Programa de la asignatura:

Diseño de sistemas eólicos

U1 | Meteorología del viento

Índice

Presentación de la unidad 3
Competencia específica..... 6
Propósitos..... 6
1.1. Aprovechamiento del viento 7
1.1.1. El gradiente horizontal de presión 8
1.1.2. Variaciones del viento 14
1.1.3. Rugosidad del terreno 16
1.2. Obtención de datos del viento 20
1.2.1. Uso y manejo de anemómetros..... 21
1.2.2. Medición de la dirección del viento..... 24
1.2.3. Medición de temperatura..... 24
1.2.4. Medición de presión atmosférica 25
1.2.5. Frecuencia y duración de las mediciones..... 27
1.2.6. Ubicación de sensores 29
1.3. Tratamiento de datos del viento..... 30
13.1. Campo de velocidad del viento..... 31
1.3.2. Uso y manejo del software para la simulación del viento..... 34
Cierre de la Unidad..... 40
Fuentes de consulta 41

Presentación de la unidad

Eólicos. Retomado de https://www.flickr.com

El viento ha servido bien a la humanidad durante muchos siglos, propulsando barcos, moviendo molinos de viento para moler grano en las granjas y bombear agua. Sin embargo, el viento perdió terreno cuando el barato y abundante petróleo se volvió accesible después de la segunda guerra mundial. Los altos costos y la incertidumbre en la energía eólica colocaron al viento en desventaja económica con el petróleo. Sin embargo, las recientes preocupaciones sobre el calentamiento global, la contaminación ambiental y la seguridad energética, han incrementado el interés en la investigación sobre fuentes de energía renovables y amigables con el medio ambiente, tales como la energía eólica, solar, hidráulica y geotérmica, como reemplazo a la energía a base de combustibles fósiles. La energía eólica puede dar una solución viable a los cambios climáticos y crisis de energía que se vive hoy en día. La utilización de energía eólica eliminaría las peligrosas emisiones de CO_2, SO_2, NO_x y otros peligrosos residuos de las tradicionales centrales eléctricas que utilizan como combustible el carbono o los residuos radioactivos de las plantas nucleares.

Al diversificar el suministro de energía, la energía eólica reduciría en gran medida la dependencia en los combustibles fósiles que están sujetos a precios y suministros inestables. En las recientes décadas se ha visto un gran crecimiento en el desarrollo de complejos eólicos en todo el mundo. En el 2009 las instalaciones globales alcanzaron el record de producción de energía de 282 GW, alrededor del 3% del consumo mundial.

Al ser una fuente de energía renovable, limpia y confiable, se espera que la energía eólica tome mucho mayor porcentaje en el suministro de energía en las siguientes décadas. El resurgimiento de la energía eólica como una importante fuente de energía para el mundo deber ser considerado como uno de los más significantes desarrollos de final del siglo XX. Para entender lo que ha estado pasando en los últimos años en el terreno de energía renovables, y en especial en el terreno de la energía eólica, es necesario considerar algunas cosas:

- Los combustibles fósiles son finitos y su utilización tiene serios efectos adversos para el ambiente.
- El viento existe en todas partes de la tierra, y algunos lugares con una considerable densidad de energía. Esto hace a la energía eólica potencialmente viable.
- Existe la capacidad tecnológica. En particular, ha habido desarrollos en otros campos, los cuales, al ser aplicados a sistemas eólicos, han revolucionado la producción de energía eólica.

Estos tres factores han sido decisivos para el resurgimiento del viento como una fuente de energía eólica, pero no son suficientes. Se necesita de otros dos factores:

1. Primero, la visión para usar el viento como una nueva forma.
2. Segundo, las cuestiones políticas.

Hace algunos años el costo de producción de energía eléctrica a partir del viento era mucho más elevado que la que usaba en combustibles fósiles. El apoyo de los gobiernos fue requerido para llevar a cabo investigación, desarrollo y pruebas, haciendo reformas políticas que permitieron a las centrales de energía eólicas conectarse con las centrales, y ofreciendo incentivos para ayudar al desarrollo de la nueva tecnología.

La política necesaria para este apoyo apareció en diferentes momentos y lugares. Primero en Estados Unidos, Dinamarca, Alemania, y ahora en muchos otros países, como en México.

Ahora bien, en esta unidad se revisa un importante tópico para el diseño de sistemas eólicos, es decir, el recurso eólico y sus características. El material de esta unidad puede ser de uso directo a otros aspectos de la energía eólica, los cuales son discutidos en otros temas de la asignatura. Por ejemplo, para conocer las características de un sitio en particular es relevante considerar los siguientes tópicos:

- Diseño de sistemas eólicos. El diseño de sistemas requiere del conocimiento de las condiciones promedio, así como la información de la naturaleza de las

turbulencias del viento y eventos extremos que puedan ocurrir en la región. Esta información es usada para diseñar y seleccionar una turbina destinada a un sitio en particular.

- Evaluación del desempeño. Se requiere de la determinación de la productividad de energía esperada y el costo de la eficiencia de un sistema eólico.
- Emplazamiento. Los requerimientos del emplazamiento pueden incluir la valoración y predicción del atractivo de un sitio para la implementación de una o más turbinas.
- Operación. Los requerimientos para la operación incluyen la necesidad de tener información sobre los recursos eólicos del lugar del emplazamiento, para proceder a la hora de la administración de la carga, de procedimientos administrativos, mantenimiento o vida del sistema.

En esta unidad se inicia con una discusión general de las características del viento y características atmosféricas del lugar de emplazamiento del sistema eólico que influyen directamente en la generación de energía eólica. Se presentan los tópicos necesarios para el análisis de datos, estimaciones de recursos, evaluar condiciones extremas en la velocidad del viento y determinar la potencia producida por una turbina de viento dados los recursos en cierto lugar.

Competencia específica

Unidad 1	**Analizar** las características hidrodinámicas del viento para identificar las particularidades de diseño de un sistema eólico a partir de las condiciones geográficas de emplazamiento.

Propósitos

1	**Determinar** las características hidrodinámicas relevantes del viento.
2	**Describir** los instrumentos y formas de medición de las variables hidrodinámicas del viento en el emplazamiento.
3	**Obtener** las variables hidrodinámicas del viento del emplazamiento.
4	**Determinar** los lugares factibles del emplazamiento y la vialidad de un proyecto en cierto lugar.

1.1. Aprovechamiento del viento

El uso del viento como una fuente de energía se remonta siglos atrás en muchas civilizaciones. La historia del hombre antiguo ha revelado que la energía eólica fue descubierta y usada independientemente en muchos sitios del mundo.

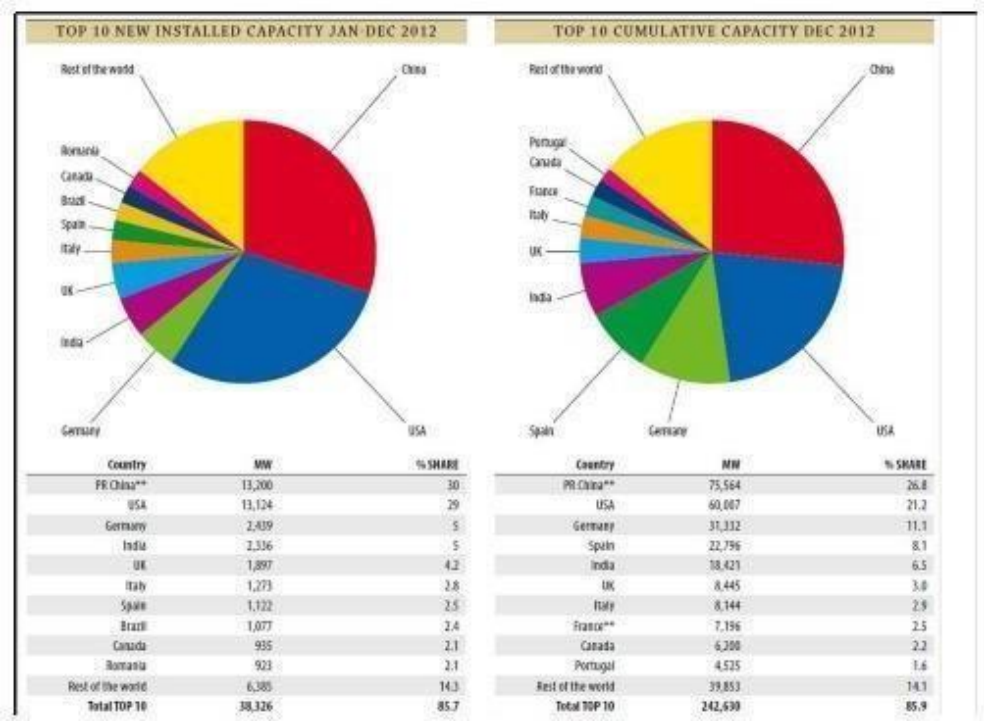
Alrededor del 4000 A.C. los antiguos chinos fueron los primeros en poner velas a sus primitivas balsas. Después, aproximadamente en el 3400 A.C., los antiguos egipcios pusieron en marcha sus primeros barcos con velas inicialmente para navegar por el río y después, a lo largo de la costa del mediterráneo. Alrededor del 1250 A.C., los egipcios construyeron sofisticados barcos empujados por el viento para navegar hasta el mar rojo. Los barcos de viento dominaron el transporte por los mares hasta la invención de la máquina de vapor en el siglo XIX.

Fuentes históricas demuestran que los chinos han utilizado los molinos de vientos los últimos 1800 años. Los molinos de viento de eje vertical fueron construidos en Sistan (el este de Persia) para moler grano y bombear agua, como fue registrado por geógrafos del siglo IX. Los molinos de eje horizontal fueron inventados en el norte de Europa en los 1180. Los primeros molinos tenían cuatro palas y eran montados sobre un poste central. Desde entonces, los molinos de eje horizontal dominaron en Europa y Norte América por muchos siglos, debido a alta eficiencia y ventajas técnicas sobre los molinos de eje vertical.

Diferente a los molinos de vientos, los cuales fueron usados para moler grano y bombear agua, las turbinas de viento son usadas para convertir la energía del viento en energía eléctrica. Las primeras turbinas de viento en operar en el mundo fueron diseñadas y construidas por Charles Brush en 1888. Estas turbinas de viento estaban equipadas con 144 hojas de cedro con un diámetro rotacional de 17 metros. Generaban un pico de potencia de 12 kW para cargar baterías que suministraban corriente continua a lámparas y motores eléctricos. Un pionero en el diseño de modernas turbinas de viento, las Turbinas Gedser fueron construidas en Dinamarca a mediados de los 50. Hoy modernas turbinas de viento en las granjas tienen tres palas, operando a relativas altas velocidades y producen energía del orden de unos cuantos mega watts.

Debido al propósito de disminuir las emisiones de efecto invernadero y proveer con la adecuada energía al mundo desarrollado, los esfuerzos están encaminados para completar la base de energía con fuentes renovables. Muchos países han hecho los marcos políticos de trabajo para asegurar que las fuentes renovables jueguen un rol decisivo en el futuro de la generación y consumo de energía. Por ejemplo, la Unión Europea tenía como objetivo que el 20% de la generación de energía en Europa fuera por

fuentes renovables para el 2010. En la figura de la gráfica de la *Capacidad de generación de energía eólica* se pueden observar las capacidades instaladas en el año 2012 en diferentes partes del mundo. Como se puede ver, China es el líder en la instalación, asimismo la producción, seguido muy cercanamente por Estados Unidos, y poco abajo está Alemania. Con el crecimiento en la confianza en las fuentes renovables y reducimiento de los costos en la generación de energía eólica, el crecimiento en la generación de energía eólica va a continuar en los venideros; se espera que para el año 2020 el nivel de capacidad de generación de energía eólica alcance el 1.2 mil GW.



Country	MW	% SHARE
PR China**	13,200	30
USA	13,124	29
Germany	2,439	5
India	2,336	5
UK	1,897	4.2
Italy	1,273	2.8
Spain	1,122	2.5
Brazil	1,077	2.4
Canada	935	2.1
Romania	923	2.1
Rest of the world	6,385	14.3
Total TOP 10	**38,326**	**85.7**

Country	MW	% SHARE
PR China**	75,564	26.8
USA	60,007	21.2
Germany	31,332	11.1
Spain	22,796	8.1
India	18,421	6.5
UK	8,445	3.0
Italy	8,144	2.9
France**	7,196	2.5
Canada	6,200	2.2
Portugal	4,525	1.6
Rest of the world	39,853	14.1
Total TOP 10	**242,630**	**85.9**

Capacidad de generación de energía eólica en el mundo y capacidad instalada en el año 2012. Top 10.

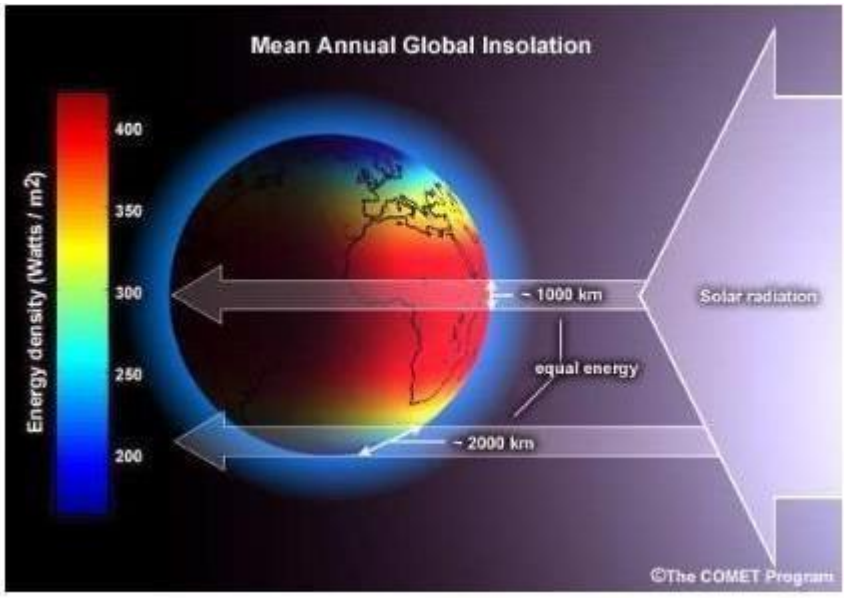
1.1.1. El gradiente horizontal de presión

La energía del viento es una forma de energía solar, la cual es producida por la fusión nuclear de hidrogeno (H) en Helio (He) en su núcleo. El proceso de fusión H → He crea calor y radiación electromagnética que viaja desde el sol en todas las direcciones por el espacio interestelar. Aunque sólo una pequeña parte de esa energía solar llega a la tierra, ésta provee de casi toda la energía terrestre necesaria. Ha sido estimado que la energía

total, solar recibida por la tierra es de aproximadamente 1.8×10^{11} MW. De toda esa energía sólo el 2% es convertido en energía eólica (3.6×10^{9} MW), y sobre el 35% es disipado en los 1000 mtr de la superficie de la tierra. Entonces la potencia total que puede ser convertida en otra forma de energía es de aproximadamente 1.26×10^{9} MW, que es cerca de 20 veces el presente consumo total global. La energía eólica en principio podría satisfacer los requerimientos energéticos del mundo entero.

El viento resulta del movimiento del aire debido a gradientes (diferencias) de presión, corrientes de viento desde regiones con alta presión a regiones con baja presión. Conforme más grandes sean las diferencias de presión (gradientes), más alta es la velocidad del viento que se genere, y por lo tanto, más grande la potencia que puede ser capturada del viento. La generación y movimientos del viento son complicados debido a la gran cantidad de factores que influyen. Sin embargo, sí se pueden enumerar los más importante e influyentes: la radiación solar, el efecto Cariolis debido a la rotación de la tierra, y condiciones geográficas locales.

- **Radiación solar.** De todos los factores que afectan la generación del viento, el más importante y critico resulta la radiación solar. Primero que nada, la tierra es una esfera que gira alrededor del sol casi en el mismo plano de su ecuador. Debido a que la superficie de la tierra es casi perpendicular a la trayectoria de los rayos del sol, el ecuador recibe la más grande cantidad de radiación por unidad de área, y la menor en los polos de la tierra.
  Debido a esta variación espacial en la radiación recibida, se genera un gradiente de temperatura desde el ecuador a los polos, y por lo tanto, un gradiente de presión desde los polos hacia el acusador. De aquí, aire caliente y menos denso en el ecuador se eleva en la atmósfera y se mueve hacia los polos y aire frío más denso fluye desde los polos hacia el ecuador por la superficie de la tierra. Este flujo de aire en cada hemisferio forma lo que se conoce como circulación meridional. Segundo, el eje de rotación de la tierra tiene un pequeño desplazamiento respecto del eje de rotación alrededor del sol, cerca de 23.5. Este pequeño desplazamiento ocasiona las variaciones en la cantidad de radiación recibida en diferentes regiones del planeta durante el año. Tercero, en la superficie de la tierra existen diferentes tipos de materiales, tales como vegetación, rocas, agua, hielo/nieve, etc. Cada uno de esos materiales tiene diferente capacidad de reflexión y absorción de radiación, provocando altas temperaturas (desiertos) y bajas temperaturas (lagos congelados) aun en la misma latitud. Cuarto, la cantidad de radiación solar recibida es también afectada por la topografía de la tierra. Hay una gran cantidad de montañas, valles, colinas, etc., en la tierra, resultando en diferencia en la radiación recibida en ciertas regiones.



Radiación promedio recibida del sol en la tierra. Como se puede notar en el ecuador se recibe la mayor cantidad de radiación, haciendo que las temperaturas promedias sean más altas en esa región. En contraste se tiene a los polos que por su posición respecto al sol reciben poca o nula radiación haciendo que las temperaturas promedias sean bajas ahí.

- **Fuerza de Cariolis.** La rotación de la tierra es otro importante factor que afecta la dirección y velocidad del viento. La fuerza de Cariolis, la cual es generada por la rotación de la tierra, desvía la dirección de los movimientos atmosféricos. Los vientos hacia el norte son desviados hacia la derecha, y los vientos hacia el sur son desviados hacia la izquierda. Esta fuerza también depende de la latitud, que es cero en el ecuador y alcanza su máximo en los polos. Y, por último, la intensidad, con la que son desviados los vientos depende de la velocidad de éstos; mientras sean lentos, serán desviados poco, y si son fuertes, serán desviados con mayor intensidad.

- **Geografía local.** La rugosidad de la superficie de la tierra es resultado de la geografía local y estructuras hechas por el hombre. La fricción de arrastre y obstrucciones cerca de la superficie de la tierra generalmente provocan que la velocidad del viento disminuya e inducen un fenómeno conocido como Cizalladura. La razón en la cual la velocidad del viento crece con la altura varía con base en las condiciones topográficas, el terreno y el clima, con grandes crecimientos observados en terrenos rugosos. Una burda aproximación dice que este crecimiento es de 10% cada que se dobla la altura. En adición, alguna estructura geográfica especial puede modificar fuertemente la intensidad y velocidad del

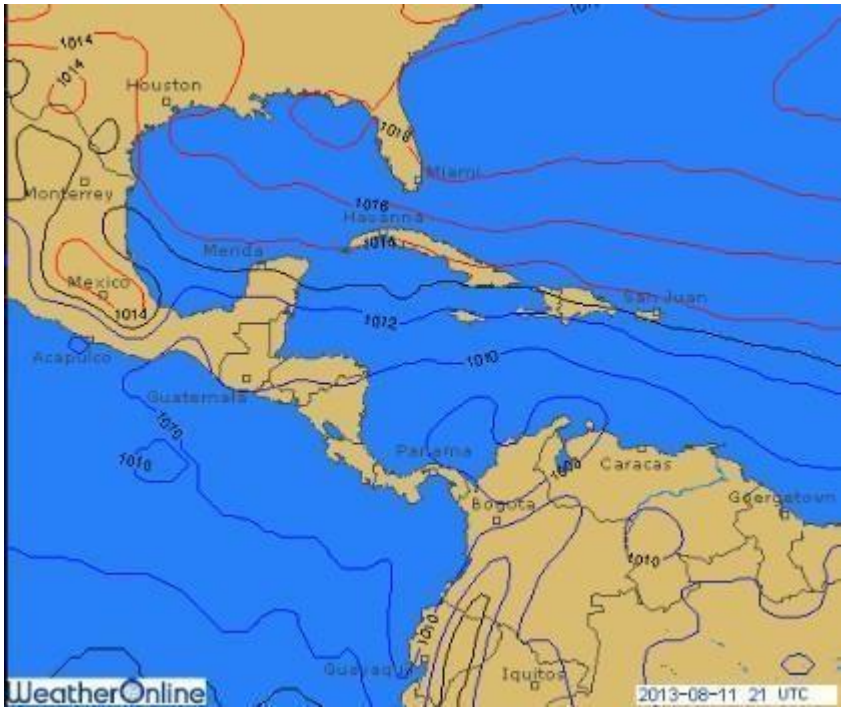
viento, como podría ser que una estructura montañosa forme una corriente de viento de alta velocidad.

En este subtema se presentan las características generales de los recursos eólicos y es importante iniciar con un panorama global de los origines del recurso, las características generales del viento y estimaciones de los potenciales de los recursos eólicos.

El origen de la energía eólica. Como ya se mencionó anteriormente, la energía del viento proviene de la energía solar y las corrientes de viento son generadas cuando hay una diferencia de presión. Una cantidad muy importante en el estudio de la generación de las corrientes de viento es la fuerza de presión en el aire (por unidad de masa). F_p, que es dada por:

$$F_p = \frac{-1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial n}$$

donde ρ es la densidad del aire y n es la dirección normal a las líneas de presión constante (Isobaras), en la siguiente figura, así como en las páginas de internet que se presentan a continuación:



Las Isobaras son las curvas donde la presión tiene un valor constante. La radiación solar al variar globalmente ovaciones que las condiciones climatológicas varíen, entre ellas la presión, esto hace

que la presión sea una función de la posición y del tiempo, $p(x,t)$, las isobaras son curvas $x(s)$ que están definidas por la ecuación $p(x(s),t) = p_0$.

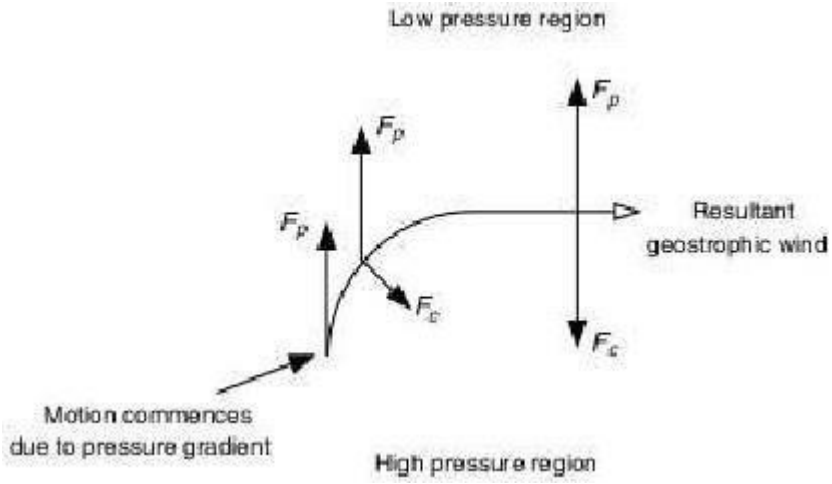
En las siguientes páginas de internet se puede ver el mapa con las líneas Isobáricas en el país.
http://www.meteored.mx/mapas-meteorologicos/prsvie-mexe.html

http://www.weatheronline.co.uk/weather/maps/forecastmaps?LANG=es&CONT=mamk&MAPS=d&LOOP=0&LAND=MX&MORE=1&UP=1&R=0&DAY=0

Por otro lado, la fuerza de Cariolis, la fuerza ficticia causada por la rotación de la tierra, es expresada como:

$$F_c = fU$$

donde U es la velocidad del viento y f es el parámetro de Cariolis [$f = 2w\,sin(\emptyset)$], con $\emptyset$ representando la latitud donde se mide y w la velocidad angular de rotacion de la tierra. De aquí, entonces, se observa que la fuerza de Cariolis depende de la velocidad del viento y de la latitud (se recuerda que la latitud mide la distancia angular al ecuador). Hasta aquí sólo se ha obtenido la magnitud de la fuerza de Cariolis. Como bien se sabe, la fuerza es un vector, entonces ahora sólo falta conocer la dirección en la que actúa esta fuerza. La dirección de esta fuerza es perpendicular a la dirección de la velocidad del viento. El resultado de esas dos fuerzas es el viento geostrófico, tal como se muestra en la siguiente figura.



La corriente de viento inicia por el gradiente de presión luego de esto la fuerza de Cariolis produce que la dirección del viento cambie, es decir, lo hace girar hasta que la fuerza de Cariolis se cancela con la fuerza de presión. Esto hace que el viento geostrofico tienda a ser paralelo o seguir las líneas Isobáricas.

Entonces, igualando ambas fuerzas, la fuerza de presión (1) y la fuerza de Cariolis (2), se obtiene la magnitud de la corriente de aire geostrófica U_g:

$$U_g = \frac{-1}{f\rho}\frac{\partial p}{\partial n}$$

Esto es para el caso idealizado, porque aún falta considerar que la geografía terrestre causa que las líneas Isobaras sean curvas; esto genera que se produzca una fuerza centrífuga, la cual genera una corriente de viento llamado viento de gradiente. Como resultado de estas fuerzas, el viento gradiente también es paralelo a las líneas Isobaras y su magnitud U_{gr} está dada por:

$$\frac{U_{gr}^2}{R} = -fU_{gr} - \frac{-1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial n}$$

donde R es el radio de curvatura de la trayectoria del viento. Sustituyendo en (3) se obtiene:

$$U_g = U_{gr} + \frac{U_{gr}^2}{fR}$$

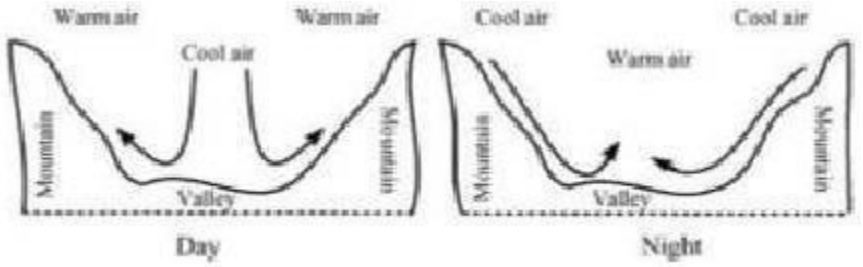
Otra fuerza que no se ha incluido es la fricción con la superficie de la tierra: la superficie de la tierra ejerce una fuerza horizontal al movimiento del aire de tal manera que retarda el flujo. Esta fuerza decrece con la altura y es despreciable después de cierta altura conocida.

En el modelo de generación del viento anterior se ha considerado el modelo ideal, representado por superficie terrestre lisa. En realidad, la superficie de la tierra no es tan lisa y varía considerablemente, con grandes océanos e islas de tierra. Esas diferentes superficies pueden afectar el flujo del aire debido a las variaciones en la presión, la absorción de radiación solar y la humedad. El océano actúa como un gran reservorio de energía. De aquí, entonces, que el flujo del viento sea afectado por las corrientes oceánicas. Estos efectos afectan los vientos globales y muchos de los vientos regionales.

Corrientes a escalas atmosféricas más pequeñas pueden ser divididos en secundarios y terciarios. Las secundarias ocurren si los centros de alta y baja presión son causados por el calentamiento o enfriamiento de la atmósfera inferior (recuerda el caso del gas ideal $PV = NKT$, donde al aumentar la temperatura, la presión aumenta); éstas pueden incluir las siguientes:

- Huracanes
- Circulaciones estacionarias
- Ciclones extra-tropicales

Ejemplos de circulaciones terciarias son: vientos de los valles y montañas, como son mostrados en la siguiente figura. Un entendimiento de esos patrones de corrientes eólicas y otros efectos son importantes a la hora de evaluar los sitios potenciales para el emplazamiento de un sistema eólico.



Las corrientes en las montañas cuando se producen las corrientes de aire caliente o tibio tienden a subir en la atmosfera, recuerda el principio de Arquímedes que dice que objetos menos densos tienden a flotar cuando están sumergidos en un fluido más denso y dado que el aire caliente tiende a expandirse y por lo tanto a disminuir su densidad, entonces se topa con el fenómeno de que el tibio en la superficie terrestre tienda a ascender por la pendiente de la montaña (flotar) y el aire frío de la alta atmósfera a descender (hundirse) por el medio del valle. Para el caso de la noche la dirección del flujo se revierte debido a que el aire frío se concentra en lo alto de las montañas y este tiende a descender por la pendiente de la montaña y reemplazar al aire tibio del valle haciéndolo ascender por este.

1.1.2. Variaciones del viento

Las condiciones atmosféricas varían desde un segundo hasta meses, y desde centímetros hasta cientos de kilómetro. En este subtema van a discutir las variaciones espaciales, que generalmente dependen en la altura desde la superficie y de las condiciones geográficas globales y locales.

Variación temporal

Las variaciones en la velocidad del viento con el tiempo lo puedes tratar en las siguientes categorías:

- Inter-anual
- Anual
- Diurnal
- Ráfagas y turbulencias

Inter-anual

Variaciones Inter-anuales en la velocidad del viento ocurren en escalas más grandes que un año y pueden tener un gran efecto en la generación de energía eólica. La habilidad para estimar las variaciones inter-anuales en un sitio dado es casi tan importante como estimar la variación de la velocidad promedio en un lugar. Los meteorólogos concluyen que se necesita cerca de 30 años de datos para determinar las variaciones climáticas y se necesitan cerca de cinco años para obtener un promedio anual de la velocidad del viento en un sitio dado. Sin embargo, unos conjuntos de datos más cortos pueden ser de utilidad. Investigadores aún están en busca de modelos de predicción confiables a largo plazo de la velocidad promedio del viento. La complejidad de las interacciones meteorológicas y topográficas hacen que las variaciones sean un estudio difícil, y en algunos casos, impredecible.

Anual

Variaciones significantes en la velocidad promedio del viento a lo largo del año son comunes conforme la radiación solar varía debido a la rotación de la tierra alrededor del sol en una trayectoria elíptica, donde la distancia al sol cambia, la velocidad de rotación varía debido a la inclinación misma del eje de rotación de la tierra respecto al plano de rotación respecto al sol.

Diurna

A lo largo del día, grandes variaciones en el flujo del viento debido a las variaciones propias del ciclo diario de radiación solar. Un caso típico variación diaria es un incremento en la velocidad del viento durante el día y una disminución durante la noche hasta el amanecer. Las variaciones en la radiación solar debido a la rotación de la tierra son también responsables de las variaciones de la temperatura. Debido a esto los cambios más grandes en el viento ocurren durante la primavera y el verano, y las más pequeñas durante el invierno. Sin embargo, la variación diaria en la velocidad del viento puede variar con la localización y altitud respecto al mar. Por ejemplo, en altitudes altas como en montañas o riscos, los patrones diarios de variaciones son diferentes debido las corrientes de intercambio de aire frío y caliente entre la atmosfera baja y alta.

Pequeñas variaciones

Pequeñas variaciones en las corrientes de viento de interés incluyen las turbulencias y ráfagas de viento. Estas pequeñas variaciones suelen ocurrir en escalas de minutos o menos. Generalmente es usado que variaciones en la velocidad del viento en periodos de segundos a 10 minutos, y que tienen carácter estocástico, son considerados como

turbulencias. Estas turbulencias, en el caso de generación de energía eléctrica, tienen que ser consideradas. Por ejemplo, las turbinas de viento incluyen una carga máxima, la cual, por el bien de la estructura, resulta peligroso sobrepasarla.

Una ráfaga de viento es un evento discreto dentro de las turbulencias: una forma de caracterizar una ráfaga es mediante su amplitud (intensidad de la velocidad del viento), tiempo de incremento, máxima variación y lapso que dure. Estos factores son los principales a la hora de considerar el diseño de un sistema eólico.

1.1.3. Rugosidad del terreno

La importancia de las características del terreno es de gran influencia para el desarrollo de un sistema eólico. Algunas de las características del terreno que influyen en la generación de la energía podrían ser de gran importancia, de tal manera que la economía de todo el proyecto podría depender de la apropiada selección del emplazamiento. Uno debe de esperar que cualquier irregularidad en la superficie de la tierra va a modificar el flujo del viento, y, por lo tanto, comprometiendo la aplicabilidad de las aproximaciones vistas hasta el momento. Aquí se presenta una cualitativa discusión de algunas de las más importantes áreas de interés en el tema de efectos de terreno.

Clasificación del terreno

La clasificación más básica del terreno es en dos: terreno plano y no plano. Se define un terreno plano como el área donde los efectos del terreno son insignificantes en el flujo del viento sobre el terreno. Un terreno plano es terreno con pequeñas irregularidades, tales como bosques, rompe vientos, etc. Terrenos no planos tienen elevaciones o depresiones a gran escala como montañas, valles, riscos y cánones. Para calificar un terreno como plano, las siguientes condiciones deben de cumplirse:

- La diferencia entre el sitio de la turbina de viento y el terreno de los alrededores no es más grande que 60mtr en un diámetro circular de 11.5 Km alrededor del sitio de la turbina.
- Ninguna colina tiene una razón en su altura o anchura mayor que 1/50 dentro de 40Km río arriba o rio abajo.
- La diferencia entre la parte más baja del disco del rotor t la elevación más baja en el terreno es más grande que tres veces la máxima diferencia de elevación dentro de los 4 Km río arriba.

Terrenos no planos o complejos o muy complejos consisten en una gran variedad de características, y uno en general usa las siguientes clasificaciones:

1. Aislada de presión o elevación
2. Terreno montañoso

El flujo en terreno montañoso es complejo debido a las elevaciones y depresiones que suelen ser de características aleatorias.

El flujo en tales terrenos es clasificado en dos divisiones: a pequeñas y grandes escalas. Un importante punto aquí es que la información en la dirección del viento debe de ser considerada cuando se clasifica un terreno. Por ejemplo, si una colina aislada (200mtr de altura y 1000 m de anchura) estuviera situada a 1km de un sitio propuesto, el sitio puede ser considerado como no plano. Sin embargo, si en promedio sólo el 5% del tiempo la dirección del viento con una baja velocidad, se dice que 2m/s viene desde la colina, entonces, se puede decir que el terreno es plano.

Flujo del aire sobre terrenos planos y obstáculos

El flujo sobre terrenos con obstáculos naturales y hechos por el hombre han sido muy estudiados.

Obstáculos hechos por el hombre se refiere a los edificios, silos, etc. Obstáculos naturales incluyen árboles y vegetación. Para obstáculos hechos por el hombre, un estudio común es considerar a los obstáculos como objetos rectangulares y considerar el flujo sólo en dos dimensiones. Este tipo de flujo es considerado una capa de cizalladura que separa al flujo desde el frente de la corriente para luego volver a unirse a favor del flujo, formando una frontera entre la región de recircula miento interna y la región de flujo externa. Los resultados de un intento de cuantificar el fenómeno con estructuras hechas por el hombre, donde el cambio en la potencia disponible y la turbulencia mostrada en las gráficas de la velocidad del viento contra la altura. Nota que a una distancia alrededor de 15 veces la altura del obstáculo, la potencia perdida debido al obstáculo es pequeña.

Flujo en un terreno plano con un cambio en la rugues de la superficie

En muchos terrenos naturales, la superficie de la tierra no es uniforme y cambia drásticamente desde una localización a otra. Esto afecta el perfil del viento localmente. En la figura se puede observar que el perfil del viento cambia significativamente cuando se va desde una superficie plana a una rugosa.

Característica a pequeña escala de un terreno no plano

Investigadores han dividido los terrenos no planos en dos categorías: Terreno aislado y terreno montañoso. El primero se refiere a características de pequeña escala, y el segundo a gran escala. Por flujo a pequeña escala en esta división se refiere a elevaciones y depresiones.

Elevaciones

Las características del flujo sobre terrenos elevados se asemejan mucho al flujo alrededor de obstáculos.

Los cantos son colinas alargadas que tienen una altura menor o igual a 600mtr arriba del terreno de los alrededores que tienen poco o nada de área no plana en la cumbre. La razón de la longitud a la altura debe de ser mínimo de 10. Por otro lado, es bien sabido que, para el emplazamiento de una turbina de viento, la dirección ideal del viento debe de ser perpendicular al eje del risco. Cuando la dirección no sea perpendicular a el risco colina, ésta no será un sitio atractivo. También la pendiente del risco es muy importante. Pendientes más pronunciadas dan lugar a un flujo más fuerte de viento, pero de igual manera, dan lugar a altas turbulencias. Más aun, como se mostró en la figura, un risco tipo meseta crea una región de alta cizalladura debido a la separación del flujo.

Depresiones

Las depresiones son terrenos más bajos que los alrededores. El cambio en la velocidad del viento es marcadamente incrementado si las depresiones pueden encausar el viento. Esta clasificación incluye valles, cañones, cuencas y desfiladeros.

En adición a las variaciones diurnas en el flujo en ciertas depresiones, hay muchos factores que influyen el en el flujo en depresiones. Esas incluyen la orientación del viento en relación con la depresión, estabilidad atmosférica, el ancho, longitud, forma y rugues de la depresión, y la regularidad de la sección del valle o cañón. Valles y cañones (150 mtr) son consideradas depresiones a pequeña escala, y otras tales como lagunas y cuencas son consideradas como depresiones a gran escala. El gran numero que afectan las características del viento en valles, sumados a las grandes variaciones de esos mismos de un valle a otro, hacen casi imposible llegar a una conclusión válida para el flujo en estas regiones.

Características de un terreno no plano: rasgos a gran escala

Rasgos a gran escala son aquellos para los cuales las dimensiones verticales son significantes en relación con la capa limite planetaria. Estos incluyen montañas, riscos, cuencas altas, grandes escarpes, mesetas, valles profundos, y quebradas. El flujo en esas regiones es demasiado complejo y las predicciones para esta categoría de terreno son mínimamente cuantificadas. Los siguientes tipos de grandes depresiones han sido estudiadas bajo estas clasificaciones de terrenos:

- Valles y cañones
- Vientos de ladera
- Vientos dominantes con alineación
- Vientos dominantes sin alineación
- Lagunas y quebradas
- Grandes cuencas
- Desfiladeros y laderas

1.2. Obtención de datos del viento

La mayor barrera para el desarrollo de un diseño eólico en muchas regiones del mundo es la falta de una fuente confiable y detallada de datos del viento. De aquí que un primer paso requerido para el estudio de la factibilidad regional de energía eólica es una estimación de las fuentes eólicas disponibles. El uso de las fuentes de datos disponibles es una parte importante de la valoración de cualquier emplazamiento. En la evaluación es muy importante darse cuenta de las limitaciones de los datos mismos. Esto es, no todo de este tipo de información ha sido recolectado para el propósito de evaluación energética, y muchas de las estaciones de recolección de datos fueron colocados cerca o en sitios, en terrenos relativamente planos o en áreas con baja elevación. Varios estudios han tenido como resultado un detallado atlas del viento mundial. Esos son documentos que contienen datos en la velocidad del viento y dirección en una región. Esos atlas proveen de una descripción de las fuentes de viento dentro de grandes áreas (meso escalas), pero no fueron capaces de proveer suficiente información para un detallado estudio de sitios candidatos para el desarrollo de sistemas eólicos (micro escalas). En tiempos recientes, atlas de alta resolución (a escalas de 200mtr) han sido producidos, diseñados para cuantificar los recursos eólicos en un sitio en particular.

Análisis de los datos y fuentes de estimación

Aquí se asume que una gran cantidad de datos han sido recolectados. Estos deben de incluir la dirección y velocidad del viento. Hay una variedad de formas para sumar los datos en una forma compacta de tal manera que se puedan evaluar los recursos eólicos y potencia de producciones de un sitio en particular.

Se puede determinar el flujo de masa de aire, dm/dt, a través de un disco rotante de área A. Desde la ecuación de continuidad de mecánica de fluidos, el flujo de masa es una función de la densidad del aire ρ y su velocidad U:

$$\frac{dm}{dt} = \rho A U$$

Y la energía cinética por unidad de tiempo que lleva ese flujo de masa de aire (Potencia P), entonces es:

$$P = \frac{1}{2}\frac{dm}{dt}U^2 = \frac{1}{2}\rho A U^3$$

La potencia por unidad de área, $P/A = \frac{1}{2}\rho U^3$ o densidad de potencia del viento. Uno debe de notar algunos puntos importantes:

- La densidad de potencia del viento es proporcional a la densidad del aire, que para condiciones estándar (nivel del mar y 15°) la densidad del aire es 1.225Kg/mtr^3.
- La potencia es proporcional al área transversal del rotor, o al cuadrado del diámetro para turbinas de eje horizontal.
- La densidad de potencia es proporcional al cubo de la velocidad del viento.

La producción de energía eólica de una turbina debe de tomar en cuenta combinaciones de la mecánica de fluidos del aire, pasando a través de las turbinas, la aerodinámica y la eficiencia del rotor. Si la velocidad promedio del viento es conocida para cierta región, uno puede desarrollar un mapa que muestre el promedio de la densidad de potencia del viento en esa región. Estimaciones más precisas sobre la densidad de potencia pueden ser hechas si se conocen los promedios por hora. El promedio de la velocidad del viento por horas durante el transcurso del año, y la densidad de potencia es dada por:

$$\bar{P}/A = \frac{1}{2}\rho \bar{U}^3 K_e$$

Donde $\overline{U}$ es la velocidad promedio anual del viento y K_e es la llamada factor del patrón de energía:

$$K_e = \frac{1}{N\bar{U}^3}\sum_{i=1}^{N} U_i^3$$

donde N es el número de horas en un año (8760 Hrs), y U_i el promedio de la velocidad del viento en cada una de esas horas.

1.2.1. Uso y manejo de anemómetros

En muchas de las aplicaciones de la energía eólica la información sobre la velocidad del viento es indispensable, sin embargo, en muchas de las aplicaciones esta información no está disponible y entonces mediciones deben de ser hechas especialmente para determinar los recursos eólicos en un sitio candidato. Hay tres tipos de sistemas de instrumentación usados para medir el viento:

- Instrumentos usados por el servicio meteorológico nacional.
- Instrumentos diseñados especialmente para medir y caracterizar los recursos eólicos.

- Instrumentos espacialmente diseñados para altas razones de simplificación, determinando las ráfagas, turbulencias y flujo de entrada del viento, analizando la respuesta de la turbina de viento.

Para cada aplicación de energía eólica, el tiempo de instrumentación requerida varía. Por ejemplo, desde un simple sistema conteniendo sólo un anemómetro /registro de la velocidad del viento, hasta un sistema complejo diseñado para caracterizar las turbulencias en el plano del rotor. Aplicaciones en sistemas eólicos usan el siguiente tipo de sensores meteorológicos:

- Anemómetro para medir la velocidad del viento
- Veletas para medir la dirección del viento
- Termómetros para medir la temperatura del aire
- Barómetros para medir la presión del aire.

Aquí se va poner especial atención en los dos primeros, además de los ya mencionados, los sistemas de instrumentación de viento consisten en tres mayores componentes: sensores, decodificador y registro de señales.

Características generales de los instrumentos

Antes de discutir los sistemas de instrumentación, es importante revisar algunos sistemas de medición básicos. Los parámetros importantes y conceptos de instrumentación y sistemas de medición son revisados como sigue:

- Componentes del sistema
- Caracterización de las mediciones
- Características de instrumentación

Componentes del sistema

- **Sensores.** Un sensor es un dispositivo, tal como una copa de un anemómetro o un alambre caliente, el cual reacciona a los cambios de ambiente. Por ejemplo, la copa reacciona a la fuerza del viento, y el alambre reacciona al cambio en el flujo del viento mediante una respuesta de temperatura.
- **Transductor.** Un transductor es un dispositivo que convierte energía desde una forma a otra. En el caso de mediciones del viento, usualmente se refiere a un dispositivo que convierte el movimiento mecánico del viento en una señal eléctrica.
- **Decodificador de señal.** Provee de potencia al sensor cuando es requerido, recibe la señal desde el sensor y la convierte a una forma que puede ser usada para su registro.

- **Registrador.** Es un dispositivo que almacena y despliega los datos obtenidos por el sensor/transductor/decodificador de señales.

Características de las mediciones

Exactitud y precisión son dos medidas del rendimiento de un sistema de medición. Exactitud se refiere al promedio de la diferencia entre el valor de salida del instrumento y el valor real de la variable medida. Precisión se refiere a la dispersión sobre el promedio. En general, para sistemas de medición del viento la precisión es alta, y la exactitud, por otro lado, es baja.

El error se refiere a la diferencia entre el valor indicado y el verdadero valor de la señal medida. La confiabilidad de un aparato es el grado de concordancia entre un número de datos consecutivos medidos de salida de la misma variable, y claro, bajo la suposición de que todas las mediciones son hechas bajo las mismas condiciones. La reproducibilidad es el grado de concordancia entre mediciones de una misma cantidad hechas bajo diferentes condiciones.

Caracterización de las mediciones

El periodo requerido para que un sensor pueda responder a 63.2 % en un cambio gradual en una señal de entrada define su constante de tiempo. Por otro lado, la constante de distancia es la longitud de flujo de aire requerido para causar una respuesta de 63.2 % de un cambio repentino en la velocidad. Es calculado multiplicando el tiempo constante del sensor por la velocidad promedio del viento.

El tiempo de respuesta es el tiempo requerido para que un instrumento registre un porcentaje designado de un cambio repentino en la variable medida.

La frecuencia de muestreo es la frecuencia en cual una señal es medida. La resolución es definida como la unidad más pequeña de la variable que puede ser detectada por el sensor.

La sensibilidad de un instrumento de la razón de la escala completa de salida y la escala completa de entrada de una variable medida.

Anemómetro

El anemómetro de copa es probablemente el instrumento más común para medir la velocidad del viento. Estos utilizan su rotación, que varía con la velocidad del viento para generar una señal. Hoy el diseño más común tiene tres copas montadas sobre un

pequeño eje. Aquí la razón de rotación de las copas es medida por un contador mecánico que registra el número de rotaciones, cambios de voltaje o un interruptor fotoeléctrico. El tipo mecánico indica el flujo del viento en distancia. La velocidad promedio del viento es obtenida dividiendo el flujo del viento entre el tiempo de corrida del viento en el anemómetro. Este tipo de anemómetros tienen la ventaja que no necesita de una fuente de potencia o energía eléctrica. Un anemómetro eléctrico da la medida de la velocidad instantáneamente, al igual que los fotoeléctricos. La respuesta y exactitud de anemómetro de copa es determinado por su peso, dimensiones físicas e interna fricción. Cambiando cualquiera de esos parámetros, la respuesta del instrumento va a variar. Por ejemplo, si se desean medir turbulencias, se necesitará de un pequeño anemómetro de bajo peso y poca fricción. Factores ambientales pueden afectar y reducir su confiabilidad, tales como el hielo o el polvo. Existen una gran variedad de anemómetros cada uno con sus ventajas:

- Anemómetro de hélice
- Anemómetro sónico

Incluso sistemas de mediciones más modernos y eficientes como el sensor de acústica doppler (SODAR, por sus siglas en inglés), clasificado como un sistema de medición remota, es decir, que no tiene que estar en el punto o lugar de medición para poder obtener datos sobre el viento. También se puede nombrar el Sensor de Laser Doppler (LIDAR).

1.2.2. Medición de la dirección del viento

La dirección del viento normalmente es medida por una veleta. Las veletas usualmente producen señales a los cierres de contacto o por potenciómetros. La exactitud es mucho mayor para potenciómetros que para cierres de contacto, pero desafortunadamente las veletas de potenciómetros son más caras que las de cierre de contacto.

1.2.3. Medición de temperatura

Como se presentó anteriormente, la potencia en el aire es una función de la densidad del aire. Esa densidad es una función de la temperatura del aire y la presión, las cuales pueden variar con la altura. La densidad del aire puede ser determinada desde la ecuación de estado del gas ideal:

$$\rho = \frac{p}{RT} = 3.4837\frac{p}{T}$$

donde la densidad está medida en unidades de kg/mtr^3, la presión en Kilo Pascal, y la temperatura en Kelvin. Es asumido que a nivel del mar se tiene una temperatura promedio de 288.15K y 101.325 kPa. La presión, como ya se sabe, varía con la altura. Una fórmula aproximada para la variación de la presión a alturas mayores de 5000mtr es:

$$p = 101.29 - (0.011837)z + (4.793 \times 10^{-7})z^2$$

donde z es la elevación respecto al nivel del mar medida en metros, y la presión p en kPa. La presión también puede variar por las condiciones climáticas, pero estas variaciones son despreciables respecto a las variaciones de temperatura.

Estabilidad de la atmósfera en la capa inferior

Una particular característica de la atmósfera es su estabilidad a la tendencia a resistirse al movimiento vertical o suprimir las turbulencias. La estabilidad de la atmósfera en su capa inferior es factor que determinan para los gradientes de velocidad del viento que son experimentados en los primeros 100 metros arriba del suelo. La estabilidad atmosférica generalmente es clasificada como estable, neutralmente estable, o inestable. La estabilidad de la atmósfera terrestre es gobernada por la distribución vertical de la temperatura resultante del calentamiento o enfriamiento por radiación de su superficie y las subsecuentes mezclas del aire adyacente a la superficie.

1.2.4. Medición de presión atmosférica

El gradiente adiabático de la atmósfera es generalmente definido como la razón de cambio de la temperatura con la altura. Si se aproxima la atmósfera como un gas ideal seco (sin vapor de agua), la relación entre el cambio de presión y el cambio de elevación para un fluido en la presencia de un campo gravitacional:

$$dp = -\rho g dz$$

donde p es la presión, ρ la densidad de la atmósfera, z la elevación arriba del suelo, y g el campo gravitacional. La primera ley de la termodinámica se puede escribir como:

$$dq = du + dw = dh - vdp = c_p dT - \frac{1}{\rho} dp$$

donde T es la temperatura, q la trasferencia de calor, u la energía interna, h la entalpía, v el volumen específico, y c_p el calor específico a presión constante. Para un proceso adiabático (sin transferencia de calor) $dq = 0$, se obtiene:

$$c_p dT = \frac{1}{\rho} dp$$

sustituyendo dp, se llega a:

Si supones que los cambios en g y c_p son despreciables, entonces los cambios en la temperatura bajo condiciones adiabáticas son constantes, es decir, que para g = 9.81m/s^2 y c_p= 1.005kJK, se tiene que la temperatura disminuye cerca de 1 grado centígrado (o 2Kelvin) cada 100 metros de elevación. Usando la nomenclatura convencional, el gradiente adiabático r es definido como el negativo de la velocidad de cambio de la temperatura con la altura:

$$\Gamma = -\left(\frac{dT}{dz}\right)_{adiabatic} \approx \frac{1^0 C}{100 mtr}$$

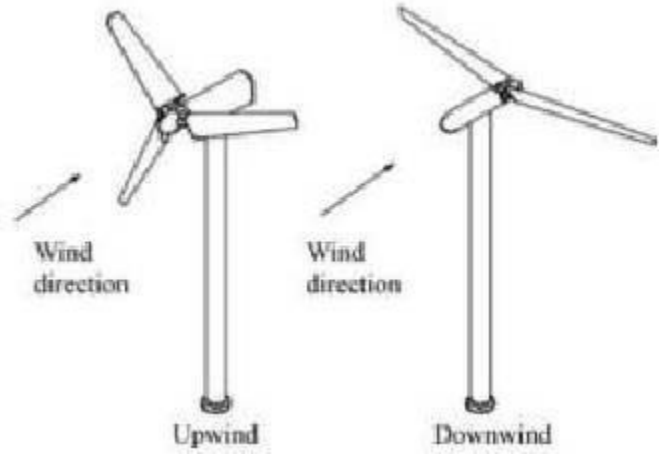
El gradiente adiabático es extremadamente importante en meteorología, ya que su comparación con el gradiente adiabático en el límite de bajas alturas es una medida de la estabilidad atmosférica. Por ejemplo, el gradiente adiabático estándar basado en mediciones meteorológicas ha sido determinado a elevaciones de 10800mtr y se ha determinado que:

$$\left(\frac{dT}{dz}\right)_{adiabatic} = \frac{-0.0066^o C}{mtr}$$

es decir, que basados en el gradiente adiabático estándar medido, la temperatura desciende 0.66°C cada 100mtr. Diferentes gradientes de temperatura crean diferentes estados en la atmósfera. Los perfiles en la temperatura cambian desde el día a la noche debido al calentamiento de la superficie de la tierra. El perfil de la temperatura antes del amanecer decrece con la altura cerca del suelo y se revierte después del amanecer. El aire es calentado cerca del suelo y el gradiente de temperatura aumenta cerca de la superficie con la altura hasta una altura z (llamada altura de inversión). La capa superficial del aire extendiéndose hasta z_i es llamada la capa conectiva. Arriba de z_i el perfil de temperatura se revierte. El concepto de estabilidad es ilustrado como sigue:
Si se considera un pequeño elemento de aire a una altitud con una presión menor, se asume la razón estándar de 0.66°C/100mtr. El pequeño elemento de aire se va a enfriar mediante su gradiente adiabático en seco (15) (1°C cada 100 mtr). Si se midiera el elemento del aire, tiene la misma temperatura como el aire a su alrededor en la superficie, y entonces, después de haber subido a los 100 mtr, este elemento se habrá enfriado 0.34°C más que el aire a su alrededor y, por lo tanto, el elemento del aire será más denso

que el aire a su alrededor, de modo que tenderá a hundirse de nuevo y regresar a su altura original. Entonces, el estado atmosférico es llamado estable. Para generalizar, cualquier atmósfera cuya dT/dz sea más grande que $(dT/dz)_{adiabatic}$, es una atmósfera estable.

1.2.5. Frecuencia y duración de las mediciones

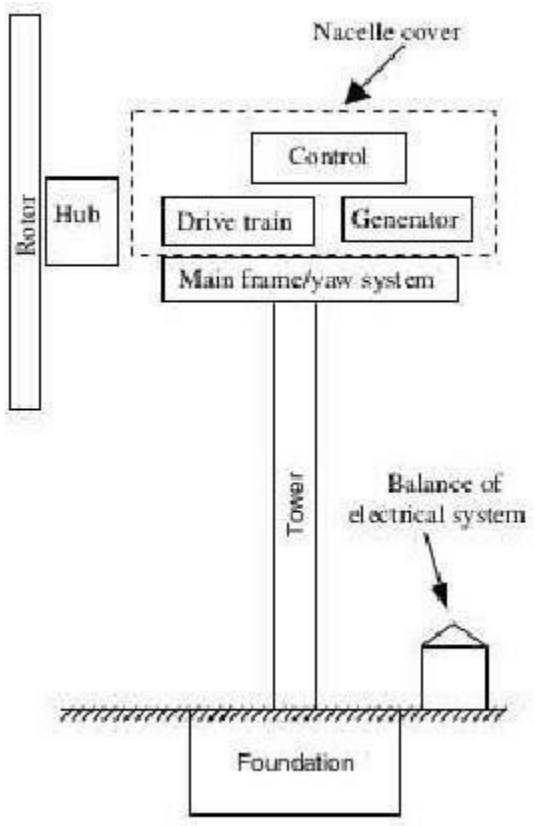


Aquí puedes observar la configuración de una turbina eólica para el caso en que este orientada en barlovento y sotavento respectivamente, se puede ver que las diferencias son significativas en ambos casos.

Por otro lado, la siguiente figura presenta los componentes principales de una turbina de eje horizontal, conformado por:

- El rotor: consistente de las palas y buje de soporte.
- La transmisión: la cual incluye la parte rotante de la turbina, inclusive partes del rotor como el eje, caja de cambios, acoplamientos, freno mecánico y generador.
- El marco principal: incluyendo la carcasa de la turbina, placa de sujeción y el sistema de guiñado.
- Torre o fundación del sistema.
- El balance del sistema eléctrico, incluyendo cables, interruptores, transformadores y posibles convertidores eléctricos.

Las partes que son modificables y ajustables a las necesidades bien podrían ser las siguientes:



Los principales componentes de una turbina de eje horizontal.

- El número de paletas, que normalmente son dos o tres.
- Orientación del rotor, barlovento o sotavento.
- Material de las paletas, método de construcción y perfil de éstas.
- Diseño del buje
- Control de potencia vía controles aerodinámicos o paletas de paso variable.
- Fija o variable velocidad de rotor
- Orientación fija o dinámica del guiño de las paletas.
- Generador sincrónico o de inducción.

La capa límite atmosférica, también conocida como el mapa límite planetaria, es la parte más baja de la atmósfera, y sus características son directamente influenciadas por la superficie de la tierra. Aquí cantidades físicas como la velocidad, temperatura y humedad cambian rápidamente en el espacio y el tiempo. Por ejemplo, un importante parámetro en la caracterización de los recursos eólicos es la variación de la velocidad horizontal del viento con la altura. Esta variación de la velocidad del viento con la altura es llamada el

perfil vertical de la velocidad del viento. En ingeniería, la determinación del perfil vertical es un importante parámetro de diseño debido a que:

1. Determina la productividad de una turbina en una torre de cierta altura, e
2. Influye fuertemente en el tiempo de vida de una turbina.

Hay por lo menos problemas de interés básicos con la determinación del perfil vertical de la velocidad del viento para la generación de energía eólica:

- Variaciones instantáneas en la velocidad del viento como una función de la altura (en escalas de tiempo de segundos).
- Variaciones estacionales en el promedio de la velocidad del viento como una función de la altura.

Uno debe de notar que esos son separados y distintos problemas, y suele ser erróneamente asumido que la misma metodología puede ser aplicada a ambos.

1.2.6. Ubicación de sensores

Usualmente se necesita recolectar datos a cierta altura, la altura de buje de la turbina. Entonces, uno necesita torres de medición de alturas de 20mtr hasta 150mtr. Algunas veces se puede aprovechar que torres de comunicación están cerca de los sitios a inconsideración y de uso práctico para las mediciones.

Pero, en la gran mayoría de los casos, torres de medición deben de ser instaladas para los sistemas de medición del viento.

Sistema de grabación de datos

En el desarrollo de un programa de medición uno debe de seleccionar el tipo de recolector de datos para desplegar, grabar y analizar los datos obtenidos desde los sensores o transductores. El tipo para desplegar usado por instrumentos son del tipo analógico y digital. En general, el tipo más usado hoy en día para la recolección y almacenamiento de información es en computadoras personales.

1.3. Tratamiento de datos del viento

Los datos producidos por un sistema de monitores pueden ser analizados en una gran variedad de formas que pueden incluir, mas no se limitan a:

- Promedio de la velocidad horizontal sobre un específico intervalo de tiempo.
- Variaciones en la velocidad horizontal del viento (desviación estándar, intensidad de las turbulencias)
- Promedio en la dirección horizontal
- Desviación sobre la dirección horizontal
- Distribución de la velocidad y distribución
- Persistencia
- Análisis estadístico
- Variaciones diurnas, anuales, interanuales en la dirección y velocidad, así como de otros parámetros del viento.

Cada una de los anteriores ya ha sido mencionada, a excepción de las persistencias, que es la duración de la velocidad del viento dentro de un rango de velocidad de viento.

Diseño de modernos sistemas eólicos

Hoy en día el diseño más común de turbinas de viento es el de eje horizontal, que es cuando el eje de rotación es paralelo al suelo. Estos sistemas son clasificados de acuerdo con la orientación del rotor (barlovento o sotavento de la torre), diseño del buje (estático o movible), torre de control, numero de palas y cómo éstas son alineadas al flujo del viento (con o sin guiño).

Turbulencias

Turbulencia en el viento es causado por la disipación de la energía cinética en energía térmica vía la creación y destrucción de remolinos, así como de ráfagas pequeñas. El tiempo de duración de un remolino o una ráfaga suele ser de tiempos muy cortos, de una hora o más, y hasta de sólo algunos minutos o menos. Debido a la cantidad de variables que se implican para la creación de estos fenómenos, se puede decir que se trata de procesos estocásticos caracterizados por algunas propiedades estadísticas.

13.1. Campo de velocidad del viento

La velocidad del viento en cualquier localización varía con el espacio y el tiempo alrededor de su valor promedio debido a los efectos de las turbulencias. Para esta unidad se estudiará el fenómeno llamado cizalladura. La cizalladura influye en la valoración de los recursos eólicos del emplazamiento y en el diseño de las turbinas del aerogenerador.

Primero, la valoración de los recursos eólicos en un área geográfica requiere que los datos del ano metro sean calibrados a la misma altura. Segundo, desde el diseño, el tiempo de fatiga de las palas del rotor va a ser influenciada por la carga cíclica resultante desde la rotación resultante de un viento que varía en la dirección vertical. De aquí, un modelo de las variaciones de la velocidad del viento con la altura es requerido en la generación de energía eólica. A continuación, se presenta un sumario de algunos modelos que se utilizan para predecir la variación de la velocidad del viento con la altura. En el estudio de la energía eólica se utilizan dos modelos o leyes que han sido generalmente para modelar la variación vertical de la velocidad del viento en regiones homogéneas, terrenos planos (praderas, desiertos, etc.). Esos modelos son: la ley logarítmica, la cual tiene sus orígenes en la mecánica de fluidos e investigaciones atmosféricas. Está basada en una combinación de investigaciones teóricas y empíricas; la segunda es la ley de potencias usadas por muchos investigadores en energía eólica. Ambos modelos están sujetos a la incertidumbre que es causada por las variables de naturaleza compleja, turbulencias. Del primer modelo se tiene el resultado:

$$U(z) = \frac{U^*}{k} ln\left(\frac{z}{z_o}\right)$$

donde U*es la velocidad de fricción del terreno, k la constante de Von Karman, z la altura desde el suelo, y z_0 la longitud de rugosidad de la superficie, la cual caracteriza la rugosidad del terreno. La ecuación anterior puede ser usada para extrapolar la velocidad del viento si a cualquier altura si es que es conocida a una altura:

$$U(z)/U(z_r) = ln\left(\frac{z}{z_0}\right)/ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)$$

donde $U(z_r)$ es la velocidad conocida a la altura z_r. El otro modelo, la ley de potencias, considera que la variación de la velocidad del viento está dada por:

$$U(z)/U(z_r) = \left(\frac{z}{z_r}\right)^{\alpha}$$

donde α es el exponente de la ley de potencia. Investigaciones y los datos meteorológicos han mostrado que el valor de α es igual a 1/7, indicando una correspondencia entre el perfil de viento y placas planas. Ha sido encontrado que el parámetro α varía con la elevación, en el transcurso del día, temporada, naturaleza del terreno, velocidad del viento, temperatura y algunos parámetros térmicos y mecánicos. Algunos investigadores dicen que todas esas aproximaciones reducen la simplicidad y aplicabilidad de la ley de potencias, y que los especialistas en la energía eólica deben de aceptar la naturaleza empírica de la ley de potencias y escoger el valor de α que mejor se ajusta a los datos del viento del terreno. A continuación, se revisan algunas formas de calcular el valor de α:

Exponente como una función de la altura y la velocidad del viento

$$\alpha = \frac{0.37 - 0.088\ln(U_{ref})}{1 - 0.088\ln\left(\frac{z_{ref}}{10}\right)}$$

donde U está dada en m/s y z_{ref} en mtr.

Correlación dependiente de la rugues del terreno

$$\alpha = 0.096\log z_0 + 0.016(\log z_0)^2 + 0.24$$

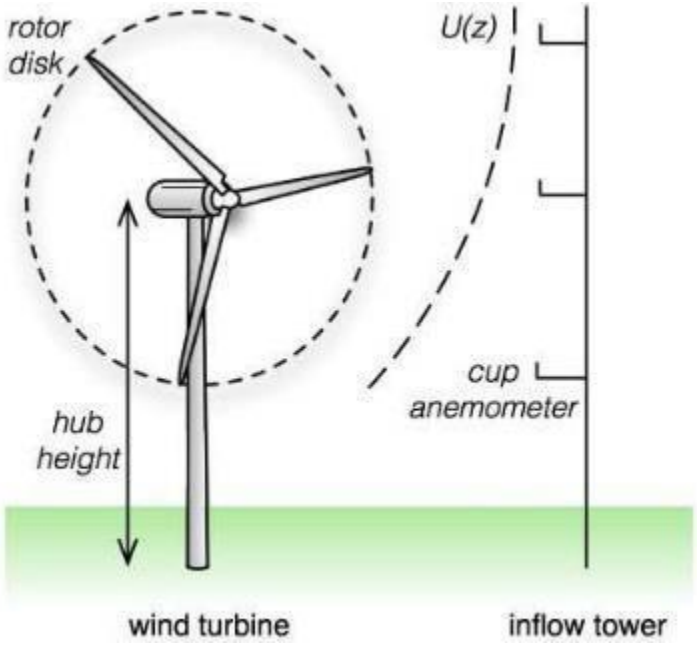
donde z_0 es la longitud de la rugosidad de la superficie.

Comparación de los perfiles de velocidad con los datos

La importancia de caracterizar la variación de la velocidad del viento con la altura, o cizalladura, en una altura dada es gran utilizada para la determinación del tipo y características de la turbina que no pueden despreciarse. Tal caracterización es necesaria para una predicción precisa de la potencia de salida de un aerogenerador, y es esencial para el desarrollo preciso de energía eólica conocer las caracterizaras de la velocidad del viento en la altura de buje de la turbina.

Recientes trabajos que incluyen el uso de datos del viento a la altura de la torre han mostrado que la diferencia entre el modelo logarítmico y de potencias de la cizalladura es despreciable para fines prácticos, y bajo algunas consideraciones pueden dar precisas predicciones de la velocidad promedio del viento a la altura de buje. Esta conclusión fue

hecha a partir de datos de experimentos en: terrenos planos sin árboles, terreno montañoso sin árboles, y terrenos forestados. Para estos tres terrenos, los investigadores encontraron que la diferencia entre el valor predicho a la altura de buje (50mtr) de la velocidad del viento y el valor experimental, es de sobre 1% y un valor máximo de 13%.



Aquí se muestra la altura de buje de turbina, la altura del centro del rotor de una turbina eólica con relación al suelo. Para las turbinas eólicas de eje vertical la altura del buje es la altura del plano ecuatorial.

En la práctica uno debe considerar que la cizalladura cambia con un gran número de variables:

- Estabilidad atmosférica
- Rugues de la superficie
- Condiciones de la superficie
- Forma del terreno

De aquí, los modelos de cizalladura deben de tener gran incertidumbre debido a que éstos no siempre caracterizan la realidad.

1.3.2. Uso y manejo del software para la simulación del viento

En este subtema se determina la productividad de una turbina de viento en un sitio dado en el cual la información sobre la velocidad es disponible.

La potencia disponible desde el viento es $P = (1/2)\rho A U^3$. En práctica, la potencia es disponible en un poco más compleja que esta fórmula. En la figura se puede ver la gráfica de la potencia una turbina eólica. La curva de potencia ilustra tres importantes características:

1. Velocidad de corte inferior
2. Velocidad retardada
3. Velocidad de corte superior

Aquí se analizan los métodos para la determinación de la producción de energía, así como los métodos para sumar la información desde un sitio dado. Las siguientes cuatro consideraciones se tomarán en cuenta:

- Uso directo del promedio de datos sobre un corto intervalo de tiempo
- Método de caja
- Desarrollo de curvas de velocidad y potencia desde los datos
- Análisis estadístico usando mediciones sumarizadas

Métodos directos de análisis de datos, caracterización de los recursos y productividad de la turbina

Uso directo de los datos

Supón que una serie de datos con N mediaciones de la velocidad del viento, U_i cada una promediada sobre un intervalo de tiempo Δt. Esos datos pueden ser usadas para calcular los siguientes parámetros de gran uso:

(1) El promedio de la velocidad sobre el total del conjunto de datos:

$$\bar{U} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} U_i$$

(2) La desviación estándar de la velocidad del viento:

$$\sigma_U = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(U_i - \bar{U})^2}$$

(3) La densidad promedio de potencia, $\bar{P}/A$ es el promedio de la energía disponible en el viento por unidad de área:

$$\frac{\bar{P}}{A} = (1/2)\rho\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}U_i^3$$

Similarmente, la densidad de energía promedio por unidad de área por un periodo de tiempo NΔt está dado por:

$$\frac{\bar{E}}{A} = (1/2)\rho\Delta t\sum_{i=1}^{N}U_i^3$$

(4) El promedio de la potencia del viento de la máquina, $\bar{P_w}$ es:

$$\bar{P}_w = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}P_w(U_i)$$

donde $P_w(U_i)$ es definida como la potencia de salida dada por la curva de potencia de la máquina.

(5) La energía desde la turbina, E_w es:

$$\bar{E}_w = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}P_w(U_i)\Delta t$$

Método de vallas

El método de vallas provee también una forma para sumar los datos del viento y determinar la productividad de la turbina. Los datos deben primero ser separados en intervalos de velocidad del viento o vallas en las cuales ellos ocurren. Es más conveniente usar la misma medida de valla. Supón que son separados en NB vallas de ancho wj, con puntos medios mj y f el número de ocurrencias en cada intervalo de la valla, de tal manera que:

$$N = \sum_{j=1}^{N_B} f_j$$

Usando estas definiciones, se encuentra:

$$\bar{U} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} m_i f_i$$

$$\sigma_U = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}\left(m_i^2 f_i - N(\bar{U})^2\right)}$$

$$\frac{\bar{P}}{A} = (1/2)\rho\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} m_i^3 f_j$$

$$\bar{P}_w = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} P_w(m_i) f_i$$

$$\bar{E}_w = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} P_w(m_i) f_i \Delta t$$

Un histograma que muestre el número de mediciones y el ancho de la valla es usualmente graficado cuando se usa este método.

Curvas de velocidad y duración de la potencia desde los datos

Curvas de velocidad y duración de la potencia son de gran uso cuando se compara la energía potencial de un sitio candidato para el emplazamiento. La curva de duración de velocidad es una gráfica con la velocidad del viento en el eje y y el número de horas en el año, para los cuales la velocidad del viento fue igual o excedió un valor, en particular en el eje x. Un ejemplo de la curva de duración de la velocidad para varias partes del mundo es mostrado en la figura. Esta gráfica da una idea de la naturaleza del régimen del viento en cada lugar. Desde su dentición, observa que el área bajo la curva es una medida de la velocidad promedio del viento. Por otro lado, se puede ver que entre menos varíe la curva, más constante es la velocidad en la región, y entre más pronunciada sea la pendiente de la curva, mayor será la variación de la velocidad. Los pasos para construir la curva de velocidad son los siguientes:

- Organizar los datos en vallas

- Encontrar el número de horas que exceden una velocidad dada.
- Graficar la curva resultante

La curva de duración de la potencia para una turbina, en particular en un emplazamiento dado, puede ser hecha con la curva de duración de la potencia junto con la curva de potencia de la turbina.

Velocidades extremas del viento

El principal factor en la meteorología en la evaluación de un prospecto como sitio para el emplazamiento de un sistema eólico es la velocidad promedio del viento. Otra importante consideración es la anticipada velocidad del viento extrema, la velocidad del viento más alta esperada sobre un periodo relativamente grande de tiempo. Velocidades extremas son de particular interés en el proceso del diseño, ya que las turbinas deben de ser diseñadas para soportar esas extremas, pero poco frecuentes condiciones. Vientos extremos son descritos en términos del periodo de recurrencia. Determinación de la velocidad extrema es algo especialmente difícil de medir, ya que podría requerir mediciones sobre periodos largos de tiempo. Es posible estimar la velocidad extrema usando extremos sobre un periodo corte de tiempo, juntos con una adecuada elección del modelo estadístico. El modelo estadístico más usado para estimar la velocidad extrema del viento es la distribución de Gumbel:

$$p(u_e) = \frac{1}{\beta} e^{-(u_e-\mu)/\beta}$$

donde ue= es la velocidad extrema del viento sobre un intervalo de tiempo dado, ß =(sev6/p), μ =¯ Ue- 0.577ß,¯ Ue= el promedio de un conjunto de valores extremos, y s= la desviación estándar de ese conjunto de datos. E

Usando técnicas estadísticas para estimar la potencia de salida de una turbina

Como ya se ha presentado, en la generación del viento interviene una gran cantidad de variables que hacen que la generación del viento sea un proceso estocástico o aleatorio. Es por eso que conviene usar una función de distribución para la velocidad del viento p(U), la cual dice que es la probabilidad de tener cierta medición de velocidad del viento en un tiempo dado. Según esta definición, entonces, se puede calcular la potencia de salida de la máquina esperada ¯ Pw(U):

$$\bar{P}_w(U) = \int_o^\infty P_w(U)p(U)dU$$

El promedio de la potencia de salida de la turbina, $\bar{P}$ permite calcular el factor de capacidad de la turbina CFw, que es la razón de la energía producida por la turbina de viento en un emplazamiento, y la energía que sería producida si la maquina corriera en su potencia nominal o teórico ideal, PR:

$$C_F = \frac{\bar{P}_w}{P_R}.$$

Es posible determinar la curva de potencia de la turbina P basado en la potencia disponible en el viento usando el coeficiente de potencia del rotor Cwp:

$$P_w(U) = \frac{1}{2}\rho A C_p \eta U^3$$

donde η es la eficiencia de la transmisión (potencia del generador/potencia del rotor). El coeficiente de la potencia del rotor es definido como:

$$C_p = \frac{Potencia\ \ del\ \ Rotor}{Potencia\ \ del\ \ Viento} = \frac{P_{rotor}}{\frac{1}{2}\rho A U^3}$$

Más adelante observa que el coeficiente Cp puede ser expresado como una función de la razón de velocidad λ :

$$\lambda = \frac{Velocidad\ \ de\ \ la\ \ punta\ \ de\ \ la\ \ Paleta}{Velocidad\ \ del\ \ Viento} = \frac{\Omega R}{U}$$

donde Ω es la velocidad angulas del rotor de la turbina de viento, y R es el radio del rotor de viento. Entonces, si se asume un valor contante para la eficiencia de la trasmisión, se obtiene:

$$\bar{P}_w = \frac{1}{2}\rho\pi R^2 \eta \int_0^\infty C_p(\lambda) U^3 p(U) dU$$

Entonces, se pueden usar los métodos estadísticos para estimar la productividad de energía de una turbina, en específico en un sitio dado con un mínimo de información. Aquí observa dos ejemplos usando como distribución de probabilidad y la distribución de Rayleigh.

Productividad de una máquina idealizada usando la distribución de Rayleigh

Una medida del promedio del máximo posible de potencia desde un diámetro del rotor dado puede ser calculada asumiendo una máquina ideal y usando la distribución de

probabilidad de Rayleigh, análisis basado en el trabajo de Carlín (1997) y que asume lo siguiente:

- Una turbina de viento idealizada, sin pérdida de potencia, C igual a el mejor valor posible o límite de Betz =16/27 (El máximo valor teórico del coeficiente de potencia).
- La distribución de probabilidad de la velocidad está dada por la distribución de Rayleigh.

El promedio de la potencia de la turbina $\bar{}$ P está dada por la siguiente ecuación y la distribución de Rayleigh: w

$$\bar{P}_w = \frac{1}{2}\rho\pi R^2\eta \int_0^\infty C_p(\lambda)U^3 \left\{\frac{2U}{U_c^2}e^{-\left(\frac{U}{U_c}\right)}\right\} dU$$

donde Uc es la velocidad del viento, característica dada por Uc= 2$\bar{}$ U/vp. Para una máquina ideal, donde no hay energía pérdida, η = 1, y usando el límite de Betz para el coeficiente de potencia de la turbina, de lo cual se obtiene:

$$\bar{P}_w = \frac{1}{2}\rho\pi R^2 U_c^3 C_{p,Betz} \int_0^\infty \left(\frac{U}{U_c}\right)^3 \left\{\frac{2U}{U_c}e^{-\left(\frac{U}{U_c}\right)}\right\} \frac{dU}{U_c}$$

Dado que la integral es igual a (3/4) v p, se llega a:

$$\bar{P}_w = \rho\left(\frac{2}{3}D\right)^2 \bar{U}^3$$

donde D es el diámetro del rotor de la turbina. Como un ejemplo numérico podrías calcular la producción anual de una turbina Rayleigh-Betz" de 18 metros de diámetro al nivel del mar, con un promedio anual de la velocidad del viento igual a 6 m/s anual:

$$\bar{P}_w = (1.225\ \ Kg/m^3)\left(\frac{2}{3}\times 18\ \ m\right)(6\ \ m/s)^3 = 38.1\ \ kW$$

Cierre de la Unidad

Has concluido el estudio de la Unidad 1 de Diseño de Sistemas eólicos, en la cual se presentó un breve recorrido histórico sobre el uso del viento en beneficio de las actividades de la humanidad, se explicaron las principales variables hidrodinámicas del viento, así como su origen.

Por otro lado, se presentaron de manera general los elementos esenciales en el diseño de un sistema eólico, así como una breve explicación de la medición e instrumentación del viento.

Finalmente, se mostraron las variables hidrodinámicas del viento más importantes a considerar en el diseño de un sistema eólico. Ahora continúa con el estudio de la Unidad 2 para poder comenzar con tu diseño.

Fuentes de consulta

1. Ibrahim Al-Bahadly. (2011). *Wind turbines*. InTech.

2. Manwell, McGowan and Rogers, Wiley Press. (2009). *Wind Energy Explained:Theory*, Design and Application.

3. Paraschivoiu, Presses Internationale Polytechnique. (2009). *Wind Turbine Design: With Emphasis on Darrieus Concept*.

4. Robert Gasch and Jochen Twele, Springer. (2012). *Wind Power Plants: Fundamentals*, Design, Construction and Operation.

5. Sath Yajith Mathew, Springer. (2006). *Wind Energy: Fundamental*, Resource Analysis and Econmics.

6. Wei Tong WIT Press. (2010*). Wind Power Generation and Wind Turbine Design*.

7. Mendoza Guerra, E. G. *Simulación con el programa RETScreen Expert para la aplicación de energías renovables en trenes Alstom Metropolis 9000 de Lima (Perú)*.

8. Milano, J. (2018). Proposta de utilização de sistema híbrido eólico/solar de geração de energia em estabelecimentos comerciais na Ilha do Mel-PR. *Ciência e Natura*, *40*, e66.

Recurso educativo

- Software de gestión de energía limpia RETScreen Expert
  https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465