



Universidad del Istmo

Campus Tehuantepec

División de Estudios de Posgrado
Maestría en Ciencias en Energía Eólica

Simulación virtual 3D de un aerogenerador de alta potencia

T E S I S

para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias en Energía Eólica

Presenta:

Ing. Ana Patricia Matus Vicente

Director:

Dr. Miguel Ángel Hernández López

Codirector:

M.C. Francisco Aguilar Acevedo

Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca. Diciembre 2018.

*Dedicado a
mis padres*

Agradecimientos

A Dios.

Por haberme permitido llegar hasta este punto y darme salud para lograr mis objetivos, por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo de felicidad, además de su infinita bondad.

A mis padres.

Silvano Matus Toral y Lucía Vicente García, con la mayor gratitud por todos sus esfuerzos, su amor, dedicación y su apoyo incondicional para lograr mis sueños.

A mis hermanos, sobrinos y cuñada.

José Carlos y Francisco Javier Matus Vicente, Alexa y Karlos Matus Vicente, y Zaira Vicente Fuentes, gracias por estar conmigo en todo momento y por su apoyo sincero.

En especial a mi confidente, amigo y compañero de vida.

Hernán López Zárate, gracias por ser mi complemento de vida, por regalarme la mejor de las ilusiones (la de poder ser mamá), a este pedacito de vida que viene en camino y crece cada día más y más, son la fuente más pura de mi inspiración.

A mis directores de tesis.

Dr. Miguel Ángel Hernández López y M. C. Francisco Aguilar Acevedo, las gracias infinitas por confiar y creer en mí al dejarme trabajar por segunda vez consecutiva con ustedes, más que mis directores son y serán unas grandes personas que aportaron de manera positiva en mi desarrollo profesional. Gracias por sus sabios consejos, regaños, gracias por su amistad.

A mis revisores.

M. C. J. Jesús Arellano Pimentel, gracias por el apoyo, sus consejos, y sus invaluable contribuciones en la revisión de este trabajo de tesis. M. D. M. José Rafael Dorrego Portela y Dr. Ociel Flores Díaz gracias por el tiempo invertido a la revisión y aportación de este trabajo de tesis.

Al proyecto.

Al Fondo Sectorial CONACYT-Secretaría de Energía Sustentabilidad Energética y a los proyectos P08: Diseño y construcción de un aerogenerador experimental con capacidad de 3 kW y desarrollo de software de simulación en realidad virtual, con fines didácticos, P20: Programa de Graduados del CEMIE-Eólico, del Centro Mexicano de Innovación en Energía Eólica (CEMIE-Eólico), por el apoyo económico y tecnológico brindado para la realización de esta tesis.

A mis amigos y compañeros del laboratorio de simulación.

Gracias por las convivencias vividas a lo largo de estos años, por hacer de mi estadía en la maestría de las mejores experiencias. Sarabia, Paquito, Reyna, Karla, Juanita, Chan y Chay, espero volver a coincidir con ustedes.

A mis amigos del Team M.C. Francisco.

Gracias Marleydy y Salvador, por la compañía, alegrías y los buenos momentos vividos en la elaboración de nuestras tesis.

A la Universidad del Istmo.

Por abrirme las puertas, por permitirme estudiar un posgrado, a los profesores y compañeros de clases, por las experiencias vividas durante los dos años que duro la maestría.

Posdata: todas las felicitaciones valen doble.

Índice general

Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Índice de figuras	vii
Índice de tablas	x
Nomenclatura	xi
Resumen	xiii
1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Estado del arte	2
1.3 Planteamiento del problema	7
1.4 Justificación	8
1.5 Objetivos	9
1.5.1 Objetivo general	9
1.5.2 Objetivos específicos	9
1.6 Alcances y limitaciones	9
1.6.1 Alcances	9
1.6.2 Limitaciones	10
1.7 Estructura de la tesis	10

2. Marco teórico	12
2.1 Aerogeneradores	13
2.1.1 Clasificación	13
2.1.2 Componentes	13
2.1.3 Tren motriz	15
2.1.4 Modelado y simulación	16
2.2 Realidad virtual	17
2.2.1 Motor de videojuegos Unity	18
3. Desarrollo	20
3.1 Modelo numérico	21
3.2 Modelado matemático	24
3.2.1 Empuje aerodinámico	25
3.2.2 Tren motriz	25
3.3 Parametrización de la caja de engranes	28
3.4 Modelos 3D	29
3.5 Descripción del entorno	33
3.5.1 Escena al exterior del aerogenerador	34
3.5.2 Escena al interior de la góndola	34
4. Resultados	36
4.1 Validación del modelo del tren motriz	36
4.2 Ambiente virtual	43
Conclusiones y trabajos futuros	51
Referencias	54

Índice de figuras

1.1	Vista 3D de la simulación.	3
1.2	Diagrama de bloques del modelo del aerogenerador.	4
1.3	Modelo 3D y gráficas de variables del aerogenerador.	4
1.4	Interfaz simulador tridimensional de la cinemática y dinámica.	5
1.5	Interfaz del simulador virtual 3D del curso introductorio de energía eólica. . .	6
1.6	Presentación de los datos de los componentes del aerogenerador.	7
2.1	Relación de los conceptos abordados.	12
2.2	Componentes del aerogenerador.	15
2.3	Componentes del tren motriz.	16
2.4	Estructura del modelo de aerogenerador.	17
3.1	Diagrama de los modelos simulados.	20
3.2	Curva de potencia linealizada AW 70/1500.	22
3.3	Aproximación lineal β	23
3.4	Velocidad del rotor rad/s	24
3.5	Diagrama a bloques de la relación entre modelos empleados.	24
3.6	Modelo de dos masas de un aerogenerador.	26
3.7	Modelo de una masa de un aerogenerador.	27
3.8	Vistas isométricas de la multiplicadora.	28
3.9	Relación de engranaje de la caja multiplicadora.	29
3.10	Modelo de la nariz en Solidworks.	30
3.11	Modelo de la torre en Solidworks.	30

3.12	Modelo de la góndola en Solidworks.	31
3.13	Modelo de la pala en Solidworks.	31
3.14	Modelo de la multiplicadora en Solidworks.	32
3.15	Vista frontal del aerogenerador en Solidworks.	32
3.16	Vista de los componentes internos de la góndola.	33
3.17	Vista del parque eólico instalado.	34
3.18	Vista cercana de los componentes internos de la góndola.	35
3.19	Vista lejana del interior de la góndola.	35
4.1	Problemática de la identificación de las diferencias de torques. a) Problema original, b) Planteamiento para la identificación de las diferencias de torques.	37
4.2	Gráfica de diferencias de torques empleando Simulink.	38
4.3	Gráfica de velocidad del rotor empleando Simulink.	38
4.4	Gráfica de torque aerodinámico vs velocidad del viento mediante la expresión para T_a y su aproximación.	40
4.5	Gráfica de la dinámica del torque aerodinámico usando la evaluación de la expresión para T_a y su aproximación.	41
4.6	Gráfica de la dinámica de la velocidad del rotor usando la evaluación de la expresión para T_a y su aproximación.	41
4.7	Gráfica de respuesta de w_r a variaciones escalonadas de viento.	42
4.8	Gráfica de diferencias de torques ($T_a - T_g$) a variaciones escaladas de viento.	42
4.9	Gráfica de las variaciones escalonadas del viento.	43
4.10	Diagrama de flujo de la integración del modelo matemático al ambiente virtual.	44
4.11	Diagrama de flujo para el cálculo de Beta.	45
4.12	Vista principal del sistema.	46
4.13	Vista al exterior del aerogenerador.	46
4.14	Vista al interior de la torre.	47
4.15	Señalamientos de los elementos al interior de la góndola.	48
4.16	Vista del comportamiento del tren motriz a una velocidad del viento de 13.5 m/s	48

4.17	Panel informativo.	49
4.18	Vista del comportamiento del tren motriz a una velocidad del viento de 14.0 <i>m/s</i>	50
4.19	Error en la resolución en Unity del modelo implementado respecto a Matlab. .	50

Índice de tablas

3.1 Datos del aerogenerador.	21
3.2 Datos de la pala.	25
3.3 Parámetros de la caja de engranes.	28
3.4 Parámetros de los rodamientos de la caja de engranes.	29
4.1 Parámetros utilizados en la simulación.	37
4.2 Datos generados en la caracterización de la entrada al sistema.	39

Nomenclatura

- a — Factor de inducción axial.
- β — Angulo pitch ($^{\circ}$).
- B_{ls} — Rigidez del eje de baja velocidad (Nmrad^{-1}).
- C_p — Coeficiente de potencia.
- C_q — Coeficiente de torque.
- D_e — Diámetro exterior.
- D_e — Diámetro primitivo.
- J_g — Inercia del generador (kg m^2).
- J_r — Inercia del rotor (kg m^2).
- J_t — Inercia total del aerogenerador (kg m^2).
- K_g — Amortiguación externa del generador ($\text{Nm rad}^{-1} \text{ s}$).
- K_r — Amortiguación externa del rotor ($\text{Nm rad}^{-1} \text{ s}$).
- K_t — Amortiguación total del aerogenerador ($\text{Nm rad}^{-1} \text{ s}$).
- λ — Relación de velocidad de punta.
- m — Módulo.
- n_g — Relación de multiplicadora.
- ρ — Densidad del aire (kg m^{-3}).
- R — Radio del rotor (m).
- T_a — Torque aerodinámico (Nm).
- T_{em} — Torque electromagnético del generador (Nm).
- T_g — Torque del generador en el lado del rotor (Nm).
- T_{hs} — Torque en el eje de alta velocidad (Nm).

- T_{ls} — Torque en el eje de baja velocidad (Nm).
- v — Velocidad del viento (m s^{-1}).
- w_g — Velocidad del generador (rad s^{-1}).
- w_{ls} — Velocidad del eje de baja velocidad (rad s^{-1}).
- w_r — Velocidad del rotor (rad s^{-1}).
- θ_r — Variación angular en el rotor (rad).
- θ_{ls} — Variación angular en la multiplicadora (rad).

Resumen

En este trabajo de tesis se presenta la simulación virtual 3D de un aerogenerador de alta potencia, a partir del modelado matemático del tren motriz, empleando un modelo de dos masas simplificado.

Se desarrolló un ambiente virtual conformado por dos escenarios, uno al interior y otro al exterior del aerogenerador, mostrando en un caso el aerogenerador al nivel del suelo y en el otro enseñando los detalles del tren motriz al interior de la góndola. Para ambos casos, existe un panel informativo con las variables y parámetros involucrados en el modelo el cual busca ayudar al usuario con la interpretación de los datos visuales.

A partir del modelo de dos masas del tren motriz se obtiene una simplificación a un modelo de una masa, asumiendo que eje de baja velocidad es perfectamente rígido. Para la validación del modelo del tren motriz se caracterizó experimentalmente la diferencia de torques contrarrestando el resultado con una expresión matemática presentada en otros trabajos.

Finalmente se emplea el modelo en la simulación de un entorno virtual usando el método numérico Runge Kutta de cuarto orden, permitiendo así visualizar la dinámica de los componentes del tren motriz.

Capítulo 1.

Introducción

Hoy en día la energía eólica juega un papel importante en el aprovechamiento de las energías renovables. Actualmente los aerogeneradores son la tecnología más usada para emplear la energía cinética del viento de masas de aire en movimiento y convertirla en energía eléctrica.

El presente trabajo de tesis aborda la simulación virtual 3D de la dinámica de los principales componentes mecánicos de un aerogenerador de alta potencia, empleando el modelo del empuje aerodinámico para obtener el T_a (torque aerodinámico), y un modelo de una masa para el tren motriz, simulando así la dinámica del rotor, todo esto representado de manera virtual mediante la ayuda del motor de videojuegos Unity.

1.1 Antecedentes

Un diferenciador de los inicios de los aerogeneradores es sin duda el avance tecnológico, el cual ha dado pauta a la simulación por computadora como una importante herramienta en el diseño y construcción de aerogeneradores. La simulación permite aproximar el comportamiento de un sistema y facilita al usuario manipular o modificar sus parámetros. Por otra parte, se tiene a la realidad virtual como un medio para acceder a una experiencia simulada próxima a la realidad física, reduciendo el peligro y creando escenarios no posibles en el

mundo real (Sherman y Craig, 2002). La combinación de ambas tecnologías permitirá una experiencia virtual de la operación de los componentes mecánicos de un aerogenerador.

Dentro del proyecto P08: *Diseño y construcción de un aerogenerador experimental con capacidad de 3 kW y desarrollo de software de simulación en realidad virtual, con fines didácticos*, del Centro Mexicano de Innovación en Energía Eólica (CEMIE-Eólico) se han desarrollado distintos trabajos con enfoques diferentes, como el apoyo en el conocimiento de protocolos de seguridad para prevenir accidentes (Cantón, 2017), o la manipulación virtual de los elementos de un aerogenerador (Hernández, Hernández, Arellano, y Toledo, 2015). Además, se construyó un parque eólico virtual con base a la norma IEC-61400, que opera mediante animaciones haciendo uso de herramientas propias de la realidad virtual (Trujillo, 2018). Cabe destacar que los citados trabajos se han desarrollado a nivel de animación, es decir, no tomando en cuenta los modelos matemáticos que permiten simular el comportamiento real de los componentes del aerogenerador.

El simulador desarrollado en este trabajo formará parte de un sistema mayor, en el cual se incluirá un parque eólico virtual, y un huerto solar que sigue la trayectoria del sol y simula la transformación de la radiación a energía eléctrica dentro del panel solar.

1.2 Estado del arte

A continuación, se presentan algunos trabajos relacionados con la simulación 3D de aerogeneradores desde un enfoque mecánico.

En (Iliyasu, Tanimu y Obada, 2017) se presenta un modelo de la oscilación de la torre de un aerogenerador debido al desequilibrio en las masas de las palas, permitiendo obtener una vista ilustrativa 3D de la simulación de un aerogenerador (véase Figura 1.1). Sin embargo, los datos son analizados mediante la representación de gráficas, lo que limita al usuario a observar los efectos de deflexión en la torre, debido en parte a la falta de interactividad de la simulación.

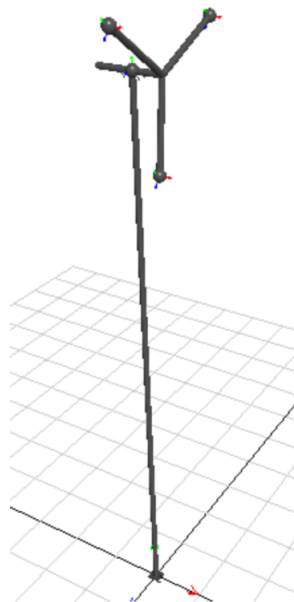


Figura 1.1. Vista 3D de la simulación.
Fuente: Iliyasu, Tanimu, y Obada (2017).

Santos, Alonso, Elouy y Arnaltes (2012) desarrollaron un sistema orientado al aprendizaje de conocimientos relacionados con la energía eólica, a través del planteamiento de problemas (aprendizaje orientado a problemas), utilizando para ello configuraciones virtuales y reales. Un modelo completo del aerogenerador fue desarrollado e implementado en Matlab/Simulink (véase Figura 1.2) para estudiar los conceptos básicos de los sistemas de conversión de energía eólica. Solo se incluye los modelos 3D de la torre, góndola y las palas. Se define el nivel de complejidad de cada parte del modelo matemático (aerodinámica de las palas, tren de transmisión, caja de engranes, sistema guiñado, generador y convertidores de potencia) para encontrar un equilibrio adecuado entre el tiempo de simulación y la información buscada.

En la simulación planteada, la entrada del sistema es la velocidad del viento, la cual permite que el modelo aerodinámico de las palas produzca las fuerzas de sustentación y arrastre, proporcionando el torque de accionamiento del rotor que se transmite a través de la caja de engranes, al eje de alta velocidad. Para generar una representación 3D, se hace uso de la herramienta SimMechanics la cual permite visualizar los elementos mecánicos en un modelo de movimiento tridimensional con el objeto de que los estudiantes comprendan mejor la

operación general de los aerogeneradores (véase Figura 1.3).

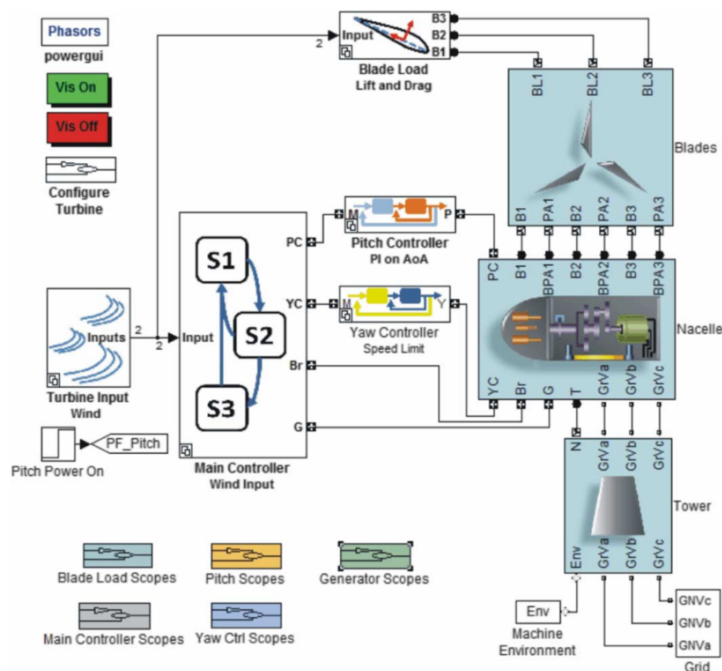


Figura 1.2. Diagrama de bloques del modelo del aerogenerador.
Fuente: Santos, Alonso, Carrasco, y Arnaltes (2012).

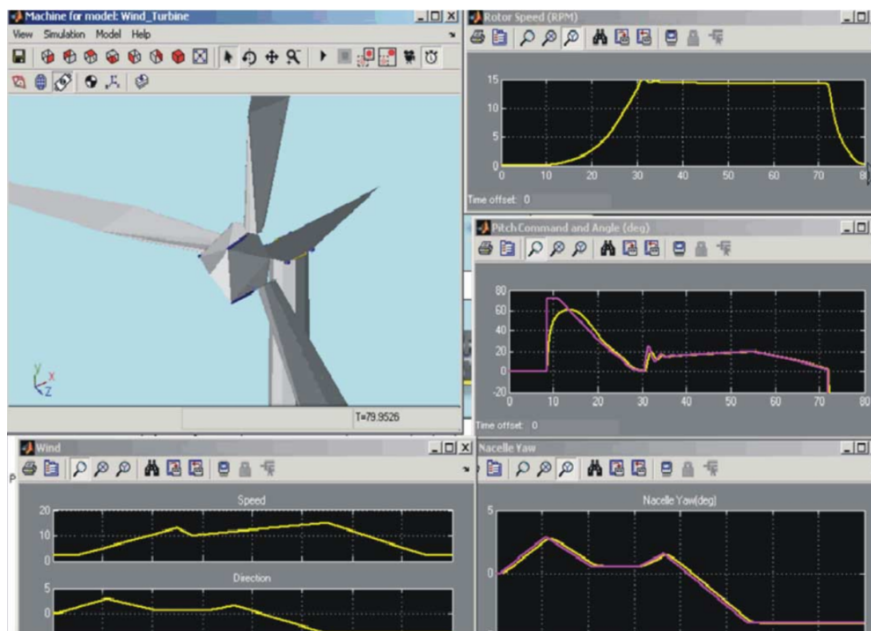


Figura 1.3. Modelo 3D y gráficas de variables del aerogenerador.
Fuente: Santos et al. (2012).

Matus (2017) presenta el desarrollo de un simulador tridimensional de la cinemática y dinámica del rotor de un aerogenerador tripala. El modelo propuesto se basa en la convención Denavit-Hartenberg, considerando al aerogenerador como un conjunto de cadenas cinemáticas abiertas que engloban cinco grados de libertad (torre, eje del rotor y las tres palas). Se obtiene el modelo dinámico con base en el algoritmo de Euler-Lagrange el cual emplea las matrices de transformación del modelo cinemático obtenido. Por último los modelos obtenidos son integrados a una interfaz permitiendo visualizar en forma tridimensional el comportamiento cinemático y dinámico del aerogenerador (véase Figura 1.4).



Figura 1.4. Interfaz simulador tridimensional de la cinemática y dinámica.
Fuente: Matus (2017).

Do, Moreland, Delgado, Wilson, Wang, Zhou y Ice (2013) desarrollaron un sistema inmersivo de realidad virtual 3D, esto con el fin de capacitar a estudiantes y profesionales de educación superior en temas sobre energía eólica, ofreciendo oportunidades de aprendizaje experimental en modelado 3D, simulación y visualización. El estudiante puede acceder a los componentes en funcionamiento, con el propósito de proporcionarles un aprendizaje y experiencia de cómo los sistemas realmente funcionan en un entorno real. El software permite la simulación virtual del aerogenerador presentando información específica sobre los conceptos aerodinámicos del

diseño de la pala, la velocidad del aire, la presión y el ángulo de incidencia del viento. En la Figura 1.5 se muestra parte de la interfaz e información que los estudiantes pueden observar al usar dicho software.

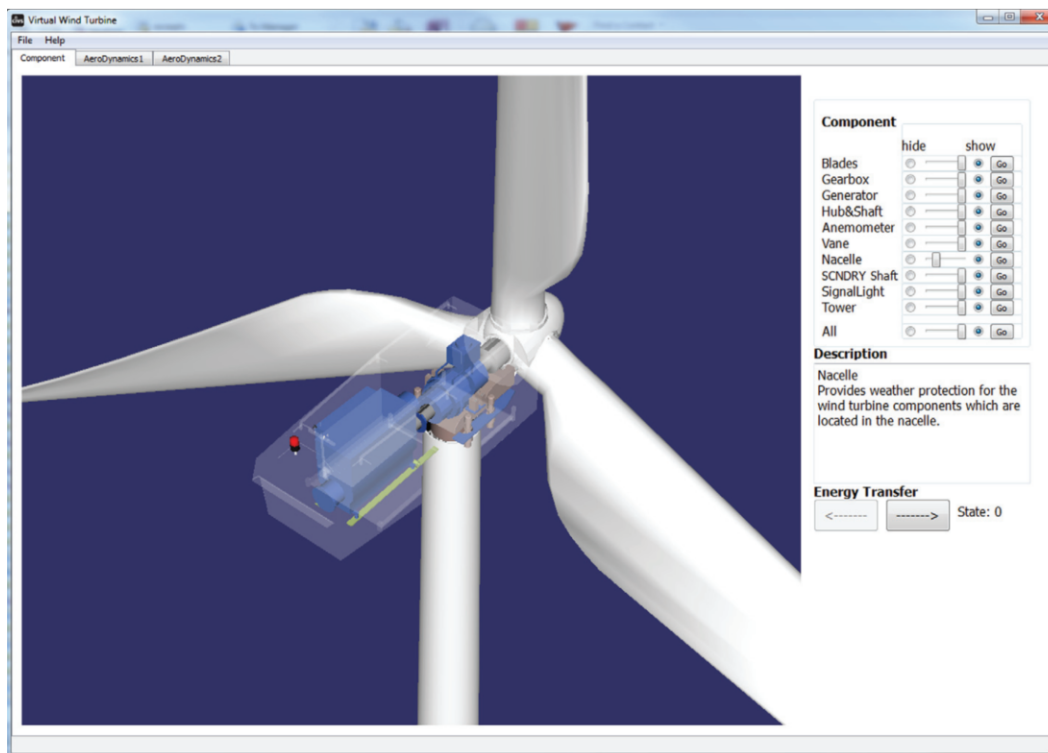


Figura 1.5. Interfaz del simulador virtual 3D del curso introductorio de energía eólica.
Fuente: Do et al. (2013).

En Zou (2015) se desarrolla un sistema de soporte de decisión industrial (DSS, Decision Support System) con asistencia 3D empleado un motor de juegos. Dentro de los elementos que contempla el DDS se encuentra la visualización 3D de aerogeneradores (véase Figura 1.6), que presentan una serie de información seleccionada como lo es: ángulo de paso, velocidad del viento, potencia del rotor, dirección del viento, velocidad del generador. Adicionalmente el sistema muestra los niveles de producción de energía, permite al usuario ver el estado de generación de energía de cada parque eólico, facilita la búsqueda de información, la ubicación del aerogenerador, y el estado en que se encuentra (alarma, mantenimiento o normal). En este trabajo se concluye que la implementación en 3D no solo se usa para la visualización, sino también es un medio adecuado para la simulación física. Puede simular una dinámica

corporal rígida, detección de colisiones y reacciones dinámicas, mostrando grandes ventajas en la representación de los aerogeneradores.

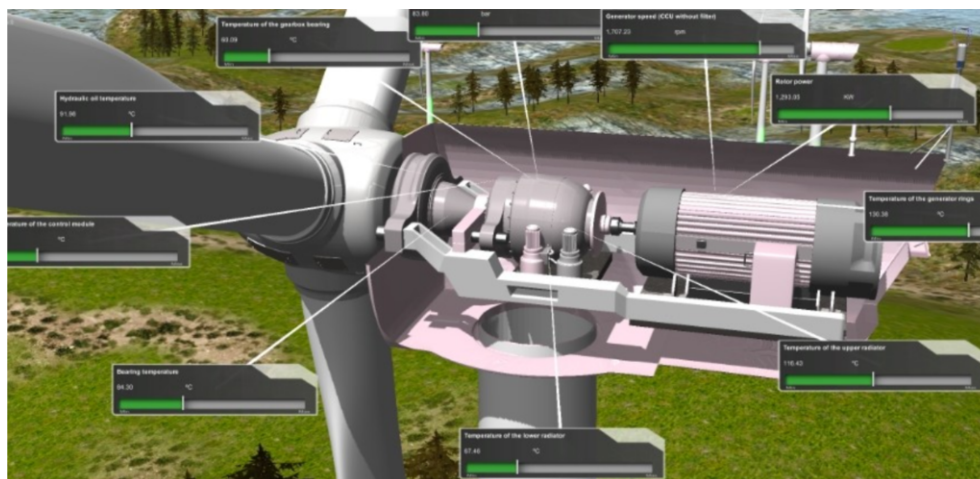


Figura 1.6. Presentación de los datos de los componentes del aerogenerador.
Fuente: Zou (2015).

1.3 Planteamiento del problema

En las últimas décadas se ha observado un gran incremento en el aprovechamiento de la energía eólica en países como EE.UU., Alemania, Gran Bretaña, Suecia, Holanda, Italia, China, Grecia, Japón, Dinamarca, entre otros (Sørensen, 2016).

Este crecimiento de la energía eólica ha impulsado una gran cantidad de investigación centrada en el desarrollo de nuevos diseños de aerogeneradores, las cuales recurren al análisis de información mediante gráficos que minimizan la interacción entre los componentes internos que los constituyen.

En la actualidad los espacios en el interior de la góndola de un aerogenerador son estrechos y por lo mismo es complicado el desplazamiento en ellos. Por otro lado, al girar el rotor de un aerogenerador se ponen en movimiento diferentes piezas mecánicas que suponen un riesgo para el personal.

Por último, el proceso de operación de un aerogenerador implica la presencia de altas ten-

siones y corrientes en cada una de las terminales del generador, cableado del transformador y componentes del sistema eléctrico/electrónico de potencia.

Estos tres factores aunados a la dificultad que representa el secreto industrial bajo el cual operan la mayoría de las empresas del sector eólico hacen complicado visualizar el interior de un aerogenerador en operación.

Por lo tanto, el problema a resolver en el presente trabajo de tesis es desarrollar una simulación virtual 3D del sistema mecánico de un aerogenerador de alta potencia, que facilite el análisis de la dinámica del sistema, esto con fines didácticos y experimentales.

1.4 Justificación

En el estudio y comprensión del funcionamiento de un aerogenerador es necesario conocer la forma que tienen de operar cada uno de los componentes que lo integran, así como la manera en que interactúan entre sí. De esta manera, la simulación se presenta como una opción en donde el trabajo con sistemas experimentales no es factible, debido al alto costo de adquirir un prototipo de dimensiones reales, sumado a los riesgos que implica trabajar con sistemas de alta potencia (Choi y Kang, 2013).

Esta tesis, está enfocada al desarrollo de una simulación virtual 3D de los principales componentes mecánicos de un aerogenerador de alta potencia, con fines didácticos y experimentales, dirigido a participantes del P08, estudiantes de la Maestría en Ciencias en Energía Eólica de la UNISTMO y a usuarios en general interesados en el estudio de aerogeneradores.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Desarrollar un simulador virtual 3D del funcionamiento dinámico de los principales componentes mecánicos de un aerogenerador de alta potencia con generador de inducción doblemente alimentado, multiplicadora y mecanismo de orientación, empleando modelos numéricos y/o matemáticos, para mostrar la operación e interacción de los principales componentes, así como el comportamiento de sus variables principales.

1.5.2 Objetivos específicos

- Mostrar el funcionamiento mecánico del tren motriz de un aerogenerador.
- Mostrar el comportamiento de las variables mecánicas involucradas en la operación de un aerogenerador en funcionamiento.
- Integrar modelos numéricos y/o matemáticos para un aerogenerador de alta potencia y así definir el comportamiento dinámico del sistema mecánico del tren motriz.
- Simular el comportamiento de los componentes mecánicos principales de un aerogenerador en función de la velocidad del viento mediante el empleo de sus modelos correspondientes.

1.6 Alcances y limitaciones

1.6.1 Alcances

- Obtener el entorno virtual al interior de la góndola y al exterior de un aerogenerador de alta potencia.

- Simular el comportamiento de los principales modelos mecánicos de un aerogenerador en función de la velocidad del viento mediante el empleo de un modelo aerodinámico y uno mecánico.

1.6.2 Limitaciones

- Se dará prioridad al funcionamiento y operación de los elementos mecánicos del aerogenerador.
- Se limita a integrar modelos numéricos y/o matemáticos del sistema mecánico de transmisión de un aerogenerador de alta potencia para definir el comportamiento dinámico del tren motriz mediante una simulación 3D.
- La interacción del usuario se centra a la simulación del rotor, el eje de baja velocidad, la caja de engranes y el eje de alta velocidad.
- No se considera un diseño y estudio de las características de la caja de engranes y las palas. Estos elementos fueron proporcionados por el equipo de trabajo del proyecto *P08* del CEMIE-Eólico.

1.7 Estructura de la tesis

Este documento está constituido por cuatro capítulos, y las conclusiones y trabajos a futuro, los cuales están organizados de la siguiente manera:

En el **Capítulo 2** se aborda la clasificación y componentes de los aerogeneradores, así como el tipo de modelación y simulación de los mismos. De igual manera, se abordan los conceptos de RV y su desarrollo con el motor de videojuegos en Unity.

En el **Capítulo 3** se obtiene el modelo matemático del tren motriz empleando el modelo de una masa, además de mostrar los modelos 3D implementados para la simulación virtual 3D y la descripción del entorno de RV.

En el **Capítulo 4** se presenta la validación del modelo del tren motriz, identificando las características de la diferencia de torques y la integración del modelo a una plataforma de realidad virtual.

Por último, se muestran las conclusiones obtenidas y las propuestas de trabajos futuros desprendidos de esta tesis.

Capítulo 2.

Marco teórico

En este capítulo se abordan los conceptos básicos que intervienen en el desarrollo de este trabajo, tal es el caso de los aerogeneradores y la realidad virtual. Además de la estructura de los modelos que permiten describir el comportamiento de los componentes que conforman esta propuesta de aplicación tecnológica.

La Figura 2.1 representa la relación entre los conceptos que se abordan en este trabajo de tesis, en donde se destacan el modelado y la simulación del tren motriz en realidad virtual como el objeto de estudio.

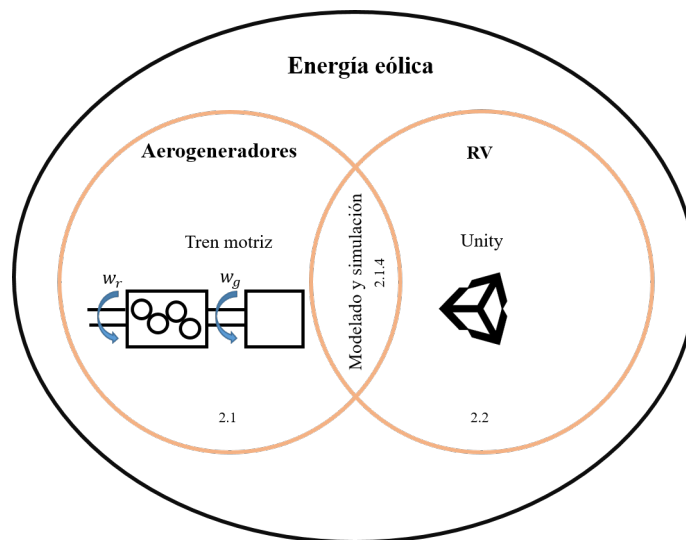


Figura 2.1. Relación de los conceptos abordados.

2.1 Aerogeneradores

Los aerogeneradores son máquinas que convierten la energía cinética del viento de las masas de aire en movimiento en electricidad, la cual es enviada a una red eléctrica. Estas redes incluyen circuitos de carga de batería, sistemas de energía de escala residencial, redes aisladas o de isla, y grandes redes de servicios públicos (Manwell, McGowan, y Rogers, 2010).

2.1.1 Clasificación

Existen diferentes enfoques que permiten clasificar de múltiples maneras a los aerogeneradores. El tipo del eje de giro del aerogenerador, número de palas, velocidad del rotor, tipo de generador eléctrico, entre otros, son algunos de los criterios empleados.

(Jha, 2011) categoriza los aerogeneradores en base a la capacidad de producción de energía en:

- Alta potencia: 1.5, 2.5 y 3.6 MW.
- Potencia media: de 20 kW a 100kW.
- Pequeña potencia: este tipo de aerogeneradores son los más adecuados para aplicaciones en las que el consumo de energía no sea superior a 10 kW.

2.1.2 Componentes

La Figura 2.2 muestra los principales componentes de un aerogenerador (Adaramola, 2014), los cuales se detallan a continuación:

1. Rotor: se compone de las palas conectadas al cubo. Las palas convierten la energía del viento en energía mecánica.

2. Ángulo de paso (*pitch*): permite girar las palas para reducir la captación del viento cuando estas velocidades superan la velocidad de diseño del aerogenerador.
3. Góndola: se encuentra encima de la torre y encierra diversos componentes, el rotor se conecta a la góndola.
4. Freno mecánico: actúa como un sistema de seguridad de los efectos de frenado de la pala o un freno de estacionamiento para mantenimiento.
5. Eje de baja velocidad: conecta al rotor con la caja multiplicadora o tren motriz, si es de acoplamiento directo entonces acopla el rotor con el generador.
6. Caja multiplicadora: se compone de los engranes de transmisión que aumentan la velocidad requerida por los generadores para producir electricidad.
7. Eje de alta velocidad: conecta al tren motriz o caja multiplicadora con el generador.
8. Generador: convierte la energía mecánica producida por el rotor en electricidad.
9. Intercambiador de calor: mantiene al generador fresco.
10. Controlador: es un sistema informático que ejecuta pruebas de auto diagnóstico, inicia y detiene al aerogenerador y realiza ajustes a medida que varían las velocidades del viento. Un operador remoto puede ejecutar verificaciones del sistema e ingresar nuevos parámetros a través de un módem.
11. Anemómetro: mide la velocidad del viento y la transmite al controlador.
12. Veleta: detecta la dirección del viento y la envía al controlador que se ajusta al guiñado para mover el rumbo del rotor o góndola.
13. Control por guiñado (*yaw*): mantiene el rotor frente al viento.
14. Torre: estructura fabricada en material de acero, celosía o de hormigón, su propósito es soportar la góndola y el rotor.

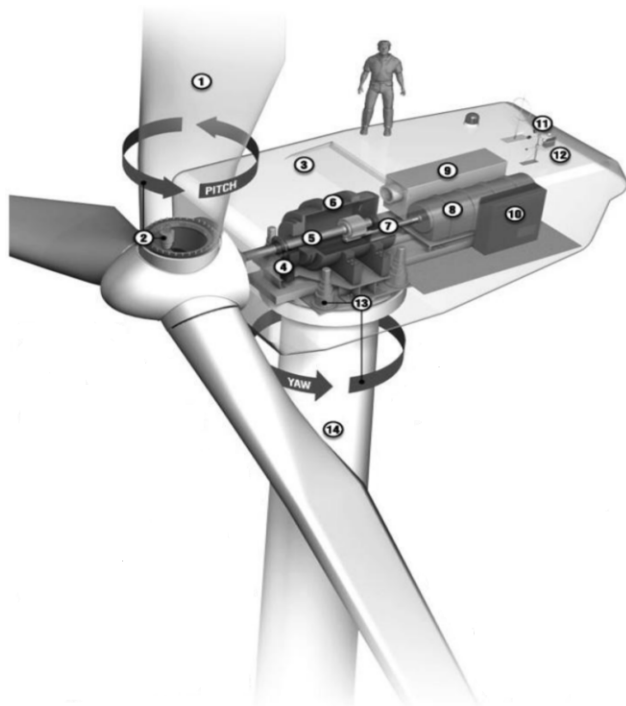


Figura 2.2. Componentes del aerogenerador.
Fuente: Adaramola (2014).

2.1.3 Tren motriz

Los aerogeneradores mediante el rotor extraen energía cinética del viento y la utilizan para introducir fuerza mecánica en la planta de energía, que a su vez se traduce en un movimiento de rotación producto del torque. Las partes giratorias que transfieren torsión se denominan componentes del tren motriz, siendo el rotor, la multiplicadora y el generador los elementos más representativos (véase Figura 2.3). Existen diversas configuraciones de trenes de transmisión y el potencial de innovación es alto (Schaffarczyk, 2014).

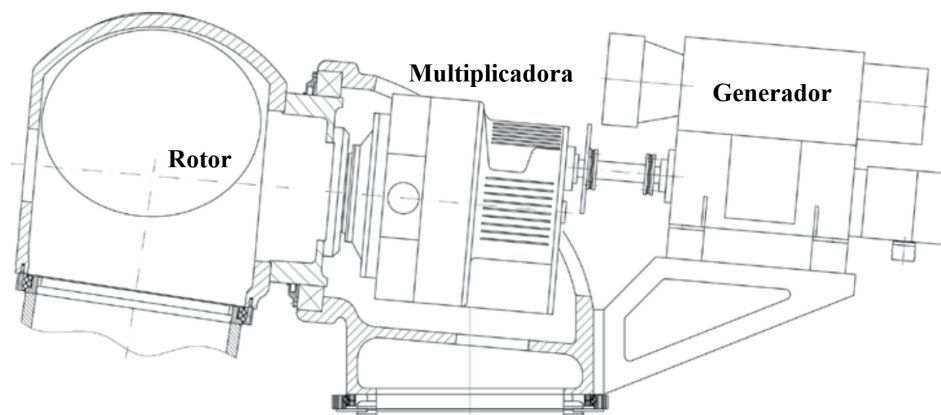


Figura 2.3. Componentes del tren motriz.
Fuente: Schaffarczyk (2014).

2.1.4 Modelado y simulación

La estructura de los modelos de aerogeneradores depende en gran medida de su enfoque. Modelos aerodinámicos muy detallados y sus modelos correspondientes de vientos son necesarios para el diseño mecánico de aerogeneradores. Sin embargo, en los estudios de simulación eléctrica un modelo aerodinámico tan detallado no suele ser necesario (Fortmann, 2014).

La Figura 2.4 ofrece una visión general de la estructura de los modelos utilizados para describir un aerogenerador. El nivel de detalle de los bloques individuales es abierto. Esto permite un enfoque modular de la simulación. De ser necesario, los bloques individuales pueden ser reemplazados por bloques más detallados para estudiar efectos o situaciones específicas.

Existen dos tipos de objetivos de simulación, uno es obtener información y el otro es entrenar o entretener al usuario. El primero es a menudo llamado una simulación analítica y el segundo una simulación de entorno virtual (Fujimoto, 2000).

La simulación es una parte útil del modelado que permite observar un sistema físico y facilita al usuario manipular o modificar los parámetros del sistema (Choi y Kang, 2013).

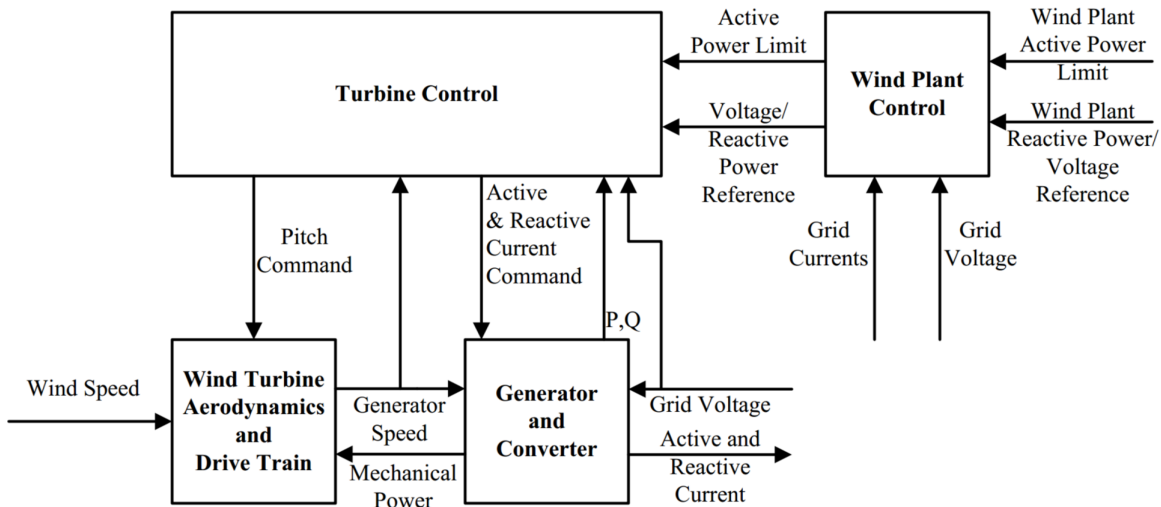


Figura 2.4. Estructura del modelo de aerogenerador.
Fuente: Fortmann (2014).

2.2 Realidad virtual

(Jerald, 2015) define a la Realidad Virtual (RV) como un entorno digital generado por computadora que puede ser interactuado y experimentado como si ese entorno fuera real. Un sistema RV ideal permite a los usuarios caminar físicamente alrededor de objetos y tocar esos objetos como si fueran reales.

Las experiencias de RV bien diseñadas pueden ser pensadas como una colaboración entre el ser humano y la máquina, donde el software y hardware funcionan armoniosamente para proporcionar una comunicación intuitiva con el ser humano (Sherman y Craig, 2002).

Los elementos clave para experimentar la realidad virtual son:

- *Un mundo virtual:* es el contenido de una comunidad en un espacio imaginario, puede existir únicamente en la mente de su creador o transmitirse de tal manera que pueda compartirse.
- *La inmersión:* reconoce la posibilidad de percibir algo aparte del mundo en el que se vive, el usuario deja de percibir el entorno que lo rodea y pasa a estar inmerso del

dentro del mundo virtual que recrea el computador en tiempo real.

- *La retroalimentación sensorial:* es proporcionada por el sistema de RV de manera directa a los participantes en base a su posición física. En la mayoría de los casos, es el sentido visual el que recibe retroalimentación, aunque existen ambientes de realidad virtual que muestran experiencias exclusivamente táctiles. La obtención de retroalimentación interactiva inmediata requiere el uso de una computadora de alta velocidad como un dispositivo mediador.
- *Interactividad:* elemento necesario en RV que permite así que parezca auténtico, accediendo a responder a las acciones del usuario. Se puede definir como la capacidad del usuario para interactuar con un mundo cambiando ubicaciones, recogiendo objetos y estableciéndolos, cambiando interruptores, etc.

2.2.1 Motor de videojuegos Unity

Unity es un motor de videojuegos que ofrece una plataforma para crear juegos y apps atractivas en 2D, 3D, RV y AR (Realidad aumentada, por sus siglas en inglés Augmented Reality). Permite hacer rápidamente la realidad de la visión creativa y visualizar el contenido prácticamente en cualquier medio o dispositivo (Technologies, 2018).

En la actualidad es de las plataformas mas utilizadas para desarrollar videojuegos en sus diferentes plataformas (consola, escritorio, navegador, tabletas y móviles).

Esta disponible en Windows y Mac, siendo el editor de Unity el centro creativo donde artistas, diseñadores y desarrolladores trabajan juntos. Es un editor altamente flexible y con múltiples prestaciones:

- Iteración rápida.
- Herramienta excepcionalmente expansible.
- Crea contenido cinemático variado en unity.

- Poderoso sistema de partículas.
- Animación.
- Gráficos.
- Optimización.
- Audio.
- Física 2D y 3D.

Capítulo 3.

Desarrollo

En este capítulo se describe la obtención del modelo matemático del tren motriz de un aerogenerador de alta potencia, empleando un modelo de una masa. Esto para contar con modelos pertinentes para simular la respuesta del aerogenerador virtual.

La Figura 3.1 esquematiza la relación entre los modelos, su simulación y la representación en el entorno virtual. Los modelos señalados se abordan en las siguientes secciones.

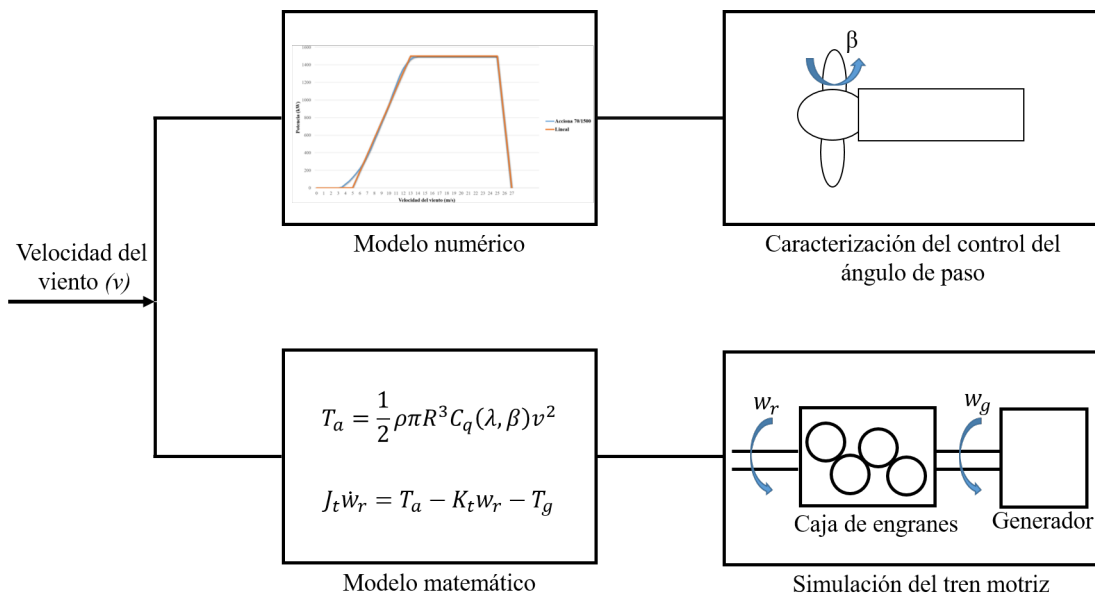


Figura 3.1. Diagrama de los modelos simulados.

3.1 Modelo numérico

Para el modelado numérico que se presenta se utilizó como referencia el aerogenerador comercial AW 70/1500 cuyas características se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Datos del aerogenerador.

Parámetros	Valor
Diámetro del rotor	35 m
Velocidad de arranque	4.0 m/s
Velocidad nominal	11.60 - 24.99 m/s
Velocidad de parada	25.0 m/s
Velocidad nominal de rotor	20.20 rpm
Potencia nominal	1500 kW

Fuente: Acciona (2016).

Se realizó la aproximación lineal de la curva de potencia del aerogenerador (véase Figura 3.2), la cual esta dividida en cuatro fases respecto a la velocidad del viento:

1. Velocidad de paro: la velocidad del viento no es la suficiente para que el aerogenerador comience a producir energía.
2. Velocidad de arranque: velocidad de viento mínima (5 m/s) a la cual el aerogenerador produce energía.
3. Velocidad nominal: velocidad de viento a la cual el aerogenerador produce la potencia nominal.
4. Velocidad de corte: la velocidad máxima a la que el aerogenerador debe dejar de trabajar para no poner en riesgo su propia estructura.

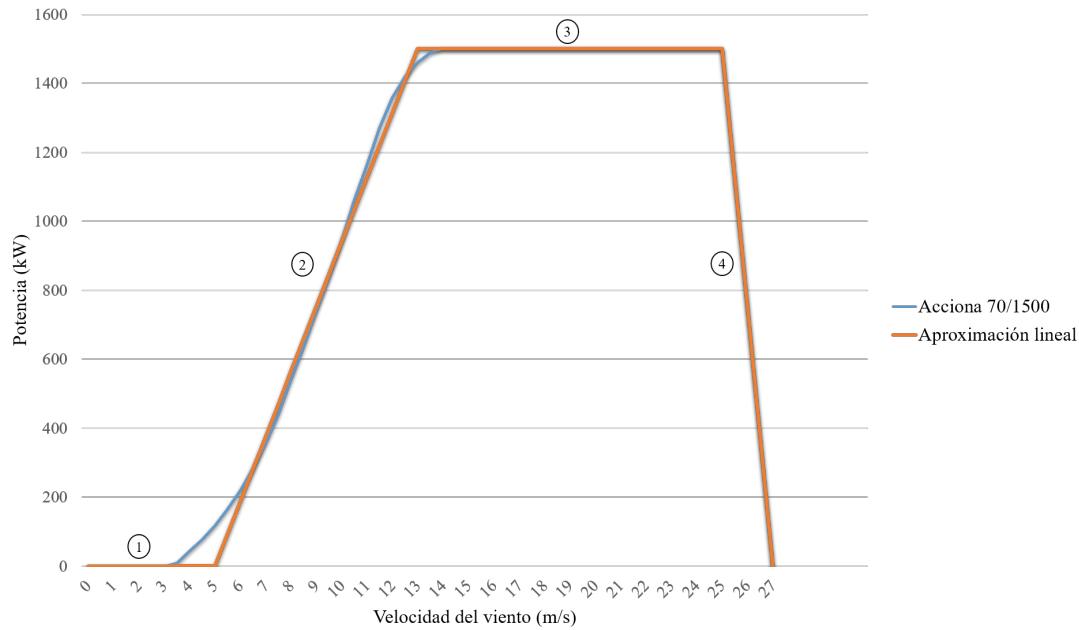


Figura 3.2. Curva de potencia linealizada AW 70/1500.

La ecuación 3.1 permite obtener la aproximación lineal de la potencia en la segunda fase, mientras la ecuación 3.2 hace referencia a la cuarta fase.

$$P(x_i) = 187.3750x_i - 935.8750 \quad (3.1)$$

$$P(x_i) = -12.5x_i + 337.5 \quad (3.2)$$

A partir de la curva de potencia puede identificar el comportamiento del ángulo de ataque de las palas (β). Las ecuaciones 3.3, 3.4 y 3.5 permiten obtener la aproximación lineal para la segunda, tercera y cuarta fase. Es de señalar que la segunda fase esta conformada por el segmento de línea descrita por la ecuación 3.3 además de una línea ubicada en cero.

$$B(x_i) = -16.3636x_i + 180 \quad (3.3)$$

$$B(x_i) = 2.5x_i - 32.5 \quad (3.4)$$

$$B(x_i) = 30x_i - 720 \quad (3.5)$$

La Figura 3.3 permite visualizar la aproximación lineal del comportamiento de β .

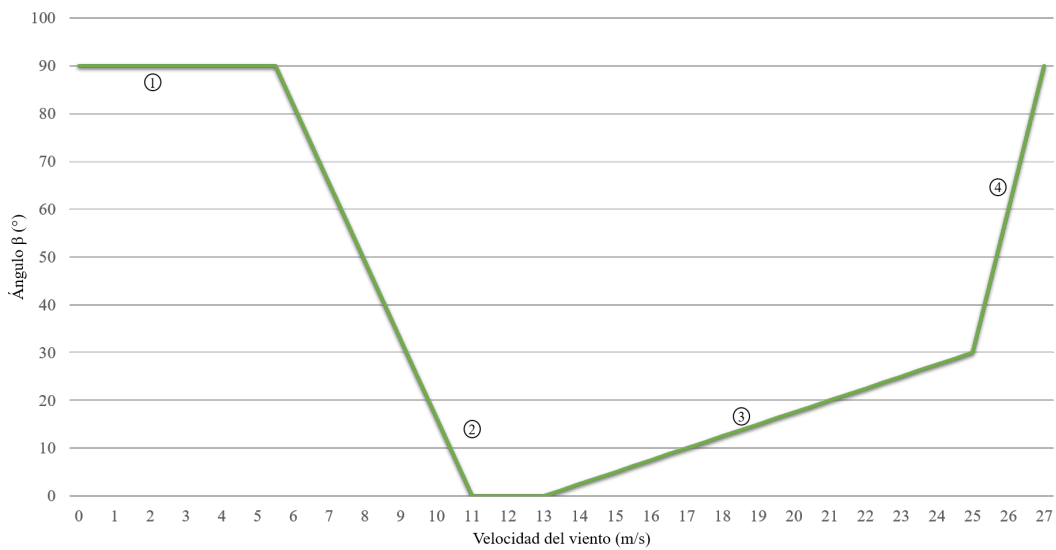


Figura 3.3. Aproximación lineal β .

Usando los valores mostrados en la Tabla 3.1 es posible tener una relación entre la potencia y velocidad nominal del rotor ($relacion = P_{nominal}/w_r(nominal)$) que puede ser generalizada para obtener la curva de la velocidad del rotor presentada en la Figura 3.4.

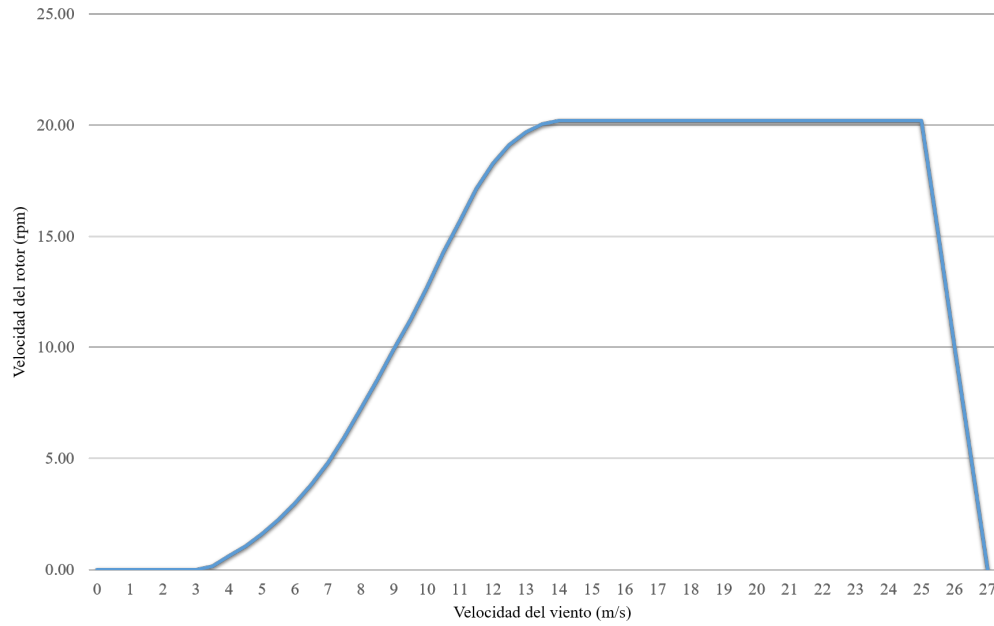


Figura 3.4. Velocidad del rotor rad/s .

3.2 Modelado matemático

Para simular el comportamiento dinámico del tren motriz se hace uso de dos modelos. El relacionado con la obtención del empuje aerodinámico a partir de la velocidad del viento y el modelo de la dinámica del tren motriz (véase Figura 3.5).

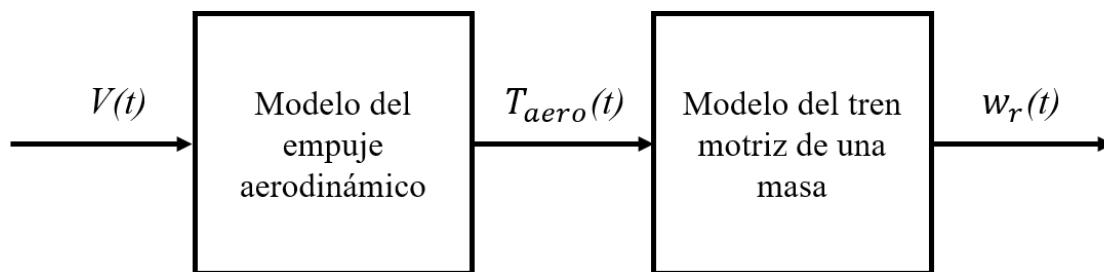


Figura 3.5. Diagrama a bloques de la relación entre modelos empleados.

3.2.1 Empuje aerodinámico

El empuje aerodinámico se calcula de la siguiente manera (Boukhezzar, Lupu, Siguerdidjane, y Hand, 2007):

$$T_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_q(\lambda, \beta) v^2 \quad (3.6)$$

donde:

$$C_q = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (3.7)$$

La pala usada de referencia cuenta con diez secciones, cuyos datos fueron proporcionados por el área de diseño aerodinámico del proyecto *P08* del CEMIE-Eólico. En la Tabla 3.2 se muestran los datos de las secciones de la pala.

Tabla 3.2. Datos de la pala.

Sección	$r(mm)$	λ_r	a
1	5002.5	0.90	0.224751712
2	8152.2	1.47	0.291068983
3	11301.9	2.03	0.318935641
4	14451.7	2.60	0.331887397
5	17601.4	3.17	0.338699712
6	20751.1	3.73	0.342788103
7	23900.8	4.30	0.345414024
8	27050.6	4.87	0.347200246
9	30200.3	5.43	0.348422791
10	33349.7	6.00	0.349308236
Punta	34000.0		

3.2.2 Tren motriz

Para la implementación del modelo del tren motriz se hace uso de un modelo de dos masas, el cual puede ser simplificado para obtener la siguiente expresión (Boukhezzar et al., 2007):

$$J_r \dot{w}_r = T_a - T_{ls} - K_r w_r \quad (3.8)$$

El par de torsión del eje de baja velocidad T_{ls} actúa como par de frenado en el rotor (véase Figura 3.6). El resultado de los efectos de torsión y fricción debido a la diferencia entre w_r y w_{ls} se expresa como:

$$T_{ls} = B_{ls}(\theta_r - \theta_{ls}) + K_r(w_r - w_{ls}) \quad (3.9)$$

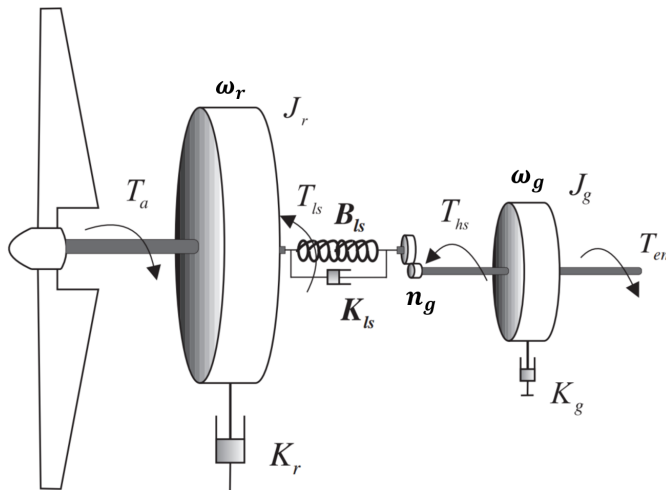


Figura 3.6. Modelo de dos masas de un aerogenerador.
Fuente: Boukhezzar et al. (2007).

El generador es impulsado por el par de torsión del eje de alta velocidad T_{hs} y frenado por el par electromagnético del generador T_{em} , de modo tal que:

$$J_g \dot{w}_g = T_{hs} - K_g w_g - T_{em} \quad (3.10)$$

Suponiendo una caja de engranajes ideal con relación de transmisión n_g , se tiene que:

$$n_g = \frac{T_{ls}}{T_{hs}} = \frac{w_g}{w_{ls}} \quad (3.11)$$

Transfiriendo la dinámica del generador al lado del eje de baja velocidad y usando las ecua-

ciones 3.10 y 3.11, la dinámica del generador se puede escribir como:

$$n_g^2 J_g \dot{w}_g = T_{ls} - (n_g^2 K_g) w_g - n_g T_{em} \quad (3.12)$$

Si se asume que el eje de baja velocidad es perfectamente rígido, entonces se puede considerar un modelo de aerogenerador de una sola masa como se observa en la Figura 3.7

$$J_t \dot{w}_r = T_a - K_t w_r - T_g \quad (3.13)$$

donde:

$$J_t = J_r + n_g^2 J_g \quad (3.14)$$

$$K_t = K_r + n_g^2 K_g \quad (3.15)$$

$$T_g = n_g T_{em} \quad (3.16)$$

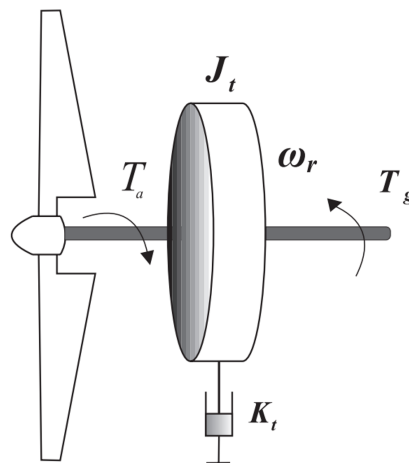


Figura 3.7. Modelo de una masa de un aerogenerador.
Fuente: Boukhezzar et al. (2007).

3.3 Parametrización de la caja de engranes

En la Tabla 3.3 se muestran los parámetros de los engranes de la caja multiplicadora utilizada en este trabajo. Los datos mostrados fueron proporcionados por el área de mecánica del proyecto *P08* del CEMIE-Eólico. En la Figura 3.8 se señalan mediante diferencias de colores los engranes considerados en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Parámetros de la caja de engranes.

	# Dientes	(m)	D_e	D_p	Módulo
Engrane guinda	144	0.19	1.98	1.7	12
Engrane azul	48	0.19	0.58	0.52	12
Engrane amarillo	88	0.19	1.10	1.05	12
Engrane azul turquesa enfrente	22	0.20	0.28	0.23	12
Engrane azul turquesa atrás	200	0.19	1.23	1.20	6
Engrane morado enfrente	20	0.20	0.13	0.10	6
Engrane morado atrás	138	0.19	0.75	0.73	6
Engrane verde	69	0.20	0.37	0.35	6

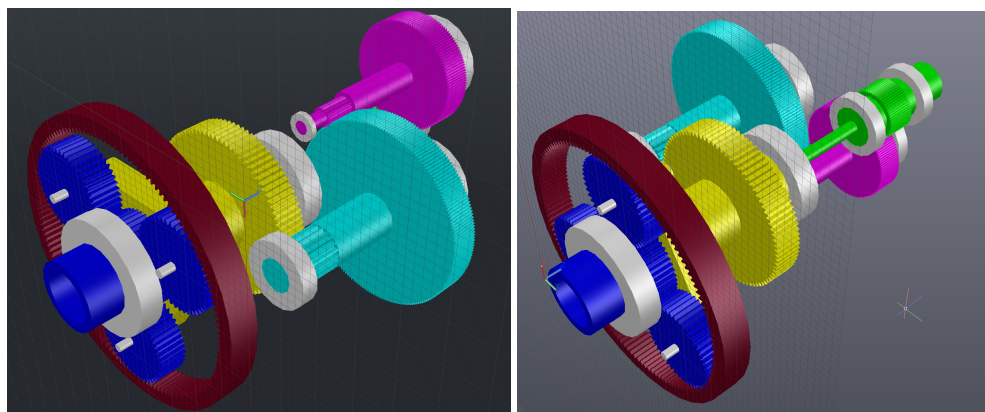


Figura 3.8. Vistas isométricas de la multiplicadora.

En la Tabla 3.4 se muestran los parámetros característicos de los rodamientos que forman parte de la caja de engranes.

Tabla 3.4. Parámetros de los rodamientos de la caja de engranes.

	D_e (m)	Grosor (m)	D_i (m)
Rodamiento azul	0.74	0.15	0.44
Rodamiento azul turquesa enfrente	0.44	0.11	0.22
Rodamiento azul turquesa atrás	0.59	0.13	0.37
Rodamiento amarillo	0.67	0.15	0.44
Rodamiento morado enfrente	0.19	0.04	0.09
Rodamiento morado atrás	0.59	0.09	0.37
Rodamiento verde enfrente	0.44	0.09	0.30
Rodamiento verde atrás	0.45	0.09	0.30

En la Figura 3.9 se esquematiza la relación de transmisión de movimiento de la caja de engranajes empleada, donde $n_g = 80$.

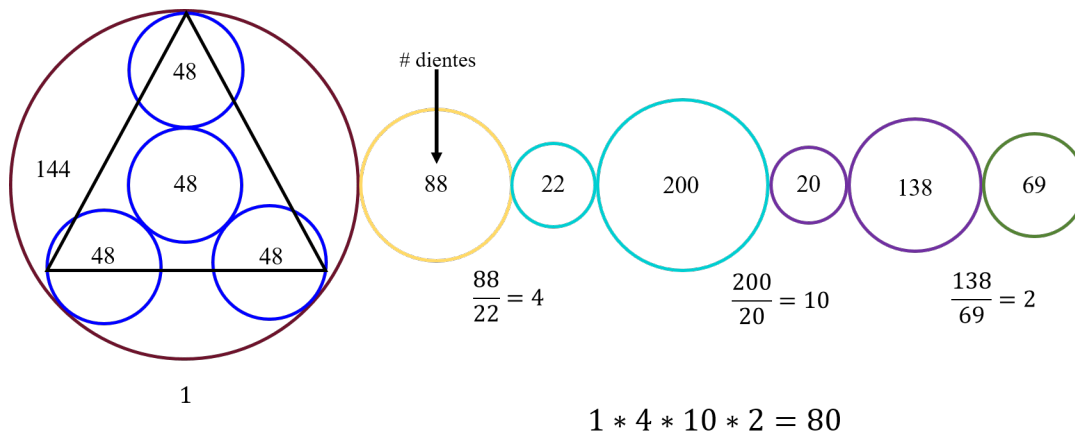


Figura 3.9. Relación de engranaje de la caja multiplicadora.

3.4 Modelos 3D

En la actualidad existen distintas herramientas de modelado 3D y software CAD que permiten obtener modelos con un elevado nivel de detalle. Sin embargo, entre mayor sea el detalle mayor será el costo computacional del modelo al momento de ejecutar una simulación (Sánchez, Ortega, González, y Reyes, 2017).

De la Figura 3.10 a la Figura 3.13 se muestran distintas piezas modeladas en CAD durante

este trabajo de tesis. En la Figura 3.14 se muestra una vista solida y un transparente de la multiplicadora en Solidworks.

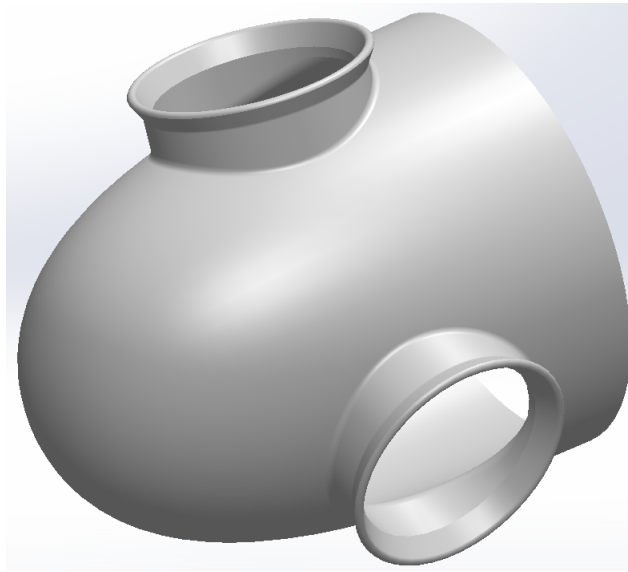


Figura 3.10. Modelo de la nariz en Solidworks.

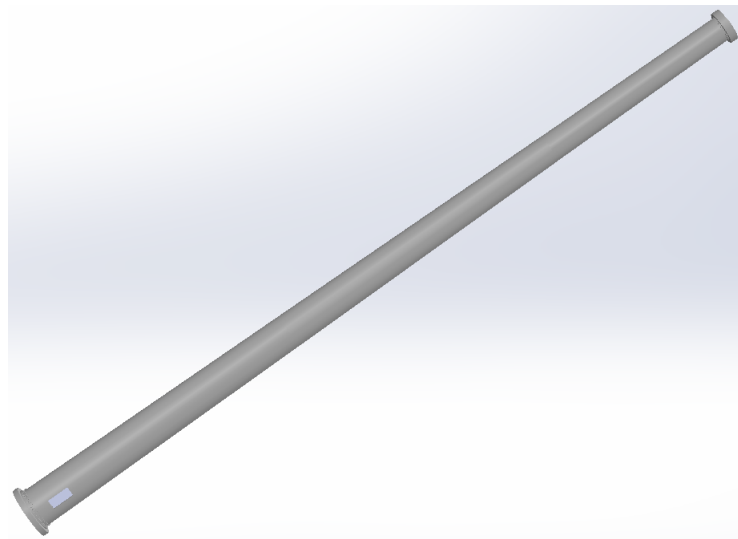


Figura 3.11. Modelo de la torre en Solidworks.

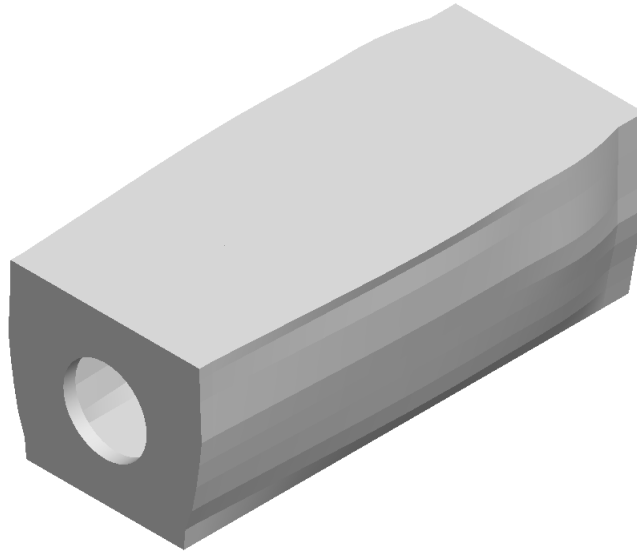


Figura 3.12. Modelo de la gónbola en Solidworks.

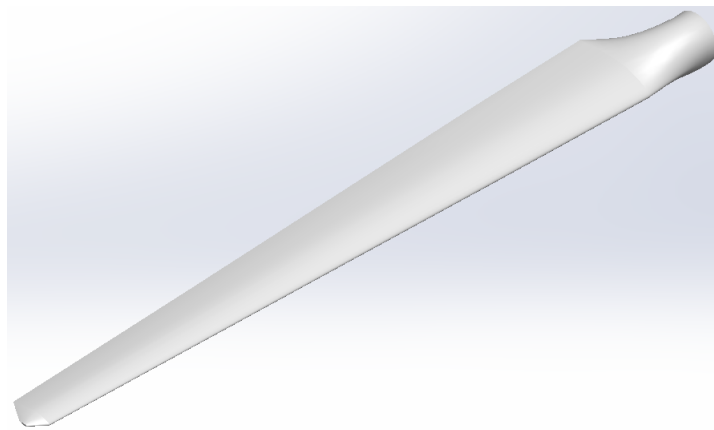


Figura 3.13. Modelo de la pala en Solidworks.

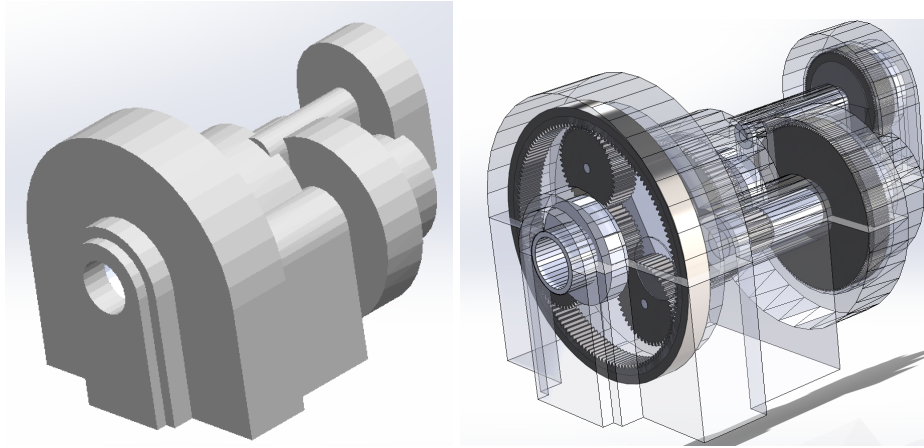


Figura 3.14. Modelo de la multiplicadora en Solidworks.

En la Figura 3.15 se muestra una vista frontal del aerogenerador ensamblado empleando los modelos realizados y algunos preestablecidos. En la Figura 3.16 se muestran los componentes internos que componen la góndola, señalando los elementos a los cuales son asociadas las variables a inspeccionar dentro del ambiente virtual.



Figura 3.15. Vista frontal del aerogenerador en Solidworks.

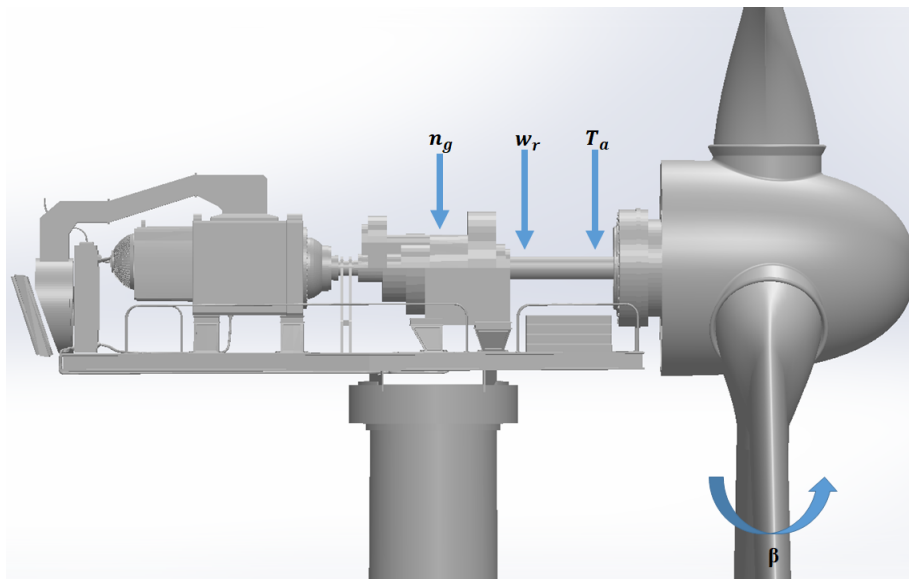


Figura 3.16. Vista de los componentes internos de la góndola.

3.5 Descripción del entorno

El entorno de realidad virtual cuenta con dos escenas principales las cuales permiten percibir al exterior e interior la simulación virtual 3D de un aerogenerador de alta potencia.

En el primer escenario al exterior, el usuario puede observar al aerogenerador y el entorno que lo rodea, como lo son otros aerogeneradores instalados en un espacio virtual de la Universidad del Istmo Campus Tehuantepec, así como parte del paisaje ubicado en el sitio, conformado por montañas y diferentes tipos de suelo.

El segundo escenario permite al usuario situarse al interior de la góndola, visualizando así el comportamiento que tienen los elementos mecánicos considerados en esta tesis. De esta forma, el usuario es capaz de visualizar los cambios de velocidad en los engranes que componen la caja multiplicadora, y el movimiento de los ejes, las palas y el anemómetro.

3.5.1 Escena al exterior del aerogenerador

La escena al exterior del aerogenerador permite visualizar la respuesta del sistema de control del ángulo de paso a la entrada del viento, así como la variación de la velocidad del rotor, además de permitirle al usuario realizar un recorrido por el parque eólico instalado (véase Figura 3.17). De igual manera esta escena facilita la entrada a la torre para visualizar los componentes que se encuentran en ella y subir por las escaleras hasta llegar a la góndola y trasladarse al escenario al interior del aerogenerador.

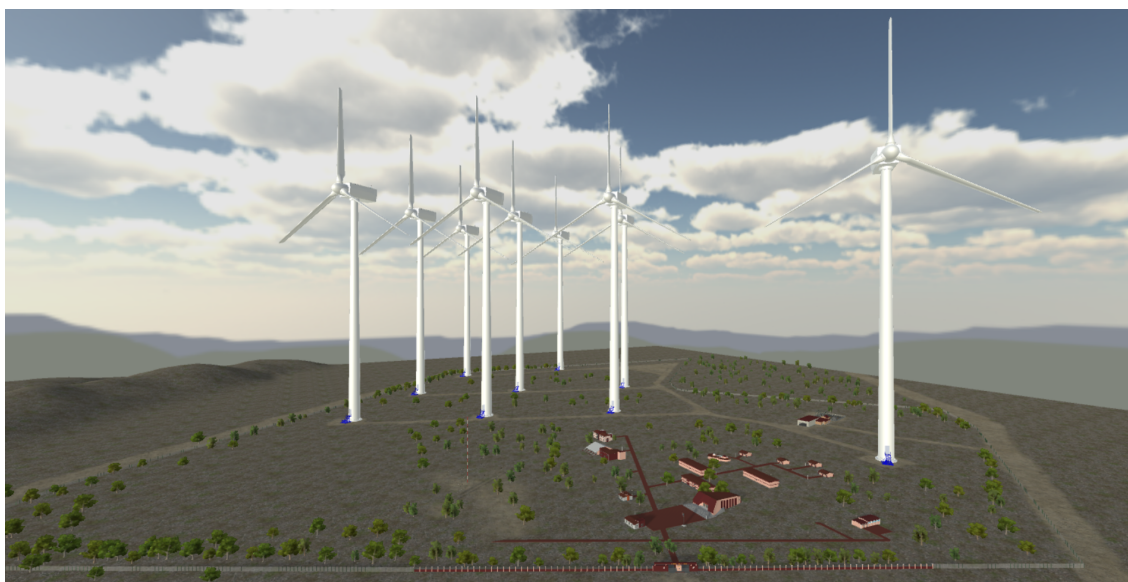


Figura 3.17. Vista del parque eólico instalado.

3.5.2 Escena al interior de la góndola

La escena al interior de la góndola permite de igual forma visualizar la regulación del ángulo de paso y el movimiento del rotor, además de realizar un recorrido al interior de este componente (véase Figuras 3.18 y 3.19) para visualizar la dinámica propia de los elementos del tren motriz. A distintas velocidades del viento estos componentes presentan distintos comportamientos, tal es el caso de la multiplicadora que contiene los engranes para la transmisión del movimiento de acuerdo a la relación establecida (véase Figura 3.9).

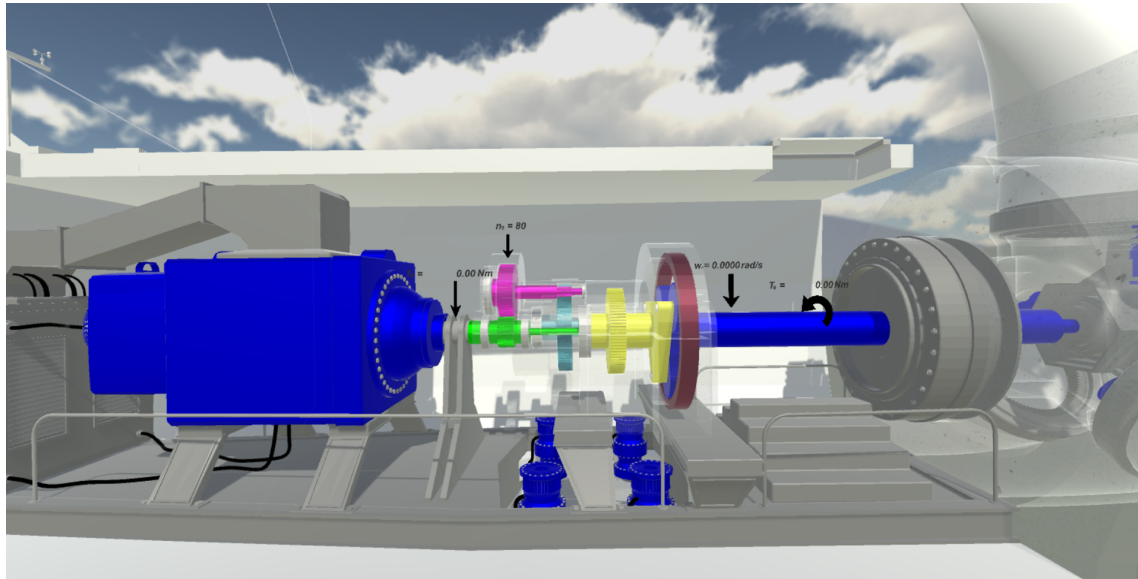


Figura 3.18. Vista cercana de los componentes internos de la góndola.

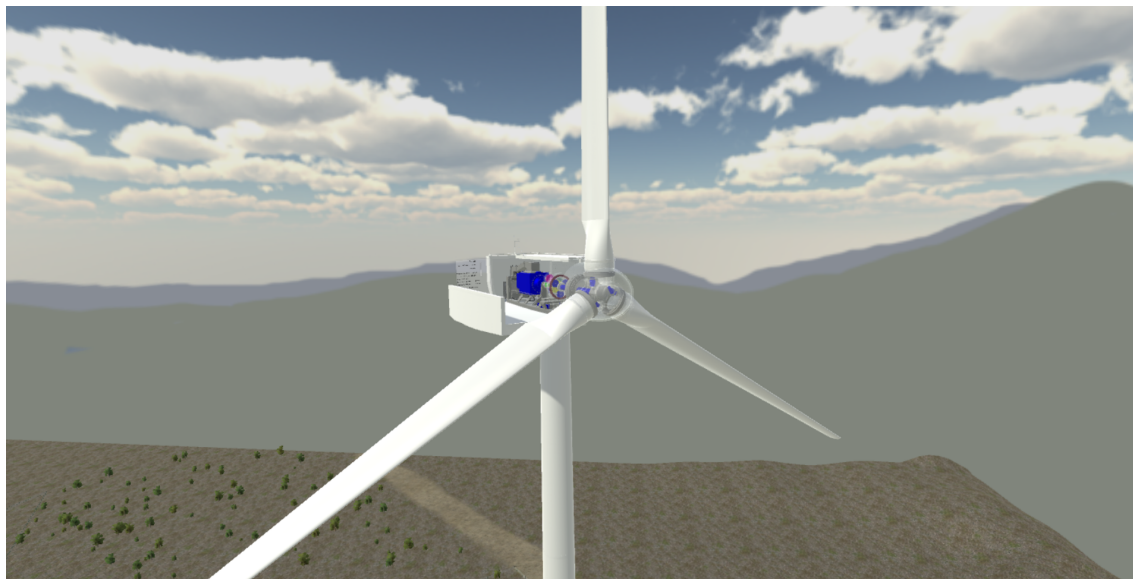


Figura 3.19. Vista lejana del interior de la góndola.

Capítulo 4.

Resultados

4.1 Validación del modelo del tren motriz

Como se mostró en la sección 3.2.2, es posible estimar el comportamiento de la velocidad del rotor a partir de la curva de potencia correspondiente. Este supuesto asume que el sistema se encuentra en un lazo de control cerrado donde las características del controlador y la dinámica de los elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos son desconocidas.

Para el caso del modelo del tren motriz contemplado los torques aerodinámico (T_a) y del generador (T_g) son variables cuya naturaleza se desconoce, tal como se ejemplifica en la Figura 4.1(a).

Así, a manera de identificar las características de las diferencias de torques ($T_a - T_g$) que permitieran obtener las velocidades en el rotor, se realizó el siguiente planteamiento:

- Dado que la entrada ($T_a - T_g$) cambia con el tiempo, la forma más simple de expresar esta variación es a través de una señal de tipo rampa que representa el cambio en la señal de control o en la diferencia de torques.
- En diversos trabajos relacionados con sistemas de control del ángulo de paso los tiempos de asentamiento registrados se encuentran entre 60 y 180 segundos (Saravanakumar y Jena, 2014). Para la caracterización de la diferencia de torques se contempla un tiem-

po de asentamiento de 60 segundos de tal forma que la señal de entrada permita llegar al valor deseado (w_r) en este tiempo.

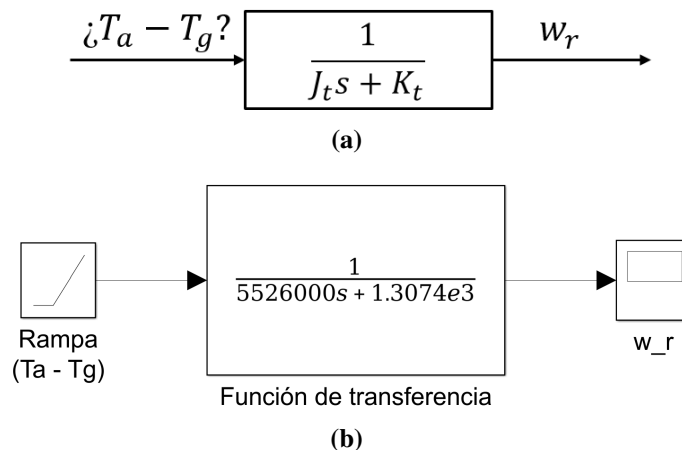


Figura 4.1. Problemática de la identificación de la diferencias de torques. a) Problema original, b) Planteamiento para la identificación de las diferencias de torques.

Para dicha caracterización se emplearon los parámetros mostrados en la Tabla 4.1, que hacen referencia a aerogeneradores de 1.5 MW.

Tabla 4.1. Parámetros utilizados en la simulación.

Parámetros	Valor	Referencia
J_r	$4.95 * 10^6 \text{ Kg}m^2$	(Bekker, 2012)
J_g	$90 \text{ Kg}m^2$	(Geng y Yang, 2009)
K_r	$27.36 \text{ Nm} * s/rad$	(Boukhezzar y Siguerdidjane, 2011)
K_g	$0.2 \text{ Nm} * s/rad$	(Boukhezzar y Siguerdidjane, 2011)

De esta forma, empleando la herramienta de Simulink se planteó el esquema mostrado la Figura 4.1(b), de tal manera que fuera posible variar la pendiente de la rampa (diferencia de torques) para obtener la respuesta deseada. En la Figura 4.2 se muestra un ejemplo de una curva de diferencia de torques para obtener la velocidad del rotor (w_r) mostrada en la Figura 4.3.

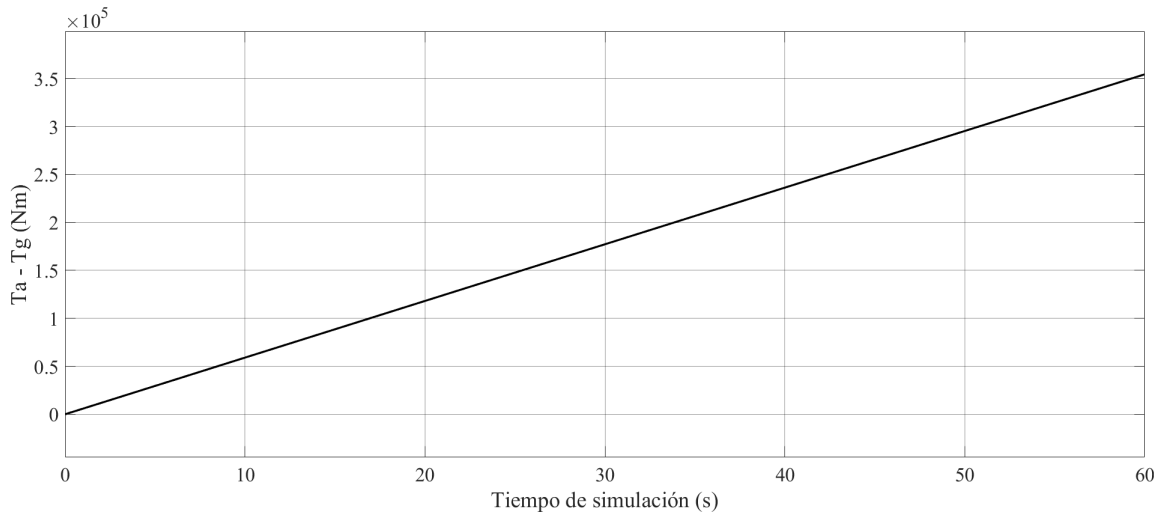


Figura 4.2. Gráfica de diferencias de torques empleando Simulink.

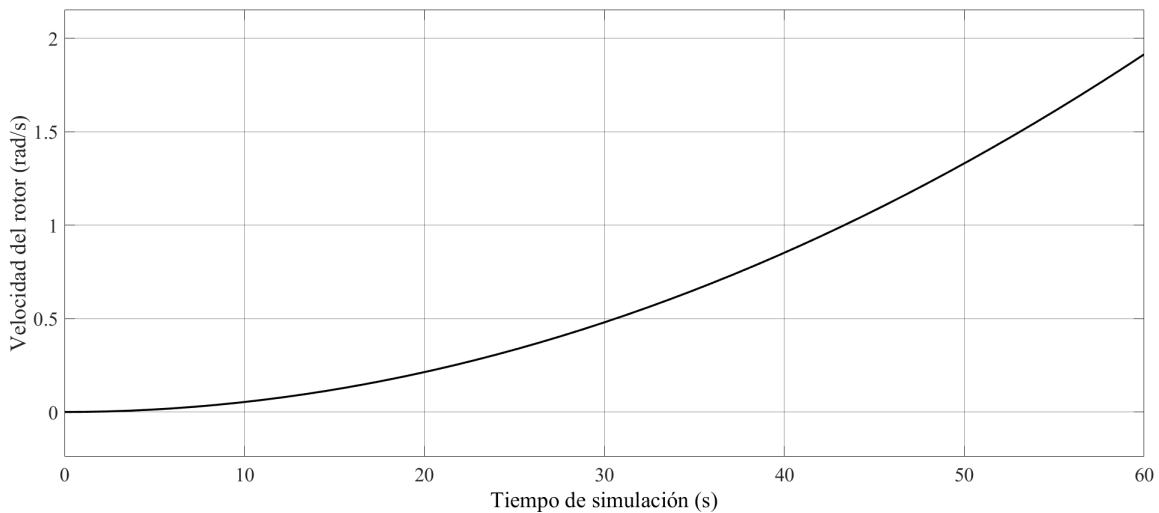


Figura 4.3. Gráfica de velocidad del rotor empleando Simulink.

De esta forma es posible estimar la diferencia de torques, a partir de los datos mostrados en la Tabla 4.2. Por otra parte, dado que en aerogeneradores con generador doblemente alimentado la demanda de potencia es de alrededor del 30% de la potencia capturada (Bianchi, De Battista, y Mantz, 2007), es posible establecer una relación empírica entre el torque del generador y el aerodinámico, de forma tal que: $T_g = 0.3 * T_a$.

Tabla 4.2. Datos generados en la caracterización de la entrada al sistema.

v (m/s)	w_r (rad/s)	$T_a - T_g$ (Nm)	T_a (Nm)	T_g (Nm)
0 - 3.0	0	0	0	0
3.5	0.0141	2610	3730	1120
4	0.0634	11740	16770	5030
4.5	0.1099	20340	29060	8720
5	0.1678	31050	44360	13310
5.5	0.2355	43580	62260	18680
6	0.3102	57410	82010	24600
6.5	0.4005	74120	105890	31770
7	0.5048	93430	133470	40040
7.5	0.6233	115360	164800	49440
8	0.7587	140410	200590	60180
8.5	0.8926	165200	236000	70800
9	1.0393	192340	274770	82430
9.5	1.1789	218180	311690	93510
10	1.3284	245850	351210	105360
10.5	1.4962	276900	395570	118670
11	1.64	303520	433600	130080
11.5	1.7938	331980	474260	142280
12	1.915	354450	506310	151890
12.5	2.0011	370350	529070	158720
13	2.0603	381310	544730	163420
13.5	2.0999	388610	555160	166550
14.0 - 25.0	2.1153	391480	559260	167780
25.5	1.5865	293620	419460	125840
26	1.0576	195740	279630	83890
26.5	0.5288	97860	139800	41940
27	0	0	0	0

Esta caracterización permitió dimensionar la magnitud de los torques que producirán el comportamiento esperado de w_r , no obstante este resulta ser un comportamiento idealizado que puede ser contrarrestado con modelos existentes en la literatura, tal es el caso del cálculo para T_a representado por (Boukhezzer et al., 2007) quienes emplean la ecuación 3.6 para un lambda (λ) de 6 y un $c_q = 0.03$.

Como se observa en la Figura 4.4 la comparativa entre el torque aerodinámico que se aproximó y el de la evaluación de la expresión matemática resulta ser válida solo para el rango de velocidad de viento referente al arranque del aerogenerador, que es donde el modelo del tren

motriz es empleado en la simulación dentro del ambiente virtual.

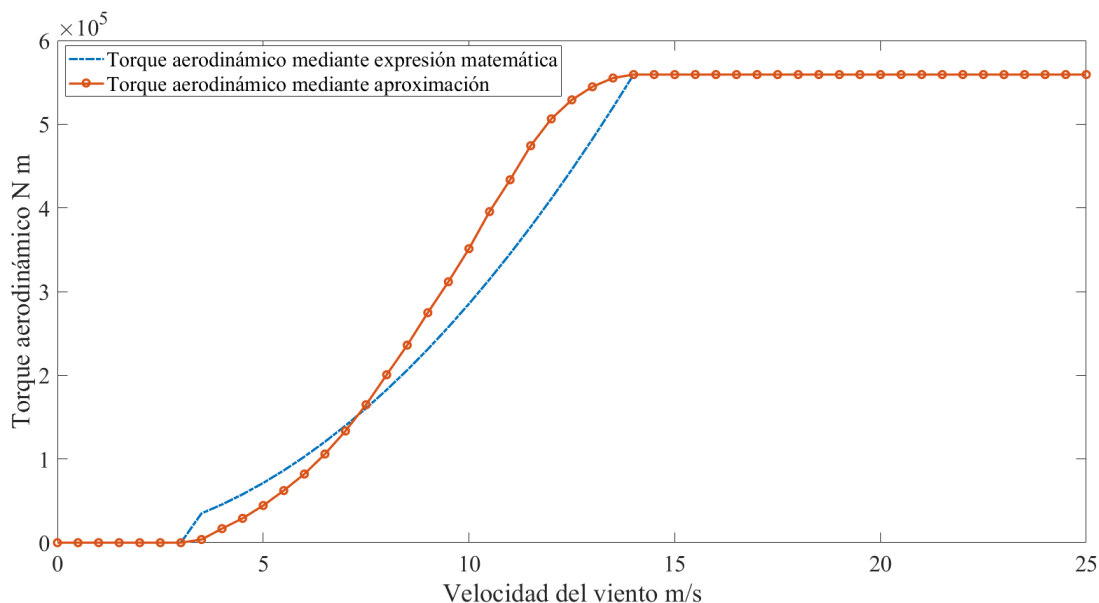


Figura 4.4. Gráfica de torque aerodinámico vs velocidad del viento mediante la expresión para T_a y su aproximación.

En la Figura 4.5 se observa el comportamiento del torque usando la aproximación y la ecuación del T_a para un cambio de viento de 0 a 11.5m/s , cuyos efectos sobre el modelo se muestra en la Figura 4.6. Para ambos casos la dinámica del torque esta representada por una rampa, siendo el valor final de 60 segundos el que corresponda a la aproximación o la evaluación de T_a presentadas en la Figura 4.4.

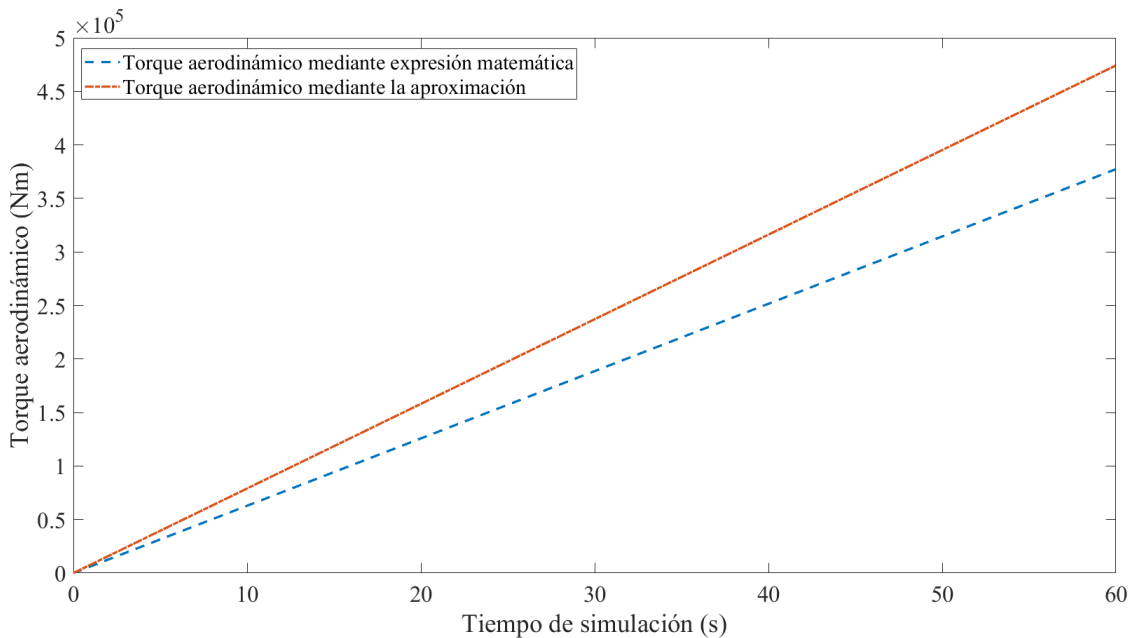


Figura 4.5. Gráfica de la dinámica del torque aerodinámico usando la evaluación de la expresión para T_a y su aproximación.

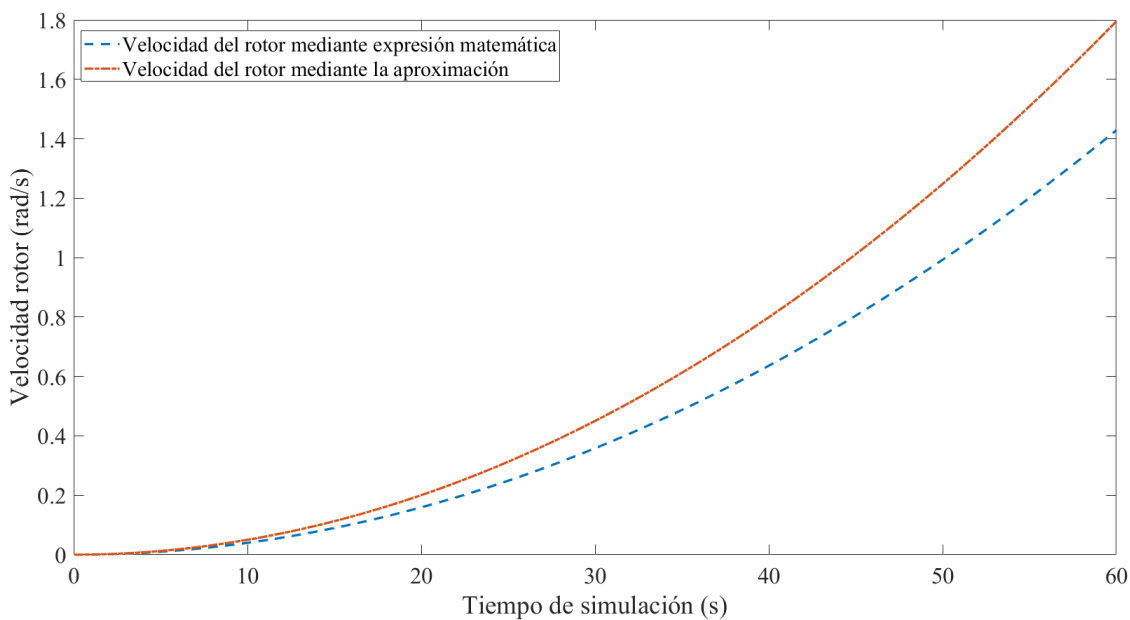


Figura 4.6. Gráfica de la dinámica de la velocidad del rotor usando la evaluación de la expresión para T_a y su aproximación.

En la Figura 4.7 se observa la respuesta de w_r a variaciones escalonadas del viento. Las

diferencias de torques son mostradas en la Figura 4.8, mientras en la Figura 4.9 se observa la variación de viento correspondiente.

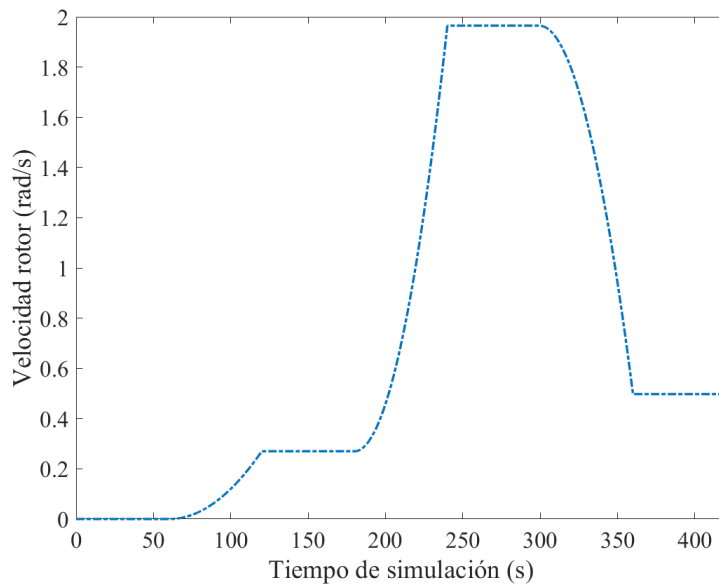


Figura 4.7. Gráfica de respuesta de w_r a variaciones escalonadas de viento.

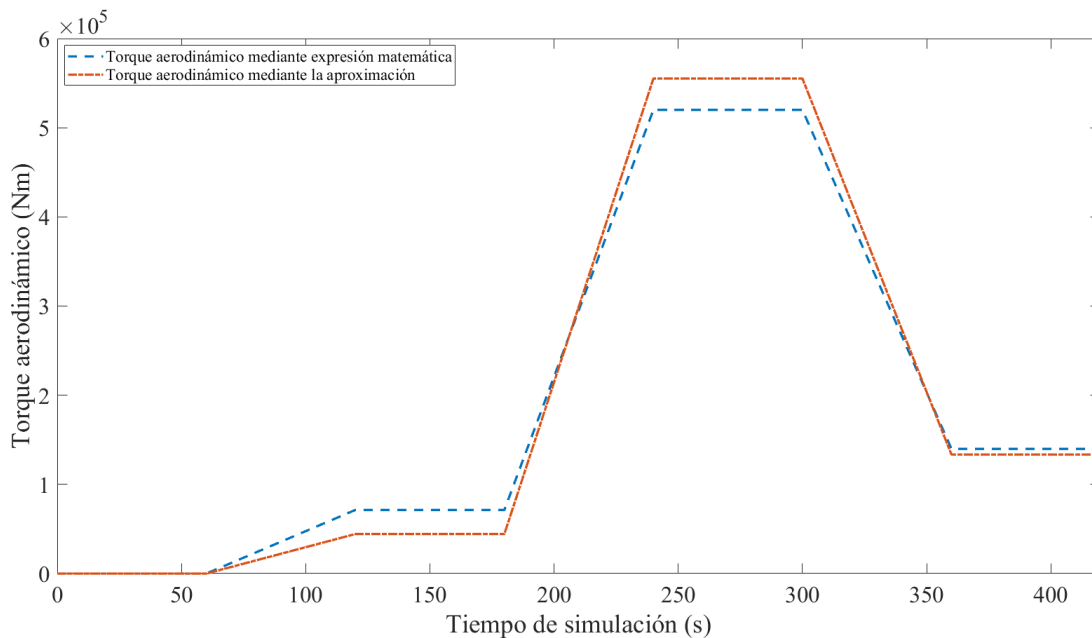


Figura 4.8. Gráfica de diferencias de torques ($T_a - T_g$) a variaciones escaladas de viento.

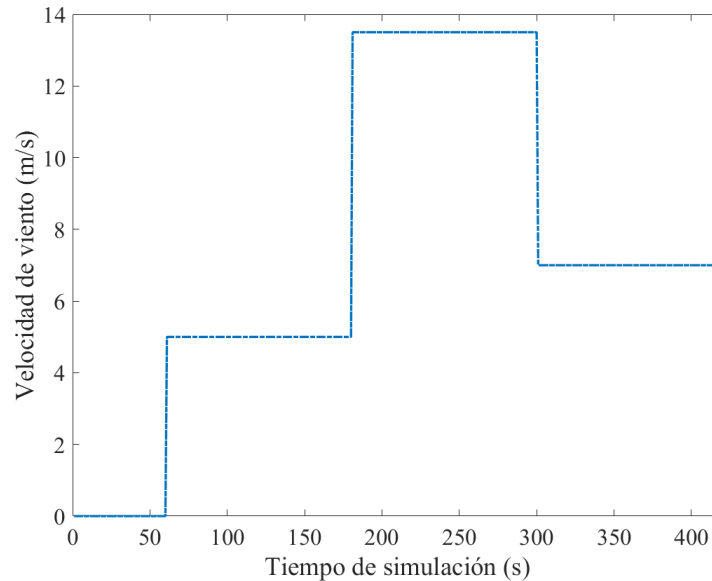


Figura 4.9. Gráfica de las variaciones escalonadas del viento.

La Figura 4.9 ejemplifica el papel que tendría el usuario en el ambiente virtual al realizar variaciones escalonadas del viento. Para la validación del modelo se programó un método numérico Runge Kutta de cuarto orden mismo que se implementó en el ambiente virtual que se describe en la siguiente sección.

4.2 Ambiente virtual

En la Figura 4.10 se muestra el diagrama de flujo de la integración del modelo matemático al ambiente virtual desarrollado en Unity, de acuerdo a la nomenclatura de (Joyanes, 1996). El sistema inicia con una declaración de argumentos constantes que hacen referencia a las características del aerogenerador utilizado en este trabajo, y la evaluación de las ecuaciones 3.14 y 3.15. Dada la variación de la velocidad del viento por parte del usuario, se obtiene β , y se calcula T_a empleando la ecuación 3.6 y la relación considerada entre T_a y T_g , para finalmente dar solución a la ecuación 3.13 mediante el método numérico Runge Kutta, generando como salida el valor de la velocidad del rotor en estado estable que es usado para dar movimiento al tren motriz dentro del ambiente virtual. En la Figura 4.11 se muestra el proceso la obtención

del valor de β a partir de su aproximación lineal empleando las ecuaciones 3.3, 3.4 y 3.5.

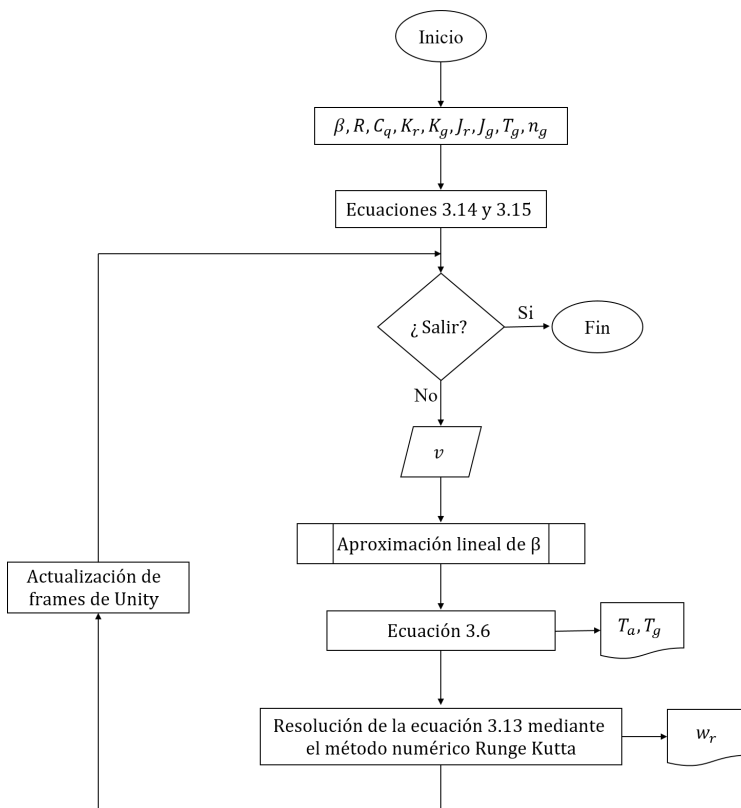


Figura 4.10. Diagrama de flujo de la integración del modelo matemático al ambiente virtual.

El usuario podrá variar las velocidades del viento de manera escalonada en incrementos de 0.5 m/s , en un rango de 0 a 27 m/s , observando los cambios respectivos en la velocidad del rotor (se requiere alzar la vista) y en el ángulo β .

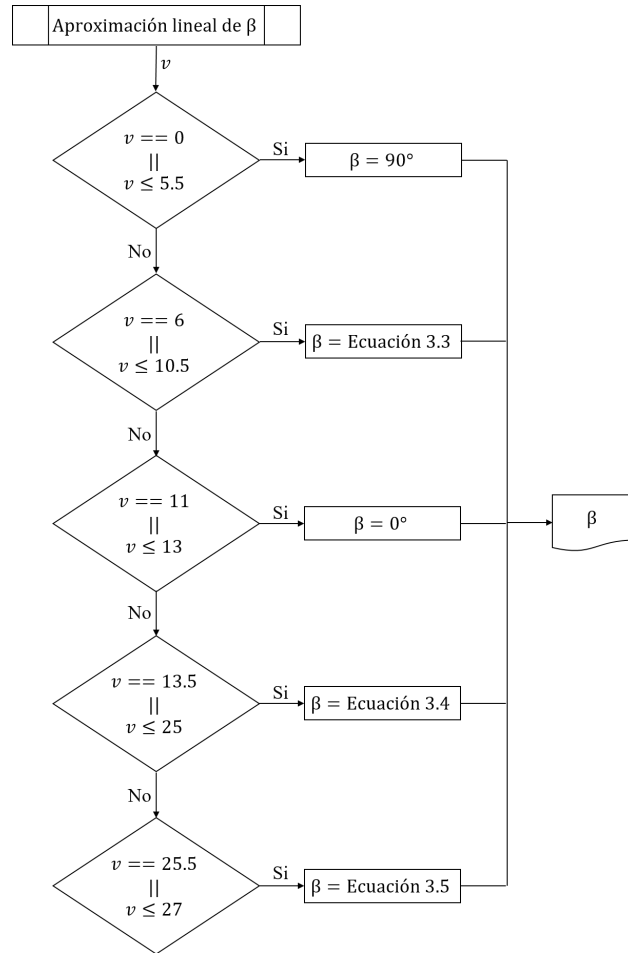


Figura 4.11. Diagrama de flujo para el cálculo de Beta.

La Figura 4.12 presenta la vista inicial del sistema, donde se le muestran al usuario las instrucciones de uso del mismo.



Figura 4.12. Vista principal del sistema.

Tal como se mencionó en la sección 3.5 el sistema cuenta con dos escenarios: al exterior y al interior de la góndola. En la Figura 4.13 se muestra una vista exterior del sistema.

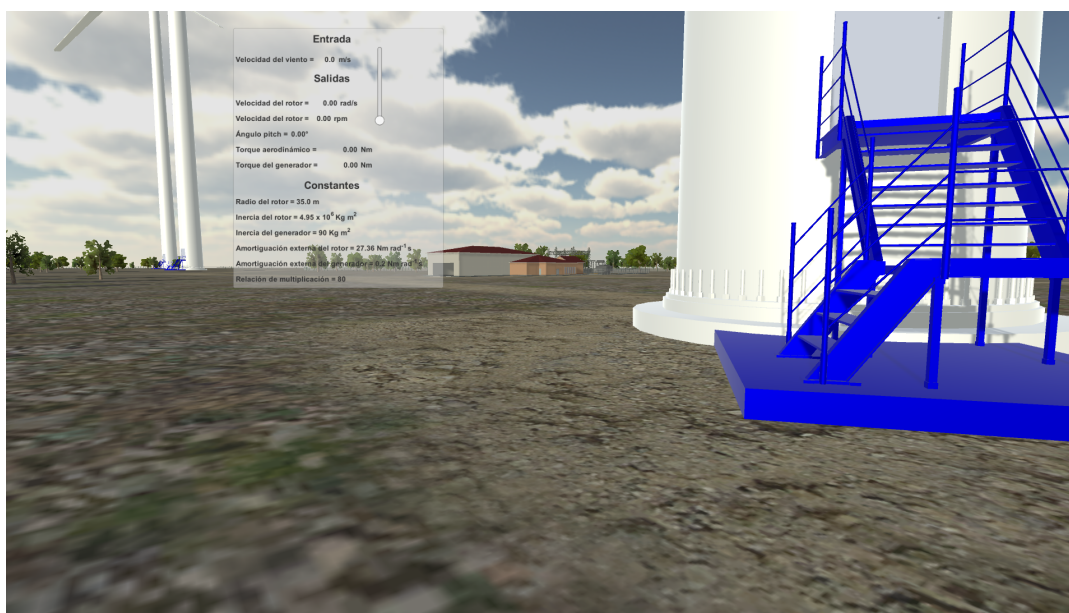


Figura 4.13. Vista al exterior del aerogenerador.

En la Figura 4.14 se muestra una vista al interior de la torre permitiendo observar los compo-

mentos que se encuentran al interior, incluyendo la escalera que permite subir a la góndola.



Figura 4.14. Vista al interior de la torre.

Las Figuras 4.15 y 4.16 muestran el interior de la góndola, para una velocidad de entrada de 13.5 m/s (que se ubica en zona de velocidad de arranque, véase Figura 3.2), obteniendo una $w_r = 1.9653 \text{ rad/s} = 18.77 \text{ rpm}$, un $T_a = 520029.50 \text{ Nm}$, y un $T_g = 156008.90 \text{ Nm}$, para un $\beta = 88.7^\circ$. Cabe recordar que de acuerdo con el planteamiento realizado en el Capítulo 3, en la simulación del movimiento del rotor en la zona de arranque se hace uso de un modelo de una masa y su solución mediante un método numérico mientras que para el movimiento de β se emplea una curva característica experimental (véase Figura 3.3).

En la Figura 4.17 se muestran los datos que contiene el panel informativo, agrupados en entrada, salidas y constantes. La barra deslizador se encuentra relacionada con los cambios de la velocidad del viento.

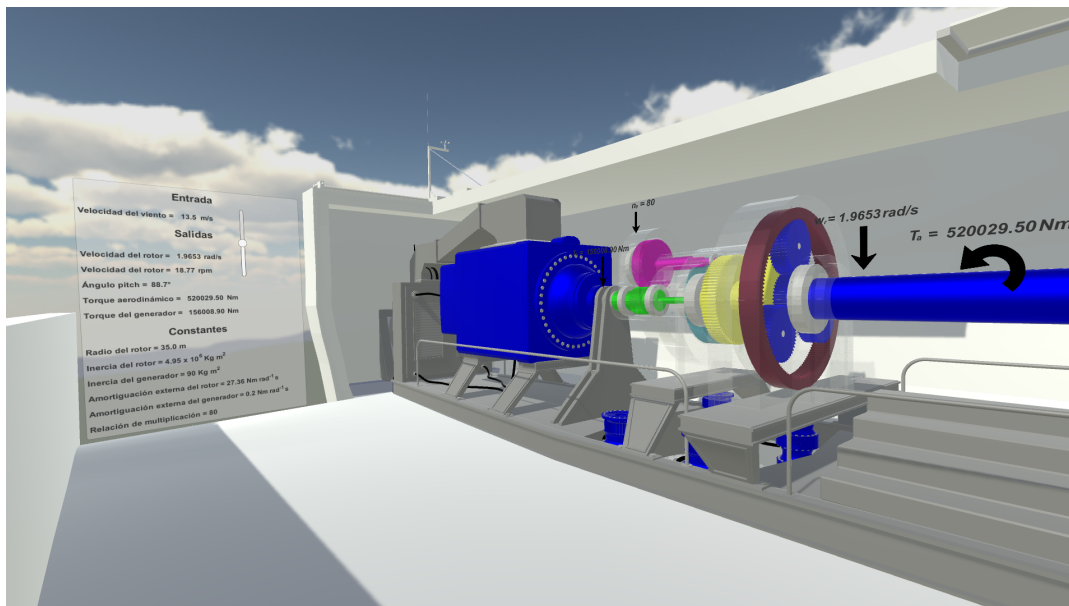


Figura 4.15. Señalamientos de los elementos al interior de la góndola.

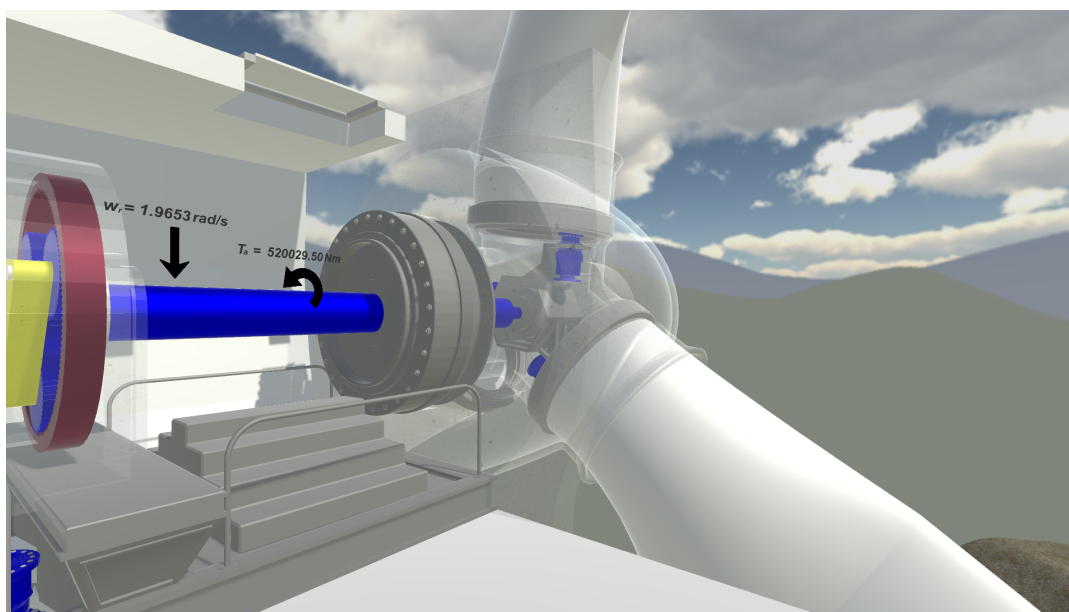


Figura 4.16. Vista del comportamiento del tren motriz a una velocidad del viento de 13.5 m/s.



Figura 4.17. Panel informativo.

Para una velocidad del viento de 14.0 m/s (zona de velocidad nominal) se tiene un $w_r = 2.1153 \text{ rad/s} = 20.20 \text{ rpm}$, un $T_a = 559263.60 \text{ Nm}$ y un $T_g = 167779.10 \text{ Nm}$, tal como se muestra en la Figura 4.18. Para este caso β asume el valor de 87.5° , el cual es observado a través del movimiento de las palas.

En la Figura 4.19 se muestra el error numérico absoluto de la resolución del modelo implementado en la herramienta de Matlab y Unity. Es de señalar que la implementación del modelo es válida para el rango de 3.5 a 13.5 m/s . Como se observa el valor máximo del error presentado es de solo 0.0033 rad/s .

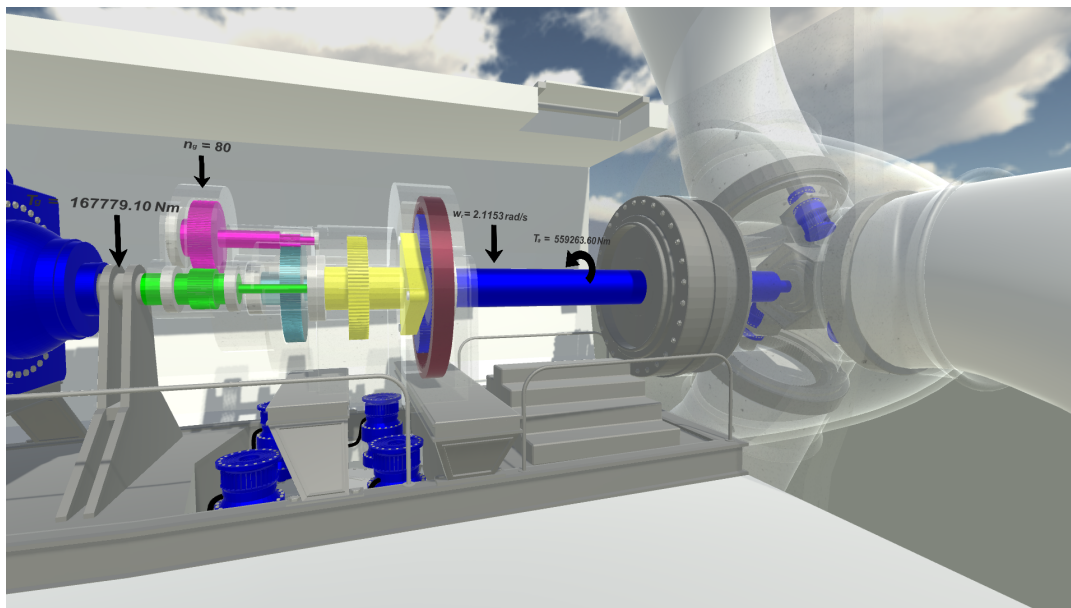


Figura 4.18. Vista del comportamiento del tren motriz a una velocidad del viento de 14.0 m/s .

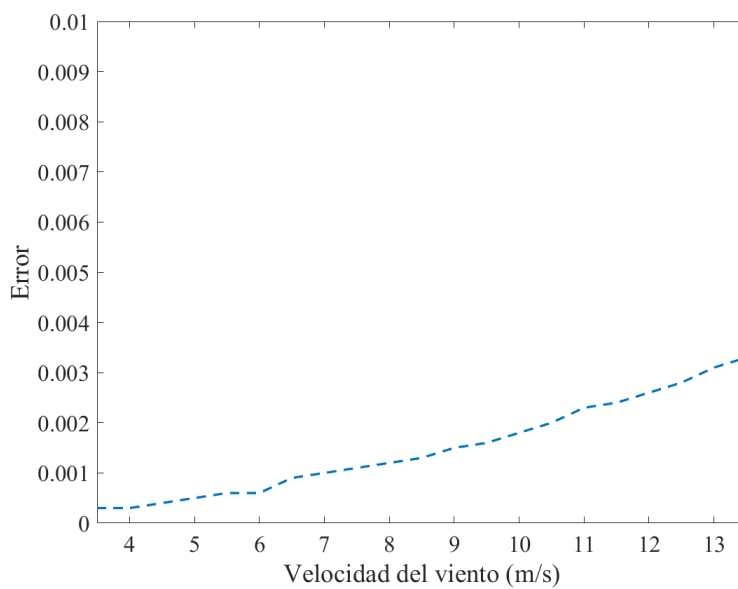


Figura 4.19. Error en la resolución en Unity del modelo implementado respecto a Matlab.

Conclusiones y trabajos futuros

A continuación se describen las conclusiones del presente trabajo de tesis y los trabajos relacionados que se sugieren alrededor del tema desarrollado.

Conclusiones

En el presente trabajo de tesis se desarrolló la simulación virtual 3D de un aerogenerador de alta potencia empleando un modelo de una masa para el modelado del tren motriz.

De los trabajos realizados se pueden citar las siguientes aportaciones:

- Se realizó el diseño de la nariz, la torre, la góndola, las palas y la multiplicadora en software de CAD, logrando así un completo ensamble del aerogenerador, lo que permitió su mejor manipulación en el entorno de Unity.
- El aerogenerador ensamblado en Solidworks fue exportado al entorno de Unity para desarrollar un ambiente virtual conformado por dos escenarios, uno al interior y otro al exterior del aerogenerador ensamblando. En el escenario exterior se puede observar al aerogenerador a nivel del suelo, mientras en escenario interior se observan los detalles del tren motriz. Además, a manera de apoyar al usuario en la interpretación de los datos visuales se incluyó un panel informativo con los parámetros y variables consideradas en el modelo.
- Basado en un modelo de dos masas y su simplificación a un modelo de una masa se dio solución mediante un método numérico al modelado del tren motriz; empleando

parámetros de aerogeneradores con características similares al que se aborda en esta tesis.

- Debido a que el modelo del tren motriz se encuentra en un lazo de control cerrado, fue necesario caracterizar la entrada que permitiera obtener el comportamiento esperado de la velocidad del rotor, para ello se hizo una caracterización experimental de la entrada contrarrestando el resultado con el uso de una expresión matemática manejada en la literatura. Los resultados de simulación obtenidos corroboraron la pertinencia del uso de la expresión matemática para ser usada como entrada al modelo del tren motriz.
- Se integró el modelo al entorno de unity a través de la programación del método numérico Runge Kutta de cuarto orden. El error numérico entre la implementación de Matlab y Unity presenta un valor máximo de 0.0033.
- En (Iliyasu et al., 2017), (Santos et al., 2012), (Matus, 2017) la representación de los elementos del aerogenerador es limitada, de igual forma en (Do et al., 2013) y (Zou, 2015) no obstante que los elementos 3D presentan un mayor detalle los valores en los paneles informativos son estáticos; estos señalamientos remarcan las diferencias respecto al trabajo presentado en esta tesis.

Trabajos futuros

A partir de los resultados obtenidos, como trabajos a futuro se sugieren las siguientes tareas:

- Considerar en el modelado los elementos aerodinámicos, de control, electrónicos y eléctricos del sistema para que al ser implementados en el ambiente virtual permitan la visualización de la dinámica del sistema a diferentes controladores.
- Diseñar los elementos en CAD del interior de la nariz que permite el anclaje de los motores, y de otros componentes internos del generador, para visualizar el comportamiento de un mayor número de elementos móviles.

-
- Incluir en el ambiente virtual desarrollado elementos en 2D (gráficas) que faciliten al usuario percibir los cambios no permisibles de manera visual.
 - Explorar las ventajas que se tendría en la interpretación de la información al pasar el sistema actual a un modo inmersivo.
 - Evaluar desde el punto de vista educativo los atributos del simulador, en cuestiones de aprendizaje de la asignatura de Introducción a la Tecnología de los Aerogeneradores de la Maestría en Ciencias en Energía Eólica.

Referencias

- Acciona. (2016). *Wind power evolved: Aw 1500*. (Recuperado de: http://www.accionawindpower.es/media/1390114/11052015-aw1500_inusa_abril-2.pdf)
- Adaramola, M. (2014). *Wind turbine technology: Principles and design*. Toronto, Canada: CRC Press.
- Bekker, J. C. (2012). *Efficient modelling of a wind turbine system for parameter estimation applications*. Stellenbosch: Stellenbosch University. Stellenbosch, Sudáfrica.
- Bianchi, F. D., De Battista, H., y Mantz, R. (2007). *Wind turbine control systems*. Argentina, La Plata, London: Springer.
- Boukhezzar, B., Lupu, L., Siguerdidjane, H., y Hand, M. (2007). Multivariable control strategy for variable speed, variable pitch wind turbines. *Renewable Energy*, 32(8), 1273–1287.
- Boukhezzar, B., y Siguerdidjane, H. (2011). Nonlinear control of a variable-speed wind turbine using a two-mass model. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 26(1), 149–162.
- Cantón, D. (2017). *Desarrollo de un entorno de realidad virtual inmersivo integrando dispositivos ihc para inspección en aerogeneradores*. Tesis de licenciatura, Universidad del Istmo, campus Tehuantepec. Oaxaca, México.
- Choi, B. K., y Kang, D. (2013). *Modeling and simulation of discrete event systems*. John Wiley & Sons: Hoboken, New Jersey.
- Do, P. T., Moreland, J. R., Delgado, C., Wilson, K., Wang, X., Zhou, C., y Ice, P. (2013). Effects of 3d virtual simulators in the introductory wind energy course: a tool for teaching

- engineering concepts. *Comprehensive Psychology*, 2, 04–07.
- Fortmann, J. (2014). *Modeling of wind turbines with doubly fed generator system*. Duisburg, Germany: Springer.
- Fujimoto, R. M. (2000). *Parallel and distributed simulation systems*. Wiley New York.
- Geng, H., y Yang, G. (2009). Robust pitch controller for output power levelling of variable-speed variable-pitch wind turbine generator systems. *IET Renewable Power Generation*, 3(2), 168–179.
- Hernández, M., Hernández, M., Arellano, J. J. A., y Toledo, A. G. (2015). Videojuego didáctico empleando el kinect para la manipulación virtual de un aerogenerador. *Pistas Educativas*, 36(112), 483–503.
- Iiyasu, I., Tanimu, I., y Obada, D. (2017). Preliminary multidomain modelling and simulation study of a horizontal axis wind turbine (hawt) tower vibration. *Nigerian Journal of Technology*, 36(1), 127–131.
- Jerald, J. (2015). *The vr book: human-centered design for virtual reality*. Morgan & Claypool: EE. UU.
- Jha, A. R. (2011). *Wind turbine technology*. CRC press: New York, U.S.
- Joyanes, L. (1996). *Fundamentos de programación: Algoritmo y estructura de datos (2a ed.)*. Madrid: McGraw-Hill.
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., y Rogers, A. L. (2010). *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons: United Kingdom.
- Matus, A. P. (2017). *Simulador tridimensional de la cinemática del rotor de un aerogenerador tripala*. Tesis de licenciatura, Universidad del Istmo, campus Tehuantepec. Oaxaca, México.
- Santos, D., Alonso, J., Carrasco, J., y Arnaltes, S. (2012). Problem-based learning in wind energy using virtual and real setups. *IEEE Transactions on Education*, 55(1), 126–134.
- Saravanakumar, R., y Jena, D. (2014). Control of variable speed variable pitch wind turbine at above and below rated wind speed. *Journal of Wind Energy*, 2014, 1–14.
- Schaffarczyk, A. (2014). *Understanding wind power technology: Theory, deployment and optimisation*. John Wiley & Sons: United Kingdom.
- Sherman, W. R., y Craig, A. B. (2002). *Understanding virtual reality: Interface, application,*

and design. San Francisco: Elsevier.

- Sánchez, R., Ortega, J., González, J., y Reyes, G. (2017). Uso de plataformas para el desarrollo de aplicaciones virtuales en el modelado de robot manipuladores. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 14(3), 279–287.
- Sørensen, J. N. (2016). *General momentum theory for horizontal axis wind turbines* (Vol. 4). Switzerland: Springer.
- Technologies, U. (2018). *Company facts*. (Recuperado de: <https://unity3d.com/public-relations>.)
- Trujillo, K. d. R. (2018). *Construcción virtual y simulación de un parque eólico*. Tesis de maestría, Universidad del Istmo, campus Tehuantepec. Oaxaca, México.
- Zou, M. (2015). *Industrial decision support system with assistance of 3d game engine: Comparing 3d and 2d interfaces for wind power system*. Tesis de maestría, Instituto de tecnología Blekinge. Karlskrona, Suecia.