

Simulación de registros de viento usando modelos de densidad espectral

Wind records simulation using spectral density models

Omar Payán-Serrano^{1*}, Eden Bojórquez Mora¹

RESUMEN

Debido a la falta de registros reales de velocidades del viento, los ingenieros civiles y estructuralistas suelen utilizar enfoques simplificados y conservadores para considerar los efectos dinámicos de viento. Diversos estudios sugieren que es posible obtener registros sintéticos que representen el viento turbulento a partir de modelos de densidad espectral, los cuales describen la componente turbulenta como la suma de múltiples ondas sinusoidales de diferente amplitud y frecuencia. El objetivo de este trabajo es analizar algunos de los modelos de densidad espectral más utilizados, con el fin de distinguir el que mejor representa el campo de velocidades del viento para aplicaciones de diseño eólico de estructuras. Los resultados permiten observar que los modelos de von Karman, Solari y von Karman-Harris generan registros sintéticos con características cercanas a las definidas por los parámetros del viento turbulento.

ABSTRACT

Recibido: agosto 2017
Aceptado: octubre 2017
Publicado: marzo 2018

Palabras Clave:

Análisis dinámico, simulación de viento, funciones de densidad espectral.

Due to the lack of real wind records to perform dynamic analysis of structural systems, civil and structural engineers commonly use simplified and conservative approaches to consider the dynamic effects of wind. Several studies suggest that is possible to obtain synthetic wind records from spectral density models, which describe the turbulent component as the sum of multiple sinusoidal waves with different amplitude and frequency. The aim of this paper is to analyze some of the models frequently used in order to distinguish which best represents the wind velocity field for wind design. The results allow us to observe that von Karman, Solari and von Karman-Harris models generate synthetic records with characteristics close to objective values.

Keywords:

dynamic analysis, wind simulation, spectral density functions

1. INTRODUCCIÓN

La tendencia arquitectónica a diseños cada vez más esbeltos ha forzado a la ingeniería civil a considerar análisis del tipo dinámico para evaluar el comportamiento de las estructuras. La falta de registros reales de velocidades del viento con características adecuadas para el análisis dinámico estructural genera la motivación de estudiar diversos modelos de densidad espectral de potencia para producir series de tiempo simuladas que representen de manera aproximada el campo de velocidades del viento.

*Autor para correspondencia.

Dirección de correo electrónico: Omar Payán-Serrano, omarjps@hotmail.com

¹ Universidad Autónoma de Sinaloa, FIC, Culiacán Rosales, Sinaloa, México. C.P. 80040

La Figura 1 describe un edificio afectado por fuerzas dinámicas $p(t)$, las cuales varían en función del tiempo y la altura. Las fuerzas dinámicas son generadas a partir de la variación de la velocidad del viento y el área de obstrucción o choque donde se ejerce la presión eólica. Como se puede observar en la figura, la velocidad del viento puede ser representada por una señal o serie de tiempo, la cual contiene el valor de velocidad para cada instante de tiempo; a este tipo de viento se le conoce como viento turbulento. Debido al cambio de características turbulentas del viento con respecto a la altura, se requiere de registros sintéticos individuales que describan el comportamiento de la velocidad para cada punto en el espacio.

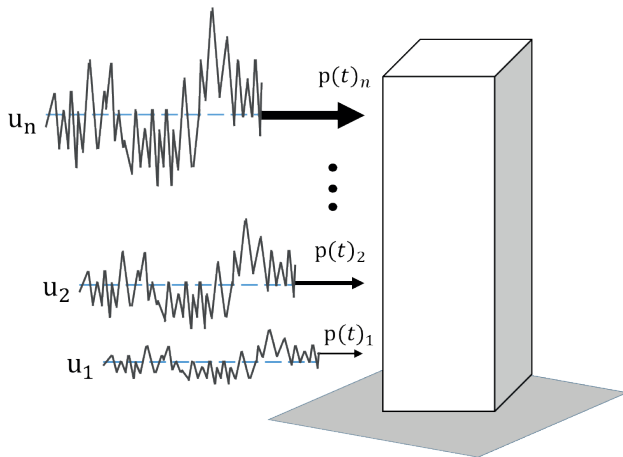


Figura 1. Edificio afectado por viento turbulento

1.1 Viento Turbulento

Las irregularidades de la superficie de la tierra provocan que el viento adquiera un comportamiento turbulento. Esta influencia llega a un nivel de altura nombrado capa límite atmosférica, siendo esta capa el límite de la atmosfera donde, a partir de ella, el viento deja de tener influencia debido a la rugosidad del terreno (Manwell, 2009). A la variación de velocidad del viento con la altura se le conoce como perfil vertical de velocidades del viento. El viento normalmente puede ser descompuesto como una velocidad media \bar{v} con una dirección predominante x y tres componentes turbulentas perpendiculares (longitudinal $u(t)$, lateral $v(t)$ y vertical $w(t)$); con la componente turbulenta longitudinal alineada al eje x , formando un plano horizontal con la componente lateral alineada al eje y y perpendicular al plano la componente vertical alineada al eje z . La Figura 2a muestra la variación típica del viento con la altura y la Figura 2b la descomposi-

ción vectorial de una muestra de velocidad del viento en el punto m .

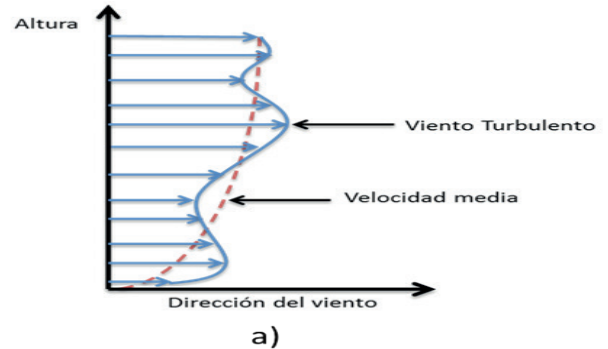


Figura 2. a) Perfil vertical de velocidades

La componente longitudinal es el resultado de sumar la parte turbulenta $u(t)$ con la velocidad media \bar{v} . Esta componente es la de mayor interés en el análisis estructural porque es de principal incidencia en las magnitudes de los parámetros de diseño; generando los valores máximos de deformación, momento de volteo y cortante en la base. Para el cálculo del perfil vertical de velocidades medias, los códigos de diseño consideran factores de rugosidad. Uno de los modelos más utilizados es el conocido como ley de potencia. La velocidad básica o regional es un valor que depende de la ubicación geográfica del sitio de interés y frecuentemente se promedia a 3s y a una altura de referencia de 10 m.

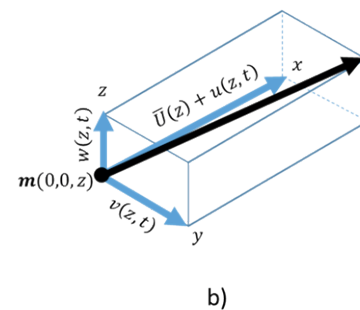


Figura 2. b) Descomposición vectorial de la velocidad del viento en el punto m

1.1.2 Intensidad de turbulencia y longitud de escala

La medida más básica de turbulencia es conocida como intensidad o índice de turbulencia. La intensidad de turbulencia es una medida de dispersión basada en la velocidad media. Este parámetro se define como la relación de la desviación estándar y la velocidad media (Holmes, 2001). En el caso de terrenos homogéneamente horizontales, la intensidad es una función de la altura y la rugosidad del terreno.

La escala de longitud puede ser representada físicamente como la longitud promedio de los vórtices o torbellinos. En su forma matemática se define como el tiempo promedio en el cual existe correlación de las fluctuaciones de velocidad del viento multiplicado por la velocidad media. Este tiempo promedio es conocido como escala de tiempo y puede ser estimado a partir de la integración de la función de auto-correlación desde cero a la primera raíz. Después de estudiar el comportamiento del viento al utilizar distintos registros reales del viento, diversos autores han propuesto expresiones empíricas para el cálculo de la longitud de escala.

1.2 Función de densidad de potencia

La componente longitudinal puede ser considerada como el resultado de una composición de varias ondas superpuestas a una velocidad media. Estas ondas tendrían variación de frecuencia, amplitud y fase. La función de densidad espectral describe la relación entre frecuencia y amplitud correspondiente a la parte turbulenta del viento. Varios autores han presentado modelos matemáticos para representar el contenido de potencia del viento en función de la frecuencia. Los modelos frecuentemente utilizados en ingeniería eólica para la componente longitudinal son von Karman (1948), von Karman-Harris (Harris, 1968), Kaimal et al. (1972), Modified Kaimal (Hiriart, 2001), Solari (1993), Davenport (1961):

von Karman:

$$S_u(z, n) = \frac{4(5.7u^{*2})L_u(z)/U(z)}{1.339 \left[1 + 39.48 \left(\frac{nL_u(z)}{\bar{u}(z)} \right)^2 \right]^{5/6}} \quad (1)$$

von Karman-Harris:

$$S_u(z, n) = \frac{4(\sigma^2)L_u(z)/U(z)}{\left[1 + 70.8 \left(\frac{nL_u(z)}{\bar{U}(z)} \right)^2 \right]^{5/6}} \quad (2)$$

Kaimal:

$$S_u(z, n) = \frac{105u^{*2}z/\bar{U}(z)}{\left[1 + 33 \left(\frac{nz}{\bar{U}(z)} \right) \right]^{5/3}} \quad (3)$$

Modified Kaimal:

$$S_u(z, n) = \frac{100u^{*2}z/\bar{U}(z)}{\left[0.44 + 33 \left(\frac{nz}{\bar{u}(z)} \right) \right]^{5/3}} \quad (4)$$

Solari:

$$S_u(z, n) = \frac{6.868\sigma^2 L_u(z)/\bar{U}(z)}{\left[1 + 10.302 \left(\frac{nL_u(z)}{\bar{U}(z)} \right) \right]^{5/3}} \quad (5)$$

Davenport:

$$S_u(z, n) = \frac{2\sigma^2 L/\bar{U}(z)}{3 \left[1 + \left(\frac{nL}{\bar{U}(z)} \right) \right]^{4/3}} \quad (6)$$

donde:

- $S_u(z, n)$ es la función de densidad de potencia.
- n es la frecuencia en Hz.
- L_u es la escala de longitud.
- u^* es la velocidad de fricción.

De acuerdo con von Karman (1948) la velocidad de fricción está relacionada con la desviación estándar de la siguiente manera:

$$\sigma^2 = 5.7u^{*2} \quad (7)$$

En este trabajo se utilizaron los modelos anteriormente mencionados con el propósito de generar registros sintéticos a partir del método de representación espectral.

2. MARCO TEÓRICO

Los registros sintéticos del viento pueden ser generados a partir del método de simulación por representación espectral propuesta por Shinozuka (1972). Este método está basado en la expresión compacta o reducida de Series de Fourier al sustituirse y adaptar el coeficiente de amplitud por la función de densidad de potencia. Una modificación del método de Shinozuka

permite considerar la influencia cruzada del viento con relación a otros puntos en el espacio. Para el caso de m procesos estocásticos estacionarios $u_j(t), j=1,2,3,\dots,m$; y $t = i\Delta t, i = 0,1,2,\dots, N_s$, la expresión para simular registros sintéticos de la parte turbulenta de la componente longitudinal en varios puntos con separación vertical es la siguiente (Shinozuka y Jan 1972):

$$u_j(t) = \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^{N_f} |H_{jk}(\omega_l)| \sqrt{2\Delta\omega} \cos[\omega_l t + \theta_{kl}] \quad (8)$$

donde:

$u_j(t)$ es una señal con media cero representada por un vector de tamaño $1 \times N_s$.

$H_{jk}(\omega_l)$ es un elemento de la matriz triangular inferior $H(\omega_l)$ de la talla, la cual es definida por el proceso de factorización de Cholesky a partir de la matriz de densidad espectral cruzada.

$\Delta\omega$ es el incremento de frecuencia angular (rad/s), procedimiento definido en Veers (1988).

θ_{kl} es un elemento de la matriz de Angulo de fase Θ con tamaño $m \times N_f$ generado aleatoriamente con distribución uniforme de $[0, 2\pi]$.

N_f es el número de valores o muestras obtenidos a partir de la discretización de la función de densidad espectral.

La matriz de densidad espectral cruzada describe la dependencia de la componente turbulenta en dos puntos a una frecuencia dada. Esta dependencia es debida a la influencia que puede tener la propagación de la turbulencia de un punto a otro.

3. RESULTADOS

Con el objetivo de estudiar el comportamiento de los modelos de densidad espectral en diferentes escenarios eólicos, se definieron 16 combinaciones para cada modelo de densidad espectral en los cuales se consideran tormentas de intensidad baja, media y alta.

La Figura 3 muestra la combinación de los modelos de densidad espectral con los parámetros categoría de terreno C_T y velocidad regional V_R , esto para generar los diferentes casos de estudio. Utilizando el método de representación espectral se generaron registros sintéticos para los niveles de 10, 50, 100, 150 y 200 m de altura, con lo cual se abarca un amplio intervalo de estructuras civiles.

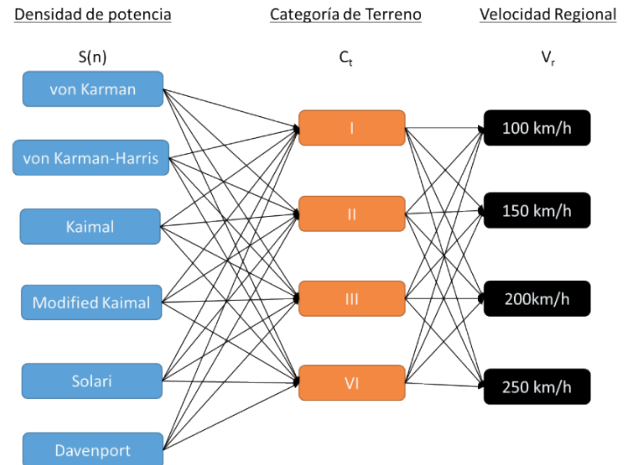


Figura 3. Combinación de posibles escenarios eólicos

La Figura 4 muestra las series de tiempo obtenidas a partir de la simulación con los diferentes modelos de densidad espectral para un escenario $C_T=2, z = 100$ m, $V_R = 200$ m/s. Las señales son del tipo estocásticas estacionarios con media cero; es decir, son señales que a pesar de ser aleatorias, estas mantienen constante los parámetros estadísticos de media y desviación estándar; estas series de tiempo representan la parte turbulenta de la componente longitudinal. La suma de la velocidad media y la parte turbulenta da como resultado el vector de velocidades del viento.

El comportamiento de la intensidad de turbulencia para cada nivel de altura de cada modelo en un escenario de $C_T=2, V_R=150$ m/s es mostrado en la Figura 5. Se observa una tendencia inversamente proporcional a la altura y los modelos de mejor aproximación a la intensidad de turbulencia objetivo son von Karman, von Karman-Harris, Solari y Davenport.

La figura 6 muestra la tendencia de cada modelo al analizar el parámetro de longitud de escala de las respectivas series de tiempo. Se observa que el comportamiento es directamente proporcional a la altura; los modelos von Karman, von Karman-Harris y Solari muestran una tendencia de cercana con la curva objetivo.

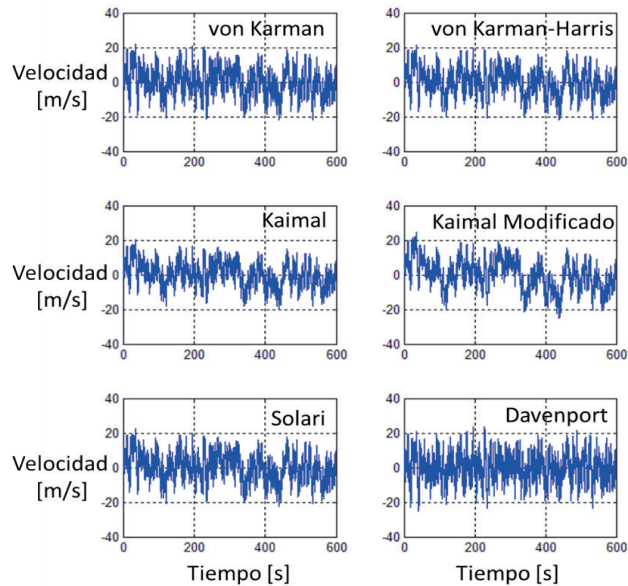


Figura 4. Series de tiempo obtenidas con los modelos von Karman, von Karman-Harris, Kaimal, Kaimal Modificado, Solari and Davenport; para $C_T=2$, $z = 100$ m, $V_R = 200$ m/s

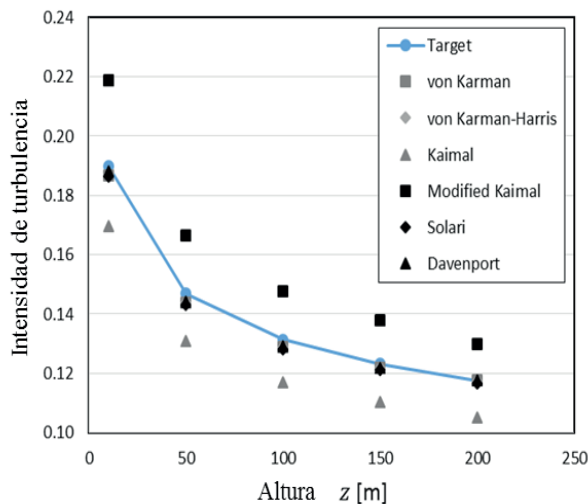


Figura 5. Valores medios de Intensidad de Turbulencia; considerando $C_T = 2$, $V_R = 150$ m/s

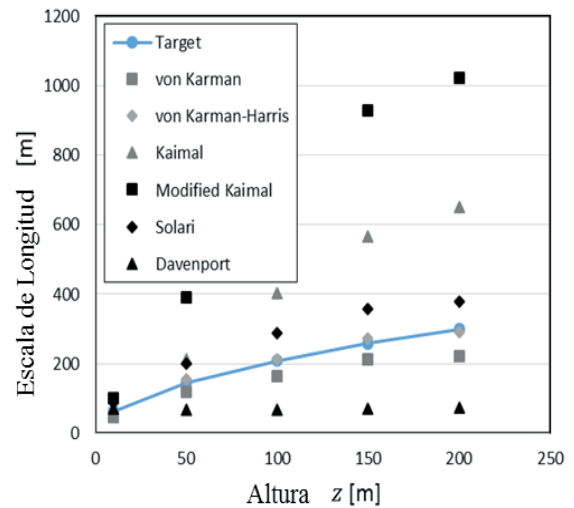


Figura 6. Valores medios de Longitud de Escala; considerando $z_0=0.05$ m and $\bar{U}_R = 150$ m/s

La Tabla 1 expone de manera cuantitativa el error promedio producido por los modelos de densidad espectral evaluados en cada categoría de terreno con el parámetro de intensidad de turbulencia. Los modelos Kaimal y Kaimal modificado generan series de tiempo con errores promedio mayores al doble que los producidos por los modelos como von Karman, von Karman-Harris, Solari o Davenport.

Tabla 1. Error total de intensidad de turbulencia por categoría de terreno

Modelo	Categoría de terreno				Suma [Error Total]
	I	II	III	IV	
von Karman	0.36	0.28	0.36	0.31	1.30
von Karman-Harris	0.37	0.27	0.38	0.32	1.34
Kaimal	2.30	2.15	2.35	2.28	9.08
Kaimal Modificado	2.29	2.52	2.09	2.11	9.01
Solari	0.51	0.38	0.53	0.44	1.86
Davenport	0.28	0.26	0.30	0.32	1.16

4. CONCLUSIONES

Se generaron registros sintéticos para alturas de 10, 50, 100, 150 y 200 m, utilizando los modelos de densidad espectral de von Karman, Von Karman-Harris, Kaimal, Kaimal Modificado, Solari y Davenport, considerando además cuatro categorías de terrenos con velocidades de viento regionales de 100, 150, 200 y 250 km/h. Las características turbulentas de 9600 registros sintéticos fueron analizadas con la finalidad de evaluar el desempeño de cada modelo en la aplicación de diseño eólico estructural. La comparación de los resultados con los valores objetivo obtenidos a partir de ecuaciones empíricas utilizadas en la mayoría de los manuales de diseño por viento, nos permite concluir que los modelos von Karman, von Karman-Harris y Solari representan de manera aproximada el campo de velocidades del viento turbulento; el modelo propuesto por Davenport permite generar registros sintéticos con el menor error en intensidad de turbulencia; sin embargo, las características de longitud de escala no eran cercanas a la curva de valores objetivo. Finalmente, las series de tiempo con mayor error promedio fueron las generadas con los modelos Kaimal y Kaimal Modificado.

REFERENCIAS

[1] Manwell, J. F. (2009). *Wind energy explained: Theory, design and application*, USA, New York: Wyle.

[2] Holmes, J.D. (2001). *Wind loading of structures*, Spon Press, London.

[3] Karman, T.v. (1948). Progress in the statistical theory of turbulence. *National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 34, No. 11, pp. 530–539.

[4] Harris, R.I. (1968). On the spectrum and auto-correlation function of gustiness, *Electrical Research Association, United Kingdom*.

[5] Kaimal, J.C., Wyngaard, J.C., Izumi, Y., and Coté, O. R. (1972). Spectral characteristics of surface-layer turbulence. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 98, No. 417, pp. 563–589. DOI: 10.1002/qj.49709841707.

[6] Hiriart, D., Ochoa, J.L., and García, B. (2001). Wind power spectrum measured at the San Pedro Mártir Sierra. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, Vol. 37, No. 2, pp. 213-220, México. DOI: 2001RMX-AA..37..213H.

[7] Solari, G. (1993). Gust buffeting, I: Peak wind velocity and equivalent pressure. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 119, No. 2, pp. 365–382. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:2(365).

[8] Davenport, A.G. (1961). The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 87, No. 372, pp. 194–211. DOI: 10.1002/qj.49708737208.

[9] Shinozuka, M., and Jan C.-M. (1972), Digital simulation of random processes and its applications. *Journal of Sound and Vibrations*, Vol. 25, No 1, pp. 111-128. DOI: 10.1016/0022-460X(72)90600-1.

Semblanzas

Omar Payán-Serrano



En Junio del 2014 adquirió el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería por la Facultad de Ingeniería Culiacán de la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS) con mención honorífica, y es egresado de la carrera de licenciado en Ingeniería Mecánica del Instituto Tecnológico de Culiacán en el 2008. Ha contribuido en la elaboración de 4 artículos científicos para revistas indizadas y congresos. Realizó una estancia de investigación en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo con el Doctor Jorge Ruiz García. Actualmente es estudiante del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería en la Facultad de Ingeniería Culiacán de la UAS desde agosto del 2014, bajo la dirección del Doctor Edén Bojórquez Mora se desarrolla la línea de investigación sobre temas de ingeniería eólica estructural. Entre sus aportaciones científicas, destaca la elaboración de herramientas de predicción para el cálculo de máximos desplazamientos de edificio bajo cargas de viento utilizando redes neuronales artificiales.

Edén Bojórquez Mora

Profesor Investigador de Tiempo Completo Titular C de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Sinaloa. Grado de Licenciatura en Ingeniería Civil por la FIC de la UAS con mención honorífica. Estudios de Maestría y Doctorado en Ingeniería en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, grado con mención honorífica. **PREMIO** a la mejor tesis Doctoral en el sexto Concurso Nacional de Tesis de Doctorado (2009) otorgado por la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica. **PREMIO** por el artículo más sobresaliente de la Revista de Ingeniería Sísmica durante el periodo 2009-2010 como autor único, otorgado por la SMIS. **PREMIO** por dirigir la mejor tesis de Posgrado a nivel Estado otorgado por INAPI 2013-2014 y las mejores tesis de Licenciatura a nivel nacional relacionadas a la Ingeniería Estructural por la SMIE 2016. Estancia Posdoctoral en el Departamento de Ingeniería Estructural de la Universidad de Nápoles Federico II, Italia. Profesor-Investigador Repatriado por CONACYT a la Facultad de Ingeniería, UAS (2008-2009). **Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores**, y miembro honorífico del Sistema Sinaloense de Científicos y Tecnólogos, así como del **Cuerpo Académico Consolidado de Estructuras y Mecánica Básica**. Autor de casi 200 artículos en Revistas Científicas y Congresos Nacionales e Internacionales. Director de casi 50 tesis de Licenciatura, Maestría y Doctorado, actualmente dirige varias tesis de Maestría y de Doctorado incluyendo de estudiantes de la UNAM, y ha supervisado a más de 20 estudiantes durante veranos de la investigación científica. Es revisor de las revistas indizadas y congresos sobre estructuras y sísmica de mayor prestigio en el mundo. Ha impartido conferencias magistrales en países como Emiratos Árabes Unidos (Dubai). **Actualmente, Coordinador de la Maestría y Doctorado en Ciencias de la Ingeniería en la unidad Culiacán y es miembro del Comité Académico y Núcleo Académico Básico de dichos Programas**. Es **Editor de la Revista de Ingeniería Sísmica** de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica la más prestigiosa en el mundo en su área escrita en español. En 2016 fue Galardonado con el Premio **Ingeniero Civil del Año** otorgado por el Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de Sinaloa 2016-2017, y fue **VICEPRESIDENTE** de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica 2016-2017. Entre sus aportaciones científicas destaca la *creación de una nueva medida de intensidad sísmica (Intensidad IB) representativa del potencial destructivo de un terremoto*, la cual está siendo reconocida por investigadores de las instituciones más prestigiadas a nivel mundial tales como las Universidades de Stanford en Estados Unidos, Imperial College de Londres, Bolonia, Pavía y Nápoles en Italia, Grenoble Francia, entre otras. Actualmente, el Dr. Bojórquez está trabajando en la generación de registros sísmicos, de viento, mapas de peligros naturales, fragilidad de estructuras, edificios con disipadores de energía, diseño sismo-resistente sustentable y otros temas encaminados al futuro desarrollo de un Reglamento de Construcción específico para los Municipios del Estado de Sinaloa.

