

# AMIDIQ

Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química A.C.

# Avances en Ingeniería Química

Vol 1, No. 3



## XLII Encuentro Nacional

Desafíos actuales en la investigación  
y docencia en ingeniería química



## Memorias del XLII Encuentro Nacional del AMIDIQ

Evento virtual del 08 al 11 de septiembre de 2021

## PROPUESTA METODOLÓGICA PARA INCORPORAR LA DIRECCIÓN DE VIENTO EN LOS TMYS

Ana Sophia Altamirano-Carranza<sup>a\*</sup>, Mario Alejandro Rendón-Ríos<sup>a</sup>, Rodrigo Alonso-Suárez<sup>b</sup>, Rafael Enrique Cabanillas-López<sup>a</sup>,

<sup>a</sup> Departamento de Ingeniería Química, División de Ingeniería, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales SN, Centro, 83000 Hermosillo, Sonora, México.  
a211221342@unison.mx\*

<sup>b</sup> Laboratorio de Energía Solar, Facultad de Ingeniería, UDELAR, J. H. y Reissig 565, C.P. 11300, Montevideo, Uruguay.

### Resumen

Para simular emprendimientos humanos con estrecha vinculación a la meteorología local, como pueden ser las aplicaciones de energías renovables, confort térmico o la difusión de contaminantes, es necesario contar con información meteorológica típica de la región bajo estudio, que incorpore datos de largo plazo [1]. Esto se puede lograr con una herramienta reconocida mundialmente como TMY [2]. Dependiendo la aplicación objetivo del TMY se escoge un valor ponderado para cada variable [3]. Debido a que la dirección de viento es una variable circular no puede ser tratada como las demás variables comúnmente utilizadas en esta metodología. El presente trabajo propone una nueva metodología para determinar el TMY más representativo para la dirección de viento. En el TMYWD (por sus siglas en inglés, Typical Meteorological Year for Wind Direction), demostró que el viento en la región de Hermosillo, Sonora, proviene en su mayoría del Suroeste, con velocidades de 6-8 m/s y 16-18 m/s. Los resultados presentados en este trabajo pueden facilitar las simulaciones y diseño de sistemas de aplicaciones que necesiten como componente principal la dirección de viento.

### Introducción

Debido a las limitaciones de la potencia informática y de almacenamiento de datos, necesarias para el registro y utilización de datos meteorológicos en los años 70's, históricamente se ha utilizado una herramienta llamada Año Meteorológico Típico (TMY, por sus siglas en inglés, Typical Meteorological Year). El uso de esta información se ha extendido en el tiempo, al punto tal que es un insumo frecuente y necesario para varios softwares informáticos actuales de simulación de aplicaciones con estrecha relación a la meteorología local, tanto comerciales como de libre distribución. El TMY es una herramienta que reúne la información necesaria para simular emprendimientos humanos con condiciones típicas de una región, utilizando para su confección estadística de datos a largo plazo para cada variable considerada [3]. El método estadístico utilizado para la confección de estas series típicas es el método de Finkelstein-Schafer (FS), que utiliza las cercanías entre las funciones de distribución acumulada de largo plazo y corto plazo de éstos; utilizando como mínimo diez años. Esta metodología es mundialmente conocida como la metodología de Sandia [4]. La metodología de Sandia tiene un enfoque empírico. Se seleccionan los meses individuales de diferentes años cuya distribución de probabilidad sea más parecida a la de largo plazo, de acuerdo a la métrica de Finkelstein-Schafer. Por ejemplo, partiendo de la mínima cantidad de datos (por ejemplo, 10 años), se examinan diez eneros y se selecciona el enero más "típico" según el criterio anterior, que será la serie de datos real que integrará la serie típica para ese mes. La característica principal de esta metodología es que se utilizan variables que son consideradas las más importantes para aplicaciones de diversas tecnologías o aplicaciones, donde la más comunes suelen ser simulaciones de energía renovable. Dependiendo de la aplicación a la que será destinada el TMY se escoge el valor ponderado que se utilizará en cada variable [5].

A pesar de la cantidad de años que han transcurrido desde la invención del TMY, hoy en día esta metodología sigue siendo utilizada, especialmente para aplicaciones de energía solar [3,6,7]. Los presentes

trabajos no consideran como un factor relevante la dirección de viento, excluyéndolo de la ponderación. Esto es algo llamativo, considerando que la estadística de dirección de viento juega un papel importante para el modelado de las pérdidas por convección en un sistema térmico o el modelado de la dispersión y difusión de contaminantes [1]. Es por esto que el presente trabajo propone la utilización de una nueva estrategia inspirada en la metodología de Sandía para encontrar un nuevo TMY, que se encuentre enfocado únicamente en la dirección de viento y que atienda la particularidad angular de esta variable. A este TMY, se le nombró como TMYWD (Typical Meteorological Year for Wind Direction).

## Datos

Para el presente trabajo se utilizaron dos estaciones climatológicas, a la cual se les dará el nombre de estación 1 y estación 2. El equipo de la estación 1 se encuentra a 18 m de altura y el de la estación 2 se encuentra a 32 m de altura. Ambas estaciones se encuentran separadas a una distancia de 40 metros. Las estaciones se encuentran ubicadas en la Plataforma Solar de Hermosillo (PSH), a 21 km al suroeste de la ciudad de Hermosillo, Sonora. La primera estación empezó su funcionamiento desde el año de origen de la PSH (año 2010), pero la segunda estación empezó a reunir datos a finales del 2018. Ambas estaciones aún continúan operando.

Antes de trabajar con los datos correspondientes, se realizó un análisis minucioso de éstos, para obtener datos de la mejor calidad posible. Para el caso de velocidad de viento se realizó un análisis visual de los datos, se obtuvo el máximo y mínimo para asegurarnos de que no existieran datos inválidos. Una vez hecho esto, también se realizó un histograma de distribución de Weibull, que es el comúnmente utilizado para representar el comportamiento de datos de módulo de viento, y constatar que la distribución de los datos está dentro de lo esperado teóricamente.

En el caso del análisis de datos de dirección de viento se realizó un análisis visual de los datos, además de inspección de la bitácora correspondiente, encontrando datos incorrectos en este equipo, los cuales fueron corregidos o en su defecto eliminados (cuando los datos tenían fallas por más de 3 horas). También se hizo comparaciones entre ambas estaciones para asegurarnos del correcto funcionamiento del equipo, a su vez, poder contar con la mayor cantidad de datos.

- Equipos

Estación 1: Se utilizó un anemómetro (R.M. Young 05103V-90), que consta de dos partes: copela para la medida de la velocidad de viento y de una veleta para indicar la dirección de viento. Ambas partes son móviles. Tanto la hélice como los ejes verticales utilizan rodamiento de bolas de precisión de acero inoxidable. Los datos proporcionados por el instrumento de medición son en m/s. Para la medición de la dirección de viento los datos son obtenidos en grados (deg) de 0° a 359°, con respecto al norte. A este conjunto de datos se les llamo *datos base*, debido a que contienen la mayor cantidad de datos, comparado con la estación 2. De la estación 1 se pudieron recabar 8 años completos.

Estación 2: anemómetro ultrasónico (Windmaster 1590-PK-020/W). Este equipo trabaja con el principio de tiempo de vuelo ultrasónico, esto es, que cada transmisor trasfiere constantemente sonido de alta frecuencia a su receptor respectivo. Los circuitos electrónicos en el interior miden el tiempo que tarda el sonido en viajar desde cada transmisor hasta el receptor correspondiente. Dependiendo de cómo sopla el viento, afectará a algunos de los haces de sonido más que a los demás, ralentizando o acelerando su frecuencia muy ligeramente. Los circuitos miden la diferencia en las velocidades de las vigas y las usan para determinar qué tan rápido sopla el viento.

A diferencia de los instrumentos rotativos, los instrumentos ultrasónicos no tienen partes móviles, por lo que es menos probable que fallen mecánicamente, además de soportar el funcionamiento ante condiciones de mayor temperatura, por lo cual estos equipos de medición tienden a ser mucho más precisos y robustos

en el largo plazo que los equipos rotativos (estación 1). Los datos obtenidos para velocidad y dirección de viento son representados con las mismas unidades y de la misma manera que en la estación anterior. Para esta estación se cuenta con datos en promedio de 2 años, y se denominan *datos complementarios*.

Es necesario utilizar los datos de ambas estaciones para completar la mínima cantidad de años requerida por el manual de TMY (10 años). Otra razón de la incorporación de los datos de la estación 2 fue que el equipo de esta estación proporciona menor incertidumbre para la obtención de datos. Por estas razones, se generó un ajuste de alturas que permita seguir incorporando los datos complementarios en los datos base, para que se continúen generando en el futuro (a partir de mayo del 2020) [3]. Este ajuste se realiza debido a que la medida de viento depende en forma importante de la altura. Para alturas mayores a aproximadamente 20 metros (como en el caso de la estación 2 y cercano al límite en el caso de la estación 1), la relación entre velocidad de viento y altura se puede parametrizar con la siguiente ecuación

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)^\alpha \quad (1)$$

Donde  $\omega_1$  y  $\omega_2$  son los módulos de velocidad de viento a las alturas  $Z_1$  y  $Z_2$  respectivamente. Para estos datos  $Z_1$  es igual a 32 m y  $Z_2$  tiene el valor de 18 m. A esta ecuación también se le conoce como la ecuación perfil vertical de viento con altura. Esta relación permitió transformar la velocidad de viento a una altura dada, como en nuestro caso de 32 m a 18 m. El parámetro  $\alpha$  (también llamado coeficiente de Von kármán) dependerá de la hora del día, la ubicación de la medida y la dirección de viento [8].

## Metodología

Se tomaron los valores de dirección de viento para cada mes-año y se calcularon las frecuencias de estos valores, estableciendo los rangos de direcciones de viento respecto a su punto cardinal. En base a todos los datos correspondientes del mes-año (largo plazo, 10 años, en este caso), se obtienen las frecuencias históricas de éstos. Seguido de esto se obtiene la frecuencia relativa de cada mes-año, nombrada “frecuencia relativa de corto plazo”, como lo muestra la siguiente ecuación:

$$FR_i^{jy} = \frac{f_i^{jy}}{N_i^{jy}}, \quad (2)$$

siendo  $f_i^{jy}$  las frecuencias del conjunto de valores de la variable  $i$  para el mes  $j$  del año  $y$ , y  $N_i^{jy}$  sería cantidad de elementos del conjunto  $f_i^{jy}$ . Después obtenemos las frecuencias relativas, que en este trabajo denominamos de “frecuencias relativas de largo plazo”, es decir, que sería para el total de años observado para el respectivo mes, esto se puede resumir en la siguiente ecuación:

$$FR_i^j = \frac{f_i^j}{N_i^j} \quad (3)$$

Donde  $f_i^j$  corresponde al conjunto de valores de la variable  $i$  para el mes  $j$  y  $N_i^j$  sería la cantidad de elementos del conjunto  $f_i^j$ . Luego se realiza la siguiente operación para cuantificar la diferencia estadística promedio de cada conjunto de frecuencias, es decir, las de corto plazo vs la referencia de largo plazo, obteniendo una métrica de distancia estadística para cada mes-año:

$$DFR^{jy} = \frac{1}{N_i^j} \sum_{i=1}^{N_i^j} |FR_i^j - FR_i^{jy}| \quad (4)$$

Por consiguiente, el mes-año, o valor de  $DFR_i^{jy}$  más bajo será el elegido para formar parte de mes típico de dirección de viento. En comparación con la metodología de Sandia, este proceso no utiliza valores de ponderación, sino que, en este caso, la única variable de interés sería la dirección de viento. Además, en

lugar de utilizar las funciones de distribución acumulada, estamos utilizando histogramas de frecuencias para las direcciones de viento mostradas en la tabla 1. Una vez obtenidos los años correspondientes para formar parte del mes típico de dirección de viento, se utilizarán los mismos años para temperatura, humedad relativa, velocidad de viento y radiación global. De esta forma se construye un TMY donde la variable dirección de viento es la principal, y por tanto es adecuado para el uso en aplicaciones donde esta variable sea determinante en un alto porcentaje, por ejemplo, en la dispersión y difusión de contaminantes atmosféricos, en el diseño bioclimático de viviendas y edificios, entre otros.

Tabla 1. Puntos cardinales y rangos de dirección de viento

Variable	Punto Cardinal	Rango de Dirección de viento (°)
N	Norte	(337.5-360-22.5]
NE	Noroeste	(22.5-67.5]
E	Este	(67.5-112.5]
SE	Sureste	(112.5-157.5]
S	Sur	(157.5-202.5]
SW	Suroeste	(202.5-247.5]
W	Oeste	(247.5-292.5]
NW	Noroeste	(292.5-337.5]

## Resultados

En la tabla 2 se muestran los años obtenidos para cada uno de los meses que conforman el año típico. Estos son los años obtenidos para cada uno de los meses que corresponden a los más representativos utilizando la variable de dirección de viento únicamente.

La información sobre la distribución de las velocidades del viento y la frecuencia de las diferentes direcciones del viento en una forma combinada se puede presentar en las rosas de los vientos. La rosa de los vientos es un gráfico que indica la distribución del viento en diferentes direcciones. En la figura 1 se muestra la rosa de los vientos para el TMYWD.

Este gráfico nos proporciona el porcentaje de tiempo aproximado con el que sopla el viento para una dirección en particular junto con su magnitud, utilizando el año típico encontrado. De este gráfico se obtuvo que alrededor del 24% de los vientos de 6-8 m/s y 16-18 m/s tienen una componente Suroeste. Los otros vientos que predominan son de 2-8 m/s que tienen una componente Este, y son de alrededor de 17-18%. Los vientos de 12-14 m/s son poco probables que sucedan junto con los vientos del norte, ya que, menos del 5% de los datos son provenientes de este módulo.

Tabla 2. Meses meteorológicos típicos del TMYWD

Mes	TMYWD
Enero	2020
Febrero	2011
Marzo	2011
Abril	2019
Mayo	2015
Junio	2012
Julio	2017
Agosto	2016
Septiembre	2014
Octubre	2012
Noviembre	2012
Diciembre	2018

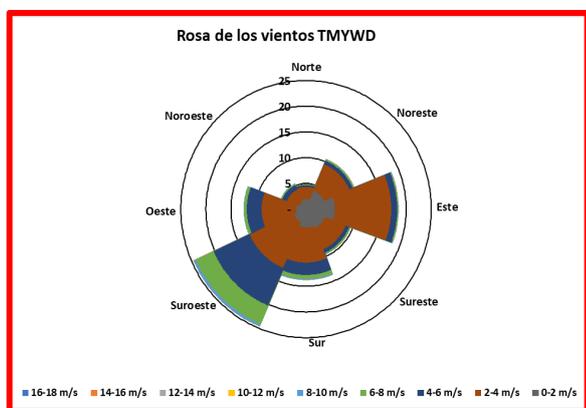


Figura 1. Rosa de los vientos obtenida por TMYWD

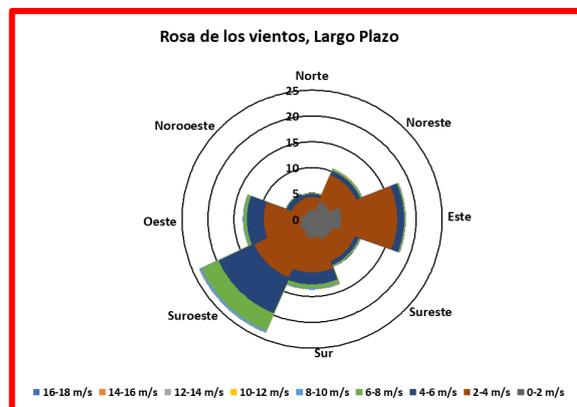


Figura 2. Rosa de los vientos con los datos de L.P.

En la figura 2, se obtuvo la rosa de los vientos con los datos de largo plazo. Esto permite realizar una comparación visual con los datos del TMYWD, ya que, este último debe reflejar la estadística a largo plazo de los datos. Las diferencias en ambas gráficas a nivel visual son casi imperceptibles. Las diferencias más grandes entre ambas gráficas fueron menores del 1%.

## Conclusiones

Se propuso una nueva metodología con el fin de obtener un año típico que sea representativo para dirección de viento, utilizando la metodología de Sandia como base. El procedimiento considera sólo la dirección de viento sin la ponderación para el resto de los parámetros climatológicos, usando análisis con

frecuencias en direcciones específicas, y por tanto es adecuado sólo para aplicaciones donde la dirección de viento sea determinante.

Los resultados obtenidos por la rosa de los vientos demostraron que alrededor del 24% de los vientos de 6-8 m/s y 16-18 m/s tienen una componente Suroeste. Y, los vientos de 12-14 m/s, provenientes del norte, tienen la menor probabilidad, con un 5%.

El TMYWD obtenido con este método refleja exitosamente la estadística a largo plazo del comportamiento del viento, por lo cual, podría utilizarse en un futuro con aplicaciones que necesiten especial enfoque en esta variable.

Este trabajo es un paso inicial para varias líneas de investigación que deben continuar con respecto a este tema, necesarias para diversos proyectos privados y gubernamentales impartidos actualmente en la Universidad de Sonora, por lo cual, se propone que se continúen con investigaciones relacionadas con este tema.

## Referencias

1. van Doorn, Eric, et al. "Statistics of wind direction and its increments." *Physics of Fluids* 12.6 (2000): 1529-1534.
2. Huld, Thomas, et al. "Assembling typical meteorological year data sets for building energy performance using reanalysis and satellite-based data." *Atmosphere* 9.2 (2018): 53.
3. Alonso-Suárez, R., Bidegain, M., Abal, G., & Modernell, "Año meteorológico típico para aplicaciones de energía solar". Ediciones Universitarias, Unidad de Comunicación de la Universidad de la República (UCUR) ISBN: 978-9974-0-1647-7. (2019)
4. Kambezidis, Harry D., et al. "Generation of typical meteorological years for 33 locations in Greece: adaptation to the needs of various applications." *Theoretical and Applied Climatology* 141 (2020): 1313-1330.
5. Sawaqed, Naseem M., Yousef H. Zurigat, and Hilal Al-Hinai. "A step-by-step application of Sandia method in developing typical meteorological years for different locations in Oman." *International Journal of Energy Research* 29.8 (2005): 723-737
6. Libralato, Michele, et al. "Influence of the Meteorological Record Length on the Generation of Representative Weather Files." *Energies* 13.8 (2020): 2103.
7. Galindo, Jose, et al. "Numerical assessment of the dynamic behavior of a solar-driven jet-ejector refrigeration system equipped with an adjustable jet-ejector." *International Journal of Refrigeration* 121 (2021): 168-182.
8. Li, Lixiao, et al. "A comparative study of field measurements of the turbulence characteristics of typhoon and hurricane winds." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 140 (2015): 49-66.