

# Estudio comparativo del coeficiente de potencia y de torque presentados en diversas turbinas eólicas

***Viviana Reyes Andrade***

Instituto Politécnico Nacional, Sección de estudios de posgrado e investigación, ESIME,

México D.F.

*vreyes1300@alumno.ipn.mx*

***Oscar Carranza Castillo***

Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Computo,

México D.F.

*ocarranzac@ipn.mx*

***Jaime José Rodríguez Rivas***

Instituto Politécnico Nacional, Sección de estudios de posgrado e investigación, ESIME,

México D.F.

*jjrodriguez@ipn.mx*

## Resumen

Este artículo presenta un estudio comparativo del coeficiente de potencia y de torque presentado en diversas turbinas eólicas; que se emplean para realizar el análisis de una turbina eólica, estableciendo los conceptos que permiten encontrar la relación de la energía cinética del viento entre la energía mecánica. En este estudio se presentan tres modelos generales que expresan el coeficiente de potencia y de torque, los cuales se agrupan en exponencial, sinusoidal y polinomial. Cabe destacar que los modelos exponenciales y sinusoidales incluyen variaciones en relación a la velocidad específica y del ángulo de ataque; y los modelos polinomiales solo dependen de la velocidad específica. Los modelos son obtenidos considerando características reales de las turbinas eólicas. El propósito de este estudio es analizar el comportamiento de coeficiente de potencia y de torque para establecer todas las consideraciones a tomar en cuenta para el desarrollo e implementación de un emulador de turbinas eólicas.

**Palabra(s) Clave(s):** Coeficiente de Potencia, Coeficiente de Torque, Turbina Eólica.

## 1. Introducción

La tendencia en la diversificación del mercado hacia las energías renovables, ha llevado a la energía eólica a convertirse en una alternativa energética muy prometedora. El viento es un recurso limpio e inagotable, disponible en la mayor parte del mundo, sin embargo, existen zonas específicas en las cuales este recurso natural es cuantioso [1]. Diferentes métodos estadísticos se han desarrollado para calcular la velocidad media del viento, la densidad de energía eólica y su factor de carga de un área geográfica específica [2]; esto permite determinar zonas idóneas para instalar parque eólicos de varios MWs y sistemas de baja potencia del orden de kW. La energía eólica puede ser utilizada como una fuente primaria de energía limpia, que se puede combinar con fuentes de energía convencionales, actuando como sistemas de respaldo, o como una fuente secundaria de energía que sólo se activa durante los picos de demanda de energía [2].

## 2. Potencia Eólica

Para determinar la potencia eólica ( $P_v$ ) que se obtiene de una turbina eólica [3], se tiene:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v_\omega^3 \quad (1)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del aire,  $r$  es el radio de la pala y  $v_\omega$  es la velocidad del viento.

La energía cinética del aire no puede ser convertida en energía mecánica con un 100% de eficiencia, esto es, porque se debe de cumplir la ecuación de continuidad del flujo de aire cuando pasa a través de la turbina [4], por lo tanto, no se puede extraer toda la potencia eólica disponible del viento. El viento al pasar por la turbina se frena, saliendo a una velocidad menor, pero siempre distinta de cero. En una turbina eólica ideal, la velocidad del viento se reduce según la ley de Betz. Esta ley indica que solo se puede convertir el 59.25% de la energía cinética del viento en energía mecánica. A este valor se le conoce como Límite de Betz.

La potencia en la turbina ( $P_a$ ) es la potencia eólica extraída del viento. Debido a que no toda la potencia del viento se puede transferir a la turbina, existe una relación entre la potencia de la turbina eólica y la potencia del viento, esta relación se conoce como coeficiente de potencia ( $C_p$ ), obteniendo:

$$P_a = \frac{1}{2} C_p \rho \pi r^2 v_\omega^3 \quad (2)$$

El  $C_p$  depende del tipo de turbina eólica que se esté utilizando, del diseño mecánico y aerodinámico de la turbina, además de la velocidad de giro de ésta y la velocidad del viento. Dentro de un solo tipo de turbina, el  $C_p$  depende fundamentalmente de dos factores:

- De la velocidad específica (Tip speed ratio,  $\lambda$ ).
- Del ángulo de ataque de las aspas de la turbina ( $\beta$ ).

Por consiguiente, el coeficiente de potencia está dado en función de dos variables  $C_p(\lambda, \beta)$ .

La velocidad específica se define como la relación entre la velocidad lineal o tangencial del extremo de la pala de la turbina y la velocidad del viento, expresada por:

$$\lambda = \frac{r\omega_m}{v_\omega} \quad (3)$$

Donde  $\omega_m$  es la velocidad rotacional de la turbina.

El torque en el eje de la turbina eólica ( $T_m$ ) se calcula mediante:

$$P_m = T_m\omega_m \quad (4)$$

$$T_m = \frac{C_p\rho\pi r^2 v_\omega^3}{2\omega_m} \quad (5)$$

Considerando (3) y sustituyendo en (5) se tiene:

$$T_m = \frac{1}{2} \frac{C_p}{\lambda} \rho\pi r^3 v_\omega^2 \quad (6)$$

De donde se establece que:

$$C_t = \frac{C_p}{\lambda} \quad (7)$$

Donde  $C_t$  es el Coeficiente de torque, con lo que (6) se expresa como:

$$T_m = \frac{1}{2} C_t \rho\pi r^3 v_\omega^2 \quad (8)$$

### 3. Coeficiente de potencia y coeficiente de torque

Diversas expresiones matemáticas se han desarrollado para modelar  $C_p$  y  $C_t$ ; los cuales se agrupan en:

- Modelos en función Polinomial
- Modelos en función Sinusoidal
- Modelos en función Exponencial

Los modelos en base a funciones exponenciales y funciones sinusoidales dependen de  $\lambda$  y  $\beta$ , con lo que controla la potencia deseada por la acción del torque y de la velocidad de la turbina, con el ajuste de la orientación de las palas de la turbina a pesar de las variaciones de la dirección y velocidad del viento [5]. Para los modelos en base a funciones polinomiales, se considera el ángulo de ataque de las aspas de la turbina eólica es constante, por lo que, el coeficiente de potencia y de torque solo están en función de la velocidad específica  $C_p(\lambda)$  [2].

#### 3.1. Modelos en función polinomial

Los modelos en función polinomial se basan en la expresión matemática general planteada por Weiwei LI, Dianguo XU, Wei ZHANG y Hongfei MA en [8]; dicha expresión solo considera variaciones en función de  $\lambda$ , se considera que el ángulo de ataque es constante, la cual es expresada por:

$$C_p(\lambda) = \sum_{i=0}^{i=n} a_i \lambda^i \quad (9)$$

Si se desarrolla la ecuación general con  $n = 7$ , para el máximo orden, se tiene:

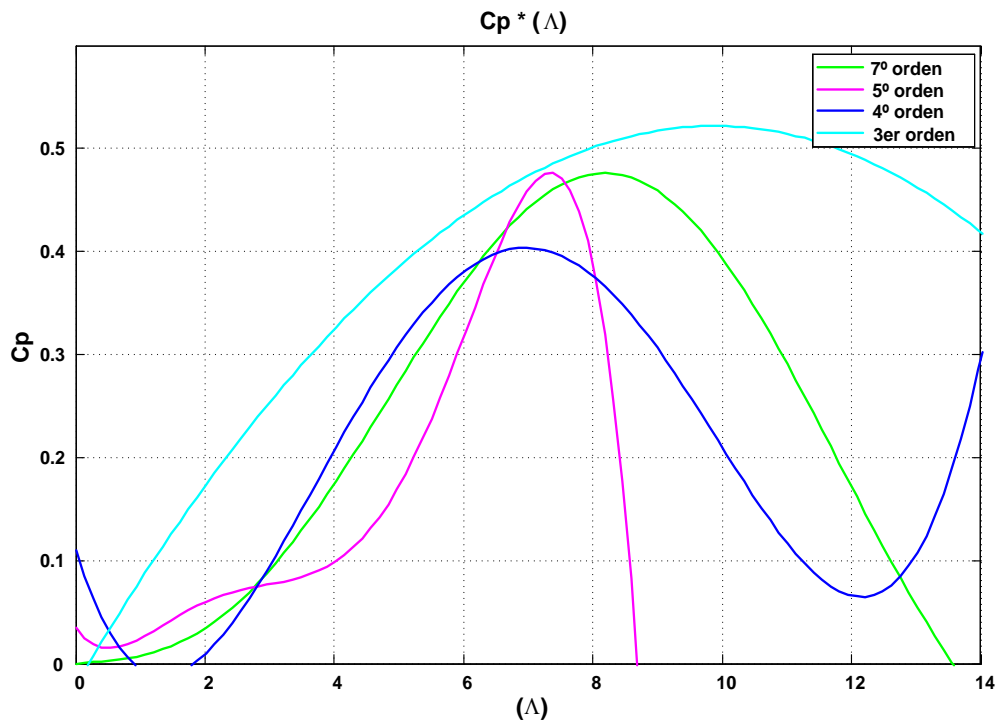
$$C_p(\lambda) = a_0 \lambda^0 + a_1 \lambda^1 + a_2 \lambda^2 + a_3 \lambda^3 + a_4 \lambda^4 + a_5 \lambda^5 + a_6 \lambda^6 + a_7 \lambda^7 \quad (10)$$

Según la literatura se encontraron cuatro modelos, que se organizan en polinomios de distintos orden, principalmente de tercer orden [5], cuarto orden [6], quinto orden [7] y séptimo orden [8]. Donde se varían los coeficientes del polinomio dependiendo del modelo (ver Tabla 1).

Coeficiente	Tercero [5]	Cuarto[6]	Quinto [7]	Séptimo [8]
$a_0$	-0.02086	0.11	0.0344	0
$a_1$	0.1063	-0.2	-0.0864	0.00510
$a_2$	-0.004834	0.097	0.1168	-0.0022
$a_3$	-0.000037	-0.012	-0.0484	0.0052
$a_4$	0	0.00044	0.00832	$-5.1425 \times 10^{-4}$
$a_5$	0	0	-0.00048	$-2.7950 \times 10^{-5}$
$a_6$	0	0	0	$4.6313 \times 10^{-6}$
$a_7$	0	0	0	$-1.3310 \times 10^{-7}$

**Tabla 1. Coeficientes de los diferentes modelos de  $C_p$  en función polinomios.**

Se obtuvieron los Coeficientes de potencia mediante los cuatro modelos en función polinomial encontrados (ver Fig. 1). En lo referente al Coeficiente de Torque  $C_t(\lambda)$ , se auxilia de (7). Se observó el comportamiento del Coeficiente de torque  $C_t$  de los cuatro modelos en base a una función polinomial en relación a la velocidad específica (ver Fig. 2).



**Fig. 1. Coeficiente de potencia en función polinomial.**

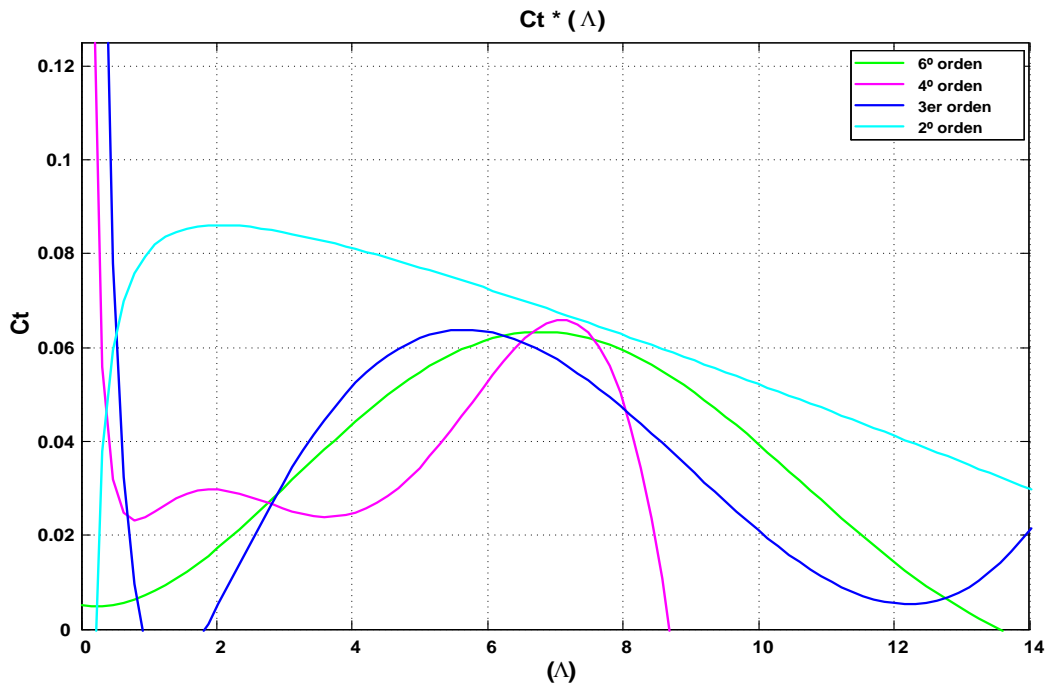


Fig. 2. Coeficiente de torque en función polinomial.

### 3.2. Modelos en función Sinusoidal

En relación a los modelos del coeficiente de potencia que se basan en una función sinusoidal [5], [9]-[12], a partir de estos modelos se obtiene una función genérica.

$$C_p(\lambda, \beta) = [a_0 + a_1(b_0\beta + a_2)] \sin \left[ \frac{\pi(\lambda + a_3)}{a_4 + a_5(b_1\beta + a_6)} \right] + a_7(\lambda + a_8)(b_2\beta + a_9) \quad (11)$$

La **Tabla 2** muestra los coeficientes de cada uno de los modelos encontrados, los cuales se aplican en (11) para satisfacer su comportamiento en función de una sinusoidal.

En la **Fig. 3** y **Fig. 4** se observa el comportamiento de  $C_p$  y  $C_t$ , respectivamente, de los cinco modelos que tienen un comportamiento sinusoidal.

### 3.3. Modelos en función exponencial.

A partir de la revisión documental de los modelos del coeficiente de potencia, se encuentra otra de las funciones matemáticas empleadas, la cual es basada en una función exponencial [13] - [35], se encuentran ocho modelos diferentes de  $C_p(\lambda, \beta)$ , de donde se encuentra una función genérica que es muestra por:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_0 \left( c_1 \frac{1}{\lambda_i} + c_2 \beta + c_3 \beta^{c_4} + c_5 \right) e^{c_6 \frac{1}{\lambda_i}} + c_7 \lambda \tag{12}$$

	Modelo propuesto por				
	[5]	[9]	[10]	[11]	[12]
$a_0$	0.5	0.44	0.44	0.5	0.5
$a_1$	-0.00167	0	-0.0167	-0.0167	0.0167
$a_2$	-2	0	0	-2	-2
$a_3$	0.1	-1.6	-3	0.1	0.1
$a_4$	18.5	15.0	15.0	10	18.5
$a_5$	-0.3	0	-0.3	-0.3	-0.3
$a_6$	-2.0	0	0	0	-2.0
$a_7$	-0.00184	0	-0.00184	-0.00184	-0.00184
$a_8$	-3.0	0	-3.0	-3.0	-3.0
$a_9$	-2.0	0	0	-2.0	-2.0
$b_0$	1	0	1	1	1
$b_1$	1	0	1	1	1
$b_2$	1	0	1	1	1

Tabla 2. Coeficientes de los diferentes modelos de  $C_p$  en función sinusoidal.

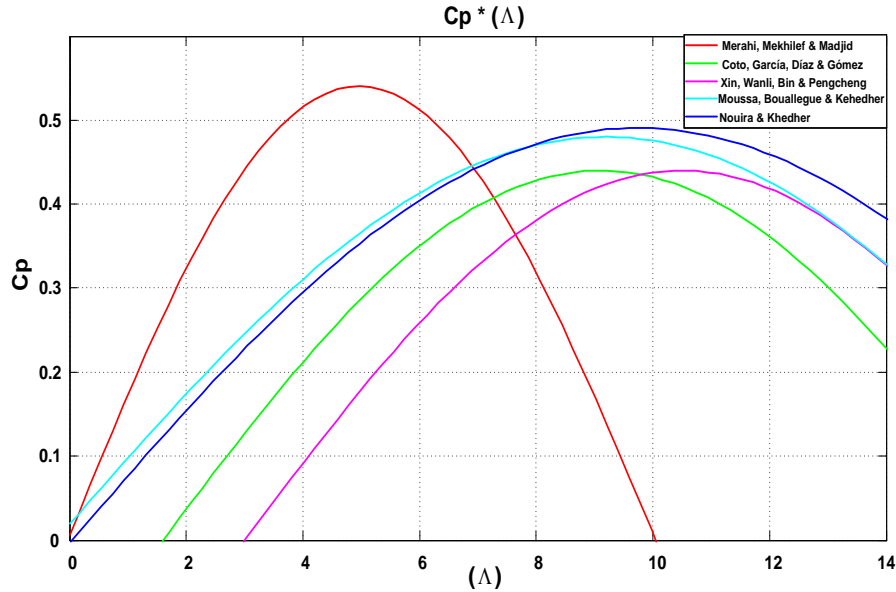


Fig. 1. Coeficiente de potencia en función sinusoidal.

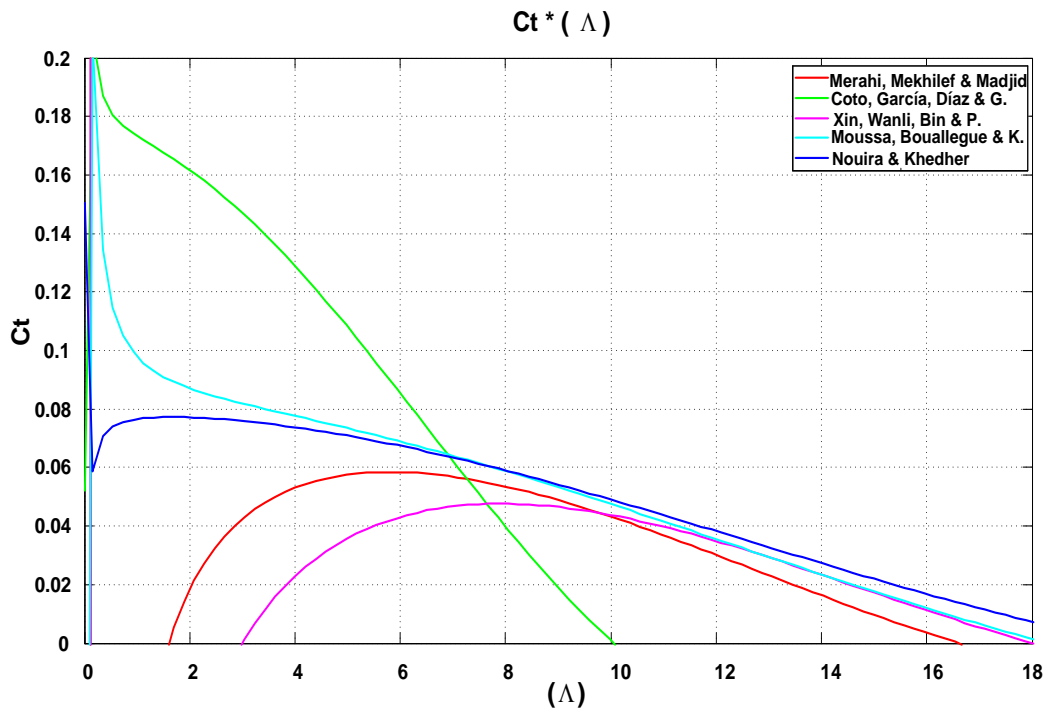


Fig. 2. Coeficiente de torque en función sinusoidal.

Donde  $\lambda_i$  es expresada por:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + d_0\beta + d_1} - \frac{d_2}{1 + \beta^3} \quad (13)$$



La **Tabla 3** muestra los coeficientes para (12) y la **Tabla 4** muestra los coeficientes para (13) según el artículo de donde se obtienen dichos parámetros.

	[13]	[14]	[15]-[23]	[24]-[29]	[30]	[31]-[32]	[33]-[34]	[35]
$c_0$	0.5	0.5	0.5176	0.22	0.5	0.73	0.44	1
$c_1$	116	116	116	116	72.5	151	124.99	110
$c_2$	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.58	-0.4	-0.4
$c_3$	0	0	0	0	0	-0.002	0	-0.002
$c_4$	-	0	0	0	0	2.14	-	2.2
$c_5$	-5	-5	-5	-5	-5	-13.2	-6.94	-9.6
$c_6$	-21	-21	-21	-12.5	-13.125	-18.4	-17.05	-18.4
$c_7$	0	0	0.0068	0	0	0	0	0

**Tabla 3. Coeficientes de los diferentes modelos de  $C_p$  en función para (12).**

	[13]	[14]	[15]-[23]	[24]-[29]	[30]	[31]-[32]	[33]-[34]	[35]
$d_0$	0.08	0	0.08	0.08	0.08	0.02	0.08	0.02
$d_1$	0	0.088	0	0	0	0	0	0
$d_2$	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.003	0.001	0.03

**Tabla 4. Coeficientes de los diferentes modelos de  $C_p$  en función exponencial para (13).**

Se obtuvieron los Coeficientes de potencia  $C_p$  mediante los cinco modelos en función exponencial considerando el ángulo de ataque constante (ver Fig. 5). Se observó el comportamiento del Coeficiente de torque  $C_t$  obtenida mediante (7) (ver Fig. 6).

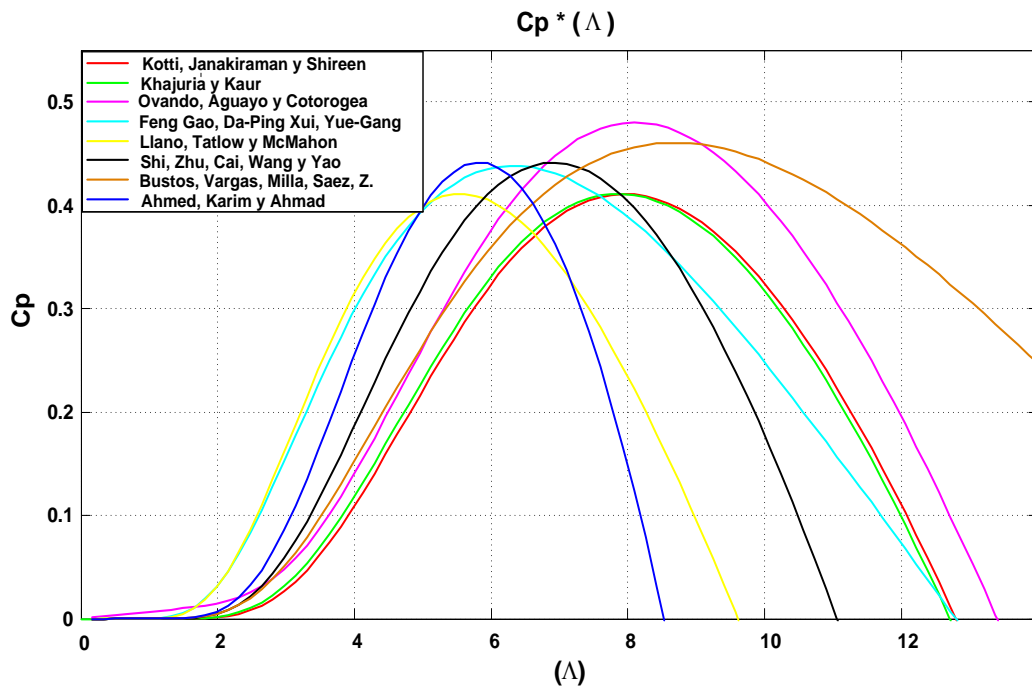


Fig. 3. Coeficiente de potencia en función exponencial.

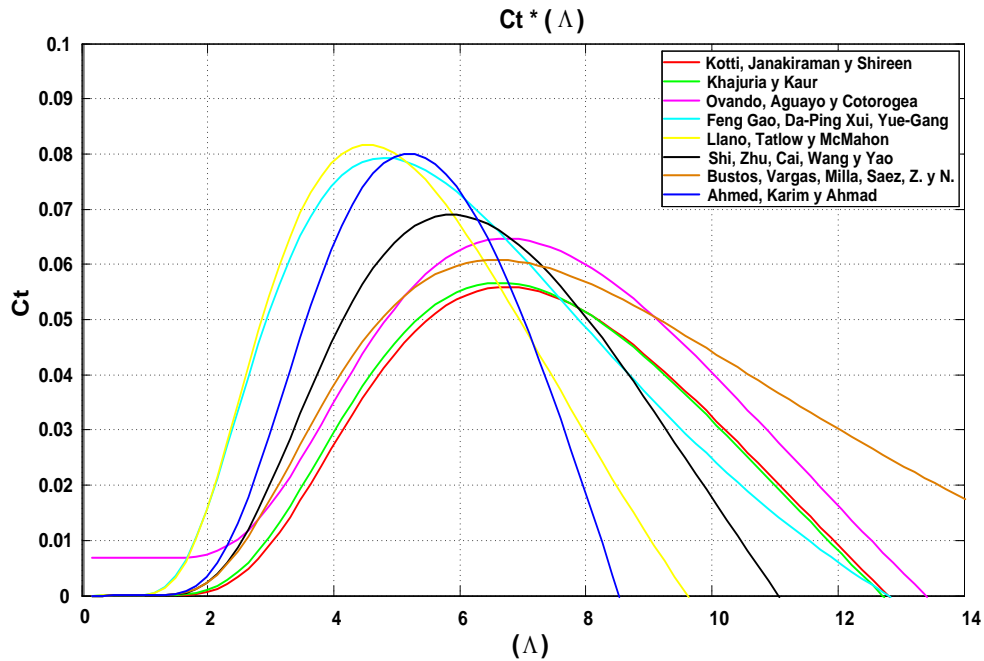


Fig. 4. Coeficiente de torque en función exponencial.

## 4. Resultados

Después del análisis de los coeficientes de potencia de los diversos modelos matemáticos de la turbina eólica se procedió a realizar estudios de los diferentes modelos, por medio de PSIM (ver Fig. 7).

Referente a los modelos en función polinomial, se obtuvieron las curvas características del Coeficiente de Potencia y del Torque en el eje de la turbina del modelo Polinomial de 3er orden, 4to orden, 5to orden 7mo orden a una velocidad del viento de 10m/s (ver Fig. 8).

De acuerdo a los modelos en función sinusoidal, se adquirieron las curvas características del Coeficiente de Potencia y del Torque en el eje de la turbina del modelo sinusoidal propuesto por Coto et al., Moussa et al. y Noura et al. (ver Fig. 9); y de las curvas características del modelo sinusoidal propuesto por Xin et al. y Merahi et al.; con una velocidad del viento de 10m/s (ver Fig. 10).

Con respecto a los modelos en función exponencial, se obtuvieron las curvas características del Coeficiente de Potencia y del Torque en el eje de la turbina del modelo exponencial propuesto por Aguayo et al. y Bustos et al. (ver Fig. 11), y de las curvas características del modelo exponencial propuesto por Kotti et al., Kaur & Khahuria, Feng Gao et al., Llano et al., Cai et al., y Ahmad et al.; a 10m/s de velocidad del viento (ver Fig. 12).

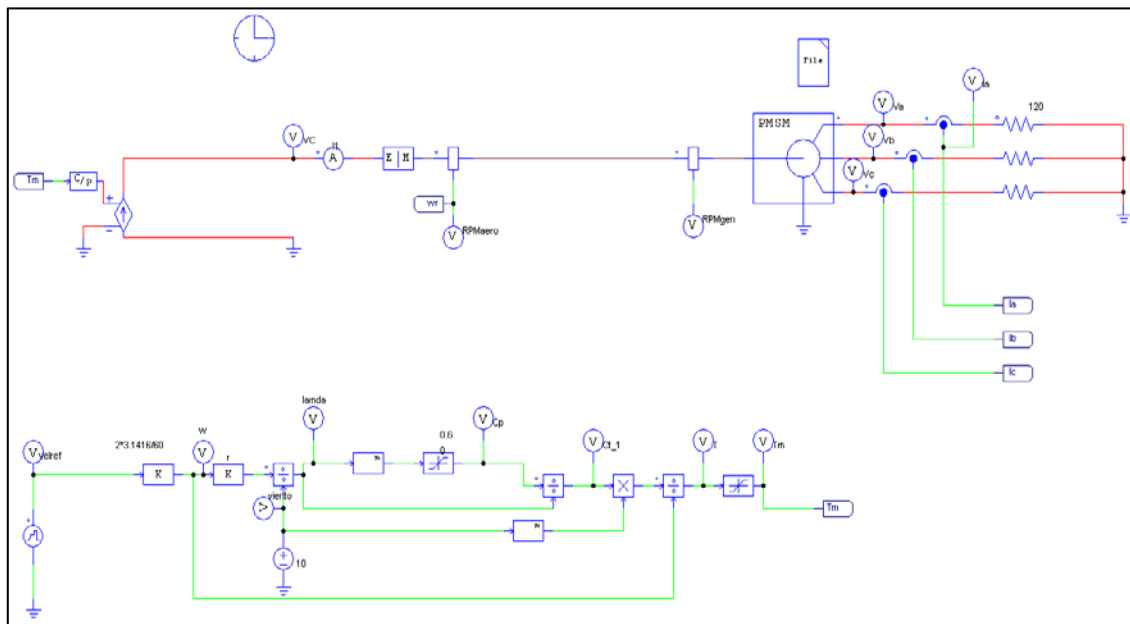


Fig. 5. Circuito eléctrico en PSIM, para realizar el estudio de los diversos modelos.

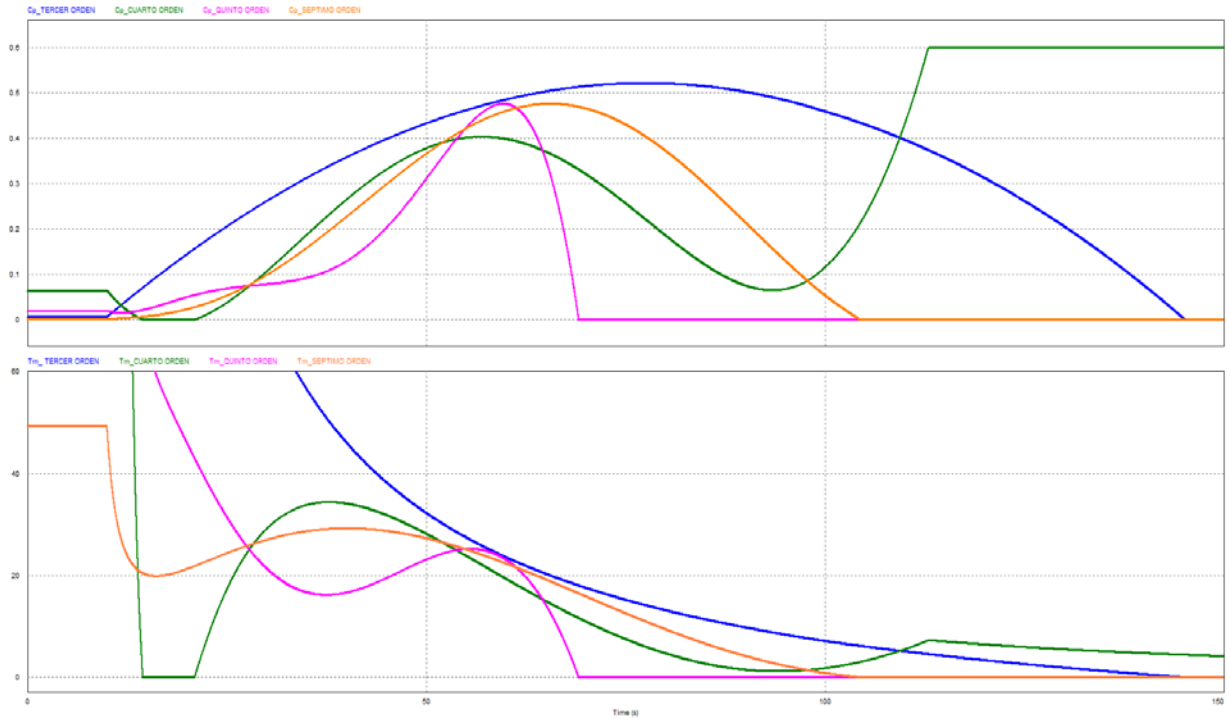


Fig. 6.  $C_p$  y  $T_m$  del modelo Polinomial de 3er orden, 4to, 5to y 7mo orden.

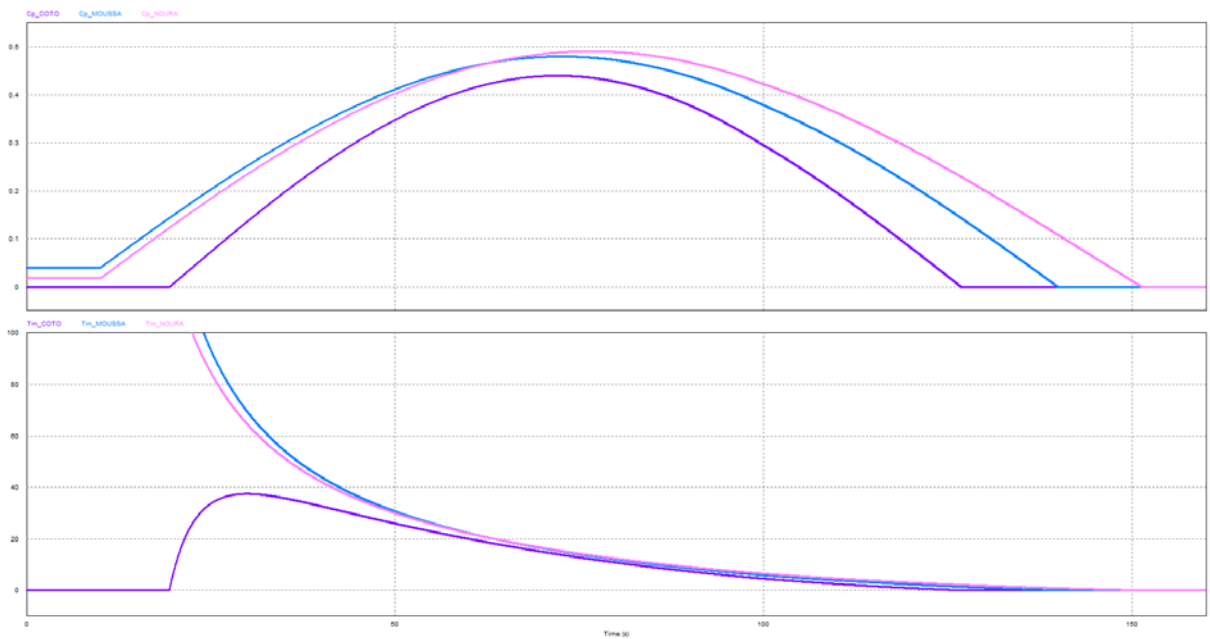


Fig. 7.-  $C_p$  y  $T_m$  del modelo sinusoidal propuesto por Coto et al., Moussa et al. y Noura et al.

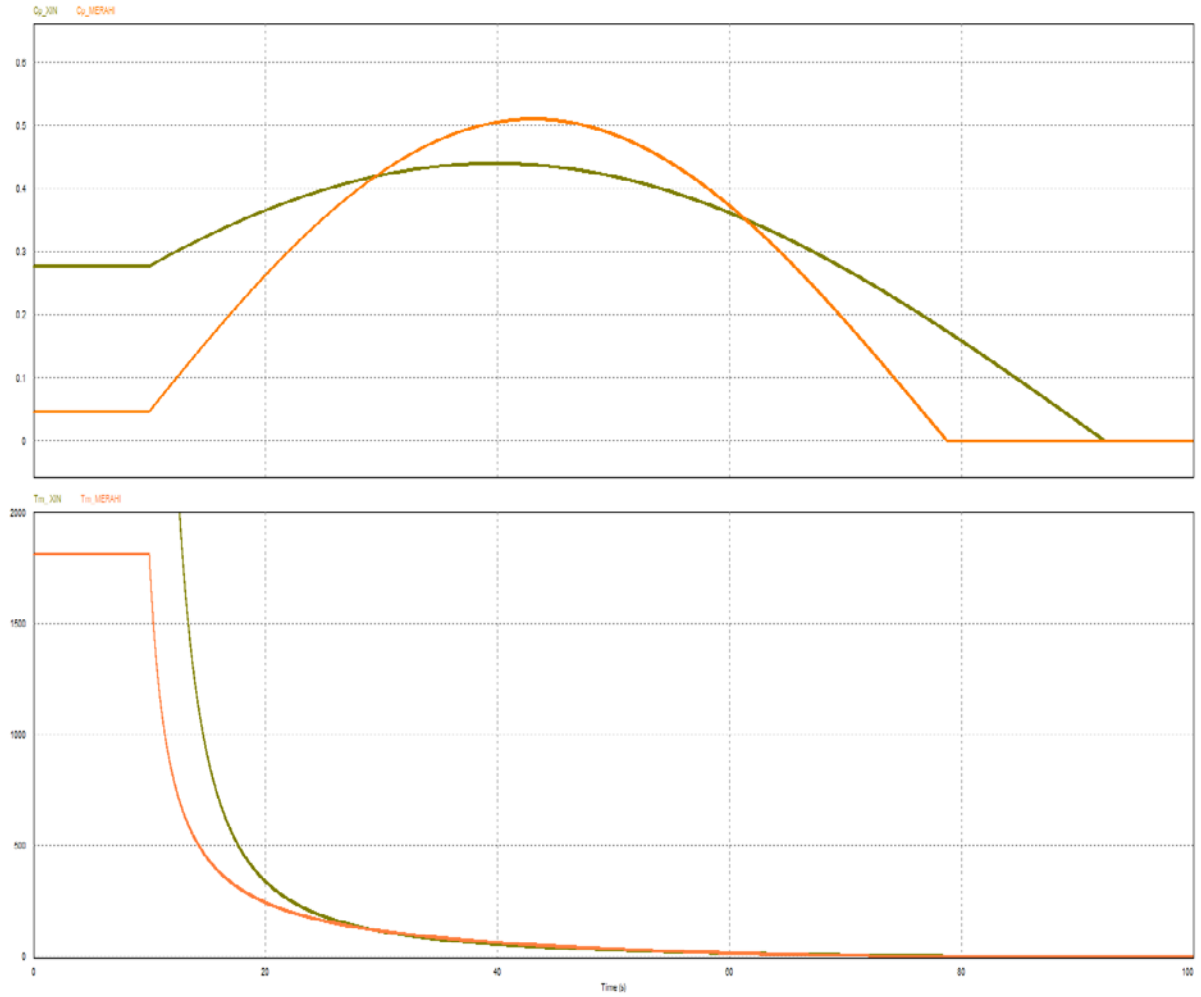


Fig. 8.  $C_p$  y  $T_m$  del modelo sinusoidal propuesto por Xin et al. y Merahi et al.

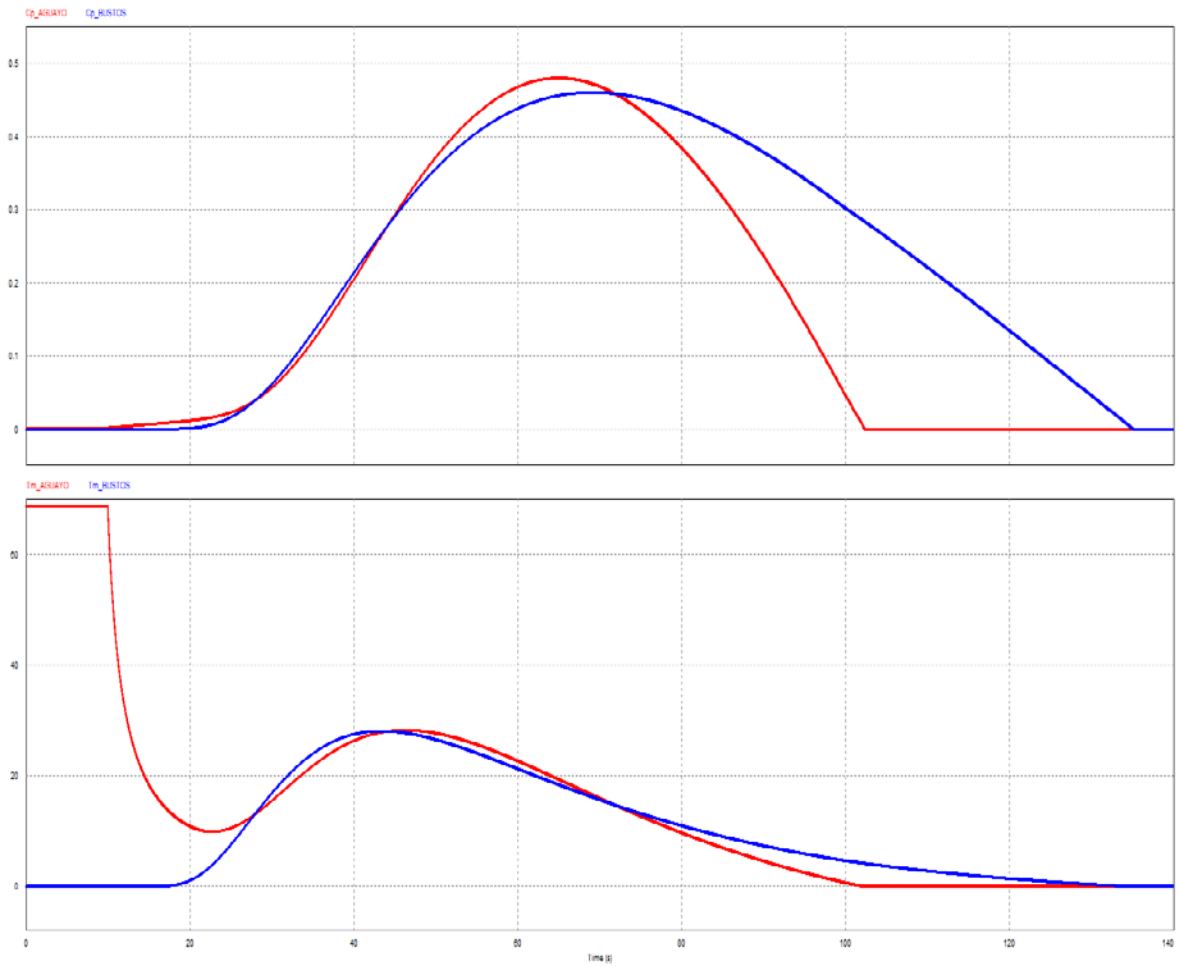


Fig. 9.  $C_p$  y  $T_m$  del modelo exponencial propuesto por Aguayo et al. y Bustos et al.

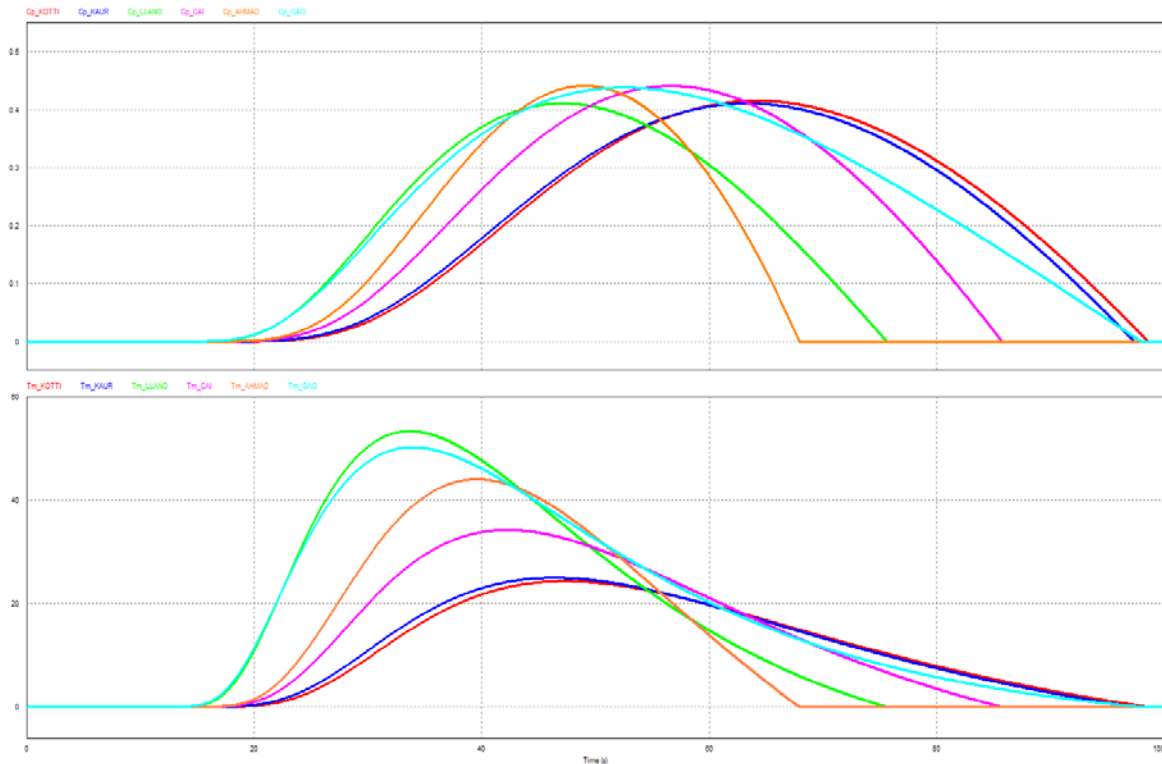


Fig. 10.  $C_p$  y  $T_m$  del modelo exponencial propuesto por Kotti et al., Kaur & Khahuria, Feng Gao et al., Llano et al., Cai et al., y Ahmad et al.

## 5. Discusión

Los modelos basados en una función polinomial dependen únicamente de  $\lambda$ , ya que consideran un ángulo de ataque constante, debido a que estos modelos son empleados principalmente en sistemas de generación eólica de baja potencia, ya que controlar el ángulo de ataque es muy costoso en relación a la energía que se obtiene. Los modelos exponenciales y sinusoidales dependen tanto del ángulo de ataque de la pala ( $\beta$ ) como de la velocidad específica ( $\lambda$ ) y se emplean en sistema de generación eólica de mediana y alta potencia.

En los modelos basados en una función sinusoidal, se observa que el coeficiente de potencia solo varía su amplitud y en el periodo, esto es, desde que velocidad específica empiezan hasta que velocidad específica terminan, por otro lado, como están basado en una función sinusoidal, si se aumenta la velocidad específica considerablemente se genera otra cresta con la misma forma que la inicial, por lo que el sistema debe estar limitado a un intervalo de velocidades específicas.

En cuanto a los modelos basados en una función exponencial se observa una buena respuesta debido a que su comportamiento es muy real y se limita automáticamente, por lo que no hay que agregar limitadores el intervalo en el que trabaje en función a la velocidad específica.

Realizando un análisis en lo particular de cada uno de los tres modelos generales, se tiene que de los cuatro modelos encontrados que obedecen a una función polinomial, el que presenta el máximo valor del coeficiente de potencia ( $C_{p_{max}}$ ) es el modelo de tercer orden, con un valor de 0.52 a una velocidad específica de 9.799 y tiene una respuesta que representa un comportamiento real. El modelo de séptimo orden también muestra un comportamiento real. Esta consideración se establece debido a que ambos no vuelven a crecer después de una determinada velocidad específica como si lo hace el modelo de cuarto orden.

Ahora considerando los cinco modelos que obedecen a una función basada en una sinusoidal, el que presenta el máximo valor del coeficiente de potencia ( $C_{p_{max}}$ ) es el modelo de Bouallegue et al., ya que su valor máximo es de 0.5405 a una velocidad específica de 4.972. Cabe destacar que todos los modelos siguen el mismo comportamiento, de manera que el coeficiente de potencia se difiere de uno en otro, solo en la amplitud y el periodo y no en la forma de  $C_p$  como si lo hacen los modelos basados en funciones polinomiales y exponenciales.

Finalmente de analizando los ocho modelos que siguen un comportamiento exponencial, el que presenta el máximo valor del coeficiente de potencia ( $C_{p_{max}}$ ) es el modelo de Aguayo et al., ya que su valor máximo es de 0.48 a una velocidad específica de 8.092. A diferencia de los modelos en función polinomial y función sinusoidal, todos los modelos que obedecen a una función exponencial tienen un adecuado comportamiento en el coeficiente de potencia.

Por otro lado, de acuerdo a  $\beta$ , de manera general se puede agregar que:

- Generalmente para  $\beta \approx 0$ , el coeficiente de potencia es el máximo para cualquier velocidad específica.
- Para una  $\beta$  constante, el  $C_{p_{max}}$  es único.
- Para una  $\beta$  magnánima,  $C_p$  es muy pequeña.

Al concluir las simulaciones del sistema de potencia completo, implementando los 3 modelos (polinomiales, sinusoidales y exponenciales); se dedujo que:

- De los modelos polinomiales el modelo de 4to orden presenta mayor desventaja, ya que la curva característica del Coeficiente de Potencia (ver **Fig. 1** y **Fig. 8**),



después de llegar al punto de máxima potencia se describe un comportamiento anormal pues al llegar a cero, nuevamente se eleva.

- Para analizar el comportamiento del Torque en el eje de la turbina en los sistemas de potencia, se colocaron limitadores, por diversas razones. Por ejemplo que no todos los modelos presentan un coeficiente con variable de exponente 1, como lo es el modelo polinomial de quinto orden. Por lo tanto se obtuvieron resultados con limitadores y sin limitadores; Sin embargo para el presente artículo solo se incluyeron gráficas del Torque en el eje de la turbina sin los limitadores. Además de la razón de que en los modelos sinusoidales, la ecuación matemática no describe el comportamiento del modelo, sino que se debe de acotar la velocidad específica; como se había mencionado anteriormente.
- Los modelos basados en una función exponencial son los que mejor describen el comportamiento del Coeficiente de Potencia y el Torque en el eje de la Turbina eólica (ver **Fig. 5**, **Fig. 11** y **Fig. 12**).

## **6. Conclusiones**

En base a la revisión documental realizada para hacer el estudio comparativo del coeficiente de potencia y del coeficiente del torque, se encontró que todos los modelos se basan en tres funciones matemáticas que son sinusoidal, exponencial y polinomial, obteniendo tres funciones matemáticas generales que satisfacen todos los modelos encontrados, mostrando en tablas los parámetros que corresponden a cada uno de los modelos, de acuerdo a su función matemática correspondiente.

Para hacer el estudio comparativo, se analizan las gráficas de los modelos agrupados en base a su función matemática, para establecer, cuál es el que tiene un mejor comportamiento y después entre las funciones. Los estudios se realizan considerando un ángulo de ataque de las palas constante.

Una vez analizados matemáticamente se realizan simulaciones para obtener el comportamiento del coeficiente de potencia y del torque que se tiene en cada uno de los modelos, corroborando los datos simulados y obtenidos en la respuesta matemática.

De esta manera, se comprueban los resultados obtenidos, además de que las simulaciones son con parámetros reales del sistema. De esta forma, se puede pronosticar el comportamiento real antes de llevar a cabo la implementación física.

En la literatura, frecuentemente se encuentran los modelos matemáticos solo de forma particular, lo que conlleva a tiempo en demasía para realizar la compilación. Ante dicha problemática se obtuvieron tres modelos generales: exponencial, sinusoidal y polinomial; que expresan el coeficiente de potencia y de torque. De esta manera se reduce el tiempo de búsqueda de los modelos, ya que se encuentran englobados en tres grupos de manera general.

Esta revisión nos servirá como base para la construcción de un emulador de una turbina eólica, que por medio de un programa se podrá evaluar el comportamiento de diversas turbinas eólicas. Generalmente se encuentran emuladores pero de un solo tipo de modelo y a un tipo particular de parámetros. El emulador a desarrollar será capaz de responder a todos los modelos ya existentes y modelos nuevos o personalizados. Además, el programa responderá a la variación de parámetros de dichas turbinas eólicas.

## **7. Referencias**

- [1] L. G. González Morales, "Mejora de la eficiencia y de las prestaciones dinámicas en procesadores electrónicos de potencia para pequeños aerogeneradores sincrónicos operando en régimen de velocidad". Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Valencia. 2011.
- [2] O. Carranza Castillo, "Estudio de técnicas de control de rectificadores Boost Trifásicos con filtro LCL para reducción de la distorsión armónica en corriente, aplicadas al procesado eficiente de energía en aerogeneradores síncronos de imanes permanentes operando a velocidad variable". Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Valencia. 2012.
- [3] Review of mathematical models of both the power coefficient and the torque coefficient in wind turbines. 24th IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE. Brasil. 2015.
- [4] Miguel Villarrubia López, Ingeniería de la Energía Eólica. 2013. Alfaomega. Barcelona España.
- [5] Design and Implementation of constant wind speed turbine emulator using Matlab/simulink and FPGA. Ninth International Conference Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER). 2014.

- [6] Maximum power extraction from a small wind turbine emulator using a DC-DC converter controlled by a microcontroller. 4th International Conference on Electrical and Computer Engineering ICECE 2006. Dhaka, Bangladesh. 2006.
- [7] Emulador de un aerogenerador de baja potencia utilizando un Generador Síncrono de Imán Permanente. Reunión de Verano de Potencia y aplicaciones industriales. Acapulco México. 2014.
- [8] Research on Wind Turbine Emulation based on DC Motor. Second IEEE conference on industrial electronics and applications. 2007.
- [9] Wind speed model design and dynamic simulation of a wind farm embedded on distribution networks. Depto. de ingeniería eléctrica, electrónica, computadores y de sistemas. Escuela Politécnica Superior de ingenieros, Universidad de Oviedo.
- [10] Sliding mode control of pitch angle for direct driven PM wind turbine. 26th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). China. 2014.
- [11] DC-Voltage regulation of a five levels neutral point clamped cascaded for wind energy conversion system. The 2014 International Power Electronics Conference. 2014.
- [12] Nouira, A. Khedher, "A contribution to the design and the installation of an universal platform of a wind emulator using a DC motor". International Journal of renewable energy research. Vol. 2. No. 4. 2012.
- [13] Adaptive sensorless maximum power point tracking control for PMSG wind energy conversion systems". Workshop on Control and modeling for Power Electronics (COMPEL). 2014.
- [14] J. Kaur, S. Khajuria, "Implementation of pitch control of wind turbine using Simulink (Matlab)". International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology. Vol. 1. 2012.
- [15] Emulation of a low power wind turbine with a DC motor in Matlab/Simulink. Power Electronics Specialists Conference. 2007.

- [16] A dynamic wind turbine simulator of the wind turbine generator system. International Conference on Intelligent System design and engineering application. 2012.
- [17] Z. Jin, Ma. Xiao, "Semi-definite programming for power output control in a wind energy conversion system". IEEE Transactions on sustainable energy. Vol. 5. No. 2. 2014.
- [18] Dynamic simulation of self-excited Induction Generator feeding motor load using matlab/Simulink. IEEE 11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics. Computer. Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). 2014.
- [19] A novel FACTS based on modulated power filter compensator for wind-grid energy systems. IEEE 5th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). 2014.
- [20] Modeling and simulation of a wind turbine-generator system. IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA. 2011.
- [21] Voltage/Pitch control for maximization and regulation of active/reactive powers in wind turbines with uncertainties. IEEE 49th Conference on Decision and Control (CDC). Atlanta, GA. 2010.
- [22] Control of wind turbine based on DFIG using Fuzzy-PI and sliding mode controllers. IEEE Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER). Monte-Carlo. 2014.
- [23] An approximate model of wind turbine control systems for wind farm power control. IEEE Power and Energy Society. San Diego, CA. 2011.
- [24] Hybrid automaton modeling and global control of wind turbine generator. Proceedings of Seventh International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Kunming. 2008.
- [25] Emulation of static and dynamic characteristics of a wind turbine using Matlab/Simulink. Power, 2nd International Conference on Control and Embedded Systems (ICPCES). Allahabad. 2012.

- [26] Modeling of the wind turbine with a permanent magnet synchronous generator for integration. IEEE Power Engineering Society General Meeting. Tampa, FL. 2007.
- [27] State-space averaging model of wind turbine with PMSG and its virtual inertia control. IECON 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Vienna. 2013.
- [28] Modeling and simulation of directly driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator. IEEE Innovative Smart Grid Technologies. Asia, Tianjin. 2012.
- [29] Study on modeling and simulation of non-grid-connected wind turbine. WNWEC World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference. Nanjing. 2009.
- [30] Control algorithms for permanent magnet generators evaluated on a wind turbine emulator test-ring. 7th IET International Conference on Power Electronics. Manchester. 2014.
- [31] Generalized average model of DC wind turbine with consideration of electromechanical transients. IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE. Vienna. 2013.
- [32] A vector control of a cascaded doubly fed induction generator for a wind energy conversion system. 11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD). Barcelona. 2014.
- [33] Comparison of fixed speed wind turbines models: a case study. IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE. Montreal, QC. 2012.
- [34] Design and modeling of low-speed axial flux permanent magnet generator for wind based micro-generation systems. International Conference on Robotics and Emerging Allied Technologies in Engineering (iCREATE). Pakistan. 2014.

## **8. Autores**

Ing. Viviana Reyes Andrade es ingeniera Eléctrica egresada del Instituto Tecnológico de Puebla en 2010. Actualmente está inscrita en cuarto semestre de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en la sección de posgrado de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica SEPI-ESIME-IPN, Unidad Zacatenco, México.

Dr. Oscar Carranza Castillo es Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica, con especialidad en Electrónica en la ESIME del IPN, es Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica con especialidad en Instrumentación en la ESIME del IPN y obtuvo su doctorado en ingeniería electrónica en enero del 2012 en la Universidad Politécnica de Valencia. Desde 1999 es Profesor Investigador en la Escuela Superior de Cómputo de tiempo completo. Su área de especialidad es electrónica de potencia aplicada energías renovables.

Dr. Jaime José Rodríguez Rivas recibió el grado B.S. por la Universidad Central de Las Villas (UCLV), Santa Clara, Cuba, en 1980, y el M.S. y el Ph.D. en Ingeniería Eléctrica en 1987 y 1991, respectivamente en el Instituto de Ingeniería de Potencia de Moscú en Rusia. De 1980 a 1994 fue Profesor Asociado en la Universidad Central de Las Villas, UCLV, Cuba. Desde 1996 es profesor en el IPN, donde actualmente es Profesor Titular e Investigador en las áreas de Electrónica de Potencia y Control de Motores de CA.