



# UNIVERSIDAD MICHUACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

---

---

## FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

MODELADO Y SIMULACIÓN  
DE UNA UNIDAD DE GENERACIÓN  
EÓLICA EN CORRIENTE DIRECTA.

TESIS PROFESIONAL  
Para obtener el título de  
**INGENIERO ELECTRICISTA**

PRESENTA:  
**JOSÉ ALEJANDRO ORTÍZ MEDINA**

ASESOR DE TESIS:  
**DR. GILBERTO GONZÁLEZ AVALOS**



Morelia, Mich. Diciembre del 2012

---

# Agradecimientos

A mi asesor de tesis Dr. Gilberto Gonzales Avalos, por todos los conocimientos y enseñanzas que me compartió, el tiempo dedicado, los cuales fueron de gran ayuda para hacer posible la culminación del trabajo final.

A la Universidad Michoacana de san Nicolás de Hidalgo en la cual curse desde la preparatoria hasta la licenciatura, gracias por todo el apoyo que me brindaron compañeros, profesores y amigos los cuales ya forman parte de mi vida.

Y también quiero agradecer a mi familia que siempre estuvo apoyándome en las buenas y en malas económicamente, ya que sin ellos no hubiese sido posible culminar mi estancia académica. A Maricruz Vallejo Nieto por apoyarme incondicionalmente en todos los momentos difíciles.

Quiero agradecer a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) por permitirme realizar mis prácticas profesionales en el área de distribución, gracias por el apoyo que me brindaron desde el primer día que llegue.

---

# Dedicatoria

A mi familia y hermanos que tuvieron confianza y también por darme la oportunidad de estudiar y seguir adelante a pesar de las adversidades y superarme día a día en la vida.

A lo largo del camino que he recorrido han pasado muchas personas que se convirtieron en parte esenciales en mi vida, agradezco a cada uno de ellos por sus conocimientos, vivencias y experiencias agradables que pase junto a ellos. Algunos están aun conmigo otros ya no lo están, pero gracias a ellos que dieron forma a la persona que soy ahora.

---

# Resumen

En esta tesis se realizó un estudio de los aerogeneradores de baja potencia, los cuales son un factor importante hoy en día para las fuentes alternas de energía, las cuales cada día se da un gran paso y más personas optan por este medio para la producción de energía eléctrica. La energía eólica es una fuente alterna de energía la principal característica que tiene es factible ya que es más económica que la energía solar.

Se analiza los diferentes tipos de aerogeneradores, así como su clasificación de baja y alta potencia, los cuales están conformados de los mismos elementos electromecánicos, los cuales hacen posible la generación. Los aerogeneradores más importantes son los de eje vertical, estos tienen varios componentes que realizan una función importante para conformar en sí lo que viene siendo un aerogenerador.

Se realiza el modelado matemático del viento, de la turbina eólica y del generador de CD del aerogenerador, el cual se comporta de manera lineal por lo tanto se conecta a un inversor trifásico para tener a la salida el voltaje deseado.

Y finalmente se realiza la simulación para observar su comportamiento y comprobar el modelo matemático de todo el sistema que conforma el aerogenerador.

---

# Índice

<b>Agradecimientos</b>	<b>ii</b>
<b>Dedicatoria</b>	<b>iii</b>
<b>Resumen</b>	<b>iv</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de Tablas</b>	<b>x</b>
<b>Capítulo 1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 La energía eólica	1
1.2 Objetivo	2
1.3 Justificación	2
1.4 Metodología científica	3
1.5 Contenido de la tesis	3
<b>Capítulo 2 Antecedentes de Aerogeneradores</b>	<b>5</b>
2.1 Introducción	5
2.1.1 Reseña histórica	5
2.1.2 Molinos de bombeo	7
2.1.3 Turbinas modernas	7
2.2 Aerogeneradores	9
2.2.1 Clasificación de los aerogeneradores	10
2.2.1.1 Por la posición del aerogenerador	10
2.2.1.2 Por la posición del equipo con respecto al viento	12
2.2.1.3 Por su potencia nominal	13
2.2.1.4 Tipo de generador eléctrico	14
2.2.1.5 Por el número de aspas	14
2.3 Principales Elementos de los Aerogeneradores	15
2.3.1 Rotor	16
2.3.2 Góndola	17
2.3.3 Multiplicadora	18

---

2.3.4	Generador	18
2.3.5	Sistema de giro y angulación	19
2.3.6	Sistema de refrigeración	21
2.3.7	Torre	21
<b>2.4</b>	<b>Impactos ambientales</b>	<b>21</b>
2.4.1	Impacto visual	22
2.4.2	Impacto del ruido	22
<b>Capítulo 3</b>	<b>Modelado del Sistema de Generación</b>	<b>24</b>
<b>3.1</b>	<b>Introducción</b>	<b>24</b>
<b>3.2</b>	<b>Propuesta del sistema de generación</b>	<b>25</b>
<b>3.3</b>	<b>Turbina eólica</b>	<b>26</b>
<b>3.4</b>	<b>Generador de CD</b>	<b>28</b>
3.4.1	Antecedentes	28
3.4.2	Principio de funcionamiento de la máquina de CD	30
3.4.2.1	Acción del conmutador	31
3.4.3	Componentes de un generador	32
3.4.3.1	Construcción del generador de CD	33
3.4.3.2	Devanado de campo	34
3.4.3.3	Armadura	34
3.4.3.4	Escobillas	35
3.4.3.5	Conmutador	36
3.4.3.6	Tipos de devanados del generador	36
<b>3.5</b>	<b>Tipos de generadores de CD</b>	<b>38</b>
3.5.1	Generador de excitación separada	39
3.5.2	Generador en derivación	40
3.5.3	Generador en serie	41
3.5.4	Generador compuesto	43
<b>3.6</b>	<b>Modelado del generador</b>	<b>44</b>
<b>Capítulo 4</b>	<b>Simulación de la unidad de generación</b>	<b>50</b>
<b>4.1</b>	<b>Introducción</b>	<b>50</b>
<b>4.2</b>	<b>Modelado del aire</b>	<b>51</b>
4.2.1	El viento	51
4.2.2	Velocidad del viento	51

---

---

4.2.3 Potencia Constante	52
4.2.4 Energía útil del viento	52
<b>4.3 Tren de engranes</b>	<b>55</b>
4.3.1 Clasificación	56
4.3.1.1 Simples	56
4.3.1.2 Compuestos	57
<b>4.4 Modelado de la turbina eólica</b>	<b>58</b>
4.4.1 Sistema Aerodinámico	59
4.4.2 Modelo de la turbina	59
4.4.2.1 Modelo estático	60
4.4.2.2 Modelado dinámico	63
<b>4.5 Simulación</b>	<b>67</b>
4.5.1 Simulación de todo el sistema	68
4.5.1.1 Simulación del sistema con viento variable	72
4.5.1.2 Simulación del sistema con viento constante	74
<b>Capítulo 5 Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>76</b>
5.1 Conclusiones	76
5.2 Recomendaciones	77
<b>Bibliografía</b>	<b>78</b>

---

# Lista de Figuras

Figura 2.1 Molino holandés y manchego.....	6
Figura 2.2 Molino de bombeo.....	7
Figura 2.3 Diseño actual de la mayoría de aerogeneradores.....	8
Figura 2.4 Sistema de conversión eólica.....	10
Figura 2.5 Clasificación de aerogeneradores por orientación del rotor. ....	11
Figura 2.6 Clasificación de aerogeneradores de rotor horizontal por la entrada de viento.....	12
Figura 2.7 Evolución de los tamaños y potencia de los aerogeneradores. ....	13
Figura 2.8 Esquema Aerogenerador. ....	15
Figura 2.9 Pala aerogenerador.....	17
Figura 3.1 Sistema de generación propuesto.....	26
Figura 3.2 Turbinas eólicas .....	27
Figura 3.3 Generador de CD.....	29
Figura 3.4 Generador de CD elemental (a) y el voltaje inducido como función del tiempo en un generador (b). ....	30
Figura 3.5. a) Generador elemental de CD, b) Variación de voltaje a la salida.....	32
Figura 3.6. Partes principales de un generador de CD. ....	33
Figura 3.7 Devanado de campo de una maquina de corriente directa. ....	34
Figura 3.8 Armadura de una maquina de CD.....	35
Figura 3.9 Ubicación de las escobillas de la máquina de CD.....	35
Figura 3.10 Estructura del conmutador. ....	36
Figura 3.11 Diagrama del devanado polar de una maquina de CD con devanado imbricado.....	37
Figura 3.12 Maquina de CD con devanado ondulado. ....	38
Figura 3.13 Circuito equivalente de un generador de CD en derivación. ....	40





---

# Lista de Tablas

Tabla 2.1 Clasificación de aerogeneradores de acuerdo a su potencia nominal..... 13

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 La energía eólica

Los vientos pueden crearse debido a una gran cantidad de factores, pero principalmente son el resultado de las diferencias de presión creada por el calentamiento del sol sobre la tierra y la atmósfera, y el calor de la superficie. Las diferencias regionales en presión que resultan de este calentamiento desparejo crean el viento. Dado que este fenómeno es una parte continuamente recurrente, representa una fuente inagotable de energía.

La energía eólica es la energía que posee el viento y puede ser aprovechada directamente o ser transformada a otros tipos de energía como es el caso de la energía eléctrica.

El hombre ha aprovechado para sus fines industriales la energía contenida en el viento desde tiempos inmemorables. La energía eólica impulso botes a lo largo del rio Nilo alrededor de 5000 años A.C. alrededor del año 200 A.C.se usaron molinos de viento para bombear agua y también con un eje vertical molían granos en Persia y el medio Este.

Cuando los colonizadores llevaron esta tecnología al nuevo mundo a finales del siglo XIX comenzaron a usar los molinos de viento para bombear agua en granjas y ranchos, posteriormente para generar electricidad.

Hoy en día se puede producir electricidad con gran eficiencia gracias a aerogeneradores de grandes dimensiones denominados turbinas de viento. El uso de la energía eólica se ha extendido a todo el mundo, la potencia eólica instalada ha

crecido de manera exponencial; los países con mayor crecimiento son: Alemania, Dinamarca y España.

La energía eólica en la costa es una aplicación con un futuro prometedor, en particular en países con una alta densidad de población, donde es difícil encontrar un sitio apropiado en tierra. Los costos de construcción son muy superiores en la costa, pero también lo es en la generación de energía.

Actualmente, la industria eólica considera esta fuente de energía no como una alternativa, sino como un recurso renovable viable y eficiente. Como prueba, la industria menciona que las aeroturbinas generan tanta energía como la producida por un reactor nuclear de dimensiones medianas o una planta de energía de carbón; teniendo en cuenta que el hecho de que las aeroturbinas pueden costar una tercera parte menos en su operación, mantenimiento y necesidades de combustible. Los expertos tienen confianza en que la energía eólica llegue a jugar un papel importante en la producción mundial de la energía del futuro.

## 1.2 Objetivo

El objetivo de esta tesis es modelar y simular la unidad eólica para analizar su comportamiento, así como su operación para la generación de energía, observando el funcionamiento conectado a la red trifásica.

## 1.3 Justificación

La energía eólica tiene dos grandes ventajas: es renovable y contamina menos comparada con otras fuentes, por lo que esto justifica el desarrollo e investigación de esta tecnología, además de que es una alternativa viable para satisfacer la creciente demanda de energía eléctrica.

La energía eólica está teniendo el mayor crecimiento entre las fuentes de energía alternativas debido principalmente en la reducción de sus costos. El potencial de la energía eólica en la costa es más grande que en tierra debido a la velocidad del viento y a la gran área disponible.

El viento es un recurso común es abundante e inagotable, de distribución amplia y limpio. Otro atractivo de la energía eólica es su distribución, en tanto que unos pocos países controlan el petróleo mundial, casi todos los países pueden aprovechar la energía eólica.

## **1.4 Metodología científica**

La metodología científica aplicada a este trabajo esta formado por las siguientes etapas:

1. Se implementará los diferentes modelos para el aerogenerador y partes que lo conforman mediante diagramas de bloques.
2. Validación de los modelos mediante el programa 20-sim.
3. Se utilizarán los modelos del aire, turbina, generador e inversor que hacen posible el funcionamiento del generador eólico para simular y analizar el comportamiento a diferentes entradas de viento.

## **1.5 Contenido de la tesis**

En el primer capítulo se da una breve introducción de la energía eólica, y la importancia que tiene en las fuentes alternas de energía, así como los beneficios que esta aporta.

En el capítulo dos se presenta la teoría en general de los aerogeneradores como lo es, su funcionamiento, construcción, clasificación, tamaño entre otros

aspectos importantes. También se da una introducción de los impactos ambientales que los aerogeneradores provocan en el medio.

En el capítulo tres se realiza el modelo matemático del aerogenerador, utilizando un generador de CD y un inversor trifásico para posteriormente conectarlo a la red suministradora (CFE).

En el capítulo cuatro se realiza el modelado del viento así como el de la turbina eólica, se cambian los parámetros para tener varios resultados para ver su comportamiento. Finalmente, se realiza la simulación del modelo del aerogenerador, teniendo como resultados importantes para el estudio de los aerogeneradores.

En el capítulo cinco se dan conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

# Capítulo 2

## Antecedentes de Aerogeneradores

### 2.1 Introducción

En este capítulo se presentan los principios generales de funcionamiento de los generadores eólicos, así, como su comportamiento. En primer lugar, se procede a explicar las diferentes configuraciones de los mismos, distinguiendo dos grandes familias: los de eje horizontal y los de eje vertical.

Se introducen los conceptos básicos que permitan realizar un balance de potencias para el sistema formado por el aerogenerador y la carga aplicada al mismo.

#### 2.1.1 Reseña histórica

Un molino es una máquina que transforma el viento en energía aprovechable, que proviene de la acción de la fuerza del viento sobre unas aspas oblicuas unidas a un eje común. El eje giratorio puede conectarse a varios tipos de maquinaria para moler grano, bombear agua o generar electricidad. Cuando el eje se conecta a una carga, como una bomba, recibe el nombre de molino de viento. Si se usa para producir electricidad se le denomina generador de turbina de viento. Los molinos tienen un origen remoto.

La referencia más antigua que se tiene es un molino de viento que fue usado para hacer funcionar un órgano en el siglo I era común. Los primeros molinos de uso práctico fueron construidos en Sistan, Afganistán, en el siglo VII. Estos fueron

molinos de eje vertical con hojas rectangulares. Aparatos hechos de 6 a 8 velas de molino cubiertos con telas fueron usados para moler cereales o extraer agua.

En Europa los primeros molinos aparecieron en el siglo XII en Francia e Inglaterra y se distribuyeron por todo el continente. Eran unas estructuras de madera, conocidas como torres de molino, que se hacían girar a mano alrededor de un poste central para levantar sus aspas al viento. El molino de torre se desarrolló en Francia a lo largo del siglo XIV. Consistía en una torre de piedra coronada por una estructura rotativa de madera que soportaba el eje del molino y la maquinaria superior del mismo.

Estos primeros ejemplares tenían una serie de características comunes. De la parte superior del molino sobresalía un eje horizontal. De este eje partían de cuatro a ocho aspas, con una longitud entre 3 y 9 metros. Las vigas de madera se cubrían con telas o planchas de madera. La energía generada por el giro del eje se transmitía, a través de un sistema de engranajes, a la maquinaria del molino emplazada en la base de la estructura. Los molinos de eje horizontal fueron usados extensamente en Europa Occidental para moler trigo desde 1180 en adelante.

En la figura 2.1 se ilustra dos tipos de molinos que se utilizaban para moler en las granjas.



Figura 2.1 Molino holandés y manchego.



### 2.1.2 Molinos de bombeo

En Estados Unidos, el desarrollo de molinos de bombeo, reconocibles por sus múltiples velas metálicas, fue el factor principal que permitió la agricultura y la ganadería en vastas áreas de Norteamérica, de otra manera imposible sin acceso fácil al agua. Estos molinos contribuyeron a la expansión del ferrocarril alrededor del mundo, supliendo las necesidades de agua de las locomotoras a vapor. En la figura 2.2 se muestra un molino de bombeo mas utilizado.



Figura 2.2 Molino de bombeo.

### 2.1.3 Turbinas modernas

Las turbinas modernas fueron desarrolladas a comienzos de 1980, si bien, los diseños continúan en desarrollo. La industria de la energía eólica en tiempos modernos comenzó en 1979 con la producción en serie de turbinas de viento por los

fabricantes Kuriant, Vestas, Nordtank, y Bonus. Aquellas turbinas eran pequeñas para los estándares actuales, con capacidades de 20 a 30 kW cada una. Desde entonces, la talla de las turbinas ha crecido enormemente, y la producción se ha expandido a muchos países.

A continuación, se muestra en la figura 2.3 un ejemplo claro de las turbinas eólicas actuales, la cuales cuentan con tres aspas.



Figura 2.3 Diseño actual de la mayoría de aerogeneradores.

## 2.2 Aerogeneradores

En la actualidad existe toda una enorme variedad de modelos de aerogeneradores, diferentes entre sí tanto por la potencia proporcionada, como el número de palas o incluso por la manera de producir energía eléctrica. Pueden clasificarse atendiendo a distintos criterios. Se pueden dividir en dos categorías generales, con base en la orientación del eje rotor: de eje horizontal y de eje vertical. Ambos pueden transformar la energía eólica en movimiento mecánico o de electricidad.

La energía eólica ofrece un importante potencial para el suministro de cantidades sustanciales de electricidad sin los problemas de producción que presentan la mayoría de las formas convencionales de generación. La ventaja de estas fuentes es que no contaminan el medio ambiente con gases ni agravan el efecto invernadero, lo cual es una valiosa alternativa frente a las fuentes que utilizan combustibles no renovables como el petróleo.

Un aerogenerador es una máquina capaz de captar la energía cinética del viento y convertirla en energía eléctrica. La captación de potencia del viento y transformación en mecánica se realiza en el rotor del aerogenerador. La transformación de la energía mecánica en eléctrica se realiza por medio de un generador eléctrico. Entre ambas partes existe un sistema de transmisión y un multiplicador.

En la Figura 2.4 se muestra un sistema típico de conversión eólica.

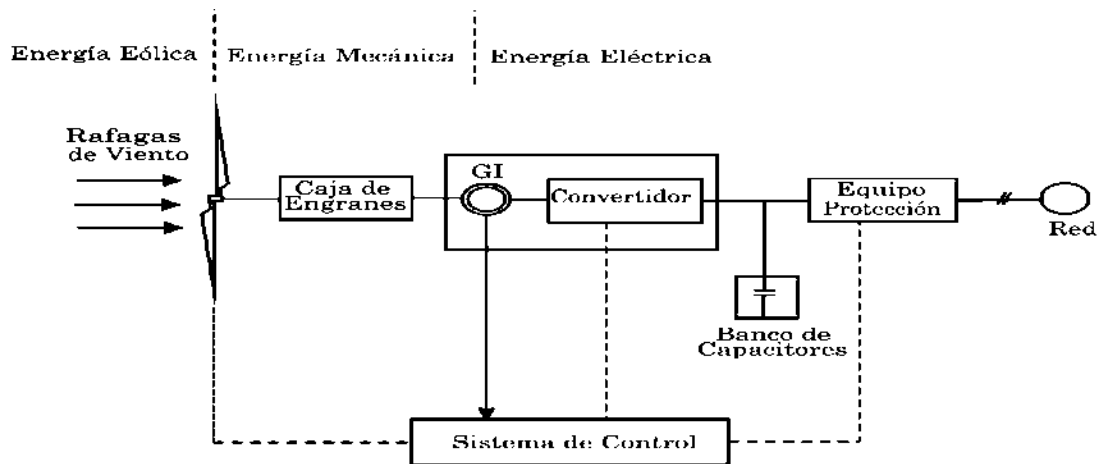


Figura 2.4 Sistema de conversión eólica.

## 2.2.1 Clasificación de los aerogeneradores

En la actualidad existe toda una enorme variedad de modelos de aerogeneradores, diferentes entre sí tanto por la potencia proporcionada, como el número de palas o incluso por la manera de producir energía eléctrica. Pueden clasificarse atendiendo a distintos criterios. Se pueden dividir en dos categorías generales, con base en la orientación del eje rotor: de eje horizontal y de eje vertical. Ambos pueden transformar la energía eólica en movimiento mecánico o de electricidad.

Los aerogeneradores se pueden clasificar de acuerdo a las siguientes características:

### 2.2.1.1 Por la posición del aerogenerador

Un aspecto muy importante que se debe tomar en cuenta es la posición del aerogenerador a continuación se muestra la clasificación

**Eje horizontal.** Son los más habituales y en ellos se centra el mayor esfuerzo de diseño en los últimos años.

**Eje vertical.** Sus principales ventajas son que no necesita un sistema de orientación al ser omnidireccional y que el generador, multiplicador, etc., son instalados a ras de suelo, lo que facilita su mantenimiento y disminuyen sus costos de montaje. Sus desventajas frente a otro tipo de aerogeneradores son sus menores eficiencias, la necesidad de sistemas exteriores de arranque en algunos modelos, y que el desmontaje del rotor por tareas de mantenimiento hace necesaria que toda la maquinaria del aerogenerador sea desmontada.

A continuación se ilustra en la figura 2.5 los dos tipos de aerogeneradores más comunes en la actualidad.



a).- Eje horizontal.

b).- Eje vertical (Darrieus).

Figura 2.5 Clasificación de aerogeneradores por orientación del rotor.

### 2.2.1.2 Por la posición del equipo con respecto al viento

El aerogenerador puede estar a favor del viento (sotavento), o en contra (barlovento) siendo esta última la opción más empleada, de esta forma se minimiza el efecto de la sombra de torre, se producen menores cargas de fatiga y se disminuye la emisión de armónicas. La máquina a sotavento tiene como ventaja la de no necesitar un mecanismo de orientación, ya que tanto el rotor como la cubierta se diseñan para seguir la dirección del viento, aunque su comportamiento se ve afectado por las turbulencias que crean el efecto de la sombra de la torre.

#### a. Sotavento

Se les denomina máquinas corriente abajo, tienen el rotor situado en la cara a sotavento de la torre. La ventaja que tiene es que pueden ser construidos sin un mecanismo de orientación, si el rotor y la góndola tienen un diseño apropiado que hace que la góndola siga al viento pasivamente. Sin embargo, en grandes máquinas esta es una ventaja algo dudosa, pues se necesitan cables para conducir la corriente fuera del generador. Si la máquina no cuenta con un mecanismo de orientación los cables pueden llegar a sufrir una torsión excesiva.

#### b. Barlovento

La principal ventaja es que evita el abrigo del viento tras la torre. Este tipo de mecanismo necesita un mecanismo de orientación para mantener el rotor de cara al viento.

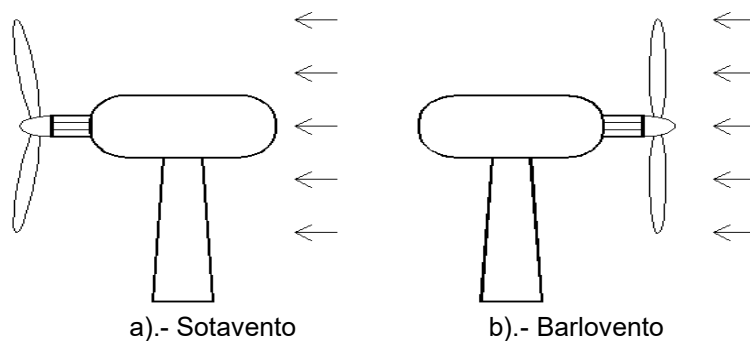


Figura 2.6 Clasificación de aerogeneradores de rotor horizontal por la entrada de viento.

**2.2.1.3 Por su potencia nominal**

Por su potencia nominal los aerogeneradores se clasifican de acuerdo a la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1 Clasificación de aerogeneradores de acuerdo a su potencia nominal.**

Clasificación de aerogeneradores de acuerdo a su potencia nominal (KW)	
Baja	< 3
Media	< 100
Alta	> 100

La Figura 2.7 se representa el tamaño, altura y diámetro de los aerogeneradores de rotor horizontal de acuerdo a su potencia nominal, para un

Aerogenerador de 5 KW se tiene un rotor de 115 metros de diámetro y una altura de torre de 120 metros.

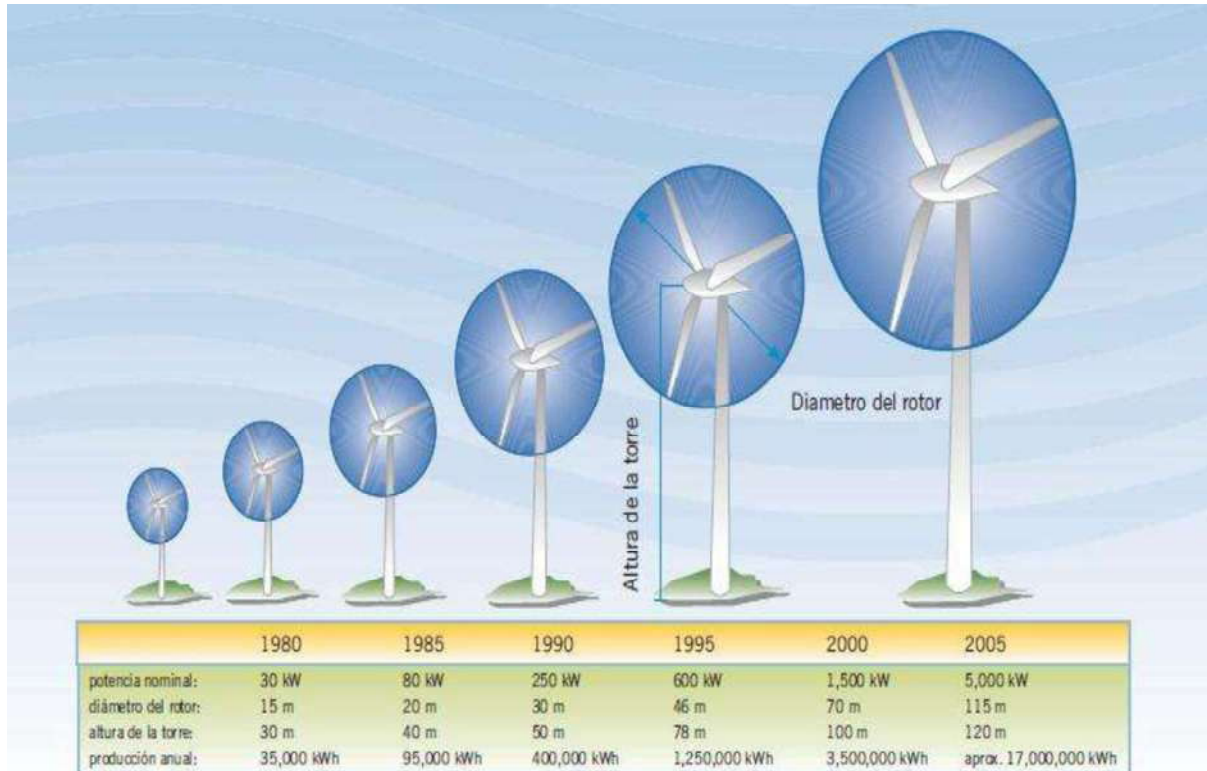


Figura 2.7 Evolución de los tamaños y potencia de los aerogeneradores.

### 2.2.1.4 Tipo de generador eléctrico

Los tipos de generadores se clasifican de acuerdo a su generador eléctrico los más usuales son:

- Síncrono.
  - Rotor devanado.
  - Imanes permanentes.
- Asíncrono.
  - Jaula de ardilla.
  - Rotor devanado.

### 2.2.1.5 Por el número de aspas

La clasificación de las turbinas eólicas de acuerdo al número de aspas o palas se clasifican como sigue a continuación:

- Dos.
- Tres.

De acuerdo a la tecnología de aerogeneradores con diferentes tipos de generadores eléctricos, actualmente existe una variedad de conceptos innovadores con diseños incluyendo dispositivos de electrónica de potencia.



## 2.3 Principales Elementos de los Aerogeneradores

Los elementos fundamentales en aerogeneradores eólicos son de gran importancia, por lo cual debemos saber el funcionamiento y ubicación de cada uno de ellos tener un concepto más amplio de los aerogeneradores eólicos.

En la figura 2.8 se ilustra los elementos principales de un aerogenerador comercial.

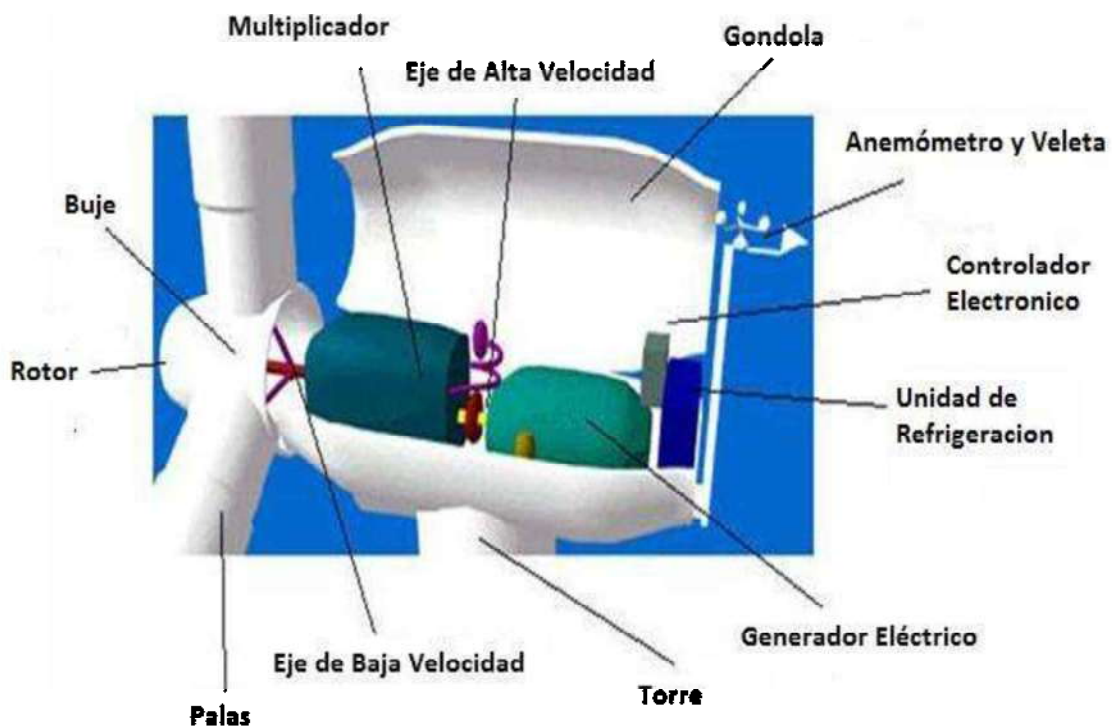


Figura 2.8 Esquema Aerogenerador.

### 2.3.1 Rotor

Se encuentra unido al eje principal para la transmisión del giro, y se puede dividir en 3 partes diferenciadas.

1. **Nariz:** Es un elemento aerodinámico que se sitúa en frente de la dirección de viento sobresaliendo de la zona de unión entre las palas y el buje. Su misión consiste en re direccionar el viento de la parte frontal del rotor a los respiraderos de la góndola y a la vez evitar turbulencias en la parte frontal del rotor.
2. **Buje:** Es la pieza de unión entre las palas y el eje principal, y por lo tanto el transmisor de la fuerza del viento al interior de la góndola. La unión al eje debe ser de forma rígida, pero con las palas pueden darse dos caso. El primero si es un generador de tres palas, en cuyo caso la unión a las palas debe comportarse también rígidamente, en el caso de aerogeneradores bipala es necesario que la unión entre palas y buje permita una ligera oscilación de hasta tres grados respecto al plano normal del eje de rotación.
3. **Palas:** Las palas deben suelen ser fabricadas con materiales con gran resistencia estructural y a la fatiga para su correcto funcionamiento a lo largo de los 25 años de vida media que se supone a los aerogeneradores, teniendo en cuenta que estarán afectados de inclemencias climáticas, fuerte vientos y en los casos de aerogeneradores offshore a salinidad. Además, deben ser fácilmente mecanizables para dotarlas de un diseño aerodinámico que minimice las cargas sobre el resto de la estructura y capte eficazmente la fuerza del viento. Los materiales empleados para

cumplir todas estas premisas son materiales compuestos de fibra de vidrio y epoxis o poliéster, fibra de carbono etc.

En la figura 2.9 se ilustra el modelo de las aspas que utilizan los aerogeneradores.

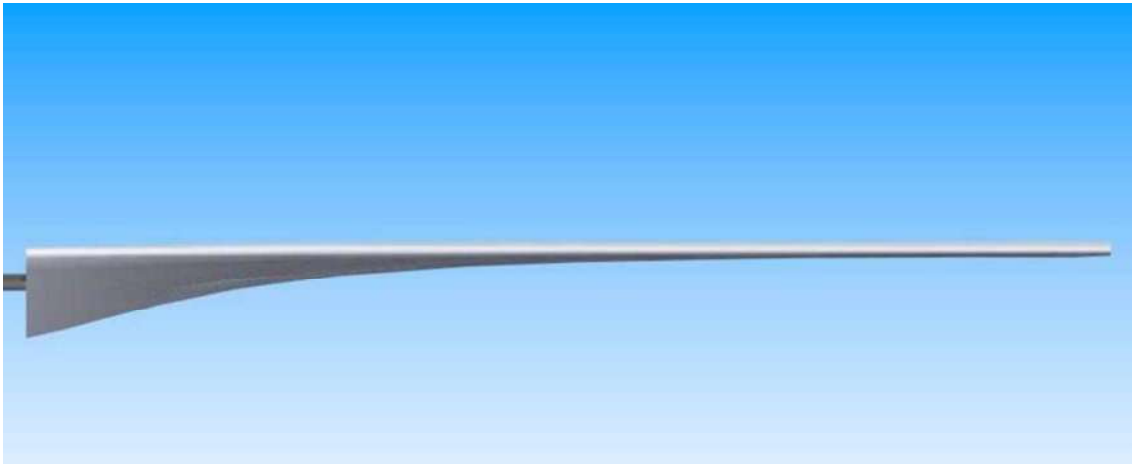


Figura 2.9 Pala aerogenerador.

### 2.3.2 Góndola

Es el chasis principal del aerogenerador, se sitúa en la parte superior de la torre y en su interior se encuentran los elementos eléctricos y mecánicos necesarios para convertir el giro del rotor en energía eléctrica. Se encuentra unida a la torre por una corona dentada para permitir la orientación del rotor al viento, y rotor y las palas por el eje principal que transmitirá la fuerza del viento al multiplicador y al motor sucesivamente. En su parte exterior lleva instalado un anemómetro y una veleta conectados a los sistemas de control de aerogenerador, y unos respiraderos para garantizar la refrigeración del motor. Se construyen en acero forjado y placas de fibra de vidrio.

### 2.3.3 Multiplicadora

El multiplicador es una caja de engranajes que convierte la baja velocidad de giro y alta potencia del eje principal en una velocidad de giro adecuada para el funcionamiento del motor a costa de la potencia. El giro se transmite del multiplicador a el motor mediante el eje secundario, de menor diámetro que el eje principal, de forma similar a como ocurría entre el rotor y la caja de engranajes con el eje principal.

El tren de potencia es el encargado de transmitir la energía producida por el giro del rotor al motor de una forma aprovechable por este para la generación de energía eléctrica. Está formado por el eje principal, caja multiplicadora y eje secundario. El eje principal es una pieza tubular de acero macizo de gran diámetro, unido solidariamente al rotor y que gira a velocidades de entre 22 y 64 r.p.m., según el modelo de aerogenerador y las condiciones de operación. Sin embargo un motor estándar de generación eléctrica necesita velocidades de giro de entorno a las 1500 r.p.m., por lo que es necesario un multiplicador que aumente la velocidad de giro transmitida.

### 2.3.4 Generador

El generador convierte la energía mecánica producida por el rotor en energía eléctrica.

Existen tres tipos de generadores:

- 1) Asíncrono (jaula de ardilla).
  - Más sencillo de fabricación.
  - Menor versatilidad.
  - Necesita una sincronización suave a red (tiristores).

- No regula el factor de potencia, necesita etapas de condensadores.
- 2) Asíncrono con rotor bobinado.
- Permite inyectar y extraer energía del rotor.
  - Al inyectar diferentes frecuencias al rotor se consigue poder generar a velocidades muy diferentes de la de sincronismo.
  - Generador de velocidad variable (de 900 a 1500 r.p.m.).
  - Al permitir la extracción de energía del rotor, se consigue generar hasta un 10% de la energía producida.
- 3) Síncrono (múltipolo).
- Control optimizado.
  - No usa multiplicadora.
  - Bajo deslizamiento.
  - Reducción de tensión.

Suelen utilizarse generadores asíncronos de jaula de ardilla, junto con baterías de condensadores para mejorar su factor de potencia. La conexión a la red puede ser directa o indirecta a la red, dependiendo si la turbina trabaja a velocidad constante o variable. Trabajando conectado de forma indirecta a la red conseguimos aprovechar los picos de velocidad del viento, pero el generador produce energía de frecuencia variable por lo que se necesitan equipos de adecuación para volcar la energía en la red. En la forma directa de conexión, la propia red limita la velocidad de giro del generador, por lo que no aprovecha los picos de mayor energía del viento.

### **2.3.5 Sistema de giro y angulación**

Los sistemas de control en un aerogenerador tienen dos importantes cometidos, el primero es el aprovechamiento máximo de la fuerza del viento

mediante la orientación del rotor, el segundo es la protección del aerogenerador ante velocidades de viento que podrían dañar la instalación.

Para el cometido de la orientación el aerogenerador cuenta con equipos anemométricos y de medida de la dirección del viento instalado sobre la góndola. Los datos recogidos pasan al ordenador de control que según un algoritmo determinado decidirá como deberá mover la góndola gracias al sistema de corona dentada y motor de giro instalados en la base de la góndola en su unión con la torre. Es necesario aclarar que el control sobre la orientación de el rotor no se realiza a tiempo real, si no que el algoritmo, con los datos recogidos, debe ser capaz de garantizar que realmente el viento a cambiado de dirección de forma estable, antes de que se produzca el giro de la góndola, ya que en caso contrario daría lugar a un movimiento errático del sistema que reduciría su eficiencia.

En los casos que el viento ha superado la velocidad nominal de trabajo, en la que se alcanza la máxima potencia producida por el equipo, y llega a la velocidad de parada, existen dos métodos de control, para evitar que puedan producirse daños.

- **Activo:** Mediante un dispositivo mecánico las palas giran el perfil enfrentado al viento cambiando su aerodinámica, por lo que para velocidades mayores de viento para las que están diseñadas a trabajar de forma óptima, aprovechan en menor medida, mediante el cambio de ángulo, la velocidad del viento, y la potencia suministrada y cargas inerciales permanecen en un rango de trabajo apropiados. Es el método más caro pero también es el que ofrece un mejor control.
- **Pasivo:** En este caso las palas no poseen ningún tipo de mecanismo de variación del ángulo ofrecido al viento, si no que permanecen fijas al rotor en todo momento. En su lugar, las palas con este mecanismo de control se diseñan de tal manera que para velocidades demasiado elevadas del viento se producen turbulencias en la parte de la pala de baja presión, por lo que la diferencia de presiones entre un lado y otro de la pala disminuye. Es decir, pasado un límite de velocidad del viento, este disminuye la fracción de energía transmitida al movimiento de las palas por las turbulencias ocasionadas,

rebajando la velocidad de giro del rotor. Este método de control es mucho más económico, pero menos exacto y eficiente que el activo, aún así, alrededor de dos tercios de los aerogeneradores instalados hoy en día utilizan este método.

### **2.3.6 Sistema de refrigeración**

Su función es evacuar el calor del generador y demás sistemas eléctricos junto con el de todas las partes vitales sometidas a rozamientos que por su trabajo, que aunque esté bien lubricado el calentamiento podría provocar su degradación y posible avería.

### **2.3.7 Torre**

La torre es la estructura que soporta a una determinada altura al mecanismo productor de electricidad del aerogenerador. Al elevar los componentes se consigue un aprovechamiento mayor de la fuerza del viento, pues a una mayor altura sobre el nivel del suelo mayor será su velocidad, y por lo tanto, también la velocidad de rotación de las palas. Su diseño suele consistir en un tronco cónico o tubular hueco de acero, en cuyo interior se alojan los equipos accesorios de suelo y se facilita un acceso seguro mediante una escalera a la góndola.

## **2.4 Impactos ambientales**

La energía eólica tiene muchas facetas ambientales positivas. Es limpia, renovable y un modo de generación sustentable.

Algunos impactos ambientales del aprovechamiento de la energía eólica son los factores visuales y paisajistas, el ruido e interferencia electromagnética. Aunque ninguno de esos efectos durara más que la vida operacional del sistema.

### 2.4.1 Impacto visual

Una turbina eólica típica actualmente usada para generación de electricidad en gran escala conectada a la red, tiene una potencia de alrededor de 600 kW, está soportada por una torre de 40- 60 m y dispone de tres palas de un diámetro de 42 a 48 m. Aunque la tendencia hacia las máquinas más grandes continúa, esta configuración es la más popular en el mercado, especialmente en áreas con elevada densidad de población

La mayoría de las turbinas son actualmente instaladas sobre esbeltas torres de acero tubular, las cuales son para la mayoría de las personas estéticamente más agradables que las torres enrejadas clásicas de las líneas de alta tensión. Los diseñadores profesionales son empleados por muchas compañías para mejorar la apariencia de sus máquinas y en muchos casos arquitectos paisajistas están involucrados en la evaluación visual de los proyectos.

### 2.4.2 Impacto del ruido

Las turbinas eólicas modernas son bastante silenciosas y lo serán más en el futuro. El ruido depende de la forma aerodinámica, del tipo de material y de los tratamientos superficiales y calidad de mecanizado, así como de las dimensiones y otras características de los elementos mecánicos que constituyen el aerogenerador, así como también de la velocidad y turbulencia del viento.

Un inconveniente añadido es que al no disponer, como sucede en otras instalaciones industriales, del aislamiento que supone un edificio, el viento sirve de elemento transmisor directo.

Diez años atrás las turbinas eólicas eran mucho más ruidosas que las actuales. Se ha puesto mucho esfuerzo para crear la presente generación de



turbinas como máquinas silenciosas a través tanto del diseño de las palas como el de las partes mecánicas de la máquina.

# Capítulo 3

## Modelado del Sistema de Generación

### 3.1 Introducción

En este capítulo se va a implementar el modelado de la unidad de generación, esto es, desde que el aire entra a la turbina por medio de las aspas generando el movimiento mecánico requerido, para posteriormente convertirlo a energía eléctrica, una vez realizado este proceso obtenemos voltaje de CD, para convertirlo en CA es necesario someter el proceso a un convertidor de CD/CA, una vez realizado la conversión de voltaje lo podemos conectar a la red eléctrica trifásica. Para ello es necesario llevar a cabo el proceso requerido por las diferentes etapas de conversión de energía mecánica a energía eléctrica.

En la actualidad los convertidores de CD/CA son muy usuales en la industria eléctrica, debido a que el voltaje de corriente alterna (CA) es rectificado por elementos electrónicos como diodos, así obtenemos la conversión el voltaje deseado.

Mientras que los generadores de CD son más habituales en las industrias que en la generación de energía eléctrica, es decir, en la generación de energía se utilizan generadores síncronos o de inducción debido a que tiene que ser transportada y posteriormente distribuida a los usuarios. Las pérdidas son menores, pero la desventaja es que se tienen que utilizar la electrónica de potencia para su mejor funcionamiento.

Por ello se requiere implementar en los aerogeneradores los generadores de CD ya que la conversión de una magnitud a otra se realizará por medio de una etapa, mientras que en los generadores síncronos se utilizan dos etapas, el sistema es más efectivo si hay menos pérdidas y esto se logra reduciendo el número de etapas de conversión de la energía.

## 3.2 Propuesta del sistema de generación

En la actualidad uno de los factores importantes que hay que tener en cuenta es el consumo de energía eléctrica, conforme pasan los años la demanda aumenta considerablemente, por lo tanto se requiere aumentar la generación de la energía eléctrica.

La mayoría de las plantas generadoras son termoeléctricas enseguida las hidroeléctricas así como también las geotermoeléctricas teniendo en último lugar las fuentes alternas de energía, de ahí se desprende la energía eólica.

Como podemos denotar todos los generadores que se utilizan en las plantas generadoras, manejan un generador síncrono (ya sea de inducción, imanes permanentes etc.) debido a su gran eficiencia.

La importancia de generar energía eléctrica es muy importante en la actualidad debido a la demanda excesiva, por ello es necesario tomar en cuenta que las fuentes alternas son una gran alternativa, para ello se requiere mayor apoyo y un mejoramiento en las estructuras que se tienen.

A continuación, en la figura 3.1 se muestra un diagrama del sistema propuesto para la generación de energía eléctrica mediante un aerogenerador con un generador de CD, teniendo a la salida del generador un voltaje de CD, que posteriormente se convertirá a voltaje CA mediante un inversor trifásico, así podemos tener una interconexión a la red suministradora de energía eléctrica.

Este proceso es muy favorable tanto para el sistema de generación como para el sistema al que se conecta como lo es la red eléctrica de comisión federal de electricidad (CFE), ya que al utilizar menos componentes de electrónica de potencia la calidad de la energía será favorable.

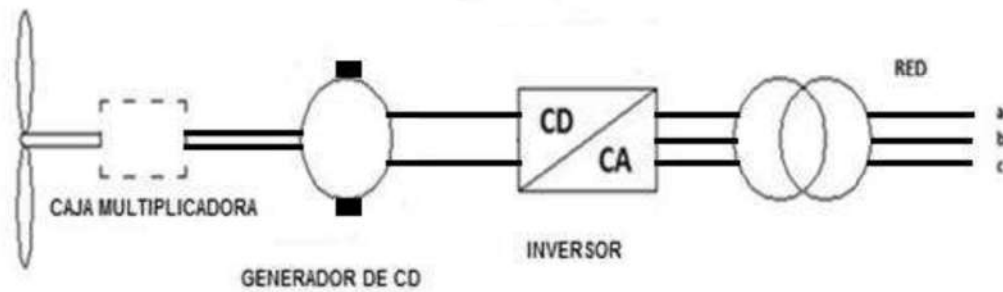


Figura 3.1 Sistema de generación propuesto

### 3.3 Turbina eólica

Una turbina eólica es un dispositivo mecánico que convierte la energía del viento en electricidad. Las turbinas eólicas se diseñan para convertir la energía del movimiento del viento (energía cinética) en la energía mecánica, movimiento de un eje. Después en los generadores de la turbina, ésta energía mecánica se convierte en electricidad.

La electricidad generada se puede almacenar en baterías, o utilizar directamente. Hay tres leyes físicas básicas que gobiernan la cantidad de energía aprovechable del viento. La primera ley indica que la energía generada por la turbina es proporcional a la velocidad del viento al cuadrado. La segunda ley indica que la energía disponible es directamente proporcional al área barrida de las paletas. La energía es proporcional al cuadrado de la longitud de las paletas. La tercera ley indica que existe una eficacia teórica máxima de los generadores eólicos del 59%.

En la práctica, la mayoría de las turbinas de viento son mucho menos eficientes que esto, y se diseñan diversos tipos para obtener la máxima eficacia posible a diversas velocidades del viento. Los mejores generadores eólicos tienen eficacias del 35% al 40%.

En la figura 3.2 se ilustra los aerogeneradores eléctricos más convencionales, los cuales forman parte de un parque eólico.



Figura 3.2 Turbinas eólicas.

En la práctica las turbinas eólicas se diseñan para trabajar dentro de ciertas velocidades del viento. La velocidad más baja, llamada velocidad de corte inferior que es generalmente de 4 a 5 m/s, ya que por debajo de esta velocidad no hay suficiente energía como para superar las pérdidas del sistema. La velocidad de corte superior es determinada por la capacidad de una máquina en particular de soportar fuertes vientos. La velocidad nominal es la velocidad del viento a la cual una máquina particular alcanza su máxima potencia nominal. Por arriba de esta velocidad, se puede contar con mecanismos que mantengan la potencia de salida en un valor constante con el aumento de la velocidad del viento.

Los elementos principales de cualquier turbina del viento son el rotor, una caja de engranajes, un generador, equipo del control y monitoreo y la torre.

Existen tres tipos de turbinas eólicas las cuales son: monopala, bipala y tripala esta última con más presencia en la generación de energía eólica. La razón principal para usar tres palas es el momento de inercia constante del rotor para todo el ángulo circunferencial del azimut respecto a los movimientos operacionales

alrededor del eje longitudinal de la torre. Todos los rotores con tres o mas palas tienen esta propiedad favorable.

### **3.4 Generador de CD**

Las máquinas de CD pueden funcionar como motor y como generador eléctrico su construcción es la misma, la diferencia es el flujo de potencia. Existen varios tipos de generadores de CD, que difieren en los métodos para obtener sus flujos de campo. Estos métodos afectan las características de salida de los diferentes tipos de generadores. Los más comunes son: de excitación separada, derivación (shunt), serie, compuesto acumulativo y compuesto diferencial.

Hoy en día los generadores de CD han sido remplazados en muchas aplicaciones por fuentes de potencia alterna y componentes electrónicos de estado solido. Esto ocurre incluso en los automóviles, unos de los usuarios más comunes de la potencia de CD.

Los generadores de CD son máquinas eléctricas que en la actualidad no se utilizan como lo hacían anteriormente, debido a que cuando requiere corriente directa (CD) ésta es convertida por elementos como lo son: diodos y rectificadores electrónicos. Los rectificadores realizan la función de convertir la corriente alterna (CA) en corriente directa (CD).

#### **3.4.1 Antecedentes**

El desarrollo de la máquina de CD se centra durante mucho tiempo en la búsqueda de procedimientos que transforman la CA inducida en una espira, al girar dentro de un campo magnético, en corriente unidireccional o de polaridad constante (CD).

La primera idea del conmutador o colector de delgas encargo de la rectificación mecánica de la tensión del devanado del rotor surge en 1831 y se debe a Pixii. Sin embargo, tuvieron que transcurrir 36 años más para que Gramme construyera en 1867 un dínamo con inducido en anillo dotada de un colector de delgas como el que actualmente se conoce. Posteriormente, surgió la idea del devanado en tambor para aprovechar más eficazmente el arrollamiento del inductivo y se propusieron los diferentes métodos de autoexcitación de la maquina, de tal forma que en 1886 se llego a una configuración básica, cuyos rasgos fundamentales coinciden con los de las máquinas modernas.

El desarrollo de los motores de CD sigue una línea paralela a la de los dinamos y su empleo se debe al principio de reciprocidad ya formulado por Faraday y Lenz.

La figura 3.3 muestra un generador de cd elemental, el cual es simplemente un generador de CA equipado con un rectificador mecánico llamado conmutador.

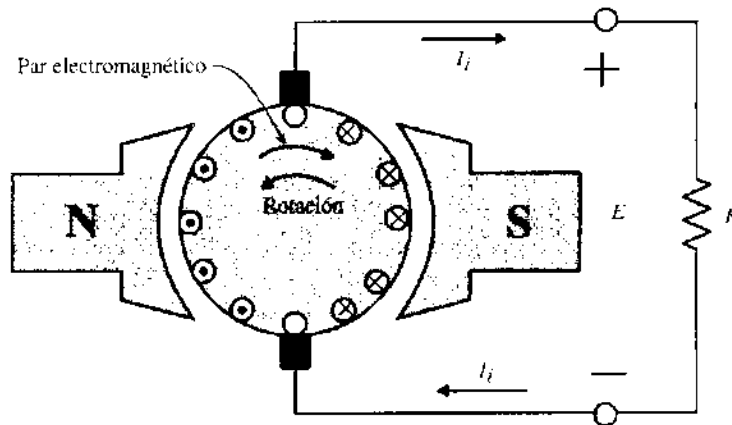


Figura 3.3 Generador de CD.

**3.4.2 Principio de funcionamiento de la máquina de CD**

El generador de CD se basa su funcionamiento en el principio de inducción electromagnética de Faraday, la cual establece que si hacemos girar una espira en un campo magnético se produce una f.e.m. inducida en sus conductores. Conforme gira la espira, se produce una f.e.m. en las terminales de la misma, esta tensión aparece entre las escobillas y por consecuencia se transmite a la carga.

Como ya vimos anteriormente la máquina de CD se utiliza como motor cuando produce un par mecánico, y cuando genera una tensión en sus terminales funciona como generador eléctrico.

El principio de funcionamiento como generador se basa principalmente en la ley general de la inducción electromagnética de Faraday, la cual establece que si hacemos girar una espira en un campo magnético se produce una fem inducida en sus conductores. La máquina está compuesta básicamente por dos arrollamientos uno que se encuentra en el estator, el cual es crear un campo magnético denominado inductor, el segundo arrollamiento está ubicado en el rotor y se le denomina inducido o armadura.

En la figura 3.4 se ilustra el generador elemental de CD, así como la forma de onda del voltaje inducido en un generador.

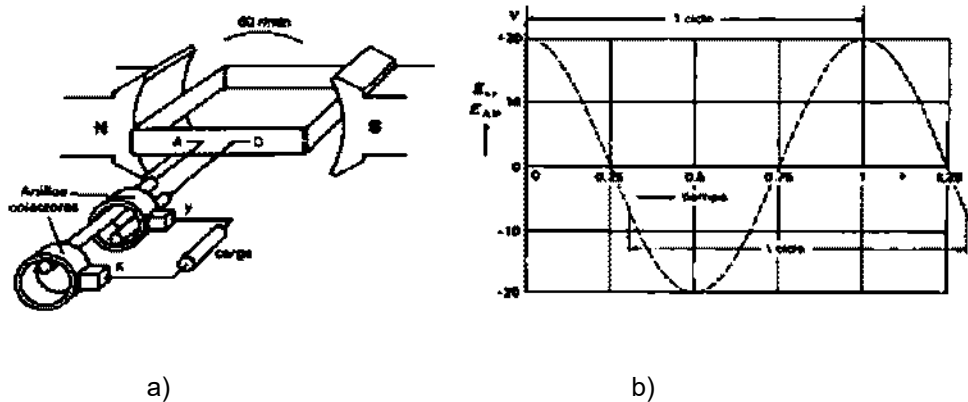


Figura 3.4 Generador de cd elemental (a) y el voltaje inducido como función del tiempo en un generador (b).



La diferencia de potencial obtenida en el exterior a través de un anillo colector y una escobilla en cada extremo de la espira tiene carácter senoidal, durante la primera mitad del ciclo se obtiene la misma tensión alterna, pero en el semiperiodo siguiente, se invierte la conexión convirtiendo el semiciclo negativo en positivo.

Para rectificar la corriente alterna inducida en el devanado del rotor, se rempazan los anillos rasantes por conmutador, de esta forma el voltaje inducido en las escobillas pulsa pero no cambia de polaridad (figura 3.3). Debido a la polaridad constante en las escobillas, esta maquina de CD recibe el nombre de CD o dínamo.

### **3.4.2.1 Acción del conmutador**

Para poder obtener la polaridad en una sola dirección en una escobilla, o bien para tener un para unidireccional a partir de una bobina en un campo magnético, debemos modificar el mecanismo de la máquina, se mantiene un anillo dividido en dos mitades aisladas una de otra, y las escobillas se deslizan sobre estas mitades, llamadas segmentos de conmutador. Por lo tanto, el voltaje promedio de la salida difiere a cero y se obtiene en las terminales de las escobillas una corriente continua (CD). Para comprobar dicho procedimiento podemos aplicar la regla de la mano derecha y viendo que tal sistema de escobillas y conmutador hace que las escobillas tengan polaridades definidas.

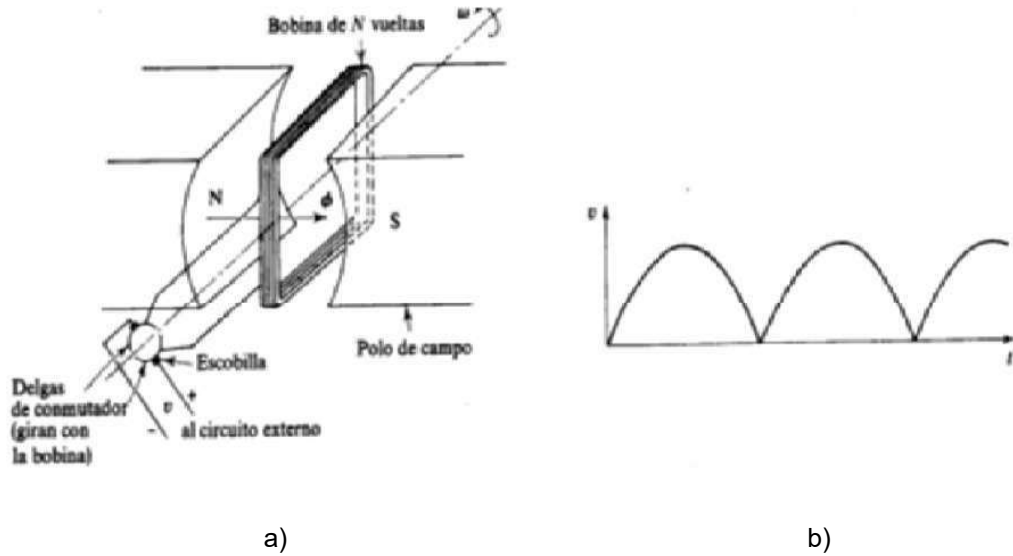


Figura 3.5. a) Generador elemental de CD, b) Variación de voltaje a la salida.

### 3.4.3 Componentes de un generador

En la actualidad la máquina de CD es una de las más versátiles en la industria. Su fácil control de posición, paro y velocidad la han convertido en una de las mejores opciones en aplicaciones de control y automatización de procesos.

Una máquina de corriente continua (generador o motor) se compone principalmente de dos partes, un estator que da soporte mecánico al aparato y tiene un hueco en el centro generalmente de forma cilíndrica. En el estator además se encuentran los polos, que pueden ser de imanes permanentes o devanados con hilo de cobre sobre núcleo de hierro. El rotor es generalmente de forma cilíndrica, también devanado y con núcleo, al que llega la corriente mediante dos escobillas.

### 3.4.3.1 Construcción del generador de CD

La máquina de corriente directa puede realizar la función como generador y como motor, por lo tanto su construcción es la misma independientemente de su funcionamiento y sólo la forma de excitación determina su forma de operación.

A continuación se muestra las partes principales de una máquina de CD:

- Tapas frontal y superior
- Carcasa
- Devanado de armadura o inducido
- Rodamientos
- Eje o flecha
- Devanado de campo o inductor
- Conmutador
- Escobillas
- Porta escobillas

La figura 3.6 muestra las partes principales del generador de CD.

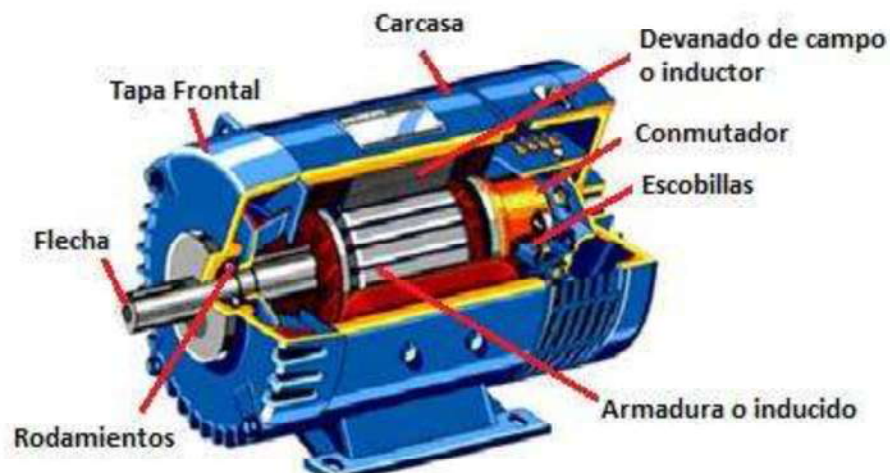


Figura 3.6. Partes principales de un generador de CD.

### 3.4.3.2 Devanado de campo

El devanado de campo también denominado inductor o estator, es el responsable de producir el campo magnético principal en la máquina. Está conformado básicamente por un electroimán montado en piezas polares para formar el estator electromagnético. Los devanados de campo y las piezas polares colocados en la carcasa, que es la parte fija de la máquina.

En la figura 3.7 se ilustra el devanado de campo de la máquina CD.

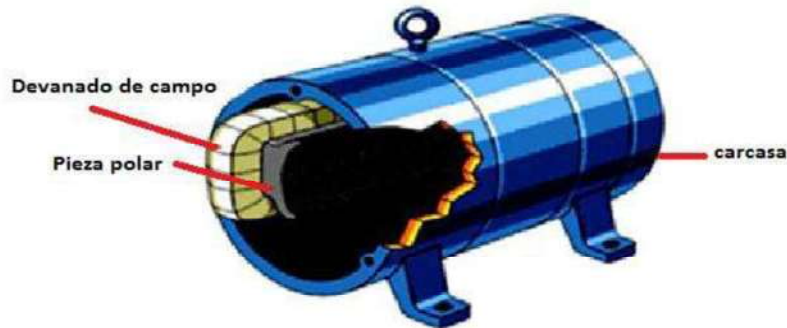


Figura 3.7 Devanado de campo de una máquina de CD.

### 3.4.3.3 Armadura

La armadura es la parte rotatoria de un generador de CD, también conocido como rotor o inducido. Está colocado en un eje y gira entre los polos de los devanados de campo. Está construida sobre el eje o flecha, núcleo, devanado y conmutador.

Los devanados de armadura son montados de tal forma que se colocan en las ranuras del núcleo.

A continuación en la figura 3.8 se muestra la armadura de la máquina de CD.



Figura 3.8 Armadura de una maquina de CD.

#### 3.4.3.4 Escobillas

Las escobillas son las que se encargan de transmitir el voltaje generado a las cargas. Están colocadas en los lados del conmutador. Están hechas de carbono y grafito.

Están sujetas a la estructura del estator de tal forma que mediante muelles o resortes se asegura que las escobillas mantengan un contacto firme con las delgas del colector.

El la figura 3.9 se aprecia la forma en que van colocadas las escobillas.

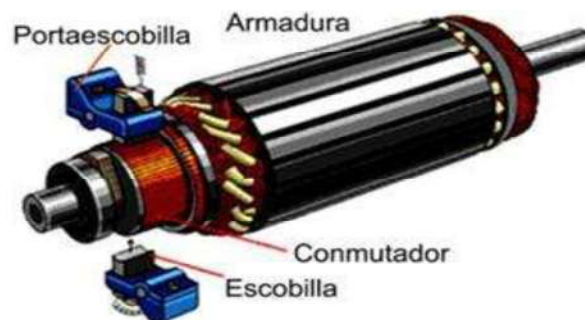


Figura 3.9 Ubicación de las escobillas de la máquina de CD.

### 3.4.3.5 Conmutador

El conmutador junto con las escobillas son los responsables de hacer llegar la tensión generada a las cargas. Está constituido esencialmente por piezas planas de cobre duro de sección trapezoidal, conocidas como delgas, separadas y aisladas unas de otras por delgadas laminas de mica, formando el conjunto un tubo cilíndrico aprisionado fuertemente. El conmutador tiene tantas delgas como bobinas posee la armadura de la máquina.

En la figura 3.10 se muestra como esta compuesto el conmutador del generador de CD.



Figura 3.10 Estructura del conmutador.

### 3.4.3.6 Tipos de devanados del generador

Como se ha indicado anteriormente el generador de CD cuenta con dos bobinas; el devanado de campo y el devanado de armadura, enseguida se indican los tipos de devanados que tiene cada uno de ellos.

Devanado de armadura: el devanado de armadura o inducido puede ser de dos tipos:

- **Devanado imbricado.** Este se distingue porque forma tantas trayectorias paralelas como número de polos de campo haya, se recomienda utilizar cuando se deseen bajas tensiones. En este tipo de devanados se utiliza un par de escobillas por cada dos trayectorias. En este devanado los extremos de una bobina van conectados a dos delgas adyacentes del conmutador.

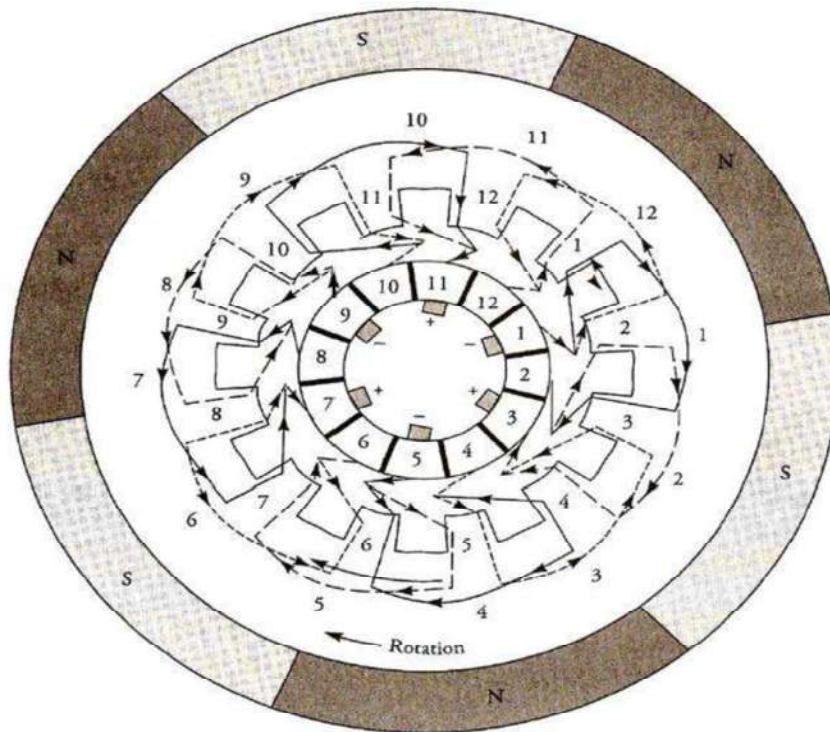


Figura 3.11 Diagrama del devanado polar de una máquina de CD con devanado imbricado.

- **Devanado ondulado.** En este tipo de devanado también se denomina devanado serie en virtud de que todas las bobinas de armadura bajo de pares de polos similares, están en serie. Se recomienda utilizar este tipo de devanado cuando desean obtener altos voltajes y bajas corrientes. En este devanado los extremos de una bobina van conectados segmentos del conmutador que están aproximadamente  $360^\circ$  eléctricos.



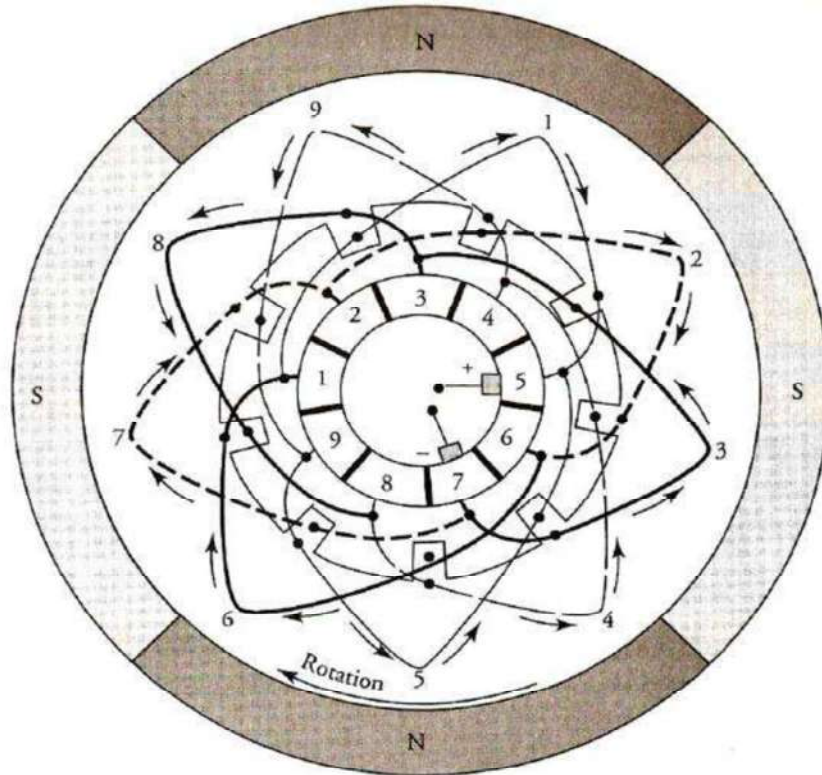


Figura 3.12 Máquina de CD con devanado ondulado.

### 3.5 Tipos de generadores de CD

Los cuatro tipos de conexión básicos del generador de CD son: con excitación separada, serie, en derivación (shunt) y compuesto, del compuesto se derivan otros dos tipos de conexiones secundarias como lo son compuesto acumulativo y diferencial.

La diferencia entre estos tipos de conexiones del generador, es el modo que se produce la excitación del campo del estator. Como lo dice su nombre el generador es el encargado de producir voltaje de CD, esto se realiza mediante la conversión de energía mecánica a energía eléctrica.



Los tipos más comunes del generador de CD son:

1. Generador de excitación separada.
2. Generador en serie.
3. Generador en derivación.
4. Generador compuesto.
  - a) Generador compuesto acumulativo.
  - b) Generador compuesto diferencial.

Estos tipos de generadores difieren en sus características en los terminales (voltaje-corriente), y por lo tanto en las aplicaciones para las cuales son adecuados.

Los generadores de CD se comparan entre sí por su voltaje, potencia nominal, eficiencia y regulación de voltaje. La regulación de voltaje (VR, por sus siglas en inglés) se define por medio de la ecuación:

$$VR = \frac{V_{sc} - V_{pc}}{V_{pc}} \times 100 \% \quad (3.1)$$

Donde:

**V<sub>sc</sub>** Es el voltaje en terminales del generador en vacío

**V<sub>pc</sub>** Es el voltaje en los terminales del generador a plena carga

### 3.5.1 Generador de excitación separada

El flujo del campo se deriva de una fuente de potencia separada independientemente del generador en sí mismo.

En este tipo de generador el flujo principal se obtiene de una fuente de potencia independiente del mismo generador. Una de sus principales características

es que ofrece una tensión en terminales casi constante cuando no se utiliza una resistencia de ajuste sobre la corriente de campo.

### 3.5.2 Generador en derivación

El flujo del campo se deriva de la conexión del circuito de campo directamente a través de los terminales del generador.

En este tipo de generador el voltaje en las terminales es igual al que tiene el devanado de campo debido a que ambos devanados conectados en paralelo, de ahí también proviene su nombre generador en paralelo o shunt.

Cuando el generador se encuentra sin carga, la corriente del inducido es la misma que la corriente de campo. Cuando tiene carga, la corriente de armadura suministra la corriente de carga y la corriente de campo tal como se aprecia en la figura.

Este generador es capaz de aumentar el voltaje en sus terminales mientras exista algún flujo remanente en los polos del campo. En las figuras 3.13 y 3.14 se pueden apreciar como aumenta el voltaje en las terminales según varía la corriente de campo.

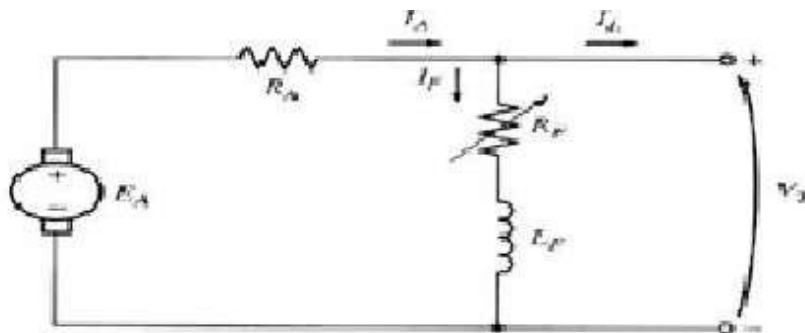


Figura 3.13 Circuito equivalente de un generador de CD en derivación.

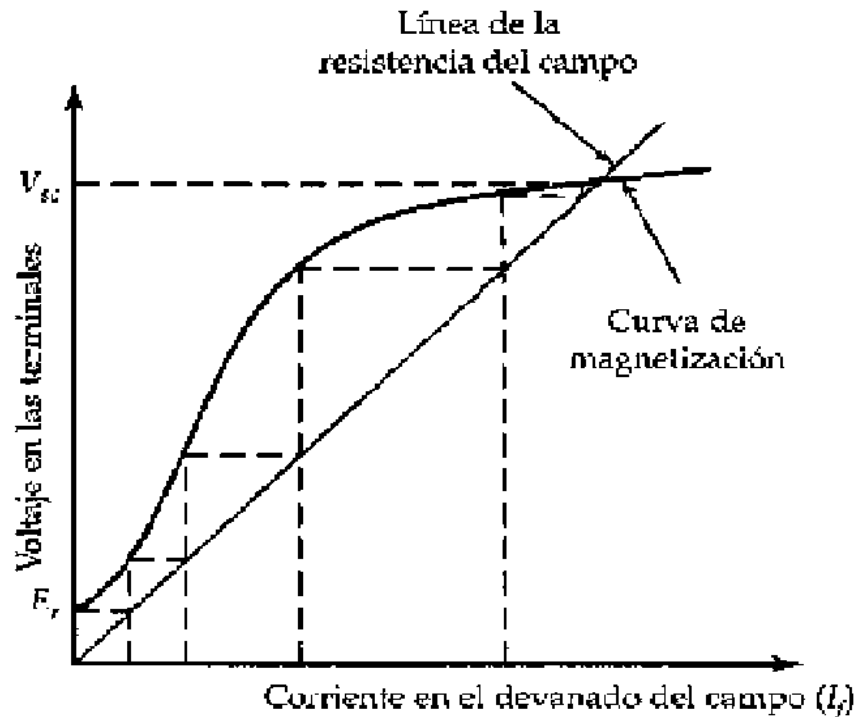


Figura 3.14 Crecimiento del voltaje en un generador en derivación.

### 3.5.3 Generador en serie

El flujo de campo se produce por la conexión del circuito del campo en serie con el inducido del generador.

Como su nombre lo indica el devanado del inductor se encuentra en serie con el devanado del inductor y la fuente de excitación. Debido a este tipo de conexión, las corrientes que circulan por ambos devanados son muy altas y por lo tanto el calibre del conductor será mayor y con muy pocas vueltas de alambre comparado con el devanado en derivación.

En la figura 3.15 se muestra el circuito equivalente de un generador de CD en serie. La curva de magnetización de un generador serie se obtiene al excitar de

manera separada el devanado de campo serie. La tensión en terminales del generador decrecerá en función de la reacción de armadura presente en la máquina, es decir, a mayor reacción de armadura de mayor caída de tensión en las terminales del generador. En la figura 3.16 se muestra el efecto.

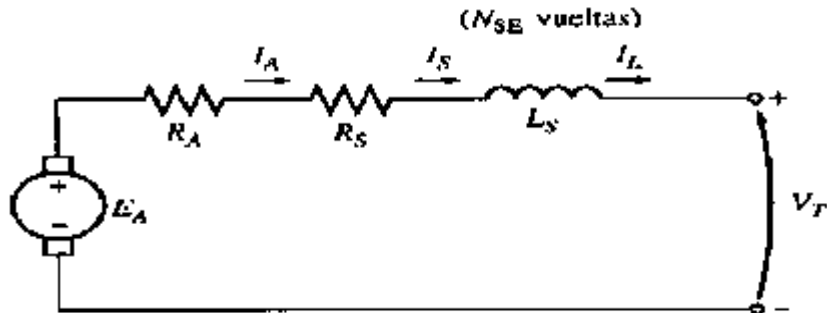


Figura 3.15 Circuito equivalente de un generador de cd en serie.

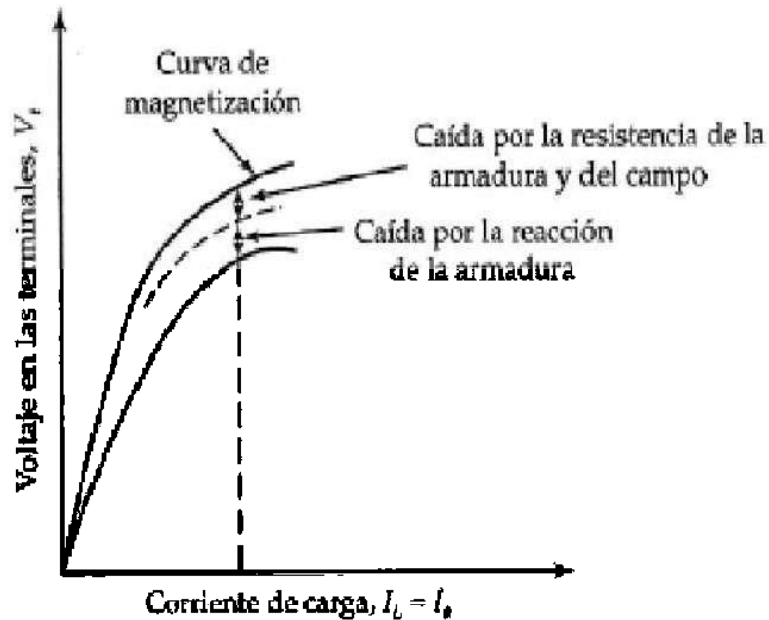


Figura 3.16 Características del generador serie.

**3.5.4 Generador compuesto**

El generador compuesto se divide en dos tipos los cuales a continuación se describen.

- Generador compuesto acumulativo. En él están presentes tanto el campo en derivación como el campo en serie y sus efectos son aditivos.
- Generador compuesto diferencial. En él están presente tanto el campo en derivación como el campo en serie, pero se restan.

En la figura 3.17 se ilustra los diferentes tipos de conexión del generador de CD.

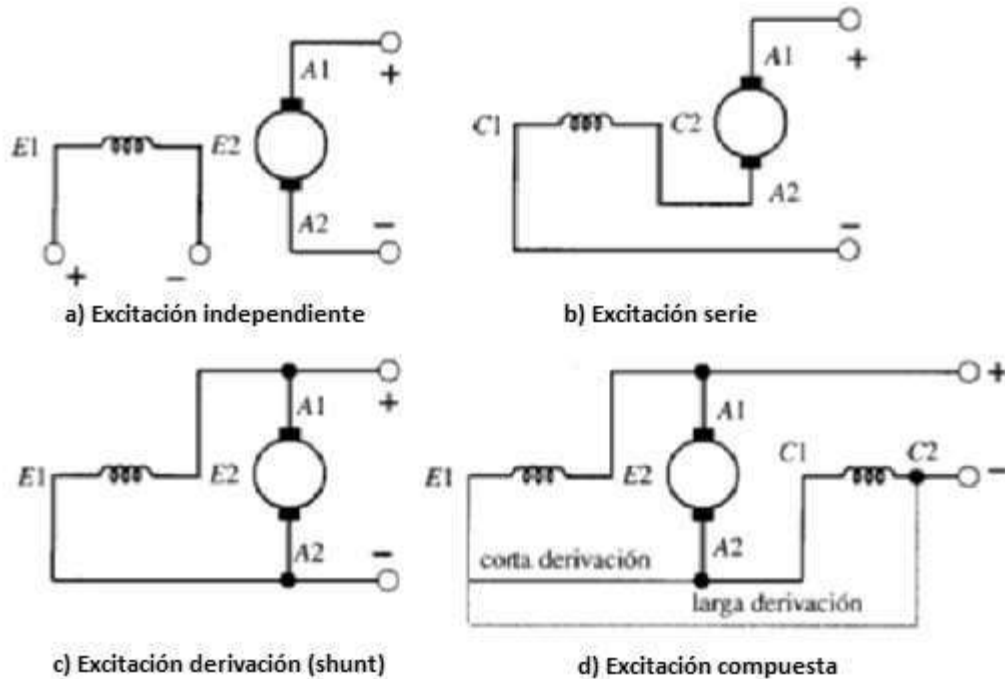


Figura 3.17 Tipos de excitación de los generadores de CD.

### 3.6 Modelado del generador

Para realizar el modelado del generador de CD se debe tomar en cuenta dos aspectos muy importantes: la corriente de armadura y el par mecánico. Lo realizaremos mediante ecuaciones de estado para su mejor comprensión.

A continuación se muestra en la figura 3.18 el modelado del generador de CD.

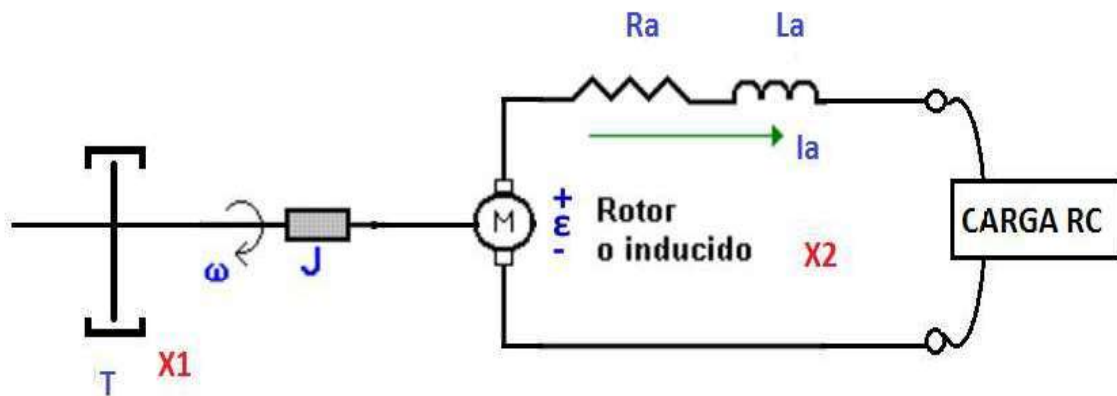


Figura 3.18 Circuito del modelo del generador de CD.

Representación matricial de las variables de estado del modelado del generador de CD, tomando como variables la velocidad del par X1 y la segunda variable la corriente de armadura X2.

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{f}{J} & -\frac{n}{La} \\ \frac{n}{J} & -\frac{Ra}{La} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \tau \quad (3.2)$$

Donde:

$\dot{X}_1$	Variable de estado 1
$\dot{X}_2$	Variable de estado 2
$R_a$	Resistencia de la armadura
$L_a$	Inductancia de armadura
$N$	Fricción
$J$	Par
$\tau$	Velocidad del par

A continuación, se sustituyen las variables para realizar el análisis

$$X_1 \rightarrow h_j$$

$$X_2 \rightarrow \lambda_a$$

$$Z_1 \rightarrow w$$

$$Z_2 \rightarrow i_a$$

$$\begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w \\ i_a \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{J} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_a} \end{bmatrix}}_T \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Realizamos multiplicaciones de matrices

$$\dot{Z} = \bar{A}Z + \bar{B}U \quad (3.4)$$

$$Z = TX$$

$$\dot{Z} = T\dot{X} \quad (3.5)$$

$$X = T^{-1}Z$$

$$\dot{Z} = T(AX + BU) = TAX + TBU \quad (3.6)$$

$$\dot{Z} = TAT^{-1}Z + TBU$$

$$\bar{A} = TAT^{-1}$$

$$\bar{B} = T$$

A continuación, realizamos la sustitución y multiplicación de matrices.

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} \frac{1}{J} & 0 \\ 0 & \frac{1}{La} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{f}{J} & -\frac{n}{La} \\ \frac{n}{J} & -\frac{Ra}{La} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J & 0 \\ 0 & La \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$TAT^{-1}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{J} & 0 \\ 0 & \frac{1}{La} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -f & -n \\ n & -Ra \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{f}{J} & -\frac{n}{La} \\ \frac{n}{La} & -\frac{Ra}{La} \end{bmatrix}$$



$$\bar{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{J} & 0 \\ 0 & \frac{1}{La} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Obteniendo como resultado las matrices de las variables de estado para posteriormente hacer la simulación por medio de diagrama de bloques.

$$\begin{bmatrix} \dot{Z}_1 \\ \dot{Z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{f}{J} & -\frac{n}{J} \\ \frac{n}{La} & -\frac{Ra}{La} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix} \tau \quad (3.9)$$

Podemos observar el comportamiento del generador de CD excitado mediante una ganancia, esta ganancia representa el aire que captan las aspas para así producir el movimiento del generador y posteriormente generar un voltaje a la salida.

A continuación en la figura 3.19 se observa el comportamiento del generador simulado en el programa 20-sim por medio de diagramas de bloques. En las graficas de las figuras 3.20 se muestra como el generador es capaz de mantener un voltaje constante debido a la baja entrada de aire.

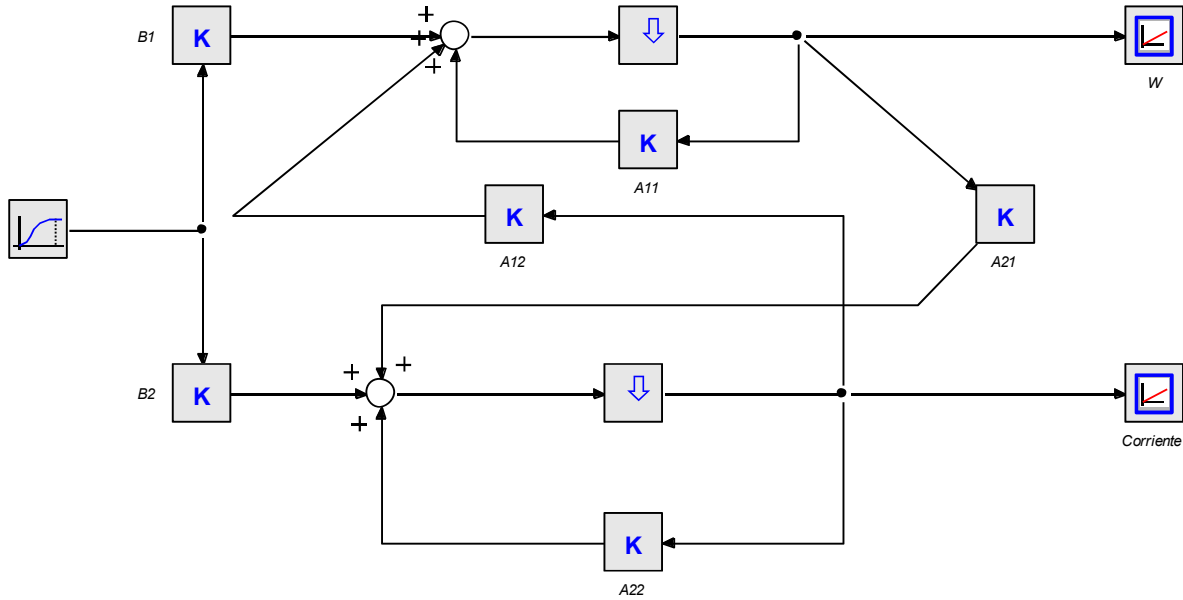


Figura 3.19 Diagrama de bloques del generador de cd en 20-sim.

A continuación se muestra las gráfica de la simulación del generador mediante diagrama de bloques. Se observa el comportamiento del voltaje generado en CD.

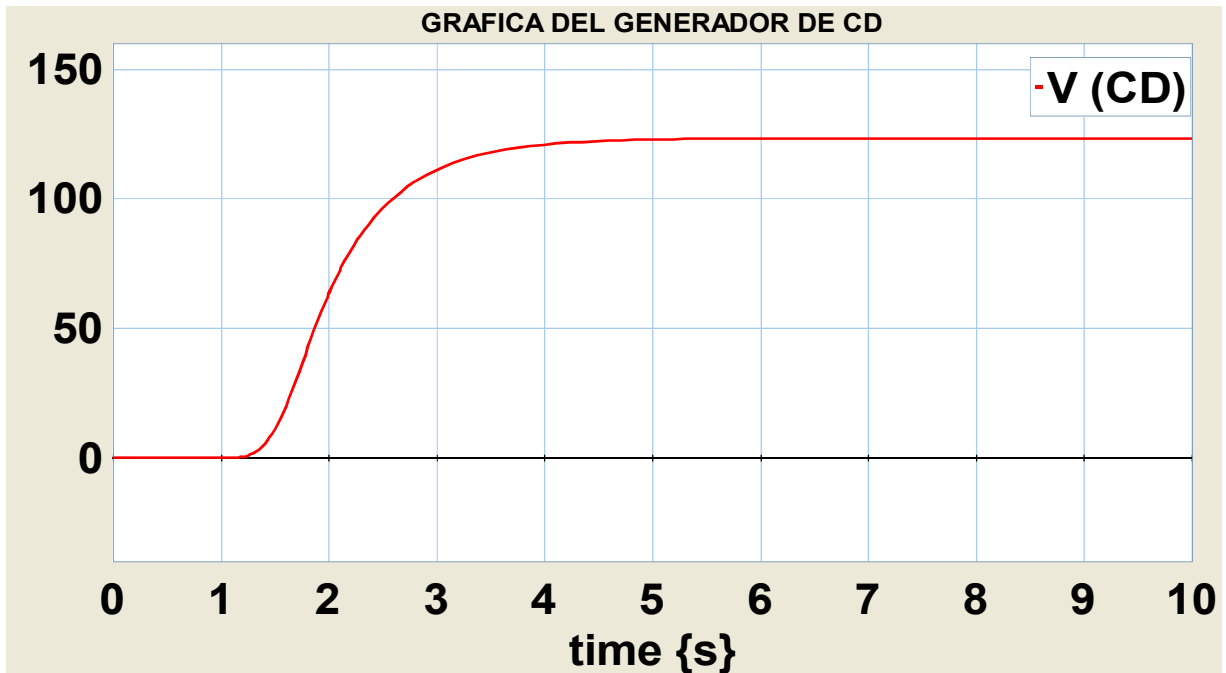


Figura 3.20 Graficas de la simulación del generador de CD.

Una vez realizada la simulación podemos observar el funcionamiento del generador de CD, posteriormente se realizaran pruebas para observar su comportamiento en campo. Para tener una mayor eficiencia es necesario hacer pruebas con distintas velocidades con distintas cargas, así lograremos lo deseado con el generador de CD.

# Capítulo 4

## Simulación de la Unidad de Generación

### 4.1 Introducción

En este capítulo se implementa el comportamiento del sistema de generación modelado y simulado, lo analizaremos por partes, observaremos el comportamiento del aire como es que esté varía dependiendo del día y la hora que se requiera, simularemos el comportamiento del aire para tener una idea más clara de su comportamiento. Así mismo se realizó el modelo matemático de la turbina eólica, este estudio se realizó por partes para tener una forma más detallada del sistema y para tener más clara la idea del este trabajo.

En la parte final de este capítulo observamos la simulación del sistema completo conformado por los distintos bloques del sistema como lo es: la fuente que en este caso es el aire, así como la turbina eólica, el modelado del generador de CD y finalmente el inversor de CD/CA, la combinación de todo este sistema da como resultado una salida de voltaje trifásico que posteriormente es conectado a la red suministradora de CFE.

Los modelados que a continuación se muestran son por medio de diagrama de bloques y simulado en un software llamado 20-sim el cual es un programa de simulación y control utilizado en las distintas ramas de la ingeniería.

## 4.2 Modelado del aire

### 4.2.1 El viento

El movimiento del aire es el resultado de los diferentes niveles de absorción de la energía solar, lo que provoca diferentes niveles de calentamiento y presión en la atmosfera. El desplazamiento del aire tiende a eliminar estos desequilibrios de presión, produciendo lo que conocemos como el viento.

El viento está definido principalmente por dos parámetros:

- a) Dirección
- b) Velocidad

La velocidad del viento varía a diferentes alturas, a mayor altura mayor será la velocidad del viento. En un aerogenerador se considera tres velocidades fundamentales:

- 1) Velocidad de conexión ( $V_{conex}$ ). Es la velocidad por encima de la cual se genera energía eléctrica.
- 2) Velocidad nominal ( $V_{nom}$ ). Es la velocidad del viento para la cual el aerogenerador alcanza su potencia nominal.
- 3) Velocidad de desconexión. Es la velocidad del viento por encima de la cual el aerogenerador deja de generar energía eléctrica.

### 4.2.2 Velocidad del viento

La viento es de naturaleza aleatoriamente variable- se encuentra regida por la superposición de los efectos micro y macro meteorológicos e influenciada por las particularidades del terreno circundante.

Las variaciones lentas de velocidad se asocian a los regímenes meteorológicos globales y los cambios d mayor frecuencia se deben al efecto de

turbulencias provocadas por obstáculos, tales como arboles, edificios, formaciones rocosas, etc.

### 4.2.3 Potencia Constante

La forma más simple de representación de una turbina de viento es asumir una entrada mecánica constante. La entrada mecánica puede ser seleccionada ya sea potencia mecánica o torque mecánico, y entonces las otras cantidades son calculadas a partir de la siguiente ecuación.

$$T_{mec} = \frac{P_{mec}}{\omega_{tur}} \quad (4.1)$$

Aunque las dos formas son posibles, se recomienda fuertemente la representación de potencia constante. Si un par constante es aplicado, la potencia mecánica en el modelo variará proporcionalmente con la velocidad rotacional. En ciertos casos, esto resulta en un modelo numéricamente inestable. En contraste, en la representación de potencia constante, el par es una función inversa de la velocidad rotacional y en tal sentido introduce un término intrínsecamente estabilizante que en la mayoría de los casos reflejara el desempeño físico de la turbina de viento menos precisamente que un modelo de potencia constante.

### 4.2.4 Energía útil del viento

Para el análisis del desempeño de la turbina eólica, se utiliza la teoría del disco actuado y se hacen las siguientes suposiciones:

- El viento homogéneo, estable y de dirección fija.
- No hay obstrucción al flujo del viento, ni a barlovento ni a sotavento.

- El flujo a través del disco esta bien distinguido del resto de la corriente de aire por medio de un tubo.
- El viento es incomprensible.
- Numero infinito de palas
- Conservación de la masa
- Ecuación de continuidad de mecánica de fluidos.

A continuación, se explica una breve descripción de la ley de conservación de la masa y de la ecuación de continuidad de la mecánica de fluidos.

Es una masa de flujo de aire constante de área circular  $A$ , que pasa a través del área del disco de una turbina, el flujo de la masa de aire es función de la densidad del aire  $\rho$  y de su velocidad  $V_w$

En la figura 4.1 se representa la ley de la conservación de la masa.

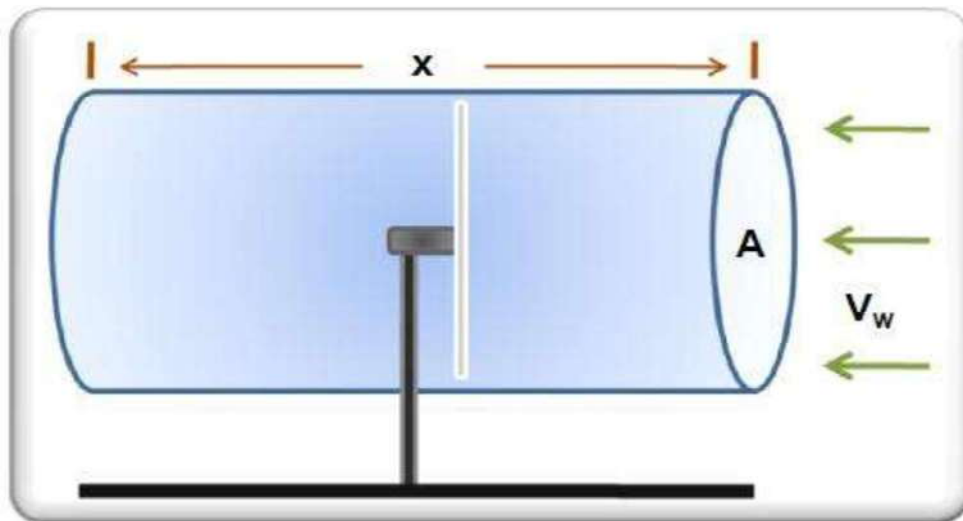


Figura 4.1 Aerogenerador en una corriente de aire.

La masa de la corriente de aire está dada por:

$$m = \rho Ax \quad (4.2)$$

Donde:

**X** Es el grosor del paquete de aire.

El gasto másico, basándose en la ecuación de continuidad de mecánica de fluidos, está dado por:

$$\frac{d(m)}{dt} = \dot{m} = \rho AV_w \quad (4.3)$$

La energía cinética en el paquete del aire es:

$$E_{cw} = \frac{1}{2} m V_w^2 \quad (4.4)$$

y la potencia en este paquete de aire es:

$$P_w = \frac{d(E_{cw})}{dt} = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 \quad (4.5)$$

Para un generador de eje horizontal la superficie, A esta dada por:

$$A = \pi R^2 \quad (4.6)$$

Donde:

**R** Es el radio del rotor

Se debe tener en cuenta que la potencia del viento es proporcional a la densidad del aire, al área de barrido del rotor y al cubo de la velocidad del viento.



### 4.3 Tren de engranes

Engranaje es una rueda o cilindro dentado empleado para transmitir un movimiento giratorio o alternativo desde una parte de una máquina a otra. Un conjunto de dos o más engranajes que transmite el movimiento de un eje a otro se denomina tren de engranajes. Los engranajes se utilizan sobre todo para transmitir movimiento giratorio, pero usando engranajes apropiados y piezas dentadas planas pueden transformar movimiento alternativo en giratorio y viceversa.

Los engranajes y las transmisiones de engranes están presentes en muchas de las máquinas que se pueden hallar tanto en el mundo industrial como en el doméstico. Los engranajes promueven el movimiento de las ruedas y hélices de los medios de transporte, ya sea por tierra, mar o aire.

Los engranajes tienen la función de transmitir una rotación entre dos ejes con una relación de velocidades angulares constante. Así, cuando se hace referencia de “Par de Engranajes, Ruedas Dentadas o Engrane” para referirse al acoplamiento que se utiliza para transmitir potencia mecánica entre dos ejes mediante contacto directo entre dos cuerpos sólidos unidos rígidamente a cada uno de los ejes.

Se denomina “Relación de Transmisión” al cociente entre la velocidad angular de salida  $\omega_2$  (velocidad de la rueda conducida) y la de entrada  $\omega_1$  (velocidad de la rueda conductora):

$$i = \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad (4.7)$$

Dicha relación puede tener signo positivo si los ejes giran en el mismo sentido o signo negativo si los giros son de sentido contrario. Del mismo modo, si la relación de transmisión es mayor que 1 ( $i > 1$ ) se supondrá el empleo de un mecanismo multiplicador, y si es menor que 1 ( $i < 1$ ) que suele resultar lo más habitual, supondrá el empleo de un mecanismo reductor, o simplemente de un reductor.

Es claro que la obtención de una relación de transmisión constante entre dos ejes, no es algo privativo de los engranajes, ya que lo mismo puede obtenerse con correas o cadenas o ruedas de fricción, o hasta levas entre los más conocidos. Sin embargo dichos dispositivos poseen ciertas limitaciones principalmente en el orden de la carga o potencia que pueden movilizar.

Los engranajes, por otro lado, poseen varias ventajas competitivas que los hacen óptimos para tal tipo de tarea (transmitir movimiento rotatorio entre dos ejes con una relación de transmisión constante), tales como su relativa sencillez de fabricación, su capacidad para transmitir grandes potencias, la gran variedad de opciones constructivas, entre otras cosas.

### **4.3.1 Clasificación**

Los trenes de engranajes se pueden clasificar según las ruedas dentadas que contengan, la clasificación es la siguiente: en trenes simples, si existe sólo una rueda por eje; y compuestos, si en algún eje hay más de un engranaje.

#### **4.3.1.1 Simples**

Son engranajes cilíndricos de dientes rectos y van colíndales con el propio eje de la rueda dentada. Se utilizan en transmisiones de ejes paralelos formando así lo que se conoce con el nombre de trenes de engranajes. Este hecho hace que sean unos de los más utilizados, pues no en vano se pueden encontrar en cualquier tipo de máquina: relojes, juguetes, máquinas herramientas, etc.

En un engranaje sencillo, el eje impulsado gira en sentido opuesto al eje impulsor. Si se desea que ambos ejes giren en el mismo sentido se introduce una rueda dentada denominada 'rueda loca' entre el engranaje impulsor o motor y el

impulsado. En cualquier sistema de engranajes, la velocidad del eje impulsado depende del número de dientes de cada engranaje.

En la figura 4.2 se ilustra un modelo típico de engranaje simple utilizado en gran variedad de productos.

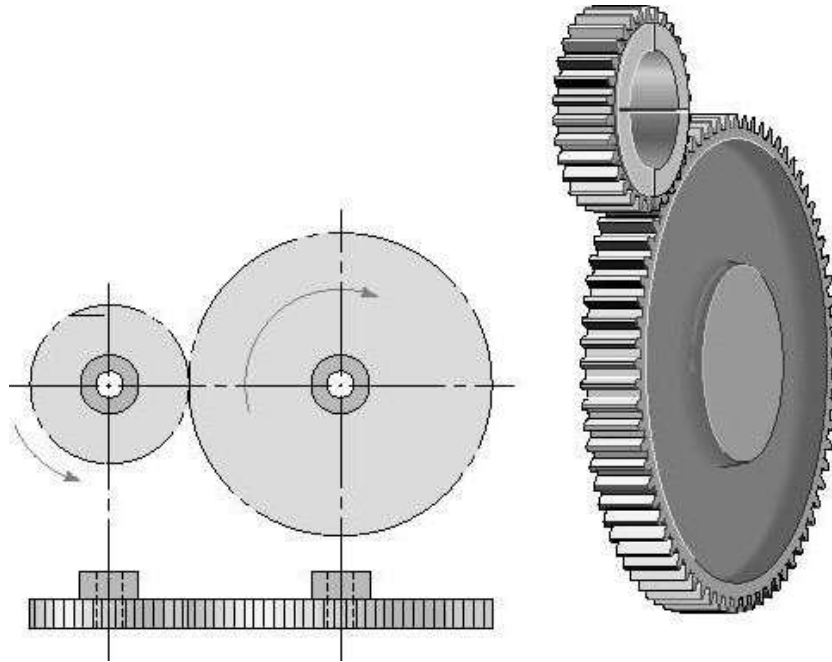


Figura 4.2 Esquema de engranes simples.

### 4.3.1.2 Compuestos

Los engranajes compuestos son los que están formados por más de dos ruedas dentadas. Con este mecanismo se logra una reducción o una amplificación muy grande de la velocidad de giro.

Observemos qué sucede en el esquema asociado del engranaje:

1. En el primer paso, desde la rueda número 1 a la rueda número 2, la velocidad de giro se reduce a la mitad, puesto que la rueda 2 tiene el doble de dientes que la rueda 1.

2. En el siguiente paso, la unión se establece entre la rueda 3, que gira con la misma velocidad de giro que la rueda 2 por tener el mismo eje, y la rueda 4, que tiene cuatro veces más dientes que la rueda 3.

En la figura 4.3 se ilustra el modelo de engranaje compuesto, el cual esta conformado por cuatro ruedas dentadas de diferente tamaño.

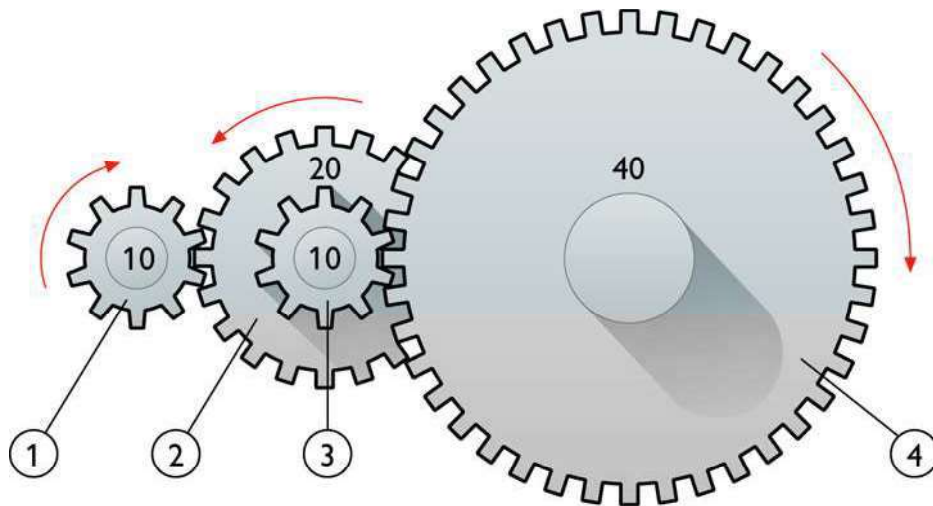


Figura 4.3 Engranaje compuesto

#### 4.4 Modelado de la turbina eólica

Para el desarrollo de este trabajo se considero un sistema de conversión eólico de eje horizontal, con turbina bartolovento de tres palas. Se hizo esta elección, ya que este tipo de sistemas son los más usuales y desarrollados. Presentan la ventaja de que al ser colocados a una cierta altura del nivel del suelo, pueden recolectar mayor cantidad de energía del 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, 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 diferentes tipos de datos, frecuentemente con niveles de detalles muy variables en varias partes de la construcción.

#### 4.4.1 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 mismo tiempo transforma la energía cinética absorbida del aire en la potencia mecánica. Una turbina de viento específica es representada por datos que describen el diseño de construcción de la turbina de viento. Además de los datos del diseño constructivo, la potencia mecánica de salida de la turbina de viento, depende de la velocidad del viento el ángulo de paso de las palas de la turbina y la velocidad rotacional del rotor de la turbina.

#### 4.4.2 Modelo de la turbina

El modelo de la turbina eólica se divide principalmente en dos partes. La primera parte es el modelo estático de la turbina, que incluye la curva de la potencia y el par desarrollado. Las entradas para este modelo son la velocidad del viento  $V_w$ , la velocidad angular del eje de baja  $\omega_r$  el ángulo de inclinación de las palas  $\beta$ , que en este caso permanece fijo, mientras que la salida es el par del rotor generado  $T_r$ .

La segunda parte es el modelo dinámico de la turbina, que incluye la inercia, el amortiguamiento y la dureza, tanto de la turbina como del generador, el eje de baja velocidad, el eje de alta velocidad, el par del rotor generado  $T_r$  y el par generado  $T_g$ , mientras que la salida son la velocidad en el eje de baja  $\omega_r$  y la velocidad en el eje de alta  $\omega_g$ .

Un esquema general para el modelo de la turbina eólica se muestra en la figura 4.4.

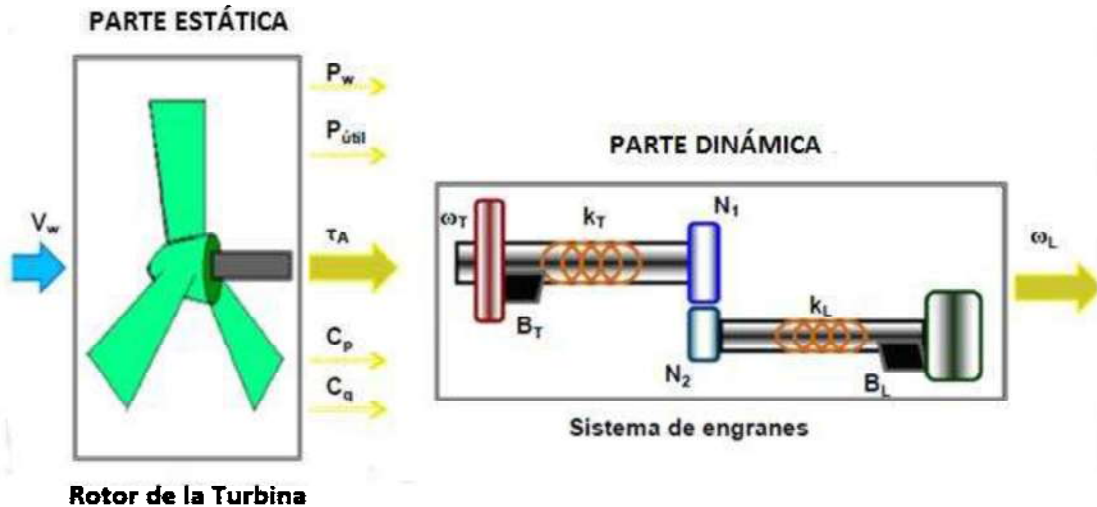


Figura 4.4 Esquema general del modelo de la turbina eólica.

#### 4.4.2.1 Modelo estático

El modelo estático es aquel que comprende el movimiento de las aspas, mediante la entrada de aire, teniendo como salida una un par desarrollado y la potencia de la turbina eólica.

La potencia desarrollada por una turbina eólica se determina a partir de la ecuación (4.8).

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (4.8)$$

$$\lambda = \frac{\omega_{ROT} R}{V} \quad (4.9)$$

Donde:

$\rho$  Es la densidad del aire,

A Es la superficie barrida por las aspas,

V Es la velocidad equivalente del viento,

$C_p$  Es el coeficiente de potencia,

B Es el ángulo de inclinación de las aspas del rotor eólico

$\omega_{Rot}$  Es la velocidad mecánica del rotor de la turbina.

$c_1, c_2, c_3, c_4, c_5$  y  $c_6$  son los coeficientes de potencia dependientes del diseño de cada rotor eólico

El coeficiente de potencia  $C_p$  depende del diseño aerodinámico de la turbina y el máximo valor teórico es 0,593, denominado por el límite de Betz. Una aproximación de esta curva está dada por la ecuación (4.10).

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{-c_5 + c_6 \lambda}{\lambda_i}} \quad (4.10)$$

$$C_p = 0.5176 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4 \beta - 5 \right) e^{\frac{-21 + 0.0068 \lambda}{\lambda_i}} \quad (4.11)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \lambda} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (4.12)$$

El coeficiente de par se define mediante la ecuación (4.13), definición necesaria para determinar el par mecánico desarrollado por la turbina eólica y que esta definido por la ecuación (4.14).

$$C_M = \frac{C_p}{\lambda} \quad (4.13)$$

$$T_m = \frac{1}{2} \rho A_r r_r V_\omega^2 C_M \quad (4.14)$$

La figura 4.5 representa la curva de potencia de la turbina eólica  $C_p$ , contra la razón de velocidad de la punta de la pala al centro de la misma  $\lambda$ , para varios valores del ángulo de inclinación de la palas  $\beta$ .

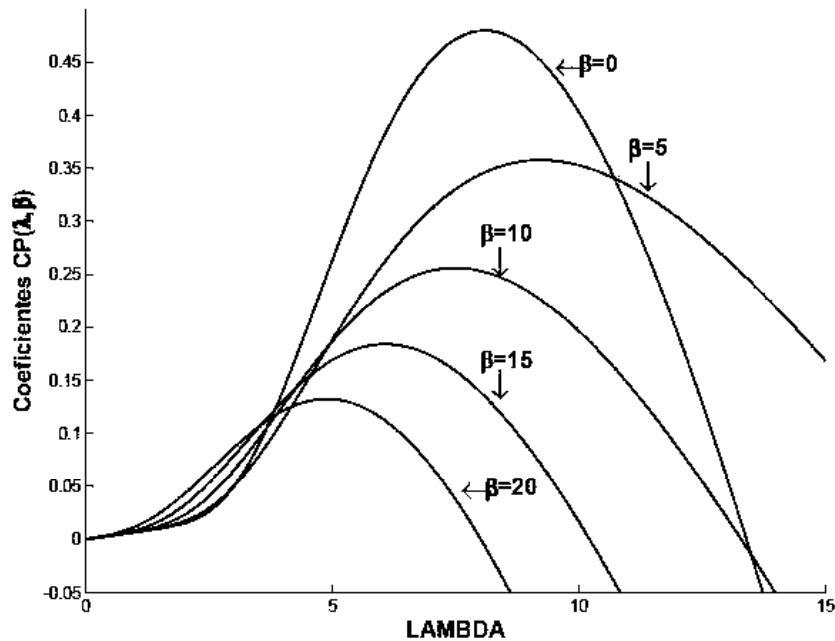


Figura 4.5. Curva de potencia  $C_p(\lambda, \beta)$ .

Todos los sistemas cambian con razón de tiempo y cuando esa razón es significativa, se les denomina sistemas dinámicos. La principal característica es que la salida en cualquier instante de tiempo depende del estado anterior y no únicamente de la entrada actual.



#### 4.4.2.2 Modelado dinámico

Existen componentes mecánicos presentes en una turbina eólica que pueden transmitir oscilaciones a la red, como son las aspas, el eje de baja velocidad, la caja multiplicadora y el eje de alta velocidad.

La parte del modelo dinámico está formado por los elementos que se encargan de transmitir la energía del eje de baja velocidad hasta el eje de alta velocidad. El acoplamiento entre el eje de baja velocidad y el eje de alta velocidad de la carga, se realiza a través de una caja multiplicadora y un acoplamiento flexible en ambos ejes; además, se considera la fricción que pueda existir entre los ejes y los momentos de inercia del rotor de la turbina y la carga. En la figura 4.6 se ilustra el esquema de visualización del sistema físico.

En la figura 4.6 se ilustra el esquema físico del modelado de la turbina eólica.

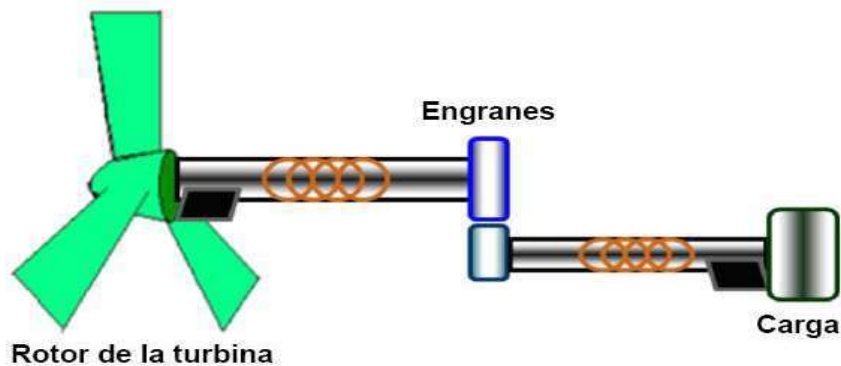


Figura 4.6 Esquema del sistema físico.

Cabe señalar que aunque en los puntos anteriores se menciona un modelo estático y un modelo dinámico, para realizar tanto la simulación como la implementación experimental se considera todo un sólo modelo matemático.

Las tres aspas forman una sola masa y los engranes son ideales, podemos realizar un esquema del sistema físico en el cual se representa la parte dinámica de la turbina eólica, el esquema se ilustra en la figura 4.7.

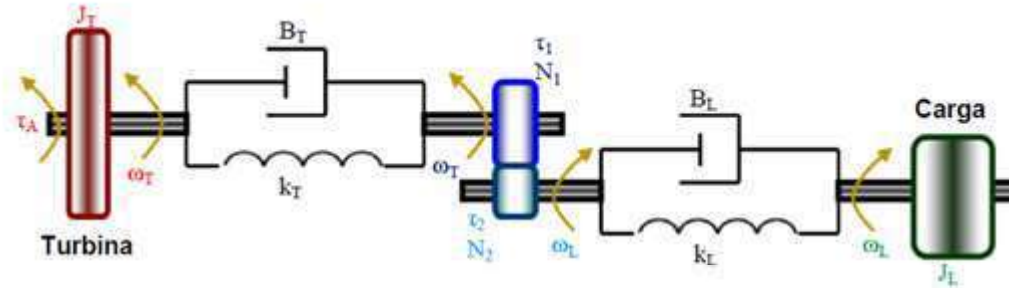


Figura 4.7 Acoplamiento de masas de la turbina y la carga.

De acuerdo a la ley de newton para el movimiento rotacional, se tiene:

$$\sum \tau = J\dot{\omega} \quad (4.15)$$

Para el eje de la turbina también llamado eje de baja velocidad.

$$\tau_A - B_T \frac{d(\theta_T)}{dt} - k_T \theta_T - \tau_1 = J_T \frac{d^2(\theta_T)}{dt^2} \quad (4.16)$$

Donde:

$\tau_A$  Es el par aerodinámico que desarrolla la turbina eólica

$B_T$  Es el coeficiente de la fricción viscosa del eje de la turbina

$k_T$  Es el coeficiente de rigidez del eje de la turbina

$\tau_1$  Es el par que desarrolla el engrane 1

$J_T$  Es el momento de inercia del rotor de la turbina

Para el eje de la carga se tiene:

$$\tau_2 - B_L \frac{d(\theta_T)}{dt} - k_L \theta_L = J_L \frac{d^2(\theta_L)}{dt^2} \quad (4.17)$$

Donde:

$\tau_2$  Es el par que desarrolla el engrane 2

$B_L$  Es el coeficiente del eje de la carga

$k_L$  Es el coeficiente de rigidez del eje del eje de alta velocidad

$J_L$  Es el momento de inercia de la carga

Del sistema de engranes se obtiene las siguientes relaciones:

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{N_1 \theta_L}{N_2 \theta_T} = \frac{N_T}{N_L}$$

$$\tau_1 = N\tau_2 \quad (4.18 - a) \quad \theta_T = \frac{1}{N}\theta_L \quad (4.18 - b)$$

De donde:

$$\frac{N_1}{N_2} = N$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{N} \quad (4.19)$$

Donde:

$N1$  Es el número de dientes del engrane 1

$N2$  Es el número de dientes del engrane 2

$N$  Es la relación de engranes.

Normalmente, se busca encontrar un modelo dinámico simple, por ello se puede considerar un sistema equivalente de dos masas, con un eje flexible y fricción viscosa equivalente, como el mostrado en la figura 4.8.

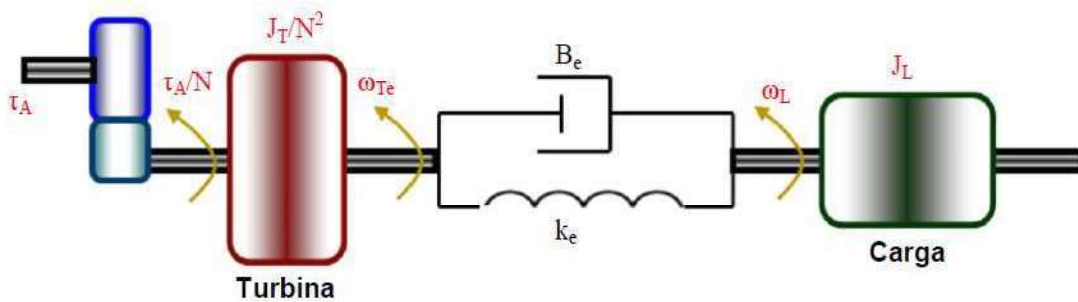


Figura 4.8 Sistema de acoplamiento de masas equivalente.

El modelo que se obtuvo se conoce como modelo reflejado hacia el eje de alta velocidad. En el sistema existen dos elementos que almacenan energía, los cuales se seleccionan como variables de estado  $\omega_{Te}$  y  $\omega_L$ .

El sistema en variables de estados se presenta como:

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_{Te} \\ \dot{\omega}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{N^2 B_e}{J_T} & \frac{N^2 B_e}{J_T} \\ \frac{B_e}{J_L} & -\frac{B_e}{J_L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{Te} \\ \omega_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{N}{J_T} \\ 0 \end{bmatrix} \tau_A \quad (4.20)$$

$$[\tau_L] = [B_e] \omega_{Te} \quad (4.21)$$

## 4.5 Simulación

Para realizar la simulación del sistema es necesario conectar las cuatro etapas que lo conforman como lo son: el aire, la turbina, el generador de CD y por ultimo el inversor de CD/CA.

En la figura 4.6 se ilustra la representación del sistema de generacion eolico, a partir de diagrama de bloques.

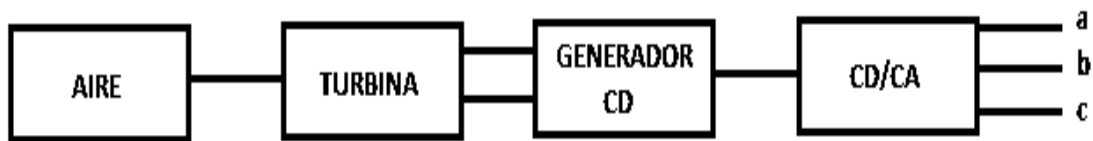


Figura 4.9 Bloques del sistema de generación eólico.

Las cuatro etapas son de gran importancia para que se lleve a cabo el buen funcionamiento del sistema, el objetivo de la tesis es modelar y simular el sistema con diferentes entradas de viento para ver su comportamiento conectado a la red eléctrica.

En la primera parte se toma como entrada al viento (m/s), esta sirve como entrada para el segundo bloque que es la turbina eólica, el modelo de la turbina tiene como entrada el viento y como salida la velocidad (WL), esta velocidad de la turbina sirve de entrada para el generador eléctrico teniendo como salida un voltaje en CD que sirve de entrada para el inversor trifásico y finalmente se tiene un voltaje trifásico a la salida del inversor.

### 4.5.1 Simulación de todo el sistema

A continuación, se ilustra en la figura 4.10 se muestra el comportamiento de potencia (watts) y velocidad de la turbina (rpm). Estos datos son tomados del generador Skystream 3.7 y sirven como referencia para la simulación de este trabajo.

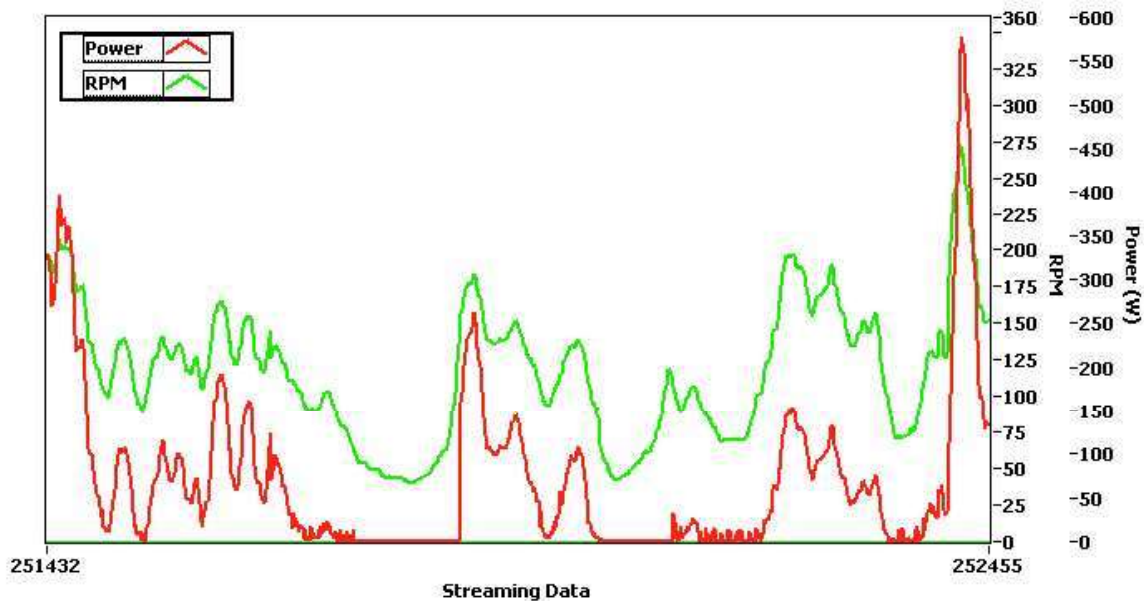


Figura 4.10 Grafica del generador Skystream 3.7

Los datos de la grafica son variables dependiendo del comportamiento del viento, se observa que la potencia depende de la velocidad de la turbina y la velocidad depende de la entrada del aire, por lo tanto están totalmente relacionada una con la otra.

A continuación se implementa en la figura 4.11 el modelo completo del sistema de generación, la simulación se realizó en 20-sim un programa de simulaciones eléctricas y mecánicas.

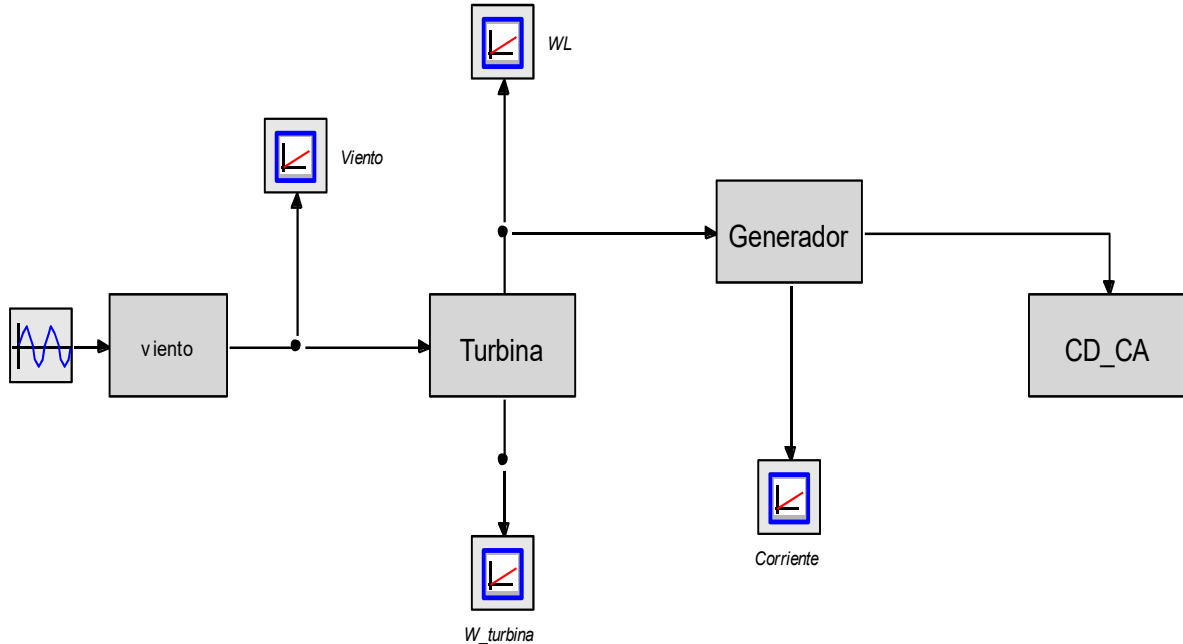


Figura 4.11 Esquema del sistema en diagrama de bloques.

En la figura 4.12 se ilustra el comportamiento del viento, tomando como entrada el viento propuesto, teniendo en cuenta que la velocidad no es constante

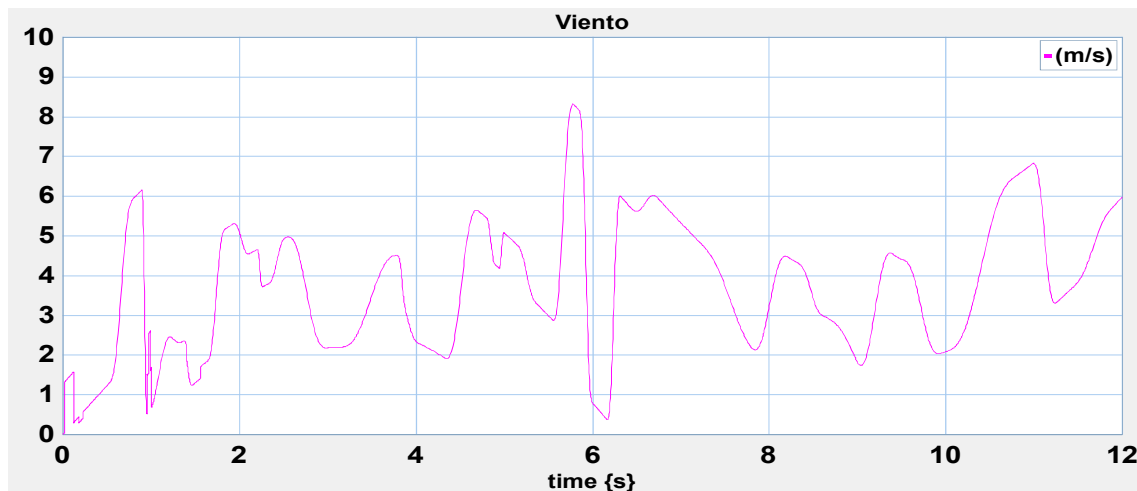


Figura 4.12 Simulación del viento.

Se observa el comportamiento de la gráfica 4.11 varía dependiendo la velocidad del viento (m/s), esta simulación tiene como finalidad ver el comportamiento del viento y así realizar un estudio para implementarlo en el generador eólico.

En la figura 4.13 se observa la simulación de la turbina, comparando con la grafica del viento (4.11) se observa que aumenta los picos de la grafica de la turbina (4.12), esto quiere decir que el viento mueve las aspas de la turbina, después pasa por unos engranes que hacen la función de una ganancia, para obtener a la salida una velocidad mayor que a la de la entrada.

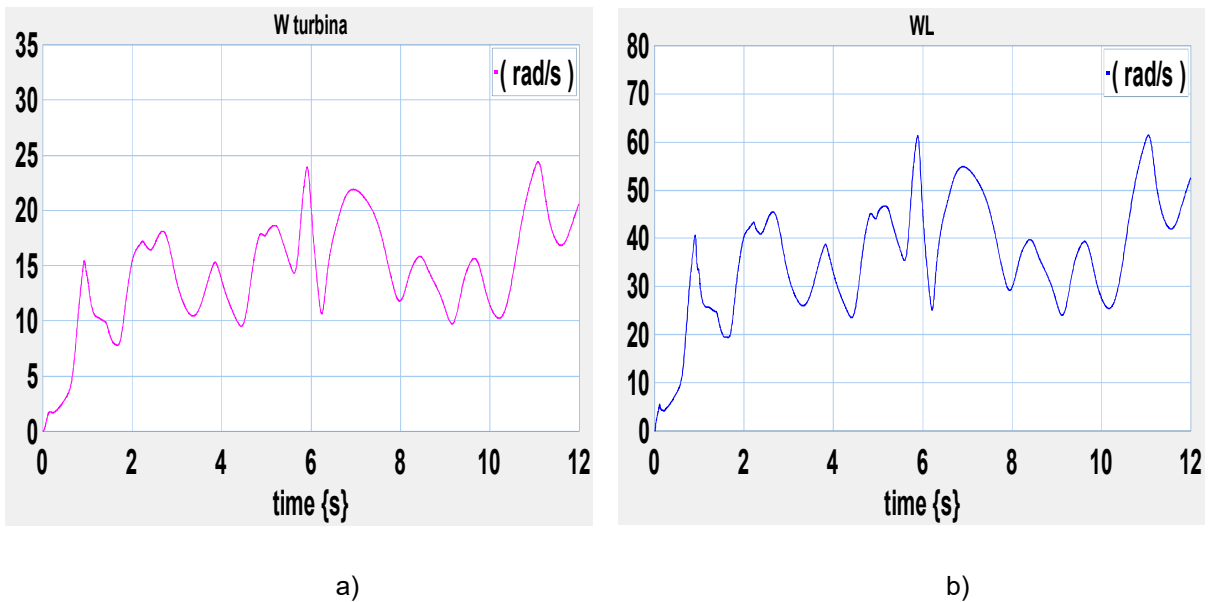


Figura 4.13 Simulación de velocidad de la turbina, a) velocidad antes de los engranes, b) velocidad después de los engranes.

A continuación se ilustra en la figura 4.14 la salida del generador eléctrico, esta salida sirve de entrada para el inversor trifásico



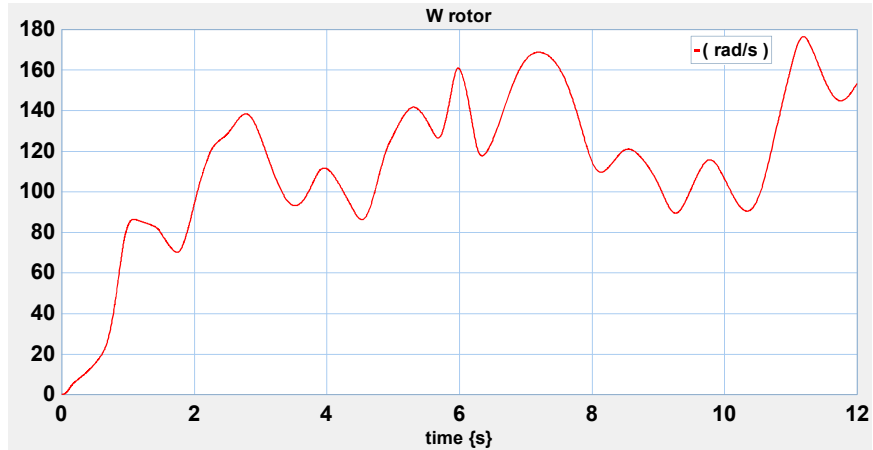


Figura 4.14 Velocidad del rotor del generador eléctrico.

Finalmente se realiza la simulación de la salida de todo el sistema, esta se toma después del inversor para ver la onda de voltaje y su comportamiento.

En la figura 4.15 se ilustra la grafica del voltaje trifásico a la salida del inversor de CD/CA.

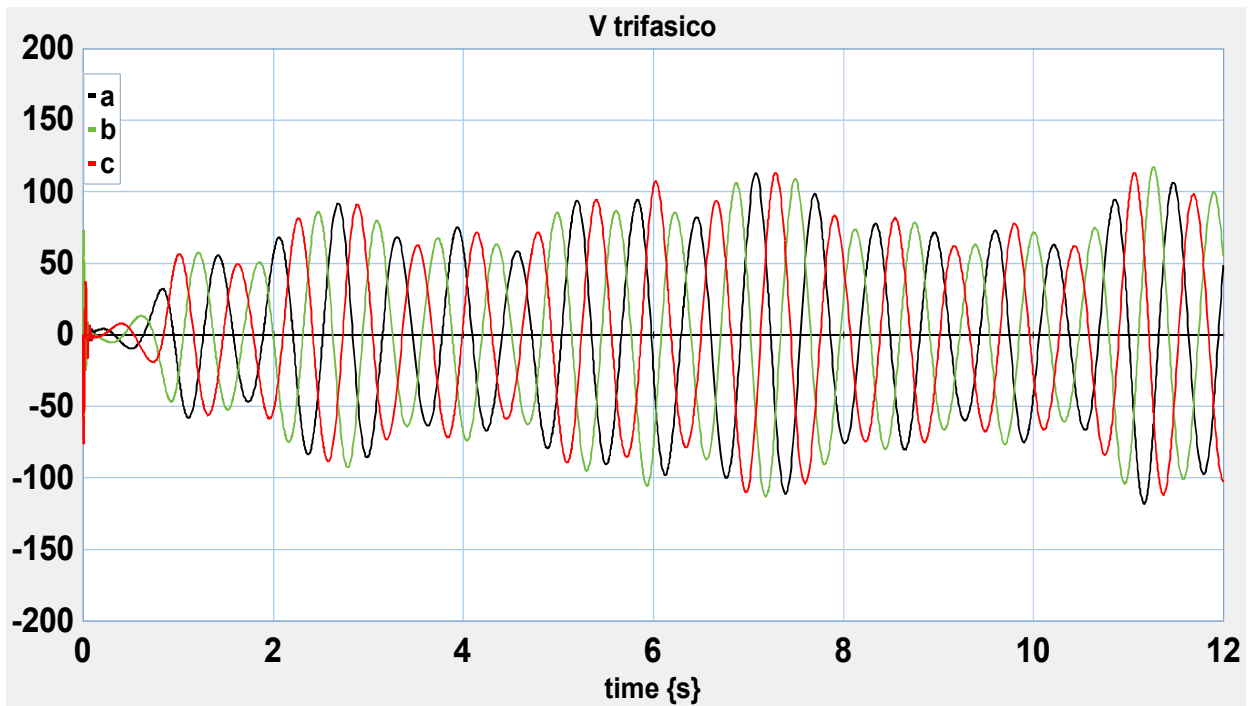


Figura 4.15 Grafica de voltaje trifásico.

Se observa que la simulación da como resultado un voltaje trifásico (AC), para posteriormente ser interconectado a la red suministradora de energía (CFE), pero la onda de salida del inversor tiene variaciones y no se mantiene constante debido a la entrada del viento oscilante que varía dependiendo del día y hora en que esta se mida.

Cabe señalar que la onda de voltaje oscila notablemente, esto disminuye si a la salida del inversor se coloca un controlador para que posteriormente se conecte a la red suministradora (CFE).

#### 4.5.1.2 Simulación del sistema con viento variable

Como vimos anteriormente la entrada de viento es muy importante para el aerogenerador, ahora simularemos el sistema con una entrada con variaciones extremas.

En la figura 4.16 se ilustra el sistema con una entrada de viento propuesta con variaciones frecuentes.

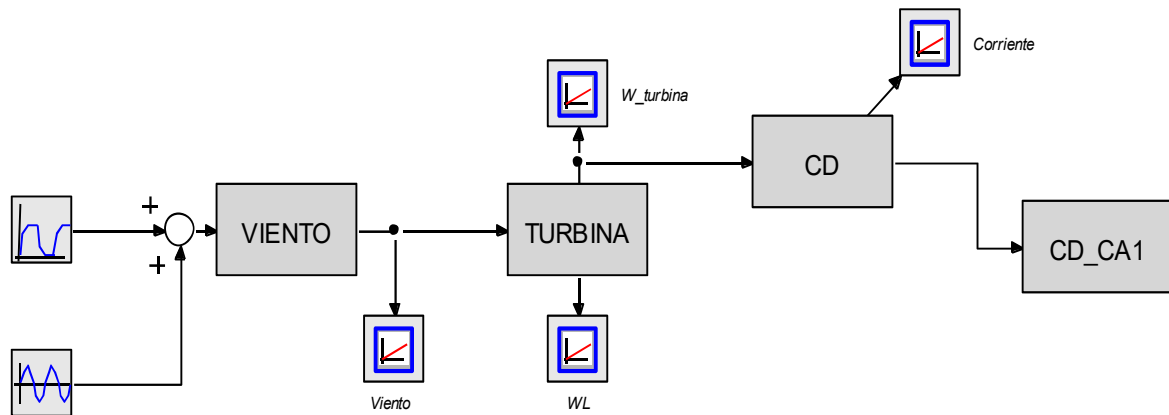
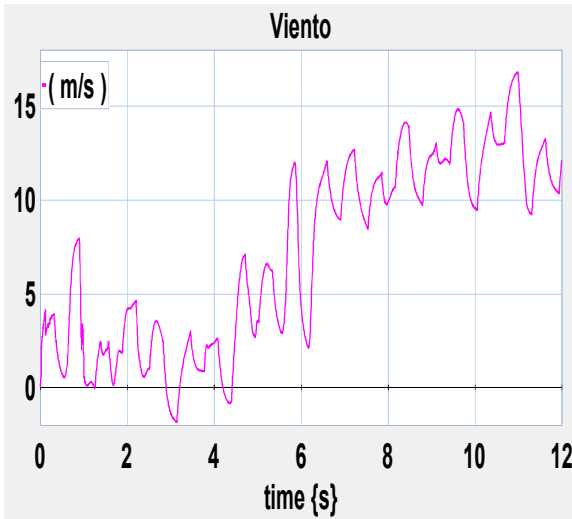
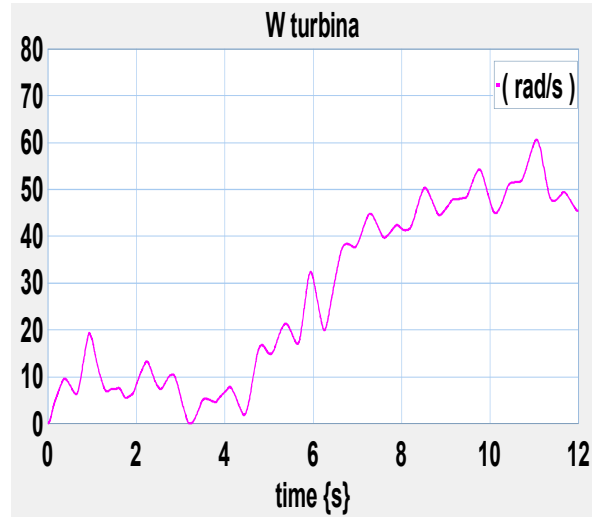


Figura 4.16 Figura el sistema en bloques.

A continuación, en la figura 4.17 se muestran las gráficas de la simulación de este sistema



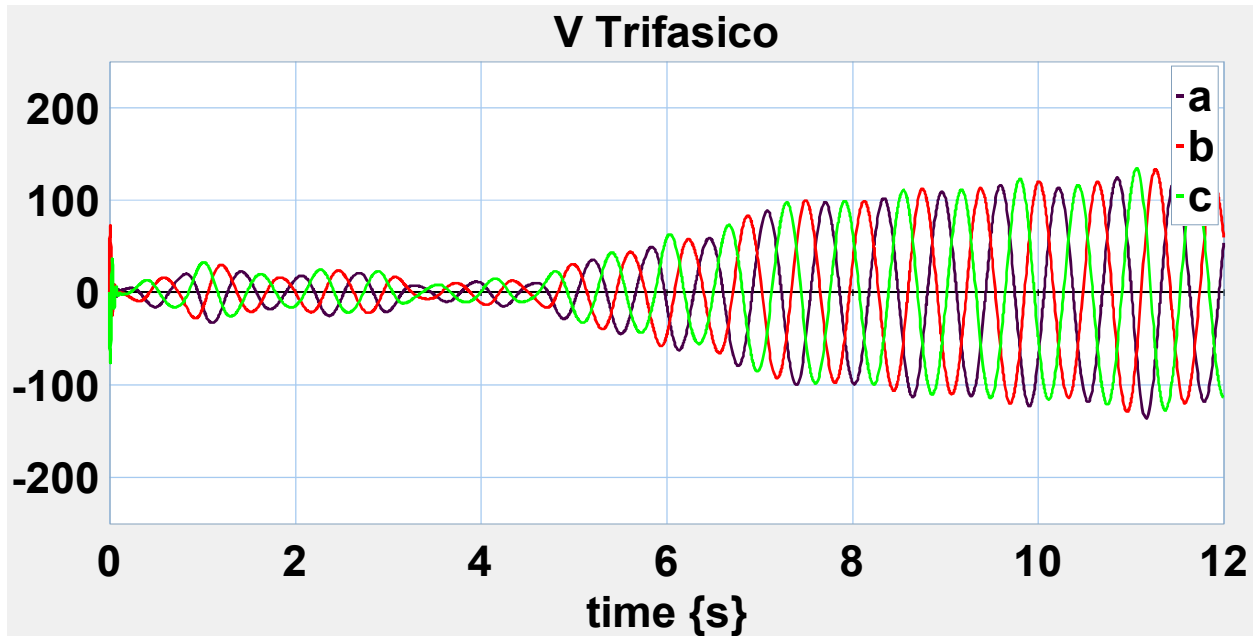
a)



b)



c)



d)

Figura 4.17 Simulación del segundo sistema propuesto.

#### 4.5.1.1 Simulación del sistema con viento constante

A continuación se muestra un sistema ideal en el cual se observa que si la entrada de aire fuera constante a la salida del inversor tendríamos un voltaje trifásico estable, en el cual no hay variaciones y sería ideal para poder conectarse a la red.

En la figura 4.18 se ilustra el voltaje trifásico ideal, el cual se obtendría si la entrada del viento se mantuviera en un sólo valor.

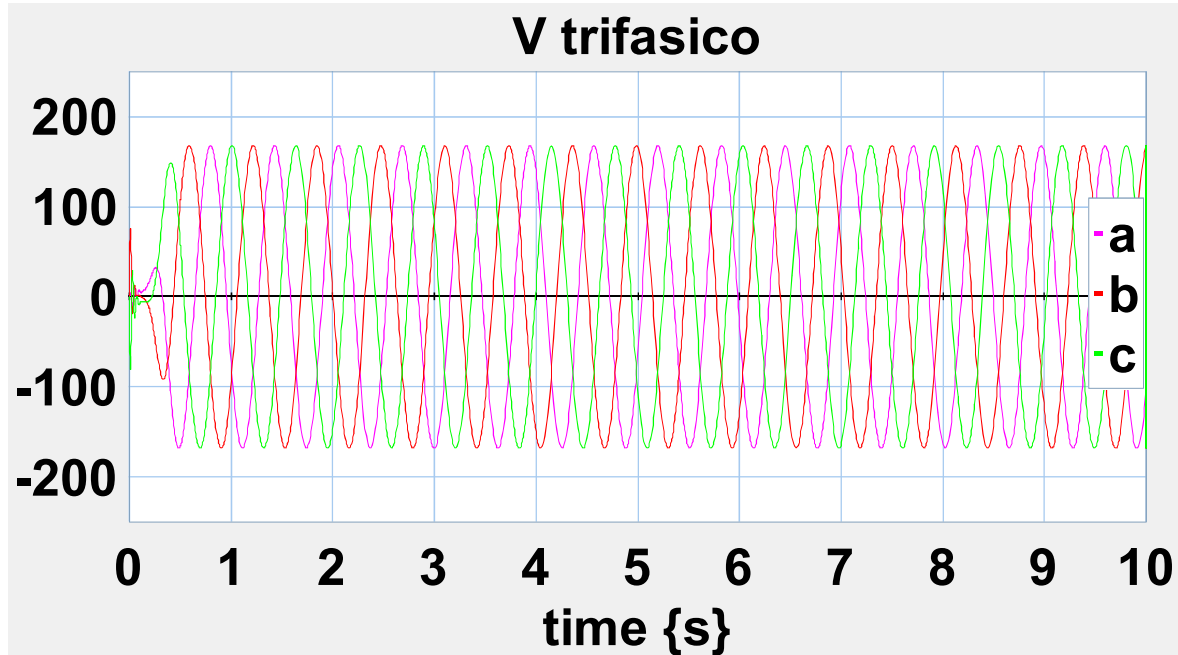


Figura 4.18 Voltaje trifásico ideal.

La variación del voltaje dependerá de la entrada del viento, dependiendo como se comporte así mismo será su variación a la salida, un aspecto que se debe destacar es que si a la salida del inversor se contara con un control este se encargaría de mantener una forma de onda de voltaje estable sin perturbaciones.

Esto ayudará a que este conectado al sistema durante un periodo más largo ya que las perturbaciones de viento hace que el sistema no sea confiable, por lo que se optara por otras formas de generación.

# Capítulo 5

## Conclusiones y Recomendaciones

### 5.1 Conclusiones

El perfil del viento que se utilizó para la simulación de la unidad de generación fue en base del aerogenerador Skystream 3.7, los valores que se tomaron ayudaron a poder tener una gráfica de viento más real y ver el comportamiento del viento a distintas horas del día. Esto ayudo a tener una respuesta más real en el sistema de generación.

Cabe señalar, que como la entrada de viento no es estable a la salida tenemos una variación en la onda de voltaje trifásico, esto se debe a las fluctuaciones del viento. Para eliminar eso debemos tomar en cuenta que se requiere de un controlador el cual permita tener a la salida una forma de onda estable y nos permita conectar a la red suministradora (CFE), evitando las desconexiones entre el sistema de generación y la red eléctrica.

Para obtener la entrada del viento se sumaron varias fuentes y seleccionando la más parecida a lo real. Para la parte de la turbina eólica se fue de gran importancia la velocidad del viento, ya que dependía que a la salida se tuviera una velocidad mayor a la de la entrada.

La implementación del generador de CD ayuda para tener mejor respuesta a la hora de generación, ya que no ocupa mucho par de arranque y podemos controlarlo mas fácilmente sin tanta electrónica de potencia que a final de cuentas afectan a la calidad de la energía.

Todo el sistema fue implementado por diagramas de bloques para su mejor presentación, se realizo desde el modelo de la turbina: estático y dinámico, también se diseño el modelo del generador de CD. para los modelos del sistema se utilizaron

variables de estado en las cuales se debe tener un buen manejo en las ecuaciones que describan al modelo de estudio.

## 5.2 Recomendaciones

A continuación se mencionan las recomendaciones en trabajos futuros, las tres son de gran importancia.

1. **Señal de viento.** Es la parte más importante ya que de esta señal dependerá el buen funcionamiento del sistema de generación eólico. Se debe realizar una señal que sea lo más parecida a lo real.
2. **Control.** Esta parte no se tomo en cuenta en esta tesis, pero es muy importante ya después del inversor se debe tener un control de voltaje a la salida para posteriormente conectarse a la red eléctrica.
3. **20-sim.** Es un software de simulación y control el cual es de gran utilidad para realizar estudios matemáticos y mecánicos, es fácil de utilizar y se recomienda ampliamente.

# Bibliografía

- [1] Rafael Cisneros magaña, Modelado y Análisis de Parques Eólicos: Referencia a Fenómenos Adversos en Calidad de la Energía. Tesis de Maestría Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- [2] Maquinas Eléctricas, Stephen J. Chapman, McGraw-Hill, 3 Edición.
- [3] Ingeniería de Control Moderna, Kasuhiko Ogata, Prentice-Hall, 3 Edición.
- [4] Ovando-Domínguez R., Emulador de Turbina Eólica para Banco de Pruebas de Generación Eoloelectrica, Tesis de Maestría, Cenidet, México.
- [5] Teoría y Problemas de Maquinas Eléctricas y Electromecánicas, Syed A. Nasar, Mc Hill, 1982 primera Edición
- [6] Aldo marino Hernández Sánchez, Análisis, Modelado y Simulación de la Operación de Sistemas de Generación Eoloelectrica Basados en Generadores de Inducción Tipo Jaula de Ardilla. Cenidet, México.
- [7] León Alfredo, Modelado y Análisis en el tiempo de un Parque Eólico Conectado a un bus infinito., UMSNH, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Morelia, Michoacán, México, Mayo 2007.
- [8] Kundur, P., *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, California, 1994.
- [9] IIE Instituto de Investigaciones Eléctricas, Inf. Técnica, <http://www.iie.gob.mx>, 2005.