

## Caracterización del viento de Ciudad del Carmen, Campeche

### Carmen City's wind characterization in Campeche

ROSADO-VÁZQUEZ, María Esther†\*, SIERRA-GRAJEDA, Juan Manuel, GUERRA-SANTIAGO, Gilberto y ROSADO-VÁZQUEZ, Eduardo Alonso

*Universidad Autónoma del Carmen*

ID 1<sup>er</sup> Autor: *María Esther, Rosado-Vázquez* / ORC ID: 0000-0002-7550-4161, CVU CONACYT ID: 785673

ID 1<sup>er</sup> Coautor: *Juan, Manuel Sierra-Grajeda* / ORC ID: 0000-0002-0565-6450, CVU CONACYT ID: 219284

ID 2<sup>do</sup> Coautor: *Gilberto, Guerra-Santiago* / ORC ID: 0000-0002-8481-8293, CVU CONACYT ID: 954799

ID 3<sup>er</sup> Coautor: *Eduardo Alonso, Rosado-Vázquez* / ORC ID: 0000-0002-8395-4808

Recibido 18 de Octubre, 2018; Aceptado 8 De Noviembre, 2018

#### Resumen

El viento se considera como un flujo másico de aire que se mueve con respecto a la superficie de la tierra. La atmósfera global transporta las masas de aire debido a los diferenciales de potencial térmico, generados por el sol. El calor latente del agua cuando varía de una fase a otra tiene más influencia en el clima. La energía disponible del viento varía de acuerdo a las estaciones del año. El objetivo principal de este trabajo es hacer una caracterización completa del viento en Cd. del Carmen, Campeche; puesto de otra forma, hacer una evaluación del recurso eólico en Ciudad del Carmen, Campeche. Para llegar a lo anterior se usarán datos históricos de velocidades, temperaturas, direcciones del viento etc, provenientes de la estación meteorológica de la Universidad Autónoma del Carmen, UNACAR. Las velocidades registradas en la estación se usarán para encontrar algunos marcadores importantes como: velocidades promedio, intensidad de turbulencia, rosas de viento, entre otros. Se va a comparar con los datos históricos de velocidad anuales del aeropuerto. La información proveniente de la estación de la UNACAR se midió cada 10 segundos durante 4 años haciendo un total de más de 202,710 datos por procesar en horas, semanas, meses y años para llegar a la evaluación del recurso eólico en Ciudad del Carmen.

#### Evaluación Recurso Eólico, Rosa de vientos, Densidad de potencia

#### Abstract

The wind is considered as a mass of flow moving respecting to earth surface. The global atmosphere transports air masses due to differential thermal potentials, powered by the sun. The water latent heat when changing from a phase to another has more influence in the weather. The wind energy available varies according to the seasons of the year. The mean objective in this work is to do a complete wind characterization at Carmen City, in other words a wind resource evaluation at Carmen city. To achieve this, we will use historical information from meteorological station at Carmen's University Autonomous, UNACAR. The measured velocities for days, months and years will be used to find some important wind markers like: average wind velocity, wind roses, turbulence intensity, wind power density among others. We will use the airport history wind velocity to compare with the data from the UNACAR. The wind velocities coming from UNACAR's meteorological station was measured every ten seconds for four years making more than 202,710 wind velocity data to process in weeks, months, years to have a wind resource evaluation from Carmen City.

#### Wind resource evaluation, wind rose, power density

**Citación:** ROSADO-VÁZQUEZ, María Esther, SIERRA-GRAJEDA, Juan Manuel, GUERRA-SANTIAGO, Gilberto y ROSADO-VÁZQUEZ, Eduardo Alonso. Caracterización del viento de Ciudad del Carmen, Campeche. Revista de Investigación y Desarrollo. 2018, 4-14: 17-26

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: ma.esther.rosado.vazquez@gmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

El viento se considera como una masa de flujo que se mueve con respecto a la superficie de la tierra. Además de los vientos globales, también tenemos los sistemas de vientos locales. La diferencia de temperaturas es la causa principal. Los sistemas de viento más importantes son: brisa del mar y circulación valle-montaña. Este estudio se llevó a cabo en el estado de Campeche, para ser más exactos en la Isla del Carmen, conocida como Ciudad del Carmen los vientos que se tienen aquí son tipo brisa del mar, se tiene un sistema de viento diurno y una alta diferencia de temperaturas entre el mar y la tierra; a la orilla del mar también se presentan dichos diferenciales, pero en menor intensidad. Durante el día la tierra se calienta mucho más que el mar que rodea a la isla; cuando cae la tarde la arena se refresca más rápido que el mar. Por lo que las direcciones de flujo se invierten (Gasch & Twele, 2012).

La evaluación de la factibilidad técnico-económica de un proyecto eoloelectrico exige un conocimiento detallado del comportamiento del viento, para ello es imprescindible llevar a cabo mediciones anemométricas en el área y lugar de interés (Borjas-Díaz, Medrano-Vaca, Huacuz-Villamar, & González Galara, 1998).

La información proveniente de la estación de la UNACAR se midió en promedio cada 10 minutos durante 4 años haciendo un total de más de 202,710 datos que incluyen velocidades de viento, temperaturas, orientación del viento, etc. El objetivo principal de este trabajo es hacer una evaluación del recurso eólico en Ciudad del Carmen, Campeche, considerando la información previamente mencionada. Para cumplir con el objetivo es necesario procesar todos los datos en horas, semanas, meses y años.

La estación de monitoreo se encuentra ubicada en la parte superior del edificio de la Facultad de Ingeniería de la UNACAR-Campus III en una torre (LENERSE del Laboratorio de Energías Renovables del Sureste), dicha torre cuenta con 3 anemómetros de copa o sensores; dos a una altura de 40m y el tercero a una altura de 30m, también cuenta con una veleta para registrar la dirección del viento así como un sensor de temperatura, toda la información recopilada se registra en un sistema de adquisición de datos.

Los datos provenientes del instrumento se usarán para encontrar algunos marcadores importantes como: velocidades promedio, intensidad de turbulencia, rosas de viento, entre otros.

La magnitud del histórico de velocidades, así como la dirección del viento son los parámetros más importantes en la predicción del rendimiento energético esperado (Gasch & Twele, 2012).

En la medición del viento, los sensores o instrumentos para la medición del viento deben de ser lo más exactos posibles en las lecturas de velocidad del viento, además, tener buena capacidad de almacenamiento para la información y lo más robusto posible para situarse a la intemperie. Un error del 10% en la medición del viento puede ocasionarnos un error de hasta el 33% en la estimación de la potencia de salida (Gasch & Twele, 2012).

Los anemómetros se componen de tres partes principales: sensor, acondicionador de señal y receptor de datos. Los instrumentos de medición, aún los de baja capacidad de almacenamiento, si registran cada 10 min la información pueden llegar a almacenar hasta 4000 datos al mes (Spera, 1994)

## Metodología

En la figura 1 se muestra un diagrama representativo de la metodología usada en este trabajo para la caracterización del viento.



**Figura 1** Metodología para la caracterización del viento

Fuente: Elaboración Propia

### Ecuaciones y conceptos usados en la caracterización del viento

En el proceso de la caracterización es importante tener presente algunos conceptos:

La velocidad estacionaria es la suma de las variaciones medidas en la velocidad del viento, en un intervalo de 10 minutos dividido entre el total de muestras durante el mismo período de tiempo se obtiene con la ecuación 1 (Borjas-Díaz, Medrano-Vaca, Huacuz-Villamar, & González Galara, 1998).

$$V_e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n V_i \quad (1)$$

La velocidad promedio es la suma de las velocidades estacionarias en un período de tiempo dividido entre el número de intervalos de 10 min en el mismo período de tiempo de las velocidades estacionarias ecuación 2 (Gasch & Twele, 2012).

$$V_T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n V_{e_i} \quad (2)$$

La varianza es una medida de las irregularidades del viento, está dado por el promedio de la diferencia al cuadrado de la velocidad real (en el período de 10 min.) y la velocidad estacionaria ecuación 3 (Manwell, Mcgowan, & Rogers, 2009)

$$\overline{V^2} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n (V_i - V_e)^2 \quad (3)$$

La desviación estandar es la raíz cuadrada de la varianza ecuación 4 (Manwell, Mcgowan, & Rogers, 2009).

$$\sigma_e = \sqrt{\overline{V^2}} \quad (4)$$

Intensidad de turbulencia es la relación entre la desviación estándar y la velocidad promedio ecuación 5 (Gasch & Twele, 2012).

$$I_e = \frac{\sigma_e}{V_T} \quad (5)$$

La desviación promedio, es la diferencia al cuadrado de la velocidad estacionaria y la velocidad promedio.

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n (V_{e_i} - V_T)^2} \quad (6)$$

Intensidad de turbulencia total

$$I_T = \frac{\sigma_T}{V_T} \quad (7)$$

La energía cinética del viento considera el aire en movimiento, como la energía del viento a través de una sección de área perpendicular a la dirección del viento durante un período de tiempo ecuación 8 (Gasch & Twele, 2012).

$$E_c = \frac{1}{2} \rho A V^3 t \quad (8)$$

Potencia del viento es la potencia que se puede extraer del viento a través de un área transversal al paso de éste, ecuación 7 (Spera, 1994).

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (9)$$

Densidad de potencia eólica es la potencia que experimenta un rotor aerodinámico de eje horizontal por unidad de área de barrido. De la ecuación 10 se observa que la potencia del viento es directamente proporcional al cubo de su velocidad (Spera, 1994) ecuación 8.

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (10)$$

Las variaciones diurnas de la densidad debido a cambios de presión son pequeñas comparadas con los efectos de la temperatura estacional y la altura respecto al nivel del mar. En este caso el promedio de la densidad del aire para un período mensual en un sitio específico se puede estimar mediante la ecuación 11 (Borjas-Díaz, Medrano-Vaca, Huacuz-Villamar, & González Galara, 1998).

$$\rho_{sm} = 1.225 e^{\left[ \left( \frac{-z}{8435} \right) - \left( \frac{T_m - 15}{288} \right) \right]} \quad (11)$$

Energía disponible en el período por unidad de área ecuación 12 (Borjas-Díaz, Medrano-Vaca, Huacuz-Villamar, & González Galara, 1998).

$$\frac{E_{D,T}}{A} = \frac{1}{12} \rho_s \sum_{i=1}^N V_{e_i}^3 \quad (12)$$

Densidad de potencia promedio en el período, ecuación 13 (Borjas-Díaz, Medrano-Vaca, Huacuz-Villamar, & González Galara, 1998).

$$\frac{\overline{P_T}}{A} = \frac{1}{2N} \rho_s \sum_{i=1}^N V_{ei}^3 \quad (13)$$

El perfil vertical de velocidad del viento está dado por la ley de potencias de Hellman. El exponente a menudo se denomina exponente empírico de cizallamiento del viento, pero varía con la altura, la rugosidad, orografía del lugar, naturaleza y estratificación del terreno. La ecuación 14, da la descripción del perfil promedio del viento donde se simplifica para dos alturas conocidas, así como el valor de la rugosidad del terreno (Mertens, 2006). La tabla 1 presenta Las rugosidades para cada tipo de terreno de acuerdo a Wood.

$$Ve(z) = Ve(Zr) \left( \frac{\ln \frac{z}{Z_0}}{\ln \frac{Zr}{Z_0}} \right) \quad (14)$$

Tipo de Terreno	Z <sub>0</sub> (mm)
Mar abierto calmado	0.2
Superficie nevada	3.0
Pasto áspero	10
Cultivo	50
Árboles dispersos	100
Varios o hileras de árboles, pocas construcciones	250
Bosques, tierras cubiertas con árboles	500
Suburbios	1500
Centros de ciudades con edificios altos	3000

**Tabla 1** Descripción del tipo de terreno y variación de Z<sub>0</sub>  
Fuente: Wood, 2011.

### Pronóstico del recurso eoloenergético

La ecuación 15 aproxima la función de densidad de probabilidad de Weibull, sin embargo requiere del conocimiento de dos parámetros: k, un factor de forma y c, un factor de escala. (Manwell, Mcgowan, & Rogers, 2009).

$$p(Ve) = \frac{k}{c} \left( \frac{Ve}{c} \right)^{k-1} \exp \left[ - \left( \frac{Ve}{c} \right)^k \right] \quad (15)$$

La ecuación 16 nos da la probabilidad de ocurrencia de tener vientos mayores o menores a un cierto valor pre-establecido (Manwell, Mcgowan, & Rogers, 2009).

$$P(v_{ex} \leq v_e \leq v_{ey}) = \int_{v_{ex}}^{v_{ey}} p(v) dv \quad (16)$$

En el caso de un proyecto eólico es esencial tener caracterizado el viento de la región con información de por lo menos un año, además de conocer la frecuencia y distribución de la velocidad del viento para diferentes direcciones con el fin de saber la orientación de los aerogeneradores y evitar la interferencia entre ellos mismos, por esta razón se usan las rosas de viento (Gasch & Twele, 2012).

Una rosa de vientos es una forma de saber gráficamente la dirección y distribución del viento en un lugar. Cada círculo concéntrico representa la frecuencia con la que se presenta una cierta velocidad por medio de rangos de velocidad marcados con diferentes colores.

### Desarrollo de la metodología

Ciudad del Carmen se ubica al suroeste de la península de Yucatán, en la parte occidente de la Isla del Carmen, está situada entre el Golfo de México y la Laguna de Términos. En la figura 2 se muestra un mapa de Cd. del Carmen, así como las ubicaciones de los lugares donde se midió la información, UNACAR-Campus III (punto rojo) y el aeropuerto de dicha ciudad (punto azul).



**Figura 2** Punto rojo Campus-III, punto azul el Aeropuerto en estas ubicaciones se midió la información meteorológica  
Fuente: Imagen tomada de Googlemaps

A partir de la información que se registró de la torre LENERSE se genera un archivo Raw Wind Data (RWD) por cada día para una variable se registran 144 datos aproximadamente, esta información se pasó a hojas de Excel; sólo se usó la información de 9 canales de los 15 que tiene; los canales registran: fechas, horas y minutos en que se tomó la lectura, sensores 1 y 2 ubicados a 40m, sensor 3 ubicado a 30m los tres miden velocidad del viento, además se registra la temperatura ambiente, la dirección del viento, tres canales más para las desviaciones estandar estacionaria, uno por cada sensor de velocidad.

Se consideraron los datos históricos anuales de velocidad del viento así como la temperatura ambiente provenientes del aeropuerto de Cd. del Carmen. Estos datos sirvieron para cotejar la información que se obtuvo de la estación meteorológica de la UNACAR.

**Desarrollo de la caracterización del viento**

Con la información disponible se fue procesando la información y los cálculos de las ecuaciones del 1 al 15 en una hoja de Excel; la información se tuvo que trabajar de forma que se tuvieran valores de la velocidad en horas, semanas, meses, años, dependiendo de la variable que se estaba trabajando.

Finalmente se usó un software gratis de internet Wind Rose Plot, WRPLOT, para graficar las rosas de viento, para esto se tuvo que organizar la información en el formato de entrada: año, mes, semana, hora, velocidad y dirección del viento, en el programa se indicó mostrar la rosa de vientos con dirección de donde viene el viento.

**Resultados de la evaluación.**

**Caracterización del viento**

De la ecuación 2 se obtuvieron los siguientes valores para las velocidades promedio.

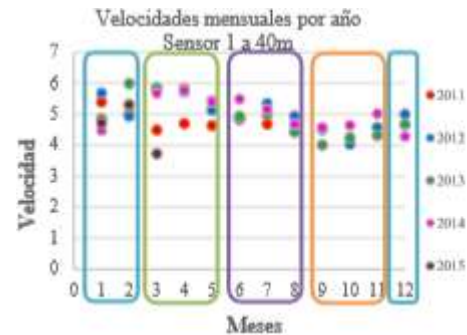
$$V_{T1 \text{ a } 40m} = 5.07086m/s$$

$$V_{T2 \text{ a } 40m} = 5.05336m/s$$

$$V_{T3 \text{ a } 30m} = 4.60000m/s$$

En el gráfico 1 se muestra la información de velocidades del viento del sensor 1, ésta información se graficó mensual y se variaron los colores para identificarla anual. En este tipo de gráficos es importante ver si existe una tendencia estacional por lo que los rectángulos ayudan a identificar las estaciones de la siguiente forma: Invierno (recuadro azul) incluye los meses 12, 1 y 2 que corresponden a Diciembre, Enero y Febrero; Primavera (recuadro verde) incluye los meses 3, 4 y 5 los cuales corresponden a Marzo, Abril y Mayo; Verano (recuadro morado) aquí se tienen los meses 6, 7 y 8 que vienen siendo Junio, Julio y Agosto; finalmente tenemos Otoño (recuadro naranja) incluye los meses 9, 10 y 11 los cuales son: Septiembre, Octubre y Noviembre.

Cabe mencionar que no se cuenta con los meses completos de los años 2011 y 2015 motivo por el cual no se aprecian todos los puntos, sin embargo, para 2012, 2013 y 2014 se observa una variación continua de los datos, de forma que presentan el mismo comportamiento con el paso de los años.



**Gráfico 1** Velocidades mensuales por años  
Fuente (con información de la UNACAR-LENERSE)

Con el histórico de los datos de velocidades anuales del aeropuerto de Cd. del Carmen (Punto A) se realizó el gráfico 2, donde además se añadieron las velocidades anuales de los sensores 1 y 3; se observa como la información registrada por dichos sensores conserva la misma tendencia que traen los datos registrados en el Punto A, además para el caso del sensor 1 su comportamiento es muy similar a los del Punto A observándose que en el período de estudio la mayoría de sus puntos se encuentran sobrepuestos.



**Gráfico 2** Histórico de velocidades del viento.  
Fuente (con datos de UNACAR-LENERSE)

Con el histórico de los datos de temperaturas anuales del Punto A se realizó el gráfico 3, donde además se añadieron las temperaturas anuales del sensor 1, se aprecia un comportamiento muy similar a los del Punto A

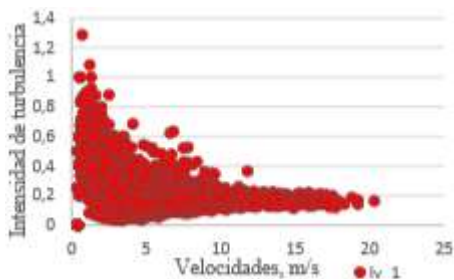




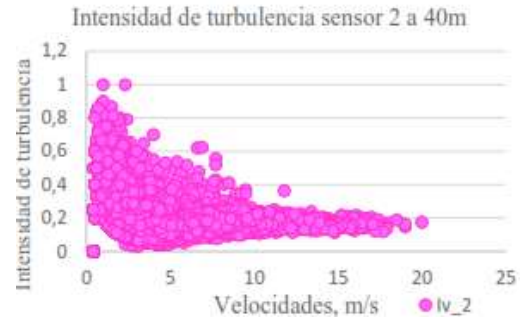
**Gráfico 3** Histórico de temperaturas  
Fuente (con datos de Tutiempo Network y UNACARLENERSE)

Las fluctuaciones turbulentas son de suma importancia en el diseño estructural de aerogeneradores, de aquí la necesidad de conocer la intensidad de turbulencia (Borjas Díaz, Medrano-Vaca, Huacuz-Villamar, & González Galara, 1998).

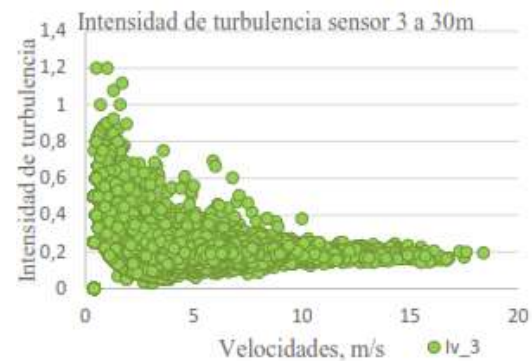
Una forma simple de medir la turbulencia es por medio del gráfico de Intensidad de turbulencia, de la ecuación 5 y con la información de los sensores 1 a 40m, 2 a 40m y 3 a 30m se calculó y gráficoó la intensidad de turbulencia para las velocidades en un lapso de 10min, estos son los gráficos 4, 5 y 6 respectivamente. Se aprecia una variación en la intensidad de turbulencia en el rango entre 0 a 1.2 sin embargo la mayoría de los puntos van de 0 a 0.5 en la escala de la intensidad de turbulencia, presentándose a velocidades bajas como en el rango de 0 a 6m/s. También se aprecia que a velocidades más altas del viento la intensidad de turbulencia disminuye debido a que el flujo del viento es más estable.



**Gráfico 4** Intensidad de turbulencia sensor 1  
Fuente (con datos de UNACAR-LENERSE)



**Gráfico 5** Intensidad de turbulencia sensor 2  
Fuente (con datos de UNACAR-LENERSE)



**Gráfico 6** Intensidad de turbulencia sensor 3.  
Fuente (con datos de UNACAR-LENERSE).

De la ecuación 6 se obtuvieron los siguientes valores para la desviación estándar promedio.

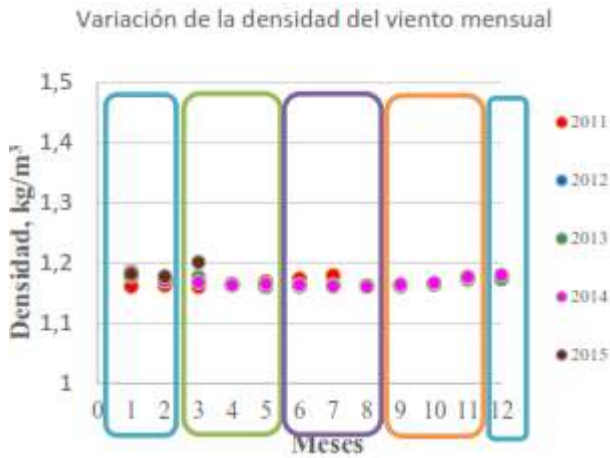
$$\begin{aligned} \sigma_{T1 \text{ a } 40m} &= 1.9987 \\ \sigma_{T2 \text{ a } 40m} &= 2.00719 \\ \sigma_{T3 \text{ a } 30m} &= 1.8684 \end{aligned}$$

Con los datos anteriores se obtuvo la intensidad de turbulencia promedio con la ecuación 7, para el sitio de estudio.

$$\begin{aligned} I_{T1 \text{ a } 40m} &= 0.203951 \\ I_{T2 \text{ a } 40m} &= 0.200719 \\ I_{T3 \text{ a } 30m} &= 0.209938 \end{aligned}$$

La densidad de potencia eólica es directamente proporcional a la densidad del aire, lo podemos apreciar en la ecuación 13.

Con la ecuación 11 se realizó la gráfica 7 correspondiente a la variación de la densidad del viento mensual por años, se observa una tendencia horizontal continua del orden de 1.17kg/m<sup>3</sup>.



**Gráfico 7** Variación de la densidad del viento mensual  
Fuente (con información de la UNACAR-LENERSE)

De la ecuación 12 y 13 se calcularon: la energía eólica disponible en todo el período de estudio y la densidad de potencia promedio en el mismo período para los sensores 1 a 40m y 3 a 30m.

En lo que respecta a la evaluación del recurso del viento se clasifica como escaso si se tienen valores menores a 100 W/m<sup>2</sup> en la densidad de potencia (Manwell, Mcgowan, & Rogers, 2009).

A 40m

$$\frac{E_{D,T}}{A} = 3,651.361 \text{ kWh/m}^2$$

$$\frac{\bar{P}_T}{A} = 109.34 \text{ W/m}^2$$

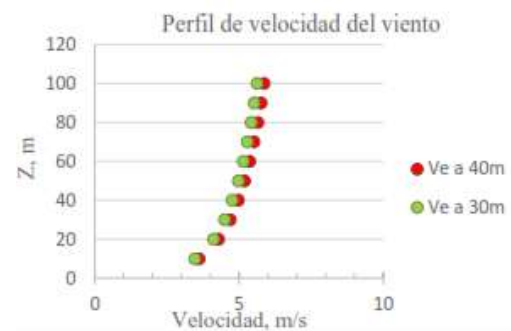
A 30m

$$\frac{E_{D,T}}{A} = 2,717.044 \text{ kWh/m}^2$$

$$\frac{\bar{P}_T}{A} = 81.36 \text{ W/m}^2$$

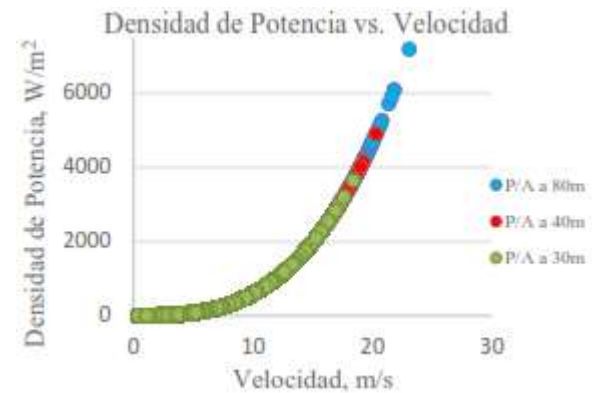
El viento se encuentra influenciado por la rugosidad la cual relaciona los obstáculos como edificios o árboles que se encuentran en el lugar de medición de los datos. Para considerar el perfil de velocidades del viento se consideró la ecuación 14 con un valor de  $Z_0=250\text{mm}$  ya que en el sitio solo se tienen dos edificios, sobre uno de ellos es donde se encuentra la estación.

Se realizaron estimaciones de la altura de 40m a 100m para ver que velocidades se podrían encontrar, el gráfico 8 muestra los resultados obtenidos con velocidades del orden de 5.6m/s para alturas de 100m



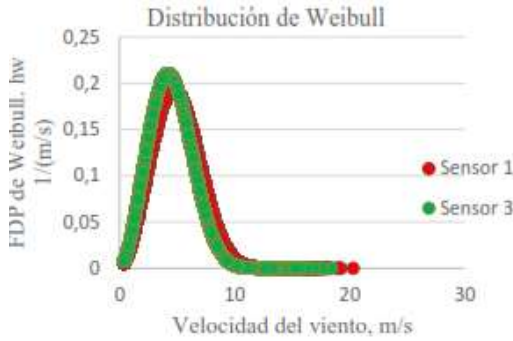
**Gráfico 8** Perfil de velocidad del viento  
Fuente (con datos de UNACAR-LENERSE)

En el gráfico 9 se muestra la densidad de potencia que se puede tener para diferentes velocidades, considerando una densidad del aire de 1.169380 kg/m<sup>3</sup> para alturas de 30 m, 40 m y 80 m este último viene de la ecuación 14).



**Gráfico 9** Densidad de potencia vs. Velocidad  
Fuente (con datos de UNACAR-LENERSE)

El gráfico 10 de distribución de Weibull se obtuvo con la ecuación 15. Comparando la f.d.p. de Weibull del sensor 1 con la correspondiente a la del sensor 3 vemos que la curva del sensor 1 es más ancha y está corrida hacia la derecha lo cual es consistente con los valores calculados de la desviación estandar y el valor promedio de la velocidad.



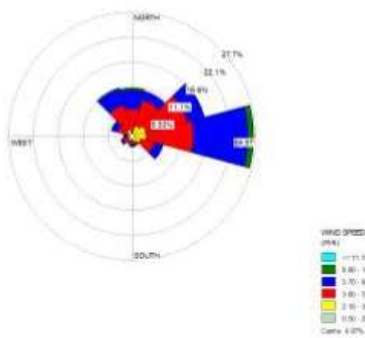
**Gráfico 10** Distribución de Weibull para  $V_r=5\text{m/s}$   
Fuente (con datos de UNACAR-LENERSE).

La tabla 2 se generó con la ecuación 16 en ella se muestran las probabilidades de ocurrencia de tener vientos mayores a un cierto valor  $V_e$ .

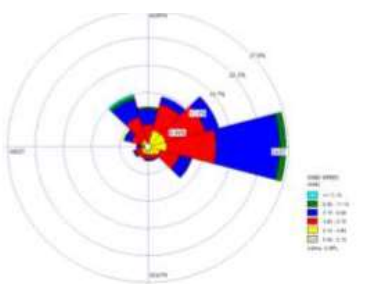
$V_e$	$V_e, \%$
4	66.7
5	47.6
6	29.7
7	15.9
8	7.1

**Tabla 2** Probabilidades de ocurrencia de vientos

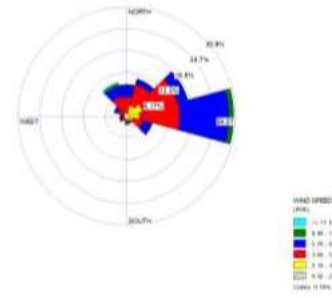
Se obtuvieron las gráficas 11, 12 y 13, con el programa WRPLOT para los años 2012, 2013 y 2014, respectivamente de forma general en las tres gráficas se nota que el viento viene del ESTE



**Gráfico 11** Rosa de frecuencia de vientos anual del 2012  
Fuente (con datos de UNACAR-LENERSE y freewareWRPLOT)



**Gráfico 12** Rosa de frecuencia de vientos anual del 2013  
Fuente (con datos de UNACAR-LENERSE y freewareWRPLOT)



**Gráfico 13** Rosa de frecuencia de vientos anual del 2014  
Fuente (con datos de UNACAR-LENERSE y freewareWRPLOT)

**Simbología**

$c$ , factor de escala de la f.d.p. de Weibull, m/s.

$E_c$ , energía cinética del viento, Joules.

$\frac{E_{D,T}}{A}$ , Energía eólica disponible en el período por unidad de área,  $\frac{Wh}{m^2}$ .

$I_e$ , Intensidad de turbulencia estacionaria.

$I_T$ , Intensidad de turbulencia promedio.

$k$ , factor de forma de la f.d.p. de Weibull.

$N$ , número de intervalos de diez minutos en el período de estudio.

$n$ , número de datos que se tienen en el período de 10 minutos

$P$ , potencia del viento, W

$\frac{P}{A}$ , densidad de potencia eólica,  $W/m^2$

$\frac{\overline{P}}{A}$  =Densidad de potencia promedio en el período,  $W/m^2$

$\rho$ , densidad del aire,  $1.227\text{kg}/\text{m}^3$

$\rho_{sm}$ , densidad del aire en función de la altura y temperatura

$\sigma_e$ , desviación estándar estacionaria, m/s.

$\sigma_T$ , desviación estándar promedio, m/s.

$Tm$ , temperatura ambiente promedio en el sitio durante un período mensual.



$V_i$ , promedio de velocidades medidas en un período de 10min, m/s.

$V_e$ , velocidad estacionaria, m/s.

$V_T$ , velocidad promedio, m/s.

$\overline{V^2}$ , varianza.

$Ve(z)$ , velocidad estacionaria estimada a una altura,  $z$ .

$Ve(Zr)$ , velocidad estacionaria estimada a una altura,  $Zr$ .

$z$ , altura del sitio sobre el nivel medio del mar, m.

$Z_0$ , factor de rugosidad del terreno, mm.

$Z$ , altura a la cual se desea estimar  $Ve, m$

$Zr$ , altura de referencia donde se midió  $Ve(Zr)$ , m.

### Agradecimiento

A la *Universidad Autónoma del Carmen*, y a la Facultad de Ingeniería por permitirnos el uso de la información recopilada por medio de la torre *LENERSE* para el desarrollo de este artículo.

Al Laboratorio de Energías Renovables del Sureste, proyecto *LENERSE* No. 254667

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT, por el apoyo económico para la realización de este proyecto

Al equipo de *Tutiempo Network* por tener disponible en su página web la información meteorológica reportada del aeropuerto de Ciudad del Carmen, Campeche.

Al equipo de Lakes Environmental por tener disponible el uso del freeware *WRPLOT*.

### Conclusiones

La velocidad promedio en ciudad del Carmen de acuerdo a la información registrada en la torre *LENERSE* en Campus III es de 5m/s

En las gráficas de velocidad mensuales se observó una tendencia estacional para los años 2012, 2013 y 2014

Al graficas los datos de velocidad históricos del aeropuerto y los registrados en la torre *LENERSE* se observó un comportamiento muy similar en el caso de los sensores 1 y 3.

No se observó una variación significativa de la densidad del viento en el período de estudio.

La densidad de potencia resulto escasa ya que para el sensor 3 fue menor a  $100 \text{ W/m}^2$  mientras que para el sensor 1 se obtuvo  $109 \text{ W/m}^2$  según la tabla clasificación de densidad de potencias presentada por Manwell, Mcgowan & Roger 2009 en su libro *Wind Energy Explaine*.

Las probabilidades de ocurrencia de tener vientos mayores a 4, 5, 6 y 7m/s, va de 67, 48, 30 y 16%

De las 3 rosas de frecuencia del viento anuales se observó que el viento sopla del este con dirección al oeste.

## Referencias

Borjas-Díaz, M., Medrano-Vaca, M., Huacuz-Villamar, J., & González Galara, R. (1998). *Estado del arte y tendencias de la tecnología eoloeléctrica*. México: UNAM-IIE.

Gasch, R., & Twele, J. (2012). *Wind Power Plants. Fundamentals, Design, Construction and Operation*. Berlin: Springer.

LakesEnvironmental. (17 de Abril de 2018). Obtenido de WRPLOT Freeware: <https://www.weblakes.com/products/wrplot/index.html>

Manwell, Mcgowan, & Rogers. (2009). *Wind Energy Explained, theory design and application*. Massachusetts, USA: Wiley.

Mertens, S. (2006). *Wind Energy in the Built Environment*. United Kingdom: Multi-Science.  
Selzer, H. (1986). *Wind Energy*. Netherlands: Commission of the European Communities.

Spera, D. (1994). *Wind Turbine Technology, fundamental concepts of wind turbine engineering*. New York: ASME PRESS.  
Tutiempo.net. (30 de Junio de 2018). Obtenido de <https://www.tutiempo.net/clima/ws-767493.html>

Wood, D. (2011). *Small Wind Turbines. Analysis, Design and Application*. New York: Springer.