renewable and Sustainable

- Energy Reviews, vol. 82, pp. 2128-2146, 2018.
- [12] G. Bell and Y. Ramachers, "Photoelectric Solar Power Revisited", *Joule*, vol. 1, no. 4, pp. 639-642, 2017.
- [13] A. Luque, *Concentrator Photovoltaics*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007.
- [14] "Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones", *Ingeniería Mecánica*, Universidad Santo Tomás, 2017.
- [15] Fagua, A. and S., W. (2018). *Celdas Solares Orgánicas*. [online] Jdc.edu.co. Available at: <https://www.jdc.edu.co/revistas/index.php/rciyt/article/view/27/29> [Accessed 30 Mar. 2018].
- [16] R. Bhol, R. Dash, A. Pradhan, and S. M. Ali, "Environmental effect assessment on performance of solar PV panel," 2015 Int. Conf. Circuits, Power Comput. Technol. [ICCPCT-2015], pp. 1–5, 2015.
- [17] Anon, (n.d.). ¿Cómo funcionan las baterías de plomo ácido?. [online] Available at: <https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/como-funcionan-las-baterias-de-plomo-acido>.
- [18] Anon, (n.d.). *Enersac - Energías Renovables*. [online] Available at: <http://www.enersac.com/energia-solar-faq-que-diferencia-hay-entre-las-baterias-de-plomo-acido-y-niquel-cadmio.php>.
- [19] *Energía Estratégica*. (2018). *La importancia de seleccionar un sistema solar fotovoltaico | Energía Estratégica*. [online] Available at: <http://www.energiaestrategica.com/la-importancia-de-seleccionar-un-sistema-solar-fotovoltaico/> [Accessed 11 Apr. 2018].
- [20] Radian.cl. (2018). [online] Available at: <http://radian.cl/documents/Curso-Solar-FV.pdf> [Accessed 10 Apr. 2018].
- [21] SunFields Europe - Venta paneles solares, inversores y equipos fotovoltaicos. (2018). *Inversor Fotovoltaico - Conceptos Básicos*. [online] Available at: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/equipos-solares-ondulador-o-inversor-fotovoltaico/> [Accessed 11 Apr. 2018].
- [22] H. Wagner and J. Mathur, *Introduction to wind energy systems*. Berlin: Springer, 2013.
- [23] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), *Marco Conceptual del Viento*. Bogotá, 2018.
- [24] R. Bayón, L. Cebadera and R. Del Castillo, "Diseño de un parque eólico de 6MW en Malpica de Bergantiños, La Coruña", *Licenciatura, EOI-Escuela de Negocios*, 2018.
- [25] N. Bansal, M. Kleemann and M. Meliss, *Renewable energy sources and conversion technology*. New Delhi [u.a.]: Tata McGraw-Hill, 1990.
- [26] T. Burton, *Wind energy*. Chichester: J. Wiley, 2001.
- [27] L. García, "Análisis aerodinámico del perfil de los álabes de una turbina eólica de eje vertical mediante simulación en 2d usando CFD", *Licenciatura, Universidad Industrial de Santander*, 2014.
- [28] National Renewable Energy Laboratory, *Sistemas eólicos pequeños para generación de electricidad*.
- [29] J. Duffie and W. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*. Hoboken: Wiley, 2013.
- [30] A. Bandi and K. Heinloth, *Energy technologies*. Berlin: Springer, 2006.
- [31] M. Douak, Z. Aouachria, R. Rabehi and N. Allam, "Wind energy systems: Analysis of the self-starting physics of vertical axis wind turbine", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 1602-1610, 2018.
- [32] J. Fulzele and M. Daigavane, "Design and Optimization of Hybrid PV-Wind Renewable Energy System", *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 1, pp. 810-818, 2018.

BIOGRAFÍA



Daniela Juliana Rey Benavides nacida en Bucaramanga. Ingeniera Mecánica, Magíster en Ingeniería Mecánica (en formación) de la Universidad Industrial de Santander. Actualmente se desempeña como Docente Tiempo Completo de la Corporación Universitaria de Ciencia y Desarrollo (UNICIENCIA).

Interesada en la investigación e implementación de sistemas de energías renovables, sistemas térmicos y políticas de desarrollo sostenible.



Edwin Ayala Mogollón nacido en Bucaramanga, Santander.

Ingeniero Electrónico de la Universidad del Valle. Magíster en Gestión de la Tecnología Educativa de la Universidad de Santander (UDES). Especialista en Informática Educativa. Actualmente se desempeña como docente en educación básica y media en la Institución Educativa El Pórtico (Aratoca, Santander) y docente universitario tiempo completo en la Corporación Universitaria de Ciencia y Desarrollo (UNICIENCIA).

Julián Barney Jáimes Rincón

nacido en Cúcuta, Norte de Santander. Ingeniero de Sistemas de la Universidad Autónoma de Bucaramanga, Especialista en Tecnologías Avanzadas para el Desarrollo de Software de la Universidad Autónoma de Bucaramanga, Especialista en Telecomunicaciones y Magíster en Gerencia de Negocios de la Universidad Industrial de Santander. Docente tiempo completo y director del programa de Ingeniería de Sistemas de la Corporación Universitaria de Ciencia y Desarrollo (UNICIENCIA).

