Reporte de Investigación
2007-04

Modelación del Rotor de Turbinas de Viento en Simulación de Sistemas de Potencia: Parte III

Responsables: Francisco M. González-Longatt
Supervisor: Francisco M. González-Longatt

Línea de Investigación:
Fuentes Alternas de Energía
y
Generación Distribuida

07-Ene-2006

Descripción de Modelo de Bloque Básico de Turbinas de Viento

Las modernas turbinas de viento son complejas y técnicamente avanzadas en construcción. Los modelos de turbinas de viento en varios programas de simulación reflejan esta complejidad. Además, los modelos de las turbinas de viento en varios programas de simulación –también los modelos de todos los componentes- son normalmente diseñados para cumplir con un propósito específico para el cual el programa de simulación es diseñado. De tal modo, los modelos de simulación en diferentes programas de simulación pueden diferir substancialmente y pueden requerir muy diferentes tipos de datos, frecuentemente con niveles de detalles muy variables en varias partes de la construcción.

Sin embargo, considerando la modelación, en la mayoría de los casos pueden ser representados por un modelo genérico con seis bloques de modelos elementales y sus interconexiones (ver la Figura 1) o por lago similar, dependiendo de la turbina de viento especifica en cuestión. Los seis elementos de modelo, serás descritos en las próximas sub-secciones, son la representación de:

- Sistema aerodinámico.
- Sistema mecánico (rotor de la turbina, ejes, caja convertidota, y el rotor del generador.
- Cadena del generador (generador y convertidores electrónicos de potencia).
- Sistema de control de paso.
- Sistema de control de la turbina de viento.
- Sistema de protección de la turbina de viento.

Para cualquier modelo de turbina de viento especifico en cualquier programa de simulación, debe ser posible identificar todas las partes del modelo con algo en el modelo genérico. De tal modo, debe ser también posible asociar todos los datos en el modelo con un significado físico en este modelo genérico.

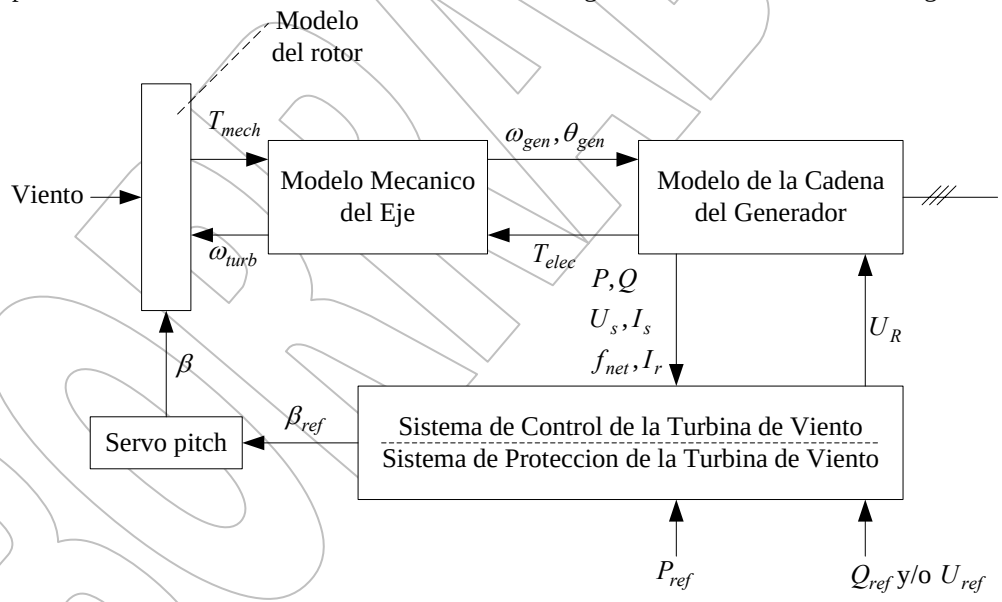


Figura 1. Diagrama de Bloque de un modelo genérico de turbina de viento. *Nota:* f_{net} = frecuencia electrica de la red, I_s = corriente del estator, I_r = corriente del rotor, P = potencia activa, Pref = potencia activa de referencia, Q = potencia reactiva, Q_{ref} = potencia reactiva de referencia, U_s = voltaje del estator, Ur = voltaje del rotor, ω_{turb} = velocidad rotacional de la turbina, T_{elec} = torque eléctrico, T_{mech} = torque mecánico, ω_{gen} = velocidad de giro del rotor del generador, θ_{gen} = ángulo del rotor del generador.

Sistema Aerodinámico

Los sistemas aerodinámicos de la turbina de viento es el rotor de la turbina (es decir, las palas de la turbina de viento). El rotor de la turbina reduce la velocidad del aire y al mimo tiempo transforma la energía cinética absorbía del aire en la potencia mecánica, P_{mech}. Una turbina de viento específica es representada por datos que describen el diseño de construcción de la turbina de viento. Además de los datos

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores.

de diseño constructivo, la potencia mecánica de salida de la turbina de viento, depende de la velocidad del viento v_{wind}, el ángulo de paso, β, de las palas de la turbina y la velocidad rotacional ω_{turb}, del rotor de la turbina.

Descripción Básica del Rotor de la Turbina

Desde el punto de vista físico, las características estáticas del rotor de una turbina de viento, puede ser descrito por la relación entre la potencia en el viento y la potencia mecánica de la turbina de viento. La relación es fácilmente descrita, comenzando con el viento que entra en el área cubierta por el rotor. Se puede demostrar que la energía cinética de un cilindro de radio R viajando con la velocidad del viento v_{wind}, corresponde a una potencia total P_{wind}, dentro del área cubierta por el rotor de una turbina de viento. Esta potencia, P_{wind}, puede ser expresada por:

$$P_{wind} = \frac{1}{2}\rho_{air}\pi R^2 v_{wind}^2 \tag{1}$$

Donde ρ_{air} es a densidad del aire (= 1.225 kg/m^3), R es el radio del rotor y v_{wind} es la velocidad del viento.

No es posible extraer toda la energía cinética del viento, debido a que esto significaría que el aire no se movería directamente detrás de la turbina. Esto no permitiría que el aire fluya mas allá de la turbina de viento, y claramente esto no podría representar una condición físisca de régimen estacionario. La velocidad del viento es solamente reducida por la turbina de viento, la cual entonces extrae solo una fracción de la potencia en el viento. Esta fracción es denominada el coeficiente de potencia, C_p de la turbina de viento. La potencia mecánica, P_{mech}, de la turbina de viento s entonces –por definición de C_p- dada por la potencia en el viento P_{wind} usando la siguiente ecuación.

$$P_{wind} = C_p P_{wind} \tag{2}$$

Se puede demostrar que el limite teórico del limite superior de C_p es 16/27 (aproximadamente 0.593), que es, que teóricamente solo es posible extraer aproximadamente el 59% de la energía cinética del viento. Esto es conocido como el límite de Betz. Para una comparación, las modernas turbinas de viento con tres palas, posee un óptimo valor de C_p en el rango de 0.52-0.55, cuando es medido a la altura del eje.

En algunos casos, C_p, es especificado con respecto a la potencia eléctrica en y terminales del generador mas que la potencia mecánica en el eje de la turbina, que es, las perdidas en la caja convertidora y el generador que son deducidas desde el valor de C_p. Cuando esta especificado de esta manera, las moderas turbinas de viento de tres palas poseen un optimo valor en el rango de 0.46 a 0.48. De la manera, es necesario entender que cuando los valores de C_p están especificados como un coeficiente de potencia eléctrica o mecánica.

Si el torque T_{mech} es aplicado en vez de potencia P_{mech}, es conveniente calcularla desde la potencia P_{mech}, Por el uso de la velocidad rotacional de la turbina, ω_{turb}:

$$T_{mech} = \frac{P_{mech}}{\omega_{turb}} \tag{3}$$

El torque total aerodinámico (T_{mec}) del rotor es modelado como un torque promedio, en la cual las oscilaciones son super puesto.

$$T_{mech} = \frac{1}{2}\pi R^3 \rho v^2 \frac{C_p(\lambda,\beta)}{\lambda} \tag{4}$$

El efecto principal es super-puesto al torque principal son la sombra de la torre, la ráfaga y las cargas gravitacionales, debido al peso de cada pala. La sombra de la torre es la reducción del torque aerodinámico

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores.

de la pala, cuando este pasa desde el frente de la torre, debido a la perturbación en el flujo de viento creado por la torre (usualmente tubular), tanto aguas arriba como aguas abajo. La oscilación en el torque en cada pala es:

$$\Delta T_{ts} = 2\frac{T_{mech}}{N_b} W_{ts}(\varphi_i) \tag{5}$$

Donde N_b es el número de las palas y W_{ts} es un coeficiente dependiente del ángulo φ_i de la pala.

$$W_{ts}(\varphi_i) = \begin{cases} t_p + t_p \cos\left(p\left(\varphi_i - \varphi^*\right)\right) & \left(\varphi^* - \varphi_T\right) \le \varphi \le \left(\varphi^* + \varphi_T\right) \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Donde:

$p = \pi/\varphi_T$
φ_T = es la mitad del ángulo de la sombra de la torre.
φ_i = es el ángulo de la pala.
φ^* = es el ángulo del azimut de la pala y,
t_0 y t_p son factores empíricos.

La ráfaga de viento (*wind shear*) es el incremento de la velocidad del viento con la altura. Este fenómeno también produce oscilaciones en el torque causado por el gradiente de velocidad del viento a lo largo de la altura por el área cubierta por las palas. El efecto del *wind shear* puede ser expresado como:

$$\Delta T_s = 2\frac{T_{mech}}{N_b} W_s(\varphi_i) \tag{6}$$

donde:

$$W_s(\varphi_i) = m\frac{0.75R}{H} sen\varphi_i + \frac{m(m-1)}{2}\frac{(0.75R)^2}{H^2}\cos^2(\varphi_i) \tag{7}$$

Otra carga es producida por el peso de las palas. Si las palas se mueven a exactamente la misma velocidad como el eje, entonces el rotor es considerado como un solo cuerpo, entonces el efecto de la altura de las palas puede ser cancelado. Sin embargo, un modelo mas detallado, donde un acoplamiento elástico entre cada pala y el eje es considerado, este efecto puede ser incluido:

$$\Delta T_w = M_{bi} r_{cdg} g \cos(\varphi_i) \tag{8}$$

De tal modo, el torque producido por cada pala puede ser:

$$T_{bi} = \frac{T_{mech}}{N_b} + \Delta T_{ts} + \Delta T_s + \Delta T_w \tag{9}$$

Y el torque aerodinámico total del rotor es la suma de los torques individuales de cada pala, calculados independientemente por la ecuación antes descrita.

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores.

BORRADOR

Tren Mecánico

Debido al incremento de la COMPLIANCE del tren mecánico de la mayoría de las turbinas de viento (usualmente lograda por los ejes suaves o acoplamiento elástico especial), un adecuado equivalente multimada debe ser empleado, a fin de representar los modos torsionales de baja frecuencia, los cuales dominan el comportamiento dinámico de las turbinas de viento.

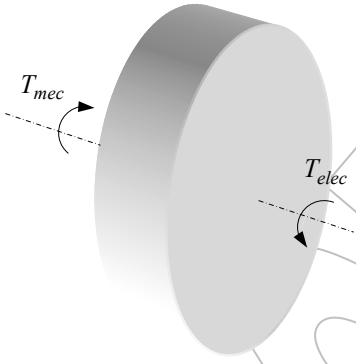
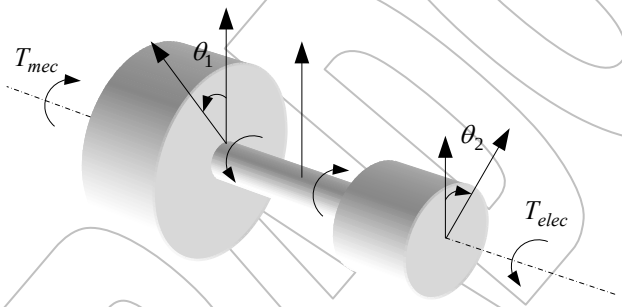
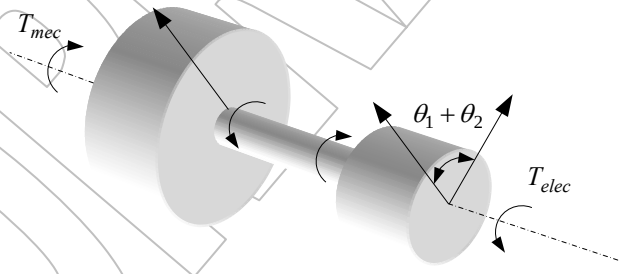


Figura 1. Modelo de una sola masa concentrada



(a) Sistemas de Referencias



(b) Sistemas de Referencia común

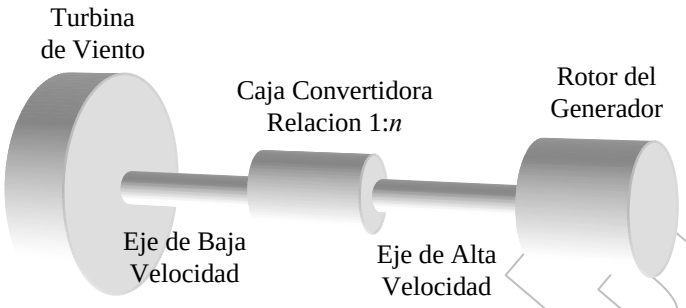
Figura 2. Modelo de dos masas concentradas

Eje d

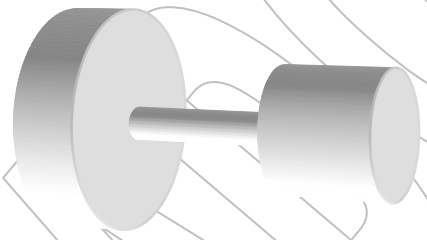
Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores.

BORRADOR

En la Figura 4.3, dos equivalentes típicos son ilustrados considerando las masas elásticamente acopladas entre ellas. En la Figura 4.3(a) las tres inercias correspondientes al rotor de la turbina, la caja convertidora, y el generador eléctrico.

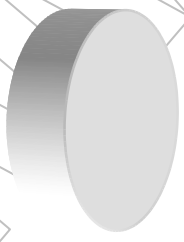


(a) Modelo del Tren mecánico de tres masas



(b) Modelo de Dos Masas

Turbina
de Viento+
Eje de Baja Velocidad +
Caja Convertidora+
Generador



(c) Modelo de una Sola Masa Concentrada

Figura 3. Diferentes Tipos de Modelos

(Los ejes de interconexión, los discos de frenos, etc. son incorporados en las inercias concentradas del modelo). La elasticidad y los elementos de amortiguamiento entre inercias adyacentes corresponden a las elasticidades del eje de alta y baja velocidad, y la fricción interna, donde los elementos de amortiguamiento representan las perdidas de torque. A fin de reproducir el BLADE EDGEWISE CAMPING modo de oscilación, cada pala del toro puede ser modelada por una inercia separada, elásticamente conectada al eje, como se muestra en la Figura 4.3(b), para un rotor de tres palas. En este caso la inercia H_H, adyacente a la caja convertidora, corresponde solamente a la del eje, y no al rotor de la turbina completo, como en la Figura 4.3(a).

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores.

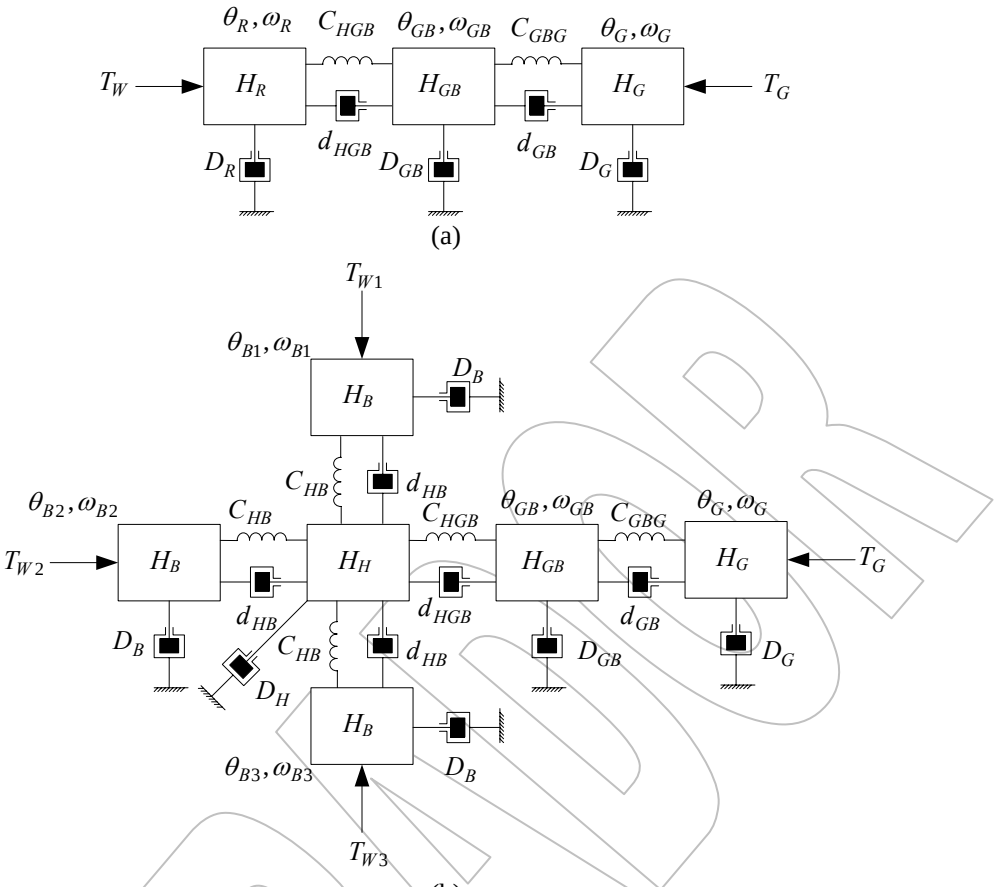


Figura 4. (a) Modelos equivalente mecánicos de la cadena mecánica (a) 3 masas (b) 6 masas.

Las ecuaciones de estados para la cadena mecánica equivalente de la Figura 4.3(a) son las siguientes, empleando las posiciones angulares y las velocidades como variables de estado.

$$\begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\theta}} \\ \dot{\boldsymbol{\omega}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathbf{0}]_{3\times3} & [\mathbf{I}]_{3\times3} \\ -2[\mathbf{H}]^{-1}[\mathbf{C}] & -2[\mathbf{H}]^{-1}[\mathbf{D}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta} \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathbf{0}]_{3\times3} \\ [\mathbf{2H}]^{-1} \end{bmatrix} \mathbf{T} \tag{10}$$

Donde:

$\boldsymbol{\theta}^T = [\theta_R \quad \theta_{GB} \quad \theta_G]^T$: Vector de posición angular del rotor, caja convertidora y generador.

$\boldsymbol{\omega}^T = [\omega_R \quad \omega_{GB} \quad \omega_G]^T$: Vector de velocidad angular del rotor, caja convertidora y generador.

$\mathbf{T}^T = [T_W \quad 0 \quad T_G]^T$: Vector de torques externos actuantes en el lado del rotor de la turbina, (torque aerodinámico T_w), y en el lado del rotor del generador (torque electromagnético T_G), convencionalmente acelerante.

$[\mathbf{0}]_{3\times3}$ y $[\mathbf{I}]_{3\times3}$ son las matrices 3x3 cero e identidad, respectivamente.

$2[\mathbf{H}] = 2diag[2H_R \quad 2H_{GDB} \quad 2H_G]$ Matriz de inercia, 3x3 diagonal

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores.

$$[\mathbf{C}]=\begin{bmatrix} C_{HGB} & -C_{HBG} & 0 \\ -C_{HGB} & C_{HBG}+C_{GBG} & -C_{GBG} \\ 0 & -C_{GBG} & C_{GBG} \end{bmatrix}$$

[**C**] Matriz de rigidez, 3x3, donde C_{HGB} y C_{GBG} son los coeficientes de rigidez del eje a la caja convertidora y de ésta al generador, respectivamente.

$$[\mathbf{D}]=\begin{bmatrix} D_R+d_{HGB} & -d_{HBG} & 0 \\ -d_{HGB} & D_{GB}+d_{HBG}+d_{GBG} & -d_{GBG} \\ 0 & -d_{GBG} & D_G+d_{GBG} \end{bmatrix}$$

[**D**] Matriz de amortiguamiento, 3x3, donde d_{HGB} y d_{GBG} son los amortiguamiento de los acoplamiento elástico, y D_R, D_{GB}, D_G, los coeficientes de amortiguamiento externos.

Las ecuaciones de estado del equivalente mecánico de seis masas de la Figura 4.3(b) son las siguientes:

$$\begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\theta}} \\ \dot{\boldsymbol{\omega}} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} [\mathbf{0}]_{6\times6} & [\mathbf{I}]_{6\times6} \\ -2[\mathbf{H}]^{-1}[\mathbf{C}] & -2[\mathbf{H}]^{-1}[\mathbf{D}] \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta} \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} [\mathbf{0}]_{6\times6} \\ [\mathbf{2H}]^{-1} \end{bmatrix}\mathbf{T} \tag{11}$$

Donde:

$\boldsymbol{\theta}^T=[\theta_{B1} \quad \theta_{B2} \quad \theta_{B3} \quad \theta_H \quad \theta_{GB} \quad \theta_G]^T$: Vector de posición angular de las palas, caja convertidora y generador.

$\boldsymbol{\omega}^T=[\omega_{B1} \quad \omega_{B2} \quad \omega_{B3} \quad \omega_H \quad \omega_{GB} \quad \omega_G]^T$: Vector de velocidad angular de las palas, caja convertidora y generador.

$\mathbf{T}^T=[T_{W1} \quad T_{W2} \quad T_{W3} \quad 0 \quad 0 \quad T_G]^T$: Vector de torques externos actuantes en las palas del rotor de la turbina, (torque aerodinámico T_{wi}, i = 1, 2, 3), y en el lado del rotor del generador (torque electromagnético T_G), convencionalmente acelerante.

$[\mathbf{0}]_{6\times6}$ y $[\mathbf{I}]_{6\times6}$ son las matrices 6x6 cero e identidad, respectivamente.

$2[\mathbf{H}]=diag[2H_B \quad 2H_B \quad 2H_B \quad 2H_H \quad 2H_{GB} \quad 2H_G]$ Matriz de inercia, 6x6 diagonal

$$[\mathbf{C}]=\begin{bmatrix} C_{HB} & 0 & 0 & -C_{HB} & 0 & 0 \\ 0 & C_{HB} & 0 & -C_{HB} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{HB} & -C_{HB} & 0 & 0 \\ -C_{HB} & -C_{HB} & -C_{HB} & C_{HGB}+3C_{HB} & -C_{HGB} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -C_{HGB} & C_{HGB}+C_{GBB} & -C_{GBG} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{GBG} & C_{GBG} \end{bmatrix}$$

[**C**] Matriz de rigidez, 6x6, donde C_{HB}, C_{HGB} y C_{GBG} son los coeficientes de rigidez del eje a la caja convertidora y de ésta al generador, respectivamente.

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores.

$$[\mathbf{D}]=\begin{bmatrix} D_g+d_{HB} & 0 & 0 & -d_{HB} & 0 & 0 \\ 0 & D_g+d_{HB} & 0 & -d_{HB} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_g+d_{HB} & -d_{HB} & 0 & 0 \\ -d_{HB} & -d_{HB} & -d_{HB} & D_H+d_{HGB}+3d_{HB} & -d_{HB} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -d_{HB} & D_{GB}+d_{HGB}+d_{GBG} & -d_{GBG} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{GBG} & D_G+d_{GBG} \end{bmatrix}$$

[**D**] Matriz de amortiguamiento, 6x6, donde d_{HGB} y d_{GBG} son los amortiguamiento de los acoplamiento elástico, y D_R, D_{GB}, D_G, los coeficientes de amortiguamiento externos.

BORRADOR

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores.

Referencias Documentales

[1] Ackermann T. *Wind Power in Power System*. John Wiley and Sons. England. 2005.
[2] N. Hatziargyriou, M. Donnelly, S. Papathanassiou, J.A. Pecas Lopes, M. Takasaki, H. Chao, J. Usaola, R. Lasseter, A.Efthymiadis, K. Karoui, S. Arabi, *CIGRE. CIGRE TF38.01.10 "Modeling New Forms of Generation and Storage*, November 2000

BORRADOR

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores.

Anexo

Modelo de la Turbina de Viento para Máquina Comercial de 1.5 y 3 MW

Las Figuras A.1 y A.2 muestran los modelos de dos masas para el rotor usando los parámetros físicos y modales respectivamente.

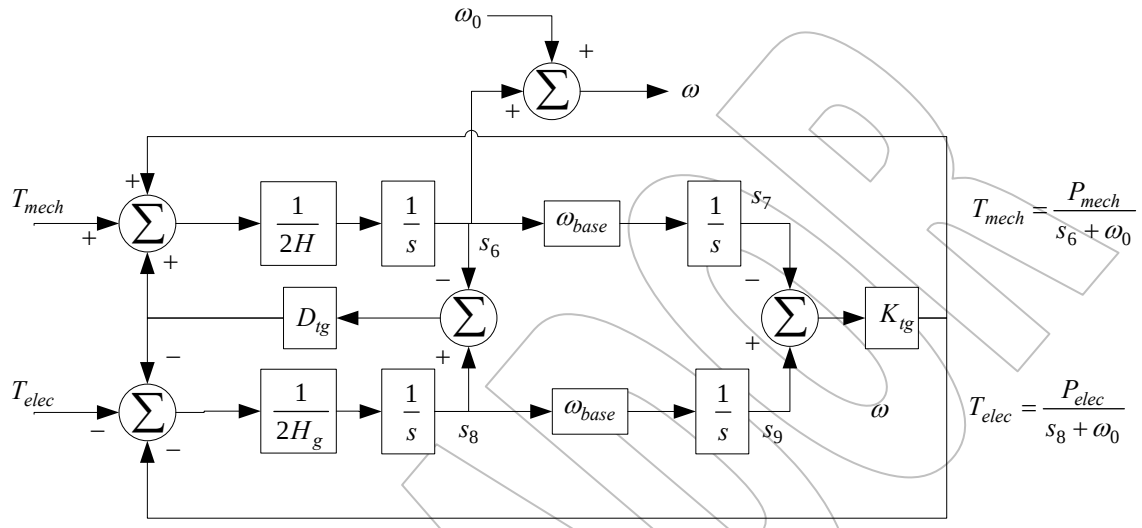


Figura A.1. Modelo de dos masas para el rotor –modelo de parámetros físicos

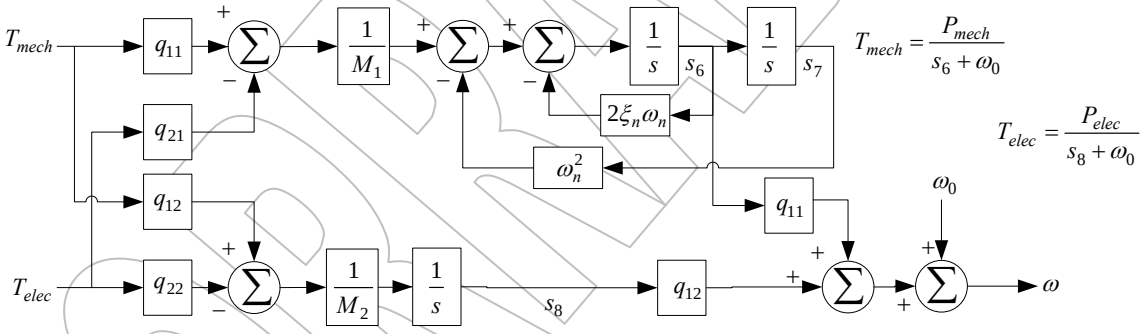


Figura A.2. Modelo de dos masas para el rotor –modelo de parámetros modales

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores.

Los datos del modelo mecánico del rotor son dados en la Tabla A.1.

Tabla A.1. Parámetros del modelo mecánico para turbinas de viento

	1.5 MW	*3.6 MW*
Modelo de Una Masa		
H [p.u en base MW turbina]	4.64	5.19
Modelo de dos Masas Parámetros Físicos		
H	4.32	4.29
Hg	0.62	0.90
Ktg	80.27	296.7
Dtg	1.5	1.5
ωbase	1.745	1.335
Modelo de dos Masas Parámetros Modales		
M1	0.759	1.562
M2	5.661	7.775
ξ_n	0.0610	1.575
ωn	11.40	16.32
q11	0.1411	0.2053
q12	1.0	1.0
q21	-0.990	-0.979
q22	1.0	1.0

BORRADOR

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores.