

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas

Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico

## MODELADO Y SIMULACIÓN DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON AEROGENERADORES DE BAJA POTENCIA

Trabajo de grado previo a la obtención del título de Ingeniera en Mantenimiento  
Eléctrico

Autora:

Diana Elizabeth Chávez Morillo

Director:

PhD. Gerardo Isaías Collaguazo Galeano

IBARRA-ECUADOR

2023



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

### AUTORIZACION DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

#### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b> 1004448955	
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b> Chávez Morillo Diana Elizabeth	
<b>DIRECCIÓN:</b> Calle Camilo Pompeyo Guzmán y Pasaje los Girasoles, San Antonio	
<b>EMAIL:</b> dechavez@utn.edu.ec	
<b>TELÉFONO MÓVIL:</b> 0997152669	

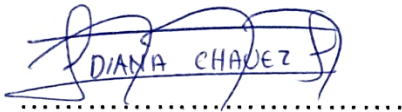
DATOS DE LA OBRA	
<b>TÍTULO:</b>	MODELADO Y SIMULACIÓN DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON AEROGENERADORES DE BAJA POTENCIA
<b>AUTOR:</b>	Diana Elizabeth Chávez Morillo
<b>FECHA:</b>	10/02/2023
<b>SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO</b>	
<b>PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSTGRADO
<b>TÍTULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico
<b>ASESOR/DIRECTOR:</b>	PhD. Gerardo Collaguazo

## 2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrollo, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que se asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 10 días del mes febrero del 2023

### EL AUTOR:

A handwritten signature in blue ink, enclosed in a hand-drawn oval. The signature reads "DIANA CHAVEZ" in capital letters. Below the signature is a horizontal dotted line.

Diana Elizabeth Chávez Morillo



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR**

**PhD. Gerardo Isaías Collaguazo Galeano**

**CERTIFICACIÓN**

Que después de haber examinado el presente trabajo de investigación elaborado por la señorita estudiante, Diana Elizabeth Chávez Morillo, certifico que ha cumplido con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado: **“MODELADO Y SIMULACIÓN DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON AEROGENERADORES DE BAJA POTENCIA”**. Para la obtención del título de Ingeniera en Mantenimiento Eléctrico, aprobado la defensa, impresión y empastado.

**PhD. Gerardo Isaías Collaguazo Galeano**

**DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO**

## TABLA DE CONTENIDO

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA .....	ii
2. CONSTANCIAS .....	iii
CERTIFICACIÓN .....	iv
INTRODUCCIÓN .....	xiii
Contextualización del problema .....	xiii
Planteamiento del problema .....	xiv
Formulación del problema.....	xiv
Justificación .....	xv
Alcance .....	xv
Objetivo general .....	xvi
Objetivos específicos .....	xvi
CAPÍTULO 1 Marco Teórico.....	1
1.1 Energías renovables .....	1
1.2 Ventajas y desventajas de las energías renovables .....	2
1.2.1 Ventajas .....	2
1.2.2 Desventajas .....	3
1.3 Energía eólica .....	3
1.3.1 Aprovechamiento de la energía eólica para la generación de electricidad ....	3
1.3.2 Ventajas y desventajas de la energía eólica.....	4
1.4 Potencial eólico en Ecuador .....	5
1.5 Tecnologías de turbinas eólicas .....	6
1.5.1 Turbinas de eje horizontal y de eje vertical.....	6
1.5.2 Turbinas de velocidad fija y velocidad variable.....	8
1.5.3 Aerodinámica de una turbina eólica .....	9
1.5.4 Control de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) .....	12
1.6 Componentes del WECS propuesto.....	13

1.6.1	La turbina eólica.....	13
1.6.2	El generador eléctrico.....	16
1.6.3	Rectificador .....	21
1.6.4	Convertidor DC-DC.....	22
1.6.5	Baterías.....	23
1.7	Configuraciones del sistema de energía eólica.....	24
1.7.1	WECS de velocidad fija sin interfaz de convertidor de potencia .....	27
1.7.2	WECS de velocidad variable con convertidores de capacidad reducida .....	27
1.7.3	WECS de velocidad variable con convertidores de plena carga .....	29
1.8	Configuraciones de WECS con generador síncrono .....	30
1.8.1	Configuración con convertidores de potencia Back-to-Back .....	30
1.8.2	Configuración con rectificador de diodos y convertidores DC-DC .....	31
CAPÍTULO 2 Modelo del sistema de generación eólico de baja potencia.....		34
2.1	Metodología.....	34
2.2	Sistema eólico propuesto.....	34
2.2.1	Modelo aerodinámico.....	38
2.2.2	Modelo mecánico.....	41
2.2.3	Modelo del Generador Síncrono de Imanes Permanentes .....	42
2.3	Convertidor DC-DC tipo Flyback.....	47
2.3.1	Frecuencia de conmutación.....	49
2.3.2	Relación de transformación de transformador .....	50
2.3.3	Resistencia de carga .....	50
2.3.4	Inductancia de magnetización.....	50
2.3.5	Capacitor de salida .....	51
2.3.6	Capacitor de entrada .....	51
2.4	Sistema de control.....	52
2.4.1	Control del lado del generador .....	52

2.4.2	Control del lado del inversor .....	60
CAPÍTULO 3 Análisis de Resultados .....		67
3.1	Valores de operación del sistema.....	67
3.1.1	Turbina Eólica y PMSG .....	67
3.1.2	Convertidor DC-DC tipo Flyback .....	69
3.1.3	Inversor trifásico.....	70
3.1.4	Controladores.....	71
3.2	Respuesta del sistema.....	71
3.3	Análisis del funcionamiento .....	81
CONCLUSIONES .....		84
RECOMENDACIONES.....		85
REFERENCIAS.....		86

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1. Turbina tripala .....	7
Fig. 1.2. Turbina Darrieus .....	7
Fig. 1.3. Curva de potencia de un aerogenerador .....	10
Fig. 1.4. Componentes de un aerogenerador .....	15
Fig. 1.5. Configuración de máquina de imanes permanentes de flujo axial .....	21
Fig. 1.6. Distribución de los imanes permanentes en máquina de flujo radial .....	21
Fig. 1.7. Rectificador trifásico .....	22
Fig. 1.8. Convertidor reductor elevador .....	22
Fig. 1.9. Formas de onda senoidal pura y modificada de un inversor .....	24
Fig. 1.10. Configuraciones del sistema de energía eólica .....	26
Fig. 1.11. WECS sin interfaz de convertidor de potencia .....	27
Fig. 1.12. WECS de velocidad variable con resistencia variable del rotor .....	28
Fig. 1.13. WECS de velocidad variable con convertidores de capacidad reducida. ....	29
Fig. 1.14. WECS de velocidad variable con convertidores de capacidad total .....	29
Fig. 1.15. Configuración con convertidores de potencia "back-to-back" de plena carga	31
Fig. 1.16. Configuración con rectificador de diodos y convertidores DC-DC .....	31
Fig. 2.1. Diagrama de bloques del sistema .....	34
Fig. 2.2. Esquema del sistema propuesto .....	38
Fig. 2.3. Paso de flujo de aire a través de las palas del aerogenerador .....	38
Fig. 2.4. Límite del coeficiente de potencias respecto a la velocidad del viento .....	40
Fig. 2.5. Modelo mecánico de dos masas de un aerogenerador.....	41
Fig. 2.6. Circuito devanado del rotor y estator del generador síncrono.....	43
Fig. 2.7. Modelo en ejes dq0 del PMSG en el marco de referencia síncrono del rotor...	45
Fig. 2.8. Circuito convertidor Flyback .....	47
Fig. 2.9. Circuito equivalente cuando el interruptor de potencia está cerrado .....	48
Fig. 2.10. Circuito equivalente cuando el interruptor de potencia está abierto .....	49



Fig. 2.11. Característica velocidad-potencia de la turbina eólica .....	53
Fig. 2.12. Esquema de control de velocidad con MPPT basado en $\lambda_{opt}$ .....	55
Fig. 2.13. Circuito del convertidor Flyback .....	56
Fig. 2.14. Balance energético entre la PDC y la potencia de la carga .....	61
Fig. 2.15. Esquema del inversor trifásico con control de voltaje.....	62
Fig. 3.1. Entrada de voltaje al convertidor Flyback .....	69
Fig. 3.2. Característica velocidad de la turbina vs Potencia mecánica .....	72
Fig. 3.3. Característica de relación de velocidad de punta vs coeficiente de potencia... 72	
Fig. 3.4. Variaciones de la velocidad del viento .....	73
Fig. 3.5. Potencia generada por la turbina eólica.....	74
Fig. 3.6. Respuesta del ángulo de paso.....	74
Fig. 3.7. Respuesta de la relación de velocidad de punta .....	75
Fig. 3.8. Respuesta del coeficiente de potencia.....	75
Fig. 3.9. Respuesta de la velocidad del generador.....	76
Fig. 3.10. Respuesta de la corriente del primario del transformador.....	76
Fig. 3.11. Voltaje y corriente que ingresan al convertidor Flyback .....	77
Fig. 3.12. Voltaje y corriente a la salida del convertidor Flyback.....	77
Fig. 3.13. Transferencia de potencia del sistema .....	78
Fig. 3.14. Corriente y voltaje de la fase A .....	79
Fig. 3.15. Voltaje de fase trifásico que recibe la carga .....	79
Fig. 3.16. Valores de potencia de una carga variable.....	80
Fig. 3.17. Corriente del banco de baterías.....	80

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Clasificación de las energías renovables.....	1
Tabla 1.2 Comparación de los tipos de turbinas eólicas respecto a su eje.....	8
Tabla 1.3 Ventajas y desventajas de las turbinas eólicas de velocidad fija y variable .....	9
Tabla 1.4 Componentes de una turbina eólica.....	13
Tabla 1.5 Características de las máquinas eléctricas síncronas y asíncronas .....	16
Tabla 1.6 Características de las baterías .....	23
Tabla 2.1 Ventajas y desventajas de los generadores síncronos y asíncronos.....	36
Tabla 2.2 Cuadro comparativo de convertidores DC-DC .....	37
Tabla 3.1 Valores de operación de la Turbina Eólica .....	68
Tabla 3.2 Datos de simulación del PMSG.....	68
Tabla 3.3 Valores de diseño del convertidor Flyback .....	70
Tabla 3.4 Valores de operación del Inversor.....	71
Tabla 3.5 Parámetros de Sintonización.....	71
Tabla 3.6 Valores ideales de potencia y coeficiente de potencia .....	72

## RESUMEN

En la actualidad la generación de energía eléctrica a partir de energías renovables como la eólica ha tenido un gran crecimiento, debido a la reducción de contaminación que representa y los avances tecnológicos que mejoran su eficiencia. Una de las aplicaciones de esta fuente de energía es la de alimentar a pequeños sectores aislados. Sin embargo, implementar un sistema de generación eólica sin un estudio previo resulta un tanto costoso. Por tal razón en este trabajo se presenta el modelado, simulación y control de un aerogenerador de baja potencia 10 kW compuesto por una turbina eólica de velocidad variable y ángulo de paso fijo, acoplada mecánicamente al eje de un generador síncrono de imanes permanentes. El modelo del sistema se obtiene partiendo de las ecuaciones matemáticas que describen el comportamiento de la parte aerodinámica, mecánica y eléctrica del aerogenerador. El modelo utiliza un esquema de control para captura de máxima energía del viento el cual regula la velocidad del generador por medio de un convertidor DC-DC tipo Flyback, en donde la barra de continua (DC) se respalda a través de un banco de baterías. Para validar su funcionamiento el modelo es implementado en la herramienta de simulación MATLAB/Simulink. De esta manera, se verifica que el sistema dispone de la capacidad de operar en el punto de eficiencia óptimo ante variaciones en la velocidad del viento y cuenta con una eficiencia de transferencia de potencia de 98.5 %, tomada desde la turbina hasta el banco de baterías.

**Palabras clave:** Electrónica de potencia, turbina eólica, generador síncrono de imanes permanentes, convertidor Flyback, seguimiento del máximo punto de potencia, inversor.

## ABSTRACT

Currently, the generation of electricity from renewable energies such as wind power has experienced a great growth, due to the reduction of pollution it represents and the technological advances that improve its efficiency. One of the applications of this energy source is to feed small isolated sectors. However, implementing a wind power generation system without a previous study is somewhat costly. For this reason, this work presents the modeling, simulation and control of a low power wind turbine 10 kW composed of a variable speed wind turbine mechanically coupled to the shaft of a permanent magnet synchronous generator with non-protruding poles. The system model is obtained from the mathematical equations describing the behavior of the aerodynamic, mechanical and electrical parts of the wind turbine. The model uses a control scheme for maximum wind energy capture which regulates the speed of the generator by means of a Flyback DC-DC converter, where the DC bus is supported by a battery bank. To validate its operation, the model is implemented in the MATLAB/Simulink simulation tool. In this way, it is verified that the system has the capacity to operate at the optimum efficiency point under wind speed variations and has a power transfer efficiency of 98.5 %, taken from the turbine to the battery bank.

**Key words:** Power electronics, wind turbine, permanent magnet synchronous generator, Flyback converter, maximum power point tracking, inverter.

# INTRODUCCIÓN

## Contextualización del problema

La energía eólica es una fuente de energía renovable, limpia, abundante y con un alto potencial a nivel global. En los últimos años, la demanda mundial de energía renovable, principalmente la energía eólica ha aumentado (García, 2016). Las energías renovables son el núcleo de los programas de estímulo económico. Por tal razón la capacidad general de todas las turbinas eólicas instaladas en todo el mundo a fines de 2019 alcanzó los 650,8 GW (REVE, 2020).

De acuerdo al Ministerio de Electricidad y Energías Renovables (MEER), la energía eólica en el Ecuador se está aprovechando en la isla San Cristóbal con una capacidad de 2,4 MW, en la isla Baltra con una capacidad de 2,25 MW y en la provincia de Loja, en el cerro Villonaco, con una potencia instalada de 16.5 MW (Escalona, Coronel, Largacha, & Silva, 2016). Según las estadísticas realizadas por el ARC (Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables) antes ARCONEL (Agencia de Regulación y Control de Electricidad), Ecuador cuenta con un potencial eólico de 21,15 MW de los cuales el 78,01 % proviene de empresas generadoras y el 21,99 % a empresas distribuidoras (ARCONEL, 2016).

Por otro lado, la evolución de los aerogeneradores se ha dado a paso acelerado en los últimos años, de tal manera que se han creado nuevos diseños para turbinas y molinos que aprovechan mejor la fuerza del viento y a la vez disminuyen los costes de su producción, permitiendo que esta tecnología llegue a los hogares y permita reducir o eliminar la dependencia de las redes eléctricas convencionales (Salazar & Ruíz, 2016).

Los aerogeneradores se clasifican principalmente por la disposición de su eje, por tanto, se tiene las turbinas de eje horizontal en las cuales su eje de rotación se encuentra paralelo al suelo. Esta es la tecnología que se ha impuesto, por su eficiencia, confiabilidad y la capacidad de adaptarse a diferentes potencias. Por otro lado, están las turbinas de eje vertical en las que el eje de rotación se encuentra perpendicular al suelo, la mayoría de estas producen energía al 50% de la eficiencia de las turbinas horizontales (Lima, Orellana, & Valencia, 2017).

Las pequeñas turbinas eólicas o aerogeneradores de baja potencia constituyen una fuente económica de electricidad para sitios aislados, la aplicación más común de sistemas aislados es la electrificación de viviendas rurales. Además, las instalaciones eólicas de pequeña potencia presentan características propias, que las dotan de una serie de ventajas adicionales respecto a la gran eólica, mayor eficiencia global por las pérdidas evitadas en la red de transporte

y distribución, y que permiten la integración de generación renovable si necesidad de crear nuevas infraestructuras eléctricas (Argudo, 2016).

Para lograr esta evolución y esta presencia de la energía eólica a nivel mundial, se han ido desarrollando a la par herramientas informáticas cada vez más sofisticadas que han permitido simular tanto el comportamiento del viento como la dinámica de los sistemas de generación, a fin de ahorrar costes y avanzar en la investigación para un mejor entendimiento y, por tanto, un mejor desarrollo y control de estos dispositivos (Castro, Domínguez, & Villaseñor, 2019).

A lo largo del tiempo se han desarrollado diversos modelos matemáticos de los principales componentes de diversos aerogeneradores, con el afán de conocer a fondo su funcionamiento, determinar sus limitaciones y obtener soluciones más cercanas a la realidad. Estos modelos son incorporados en un programa desarrollado en el paquete computacional Matlab, para analizar el comportamiento del aerogenerador y su control durante estado estable y estado transitorio, frente a variaciones de viento y fallas de cortocircuito, mediante el trazado de las principales variables aerodinámicas, mecánicas y eléctricas (Vásquez & Játiva, 2015).

## **Planteamiento del problema**

El desarrollo de las tecnologías en energías renovables, entre ellas la energía eólica, han adquirido gran importancia en la reducción de la contaminación generada por la producción de energía eléctrica a base de los combustibles fósiles. En este sentido, la velocidad de cambio y actualización de tecnologías de producción de energía eléctrica a partir de la eólica y su implementación en el medio hace que tarde un determinado tiempo, debido a los costos que estos representan. Por otro lado, el desarrollo de softwares especializados de modelamiento y simulación permiten el análisis de los parámetros de funcionamiento de los sistemas de conversión eólica a bajo costo, permitiendo una posible implementación de estos sistemas de generación de baja potencia, para el abastecimiento de energía eléctrica de sitios aislados como por ejemplo viviendas rurales y así independizarse de la red eléctrica convencional.

## **Formulación del problema**

¿Cómo realizar el modelado y simulación de un aerogenerador de baja potencia en base a sus distintos parámetros de funcionamiento?

## **Justificación**

En la actualidad el modelo energético está enfocado en el desarrollo de estrategias de generación a partir de energías renovables, como alternativa ante los combustibles fósiles y, por tanto, como medio para reducir la contaminación y favorecer la lucha contra el cambio climático. Una de las energías que más ha avanzado en los últimos años es a energía eólica, que empezó con los grandes molinos de viento utilizados en la molienda de cereales, hasta el diseño de aerogeneradores de baja potencia que constituyen una fuente de energía económica para la electrificación de viviendas rurales o los diferentes sitios aislados.

Así como ha evolucionado la tecnología de la energía eólica, también se han desarrollado herramientas informáticas que han permitido simular el comportamiento de estos sistemas de generación, a fin de ahorrar costes y avanzar en la investigación, es por esta razón que el tema de la presente investigación está orientado al modelado y simulación de un sistema de producción de energía eléctrica con aerogeneradores de baja potencia, con la finalidad de observar su comportamiento frente a perturbaciones y así determinar una posible implementación del proyecto.

De acuerdo al creciente interés en la generación de energía eólica, se han desarrollado varios estudios que se enfocan en su producción, los factores que afectan su generación, el modelo matemático de un aerogenerador, las técnicas de control para un funcionamiento óptimo, también la implementación de parques eólicos. Pero este trabajo presenta una recopilación de información acerca de un aerogenerador, en base a esto se obtiene las ecuaciones matemáticas que describen su comportamiento, las cuales son simuladas en Matlab/Simulink para validar su funcionamiento.

## **Alcance**

La obtención de energía eléctrica a partir del viento en un determinado sitio está relacionado a las diferentes variables como la velocidad del viento, por esta razón el modelo de sistema eólico es para bajas velocidades de viento con un valor máximo de 12 m/s. Los distintos parámetros a seleccionar dependen de la potencia eléctrica que es necesaria en una determinada instalación y el consumo de energía que se establezca, por lo que es importante obtener el máximo rendimiento de la potencia. El sistema de este aerogenerador cuenta con un generador sincrónico a imanes permanentes de polos no salientes, el cual convierte la energía cinética de la turbina en energía eléctrica, adicional tiene como características principales que es de velocidad variable y paso de pala.

En el desarrollo del proyecto se describe los componentes del aerogenerador, se realiza el modelado de la turbina eólica, del generador eléctrico y el control del aerogenerador, para posteriormente realizar la simulación del comportamiento del mismo. El uso de un simulador en tiempo real permite evaluar el comportamiento dinámico del aerogenerador de baja potencia ante diferentes condiciones de operación.

El software que se utiliza para la simulación es MATLAB, que no es más que un sistema de cómputo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M) y se encuentra disponible en diversas plataformas como por ejemplo Windows. Una las herramientas que se utiliza es Simulink que es una plataforma de simulación multidominio. Este es un software muy necesario dentro de las Universidades y centros de investigación y desarrollo. Además, que cuenta con dos versiones gratuitas para estudiantes.

La simulación se realiza en base a las ecuaciones dinámicas de los subsistemas aerodinámico y mecánico, y las ecuaciones matemáticas simplificadas obtenidas en el modelamiento del generador eléctrico y del sistema de control del aerogenerador. Dentro del análisis de su funcionamiento se evalúa el comportamiento del sistema frente a distintas velocidades de viento y con carga parcial.

### **Objetivo general**

Realizar el modelado y simulación de la producción de energía eléctrica con aerogeneradores de baja potencia para el análisis de su funcionamiento mediante un software especializado.

### **Objetivos específicos**

- Describir los componentes y las diversas tecnologías aplicadas en un sistema de generación eólico.
- Realizar el modelado matemático de un aerogenerador de baja potencia.
- Analizar la simulación del funcionamiento de un aerogenerador de baja potencia realizada en Matlab/Simulink.



# CAPÍTULO 1

## Marco Teórico

Este capítulo detalla información con respecto a las energías renovables, haciendo hincapié en la energía eólica, además de describir las diferentes tecnologías aplicadas en la generación eólica. De igual forma se presenta una descripción de los diferentes componentes de un aerogenerador, centrándose en el generador eléctrico del sistema y los diferentes sistemas de control.

### 1.1 Energías renovables

Las energías renovables son aquellas fuentes de generación de energía eléctrica consideradas amigables con el ambiente debido al bajo nivel de contaminación que provocan, es decir son fuentes de energía que provienen de recursos inagotables, ya que luego de ser tratados pueden regenerarse (Quiroa, 2019). Por tal razón las energías renovables se proponen como una alternativa frente a la generación a partir de combustibles fósiles y a la reducción de la contaminación ambiental (Hoyos, Franco, & Dyner, 2017).

Para Twenergy (2019), existen varias fuentes de energías renovables y cuyas energías relacionadas se muestran en la Tabla 1.1.

**TABLA 1.1**  
**CLASIFICACIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES**

<b>Energías Renovables</b>	<b>Procedencia</b>
<b>Energía Hidráulica</b>	Se obtiene del aprovechamiento de las energías cinéticas y potenciales de las corrientes de agua. El agua en su caída pasa por unas turbinas hidráulicas que transmiten la energía a un alternador, el cual la convierte en energía eléctrica.
<b>Energía Eólica</b>	Se obtiene mediante el aprovechamiento de la energía cinética de las masas de aire, es decir el viento. A través de los aerogeneradores o molinos de viento se aprovechan las corrientes de aire y se transforman en otro tipo de energía.
<b>Energía Solar</b>	Es obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética (luz, calor y rayos ultravioleta principalmente) procedente del sol.
<b>Energía Geotérmica</b>	Se consigue mediante el aprovechamiento del calor del interior de la tierra, que se transmite a través de los cuerpos de roca caliente, aguas termales, fumarolas y géiseres.
<b>Energía Mareomotriz</b>	Es obtenida aprovechando el movimiento de las mareas y las corrientes marinas. Se tiene un generador con aspas dentro del mar y cuando sube o baja marea, las aspas giran produciendo electricidad.
<b>Biomasa</b>	Es la procedente del aprovechamiento de materia orgánica animal y vegetal o de residuos agroindustriales. Generalmente se obtiene de las sustancias que constituyen los seres vivos, o sus restos y residuos.

Fuente: elaboración propia a partir de (Twenergy, 2019)

La mayor ventaja de las energías renovables es la producción de energía eléctrica. Por tanto, hoy en día, es considerada la mejor alternativa y la más viable, debido al sobreprecio y la escasez de recursos energéticos fósiles (Lechón & Zhungur, 2016). Según datos publicados por la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), las energías renovables representan casi tres cuartas partes de la nueva capacidad instalada de 2019, debido a que estos representan 176 GW de capacidad de generación a escala mundial, de los cuales las energías solar y eólica aportaron el 90% del total de la capacidad renovable agregada (IRENA, 2020).

La participación de las energías renovables en la matriz energética del Ecuador considera los siguientes aspectos; a) generación de electricidad, a través del aprovechamiento de recursos naturales en proyectos hidroeléctricos, eólicos, biomasa (co-generación) y solares (fotovoltaicos); b) la obtención de gas combustible (biogás), utilizando residuos orgánicos producidos por la agroindustria; c) el uso de biocombustibles para el transporte, a través de la sustitución parcial del consumo de la gasolina extra con etanol; d) calentamiento de agua con energía solar, para reemplazar el uso de electricidad o de gas licuado de petróleo (Correa, González, & Pacheco, 2016).

## **1.2 Ventajas y desventajas de las energías renovables**

De manera general las energías renovables presentan ciertas ventajas y desventajas al momento de implementarlas, por tal razón a continuación se describen algunas de ellas.

### **1.2.1 Ventajas**

Vivanco (2020) y UTEL (2019), señalan las siguientes ventajas de las energías renovables:

- Son fuentes de energía inagotables, que no emiten gases de efecto invernadero (GEI) en los procesos de generación de energía. Son consideradas energías limpias y herramientas fundamentales contra el cambio climático, formando un sistema energético sostenible.
- Permiten la reducción de la dependencia energética debido a su naturaleza local (solar, geotérmica, hidráulica), es decir fortalecen la independencia energética, al reducir la importación de combustibles fósiles.
- Son económicamente competitivas, las tecnologías renovables como la eólica y la solar fotovoltaica han reducido fuertemente sus costos, de forma que ya son competitivas con las convencionales.

- Permiten la generación a pequeña escala o nivel de usuario, además hacen que la zona en la que son instaladas sea más autónoma, ya que ayuda al desarrollo de la zona en la que son instaladas, tanto a nivel industrial como económico.

### **1.2.2 Desventajas**

Ruiz (2020) y Nexe Energetic (2019), mencionan las siguientes desventajas de las energías renovables:

- Presentan intermitencia en su funcionamiento, las centrales generadoras que usan estos recursos, no pueden controlar cuándo operar, debido a que funcionan cuando el recurso está disponible. En general, necesitan otras fuentes de apoyo (pueden ser combustibles fósiles o centrales hidroeléctricas) para garantizar una producción continua.
- Estas fuentes de energía necesitan de grandes construcciones y en algunos casos preparación de terreno, para producir a gran escala, por lo que afectan el ecosistema donde se ejecutan dichas instalaciones.
- La producción de energía a partir de energía proveniente de fuentes renovables requiere una inversión inicial alta, ya que para que sea rentable es necesario una investigación y planificación antes de implementarlas, lo cual implica un coste elevado.
- Provocan un impacto visual elevado, si se requiere obtener grandes cantidades de energía es necesario instalaciones que ocupen grandes extensiones, por lo que se puede suponer un impacto visual negativo.

## **1.3 Energía eólica**

La energía eólica es una fuente de energía renovable que proviene de las corrientes de aire, es decir energía cinética generada por los efectos de las corrientes de viento, la cual es convertida en otras formas útiles de energía, necesarias para las actividades humanas. Los vientos se generan debido al calentamiento no uniforme de la superficie terrestre a causa de la radiación solar; entre el 1 y 2% de la energía proveniente del sol, se convierte en viento (Lima, Orellana, & Valencia, 2017).

### **1.3.1 Aprovechamiento de la energía eólica para la generación de electricidad**

La energía cinética llevada por el movimiento de las masas de aire puede ser aprovechada por medio de aerogeneradores conectados a las grandes redes de distribución de energía eléctrica o puede aplicarse a la generación de energía eléctrica en zonas aisladas. En la actualidad el recurso eólico, específicamente los parques eólicos construidos en tierra suponen una fuente de energía cada vez más barata y competitiva frente a las otras formas de energía

incluyendo las no convencionales, favoreciendo así a la sociedad y su economía (González L. , 2018).

IRENA (2020), menciona que la energía eólica es la que mayor aumento y acogida ha tenido a nivel mundial si se habla de crecimiento de energías renovables en los últimos años. Esta es utilizada en gran porcentaje para la generación eléctrica de varios países, y se puede observar su incremento en los últimos 10 años.

Los factores que incidieron para que las energías renovables (energía eólica) tuvieran aumento en la última década son: (Lechón & Zhungur, 2016)

- Fuentes de viento inagotables existentes en todo el planeta.
- Continuo agotamiento de combustibles fósiles.
- Avances tecnológicos.
- Facilidad de aceptación de proyectos que ayuden al cuidado del medio ambiente por parte de los gobiernos de los diferentes países

### **1.3.2 Ventajas y desventajas de la energía eólica**

Según Arriols (2020) y Tello (2017), la energía eólica presenta las siguientes ventajas:

- **Ventajas de la energía eólica**
  - Una de sus principales ventajas es que es una fuente de energía inagotable, es decir que siempre se puede aprovechar el viento que es la fuente original de esta energía. Es además una fuente de energía limpia, ya que no produce ningún tipo de residuo que contribuya a la destrucción del ecosistema o favorezca al calentamiento global.
  - La energía eólica es autóctona, es decir permite la independencia energética, ya que el viento es un recurso que es accesible en todo el mundo, permitiendo crear un mercado energético autóctono que no libra de la necesidad de importar la energía eléctrica desde otras economías.
  - La instalación de los parques eólicos es fácil y rápida de montar (6 meses a 1 año) y desmontar, gracias a las tecnologías desarrolladas que a la hora de implementar un parque eólico permiten un trabajo sencillo y bastante efectivo.
  - Una de sus ventajas más importantes es que tiene un bajo costo de operación, por lo es competitiva con otras energías como por ejemplo la energía nuclear o el carbón, por esta razón resulta una opción atractiva para los inversionistas.

La producción de energía eólica presenta algunos inconvenientes debido a varios factores que pueden influir en el desarrollo de esta, (Lechón & Zhungur, 2016) y (Fernández, 2018) mencionan algunas de ellas:

- **Desventajas de la energía eólica**

- Unos de sus principales inconvenientes es que su producción de electricidad no es continua. Está sujeta a si hay o no viento, por lo que necesita el respaldo de otro tipo de energías para esos momentos (ya seas renovables o no renovables).
- La construcción de parques eólicos tiene un ligero impacto estético en el paisaje, lo que genera molestar en la población local. Además, para el acceso a dichos parques se necesita abrir carreteras, que en algunos casos causa un impacto ambiental.
- Los aerogeneradores emiten o generan sonidos que pueden ser molestos si hay viviendas próximas en la zona, sin embargo, gracias a los avances en ingeniería esta desventaja se ha reducido al mínimo.
- Otro de los inconvenientes de la energía eólica es que cuando se encuentran operacionales las aspas o palas de los aerogeneradores suponen un peligro de muerte para las aves, ya que los parques se instalan en zonas con corrientes de aire que son las que aprovechan las aves migratorias.

#### **1.4 Potencial eólico en Ecuador**

Según el “Atlas Eólico del Ecuador con fines de generación eléctrica”, el potencial eólico-eléctrico bruto de Ecuador es de 1691 MW, considerando zonas con una velocidad de viento promedio anual mayor a 7 m/s, lo que generaría una energía media de 2869 GWh. El potencial factible a corto plazo se ha estimado en valores de potencia instalable de 884 MW y energía media anual de 1518 GWh (MERNNR, 2017).

El Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables (MERNNR) señala que, la energía eólica en el Ecuador se está aprovechando en la isla San Cristóbal con una capacidad de 2,4 MW, en la isla Baltra con una capacidad de 2,25 MW y en la provincia de Loja, en el cerro Villonaco, con una potencia instalada de 16,5 MW. A través del Ministerio de Electricidad y Energía Renovables (MEER), gracias a los últimos veinte años de progreso tecnológico, han desarrollado el “Atlas Eólico del Ecuador”, el cual se ha elaborado mediante mapeo satelital, y permite conocer las zonas potenciales para el aprovechamiento energético en el Ecuador (Escalona, et al., 2016). Según las estadísticas realizadas por la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (ARC), Ecuador cuenta con un potencial eólico

de 21,15 MW de los cuales el 78,01 % proviene de empresas generadoras y el 21,99 % a empresas distribuidoras (ARCONEL, 2016).

Sin embargo, según el Plan Maestro de Electricidad 2016-2025 presentado por el MERNNR, existe el proyecto Minas de Huascachaca que se ubica en la provincia de Loja cantón Saraguro, este proyecto se encuentra en fase de construcción y está concebido para generar 50 MW con la ayuda de 16 aerogeneradores, constituyéndose así el parque eólico más grande del Ecuador (MERNNR, 2017).

El Atlas Eólico del Ecuador del Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables (MERNNR) señala que, la provincia de Loja cuenta con alrededor del 52% del potencial de viento del país, lo que ha dado lugar a la formulación de nuevos proyectos para aprovechar este recurso renovable. Por esta razón, el MERNNR, a través de la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP, lleva adelante el proceso público de selección para la concesión del Proyecto Eólico Villonaco II y III, de 110 MW (Noristz, 2020). En la provincia de Loja se tiene la mayor posibilidad de explotar el recurso eólico y específicamente en la zona de Yangana es la que mayor potencial promete, con valores máximos superiores a 20 m/s y valores medios por encima de 8 m/s anualmente (Álvarez, Maldonado, Montaña, & Tenechagua, 2014).

## **1.5 Tecnologías de turbinas eólicas**

La turbina es uno de los elementos más importantes en un Sistema de Conversión de Energía Eólica (WECS, por sus siglas en inglés). En el transcurso del tiempo se han desarrollado diferentes tipos o configuraciones de turbinas. Esta sección proporciona una descripción general de las tecnologías de turbinas eólicas como son las turbinas de eje horizontal o HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine) y de eje vertical o VAWT (Vertical Axis Wind Turbine), incluidas las turbinas de velocidad fija/variable (González F. , 2020).

### **1.5.1 Turbinas de eje horizontal y de eje vertical**

Las turbinas eólicas se pueden clasificar en función de la orientación de su eje de giro en turbinas eólicas de eje horizontal y turbinas eólicas de eje vertical como se muestra en la Figura 1.1 y 1.2, a continuación, se presenta una breve descripción de cada una de ellas.

#### **1.5.1.1 Turbinas de eje horizontal**

Las turbinas de eje horizontal tienen un rotor ubicado de forma paralela al viento y al suelo, generalmente el rotor se encuentra constituido por tres palas, aunque existe casos en los que el diseño constituye la implementación de una, dos o múltiples palas. Estas son las más implementados en los parques eólicos y en pequeñas aplicaciones aisladas de baja potencia,

debido a su eficiencia y capacidad de producción, una turbina de eje horizontal tiene la capacidad de producir hasta 1 MW y gracias a los avances de la tecnología su capacidad va en aumento (González L. , 2018).



Fig. 1.1. Turbina tripala  
Fuente: (Rodríguez J. , 2017)

#### 1.5.1.2 Turbinas de eje vertical

Las turbinas de eje vertical son aquellas cuya rotación se encuentra perpendicular al eje del suelo y son utilizadas en aplicaciones de baja potencia (menores a 10 kW) (González L. , 2018). Estas turbinas sobresalen por no necesitar un dispositivo o mecanismo de orientación, ya que debido a su fabricación pueden aprovechar el viento sin importar de dónde provenga (Rodríguez J. , 2017).

Por otra parte, su eficiencia de conversión de la energía eólica es más baja debido a que el viento es más débil en la parte inferior de las palas y, además, el eje del rotor es largo, lo que es propenso a vibraciones mecánicas. Es por esta razón que, para la conversión de energía eólica a gran escala, se dificulta la aplicación de turbinas eje vertical, siendo así las turbinas de eje horizontal los que dominan el mercado actual de viento, sobre todo en los grandes parques eólicos comerciales (Soriano, 2015).



Fig. 1.2. Turbina Darrieus  
Fuente: (González L. , 2018)

### 1.5.1.3 Ventajas y desventajas de las turbinas eólicas de eje horizontal y vertical

Las turbinas de eje horizontal y eje vertical presentan diversas ventajas y desventajas entre ellos, las cuales se presentan en la Tabla 1.2.

**TABLA 1.2**  
**COMPARACIÓN DE LOS TIPOS DE TURBINAS EÓLICAS RESPECTO A SU EJE**

Tipos de turbinas	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>HAWT</b> <b>(eje horizontal)</b>	Su rendimiento es más elevado que los de eje vertical Soportan altas velocidades de viento Se puede realizar el control de velocidad del rotor y de la energía de salida Se pueden instalar a mayor altura con la ayuda de torres donde la fuerza del viento es mayor.	Necesitan un sistema de orientación Necesitan de una construcción solida de la torre para soportar el peso de la góndola Las turbinas altas son difíciles de instalar y necesitan grúas poderosas y operadores hábiles Mantenimiento complejo de los aerogeneradores de gran potencia
<b>VHWT</b> <b>(eje vertical)</b>	No requieren sistemas de orientación Su mantenimiento es fácil Producen energía a bajas velocidades de viento No se necesita una torre de estructura poderosa Su fabricación presenta bajo costo	La mayoría de las turbinas verticales tienen poca eficiencia No toman ventaja de los vientos fuertes de mayor altura Necesitan estar conectadas a la red eléctrica para arrancar Dificultad en controlar la energía de salida

Fuente: (González L. , 2018), (Lima, Orellana, & Valencia, 2017), (Saavedra & Alejos, 2019)

Como ya se ha mencionado en la actualidad las turbinas de eje horizontal son las que predominan en el mercado, debido a las múltiples ventajas presentadas en la Tabla 1.2 y además brindan la posibilidad de aplicación a la generación de baja potencia.

### 1.5.2 Turbinas de velocidad fija y velocidad variable

Las turbinas eólicas también se pueden clasificar de acuerdo a su velocidad de trabajo en turbinas de velocidad fija y de velocidad variable. Como sugiere su nombre, las turbinas eólicas de velocidad fija giran a una velocidad casi constante y por otro lado las turbinas de velocidad variable pueden trabajar en un amplio rango de velocidad de viento, a continuación, se proporciona mayor detalle a cada una de ellas.

#### 1.5.2.1 Turbinas de velocidad fija

En las turbinas de velocidad fija, la velocidad de giro del rotor permanece constante y viene determinada por la frecuencia de la red, la relación de transmisión y el número de polos del generador, sin importar la velocidad de viento. El control aerodinámico de las palas protege a la turbina de los posibles daños causados por las ráfagas de viento. La turbina de velocidad fija



genera grandes oscilaciones en el sistema de potencia. Este tipo de turbina también requiere un diseño mecánico robusto para absorber las altas cargas mecánicas (Soriano, 2015).

Las principales ventajas de las turbinas de velocidad fija son su simplicidad, robustez y fiabilidad, además de su precio. Su principal desventaja es el consumo incontrolable de potencia reactiva y la pobre calidad de la energía generada (Soriano, 2015).

### 1.5.2.2 Turbinas de velocidad variable

Las turbinas de velocidad variable están diseñadas para alcanzar la máxima eficiencia aerodinámica para un amplio rango de velocidades de viento, lo que significa aumento de la potencia generada. Para hacer ajustable la velocidad de la turbina, el generador de la turbina eólica está normalmente conectado a la red eléctrica a través de un sistema de convertidor de potencia. El sistema de convertidor permite el control de la velocidad del generador que está acoplado mecánicamente al rotor (palas) de la turbina eólica (Wu, Lang, Zargari, & Kouro, 2011).

Las principales ventajas de la turbina de velocidad variable incluyen el aumento de la producción de energía eólica, una mejor calidad de energía, y la reducción de la tensión mecánica. Los principales inconvenientes son el aumento del costo de fabricación y las pérdidas de potencia debidas al uso de convertidores de potencia (Wu, Lang, Zargari, & Kouro, 2011).

### 1.5.2.3 Ventajas y desventajas de las turbinas de velocidad fija y variable

Las turbinas de velocidad fija y variable presentan diversas ventajas y desventajas entre ellas, las cuales se presentan en la Tabla 1.3.

**TABLA 1.3**  
VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS TURBINAS EÓLICAS DE VELOCIDAD FIJA Y VARIABLE

Velocidad	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>Fija</b>	Simple, robusta, confiable Costo y mantenimiento bajo	Baja eficiencia en la conversión de energía Alta tensión mecánica Altas oscilaciones de potencia hacia la red
<b>Variable</b>	Gran eficiencia en la conversión de energía Baja tensión mecánica	Costo adicional y pérdidas debido a los convertidores Sistema de control más complejo

Fuente: (Soriano, 2015)

En base a las ventajas presentadas por las turbinas de velocidad variable, los fabricantes se han permitido desarrollar grandes turbinas que son más rentables, por tanto, en la actualidad estas dominan el mercado.

### 1.5.3 Aerodinámica de una turbina eólica

El diseño aerodinámico de la pala de la turbina tiene una influencia significativa en la cantidad de energía capturada del viento. El diseño debe considerar los medios para limitar la

potencia y la velocidad de rotación del rotor de la turbina para velocidades de viento superiores al valor nominal para mantener las fuerzas en los componentes mecánicos (pala, caja de cambios, eje, etc.) y la potencia de salida del generador dentro de los márgenes de seguridad (Wu, Lang, Zargari, & Kouro, 2011).

### 1.5.3.1 Característica de potencia de las turbinas eólicas

Las características de potencia de una turbina eólica están definidas por la curva de potencia, que relaciona la potencia mecánica de la turbina con la velocidad del viento. La curva de potencia indica el rendimiento de un aerogenerador o turbina. Una curva de potencia típica se caracteriza por tres velocidades del viento: velocidad del viento de arranque, velocidad del viento nominal y velocidad del viento de corte o parada, como se muestra en la Fig. 1.3, donde  $P$  es la potencia mecánica generada por la turbina y  $v^*$  es la velocidad del viento (Dominguez, 2019).

La velocidad del viento de arranque, como sugiere el nombre, es la velocidad del viento a la que la turbina comienza a funcionar y a entregar energía. La pala debe poder capturar suficiente energía para compensar las pérdidas de energía de la turbina. La velocidad nominal del viento es la velocidad a la que el sistema produce potencia nominal, que es también la potencia nominal de salida del generador y la velocidad del viento de corte es la velocidad del viento más alta a la que se permite operar la turbina antes de que se apague (Dominguez, 2019).

La carga parcial se refiere a la potencia producida por el aerogenerador antes de alcanzar su potencia nominal, en la región de plena carga el aerogenerador alcanza su potencia de generación máxima y en la zona de paso variable es el punto donde el generador disminuye su capacidad de generación antes de la desconexión debido a las altas velocidades (González L. , 2018).

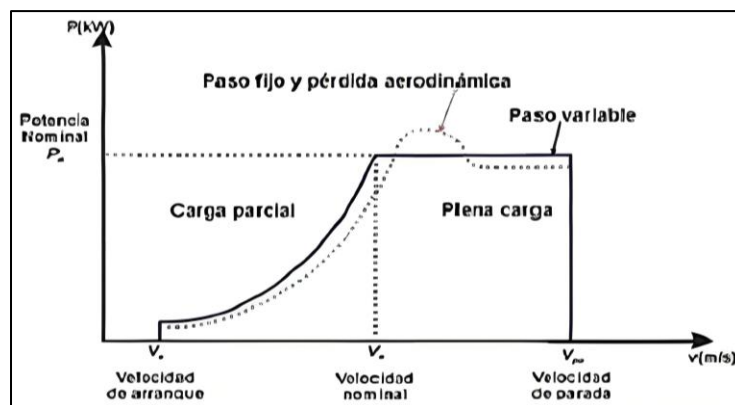


Fig. 1.3. Curva de potencia de un aerogenerador  
Fuente: (Dominguez, 2019)

Para entregar la energía capturada a la red a diferentes velocidades del viento, el generador eólico debe controlarse adecuadamente con una operación de velocidad variable. A medida que la velocidad del viento aumenta más allá de la velocidad nominal, se requiere el control de la potencia aerodinámica de las palas para mantener la potencia en el valor nominal (Wu, Lang, Zargari, & Kouro, 2011).

### **1.5.3.2 Control de potencia aerodinámica: pérdida pasiva, pérdida activa y control de ángulo de paso**

El ángulo de ataque de la pala juega un papel fundamental en la determinación de la cantidad de fuerza y par generado por la turbina. Por lo tanto, es un medio efectivo para controlar la cantidad de captura de energía. Hay tres métodos aerodinámicos para controlar la captura de energía para grandes aerogeneradores: pérdida pasiva, pérdida activa y control de paso.

#### **a) Control por pérdida pasiva**

En este tipo de sistema, la pala está fija unida de forma rígida al buje del rotor. En algunos modelos de aerogenerador, se permite el giro en su extremo para actuar como freno aerodinámico. La regulación de potencia se consigue utilizando un perfil de pala diseñado especialmente para aumentar la pérdida aerodinámica a la vez que se aumenta la velocidad del viento. Según aumenta la velocidad del viento, alrededor de la pala aumenta la potencia que capta el rotor y cuando esta velocidad llega a un valor en concreto, gracias al diseño del perfil de la pala, se comienza a desarrollar turbulencia. De esta forma, se empieza a entrar en pérdida aerodinámica y a raíz de ello la potencia se limita. En el caso de que la velocidad del viento alcance el valor de la velocidad de parada del aerogenerador, las pérdidas aerodinámicas serán tan elevadas que causaran la parada total del rotor (Pérez, 2016).

#### **b) Control por pérdida activa**

En las turbinas de entrada en pérdida activa, el fenómeno de entrada en pérdida puede ser inducido no solo por velocidades de viento más altas, sino también por el aumento del ángulo de ataque de la pala. Por lo tanto, las turbinas eólicas de pérdida activa tienen palas ajustables con un mecanismo de control de paso. Cuando la velocidad del viento supera el valor nominal, las palas se controlan para girar más hacia el viento, lo que lleva a la reducción de la potencia capturada. Por lo tanto, la potencia capturada se puede mantener en el valor nominal ajustando el ángulo de ataque de la pala (Fuentes, 2020).

### **c) Control de ángulo de paso**

Este método de control consiste en que las palas varían su ángulo de incidencia con respecto al viento. Cuando la potencia generada es excesiva, las palas comienzan a girar sobre su eje longitudinal hasta adoptar la posición denominada de bandera. La resistencia entonces opuesta al viento es mínima, así como el par ejercido y la potencia generada. Un sistema electrónico vigila tanto la velocidad del viento, como la potencia generada y la posición de las palas modificando de manera continua la posición de estas y adaptándola a la intensidad de los vientos reinantes en ese momento. El mecanismo de cambio del ángulo de paso suele funcionar de forma hidráulica (Mirapeix, 2017).

#### **1.5.3.3 Relación de velocidad de punta**

La relación de velocidad punta o TSR (Tip-Speed-Ratio), es un término que sustituye al número de revoluciones por minuto  $n$  del rotor y relaciona la velocidad tangencial de la punta de una pala y la velocidad del viento. La relación punta-velocidad está relacionada con la eficiencia, y el óptimo varía con el diseño de la pala, también sirve para comparar el funcionamiento de diferentes máquinas eólicas, por lo que también se le suele denominar velocidad específica (Defaz & Pallasco, 2017).

#### **1.5.4 Control de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT)**

El seguidor de punto de máxima potencia o “Maximum Power Point Tracker”, MPPT, es un sistema que permite obtener la máxima potencia de sistemas de generación de energía eólica o solar, y consiste en que el sistema opere en un punto específico de las curvas características de potencia-velocidad del viento (Prous, 2018).

El control de un aerogenerador de velocidad variable por debajo de la velocidad nominal del viento se logra controlando el generador. El objetivo principal es maximizar la captura de energía eólica a diferentes velocidades del viento, lo que se puede lograr ajustando la velocidad de la turbina de tal manera que se mantenga la relación de velocidad punta óptima. Se han desarrollado varios esquemas de control para realizar el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), los tres métodos conocidos son los siguientes: MPPT con perfil de potencia de turbina, MPPT con relación de velocidad de punta óptima, MPPT con control de par óptimo (Wu, Lang, Zargari, & Kouros, 2011).

## 1.6 Componentes del WECS propuesto

Los sistemas de conversión de energía eólica están conformados por diferentes máquinas que pueden realizar la conversión de energía disponible en el viento en energía mecánica, y esta a su vez mediante otros elementos convertirse en energía eléctrica para su acoplamiento a la red o una carga aislada. En este apartado se presenta una descripción de los componentes mecánicos, eléctricos y opciones de control que conforman un sistema de conversión de energía eólica completo (Nieves, 2022).

### 1.6.1 La turbina eólica

Una turbina eólica es un dispositivo mecánico que convierte la energía del viento en electricidad. Las turbinas eólicas están diseñadas para convertir la energía del movimiento del viento (energía cinética) en energía mecánica, es decir, el movimiento de un eje. Luego, en los generadores, esta energía mecánica se convierte en electricidad. Generalmente las turbinas de bajo potencial eólico aisladas de la red tienen una estructura similar a los grandes, con la diferencia en que cuyo diseño es más simple. Como en general, la turbina más empleada es la de eje horizontal, a continuación, se describen los componentes principales que la constituyen tal como muestra en la Fig. 1.4 (Carlosama, 2019).

Los componentes mecánicos de una turbina según (Nieves, 2022), (Risueño, 2017), (Carlosama, 2019) y (Romero & Santiago, 2019) se muestran en la Tabla 1.4.

**TABLA 1.4**  
**COMPONENTES DE UNA TURBINA EÓLICA**

<b>Anemómetro y veleta</b>	Se utiliza para orientar la turbina hacia la velocidad del viento predominante. Las turbinas pequeñas se orientan mediante una veleta, en tanto que las más grandes usan un sensor de dirección y se orientan mediante servomotores o motor-reductores.
<b>Convertidores electrónicos</b>	Conjunto de elementos electrónicos de potencia dispuestos a convertir una forma de energía a otra mediante sistemas de control.
<b>Generador eléctrico</b>	Maquina eléctrica capaz de entregar una diferencia de potencial en sus bornes mediante la tranasformación de energía mecánica a eléctrica.
<b>Rodamiento corona</b>	Permite orientar la góndola de manera que se capte mayores porcentajes de viento o permite despreciar vientos muy fuertes que podrían causar daños a la turbina.
<b>Torre</b>	Sitúa el generador a una mayor altura, donde los vientos son de mayor intensidad para permitir el giro de las palas y transmitir las cargas del equipo al suelo.
<b>Eje de baja velocidad</b>	Acopla el buje que gira por acción del viento con el sistema multiplicador.
<b>Cojinetes</b>	Puntos de apoyo de los ejes mecánicos y árboles para sostener su peso, guiarlos en su rotación y evitar deslizamientos.
<b>Rodamiento paso de pala</b>	Empleado para girar las palas a la dirección del viento o con mayor velocidad o evitar su captura exagerada por cuestiones de seguridad.

<b>Buje</b>	Pieza cilíndrica donde se unen mecánicamente las palas con el eje o rotor del generador.
<b>Palas o hélices</b>	Tienen la posibilidad de cambiar el ángulo de paso para reducir la captura de potencia cuando la velocidad del viento es mayor a la nominal.
<b>Góndola</b>	Sirve de alojamiento para los elementos mecánicos y eléctricos (caja multiplicadora, generador, armarios de control, etc.) del aerogenerador.
<b>Caja multiplicadora de velocidad</b>	Puede estar presente o no, dependiendo del modelo. Transforman la baja velocidad del eje del rotor en alta velocidad de rotación en el eje del generador eléctrico.
<b>Freno de disco</b>	Sirve para frenar al eje de alta velocidad cuando se encuentra girando a una velocidad superior a la nominal, evitando daños en los equipos del aerogenerador.
<b>Eje de alta velocidad</b>	Su velocidad es superior a la del eje de baja velocidad gracias al mecanismo dispuesto en la caja multiplicadora, con el objetivo de alcanzar la velocidad necesaria para el funcionamiento correcto del generador eléctrico.

Fuente: (Nieves, 2022)

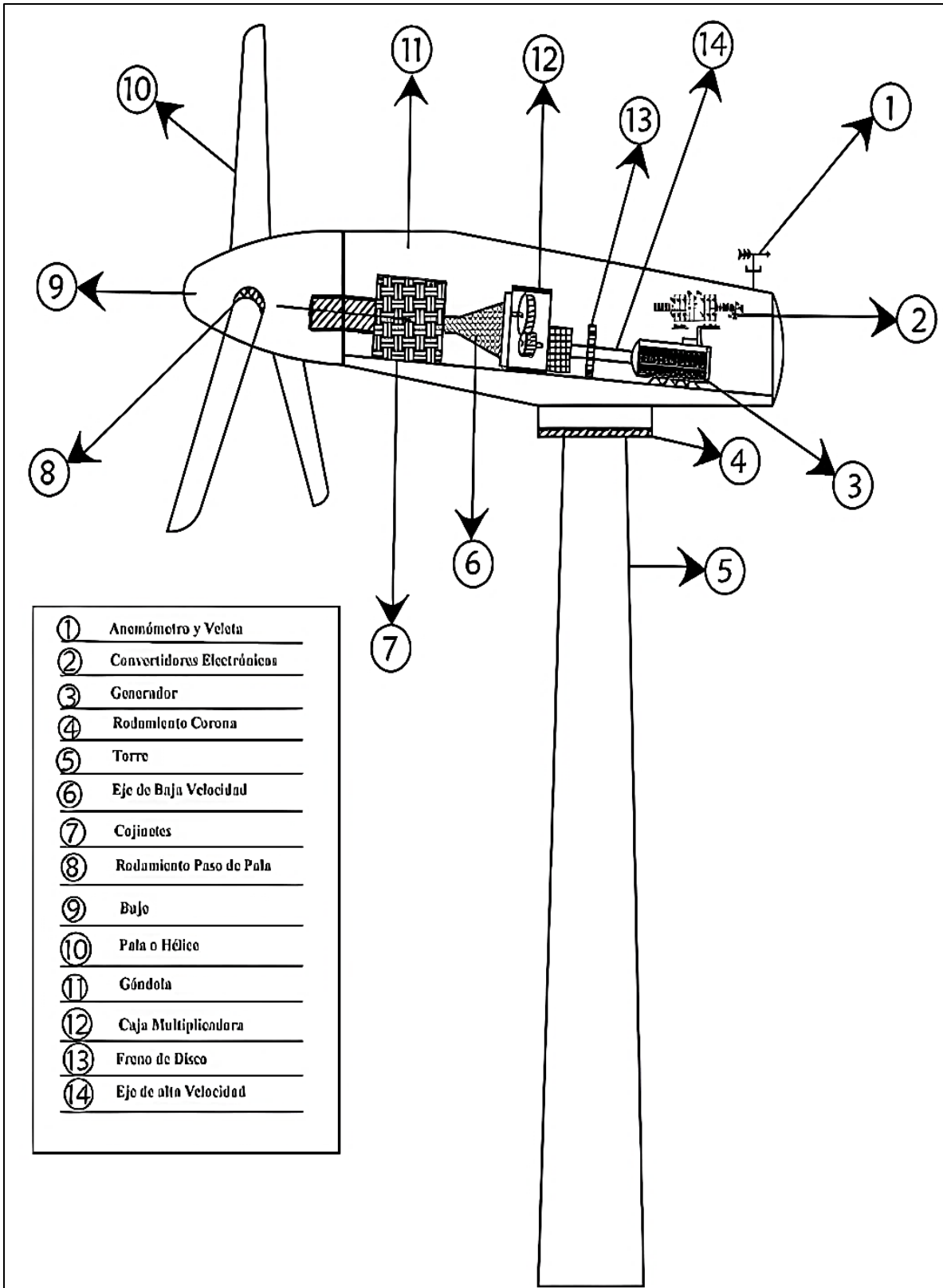


Fig. 1.4. Componentes de un aerogenerador  
Fuente: (Nieves, 2022)

## 1.6.2 El generador eléctrico

Un generador es una máquina capaz de producir una diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, llamados terminales, bornes o polos, lo que le permite transformar energía mecánica en energía eléctrica, por medio de la acción de un campo magnético sobre el bobinado eléctrico dispuesto en una armadura (León & Rodríguez, 2016).

Hay dos tipos de máquinas: síncronas y de inducción. El primer tipo es un dispositivo que tiene un imán permanente en el rotor y requiere de un movimiento mecánico primario para inducir una corriente. En una máquina asíncrona o de inducción, la velocidad del campo magnético incidente no es la misma que la del rotor. Cuando el campo magnético gira a una velocidad superior a la del rotor, se induce una corriente en el estator proporcional a la velocidad de giro del rotor. Cuanto mayor sea la velocidad de giro del rotor, mayor será la potencia que la máquina puede generar (Camacho, Salamanca, & Gallego, 2020). En la Tabla 1.5 se muestran las características de cada máquina.

**TABLA 1.5**  
**CARACTERÍSTICAS DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS SÍNCRONAS Y ASÍNCRONAS**

<b>Generadores síncronos</b>	<b>Generadores asíncronos</b>
<b>Tiene imanes permanentes</b>	No tiene imanes permanentes en su estructura
<b>Necesita una fuente de alimentación DC-AC</b>	No necesita fuente de alimentación DC
<b>Tiene dos devanados</b>	Tiene un solo devanado
<b>Cuerpo grande y costos elevado</b>	Compacto y económico
<b>Requiere un sistema fuerte</b>	Requiere control en las etapas de potencia y suministro.
<b>No afecta el factor de potencia</b>	Requiere banco de condensadores

(Camacho, Salamanca, & Gallego, 2020).

Los generadores síncronos como los asíncronos o de inducción se pueden clasificar de la siguiente manera (Soriano, 2015):

- Generadores Asíncronos o de Inducción
  - Generador de Inducción tipo Jaula de Ardilla
  - Generador de Inducción de Rotor Bobinado
    - Generador de Inducción OptiSlip
    - Generador de Inducción Doblemente Alimentado
- Generadores Síncronos
  - Generador Síncrono de Rotor Bobinado
  - Generador Síncrono de Imanes Permanentes



### **1.6.2.1 Generadores asíncronos o de inducción**

El generador asíncrono o de inducción es el más común utilizado en turbinas de viento el cual tiene varias ventajas, tales como robustez, sencillez mecánica, producción en serie, por esta última característica hace que tenga un precio bajo. La desventaja principal es que el estator tiene una corriente de magnetización reactiva (Soriano, 2015).

El generador asíncrono no contiene imanes permanentes y no se excita por separado. Por lo tanto, tiene que recibir su corriente de otra fuente y consume potencia reactiva. La potencia reactiva puede ser suministrada por la red o por un sistema electrónico de potencia. El rotor de un generador de inducción se puede diseñar como un rotor de jaula de ardilla o como un rotor bobinado (Soriano, 2015).

#### **a) Generador de inducción tipo jaula de ardilla**

Un Generador de Inducción tipo Jaula de Ardilla (SCIG, por sus siglas en inglés) tiene la ventaja de su sencillez mecánica, alta eficiencia y bajo mantenimiento. Sin embargo, tiene el inconveniente de no ser capaz de aprovechar al máximo el potencial eólico, ya que trabaja a una cierta velocidad fija de viento (González L. , 2018).

El generador y el rotor del aerogenerador están acoplados a través de un tren de engranaje debido a que el rango de velocidad del rotor y el generador son diferentes. Para el SCIG hay una relación única entre la potencia activa, potencia reactiva, tensión terminal y la velocidad del rotor. Esto significa que en fuertes vientos el aerogenerador puede producir energía más activa sólo si el generador suministra una energía más reactiva. Para el SCIG, la cantidad de potencia reactiva consumida es incontrolable porque varía con condiciones de viento. Sin cualquier componente eléctrico para suministrar la potencia reactiva del generador, esta debe tomarse directamente de la red (Zhang, Leithead, & Anaya-Lara, 2011)

Los generadores de inducción de jaula de ardilla es uno de los principales tipos de generadores utilizados en parques eólicos. Pero el elevado requerimiento de potencia reactiva puede conducir a la desconexión de los generadores SCIG de la red durante las perturbaciones de la red (Rashad, Kamel, & Jurado-Melguizo, 2018).

#### **b) Generador de Inducción de Rotor Bobinado**

Las características eléctricas del Generador de Inducción de Rotor Bobinado (WRIG, por sus siglas en inglés) es que puede ser controlado desde fuera y de este modo el voltaje del rotor puede ser leído. Los devanados del rotor bobinado pueden ser externamente conectados a través de anillos colectores y escobillas por medio de equipos electrónicos de potencia, los cuales

pueden o no llevar anillos colectores y escobillas. Mediante el uso de electrónica de potencia, la potencia puede ser extraída o mediada por el circuito del rotor y el generador puede ser magnetizado desde el circuito del estator o del circuito del rotor. La desventaja del WRIG es que es más costosa y no está tan robusta como el SCIG. Los generadores más comunes usados en la industria son las siguientes (Zhang, Leithead, & Anaya-Lara, 2011).

- **Generador de Inducción OptiSlip**

Algunas de las características del Generador de Inducción OptiSlip (OSIG, por sus siglas en inglés), es la minimización de la carga en el aerogenerador durante las ráfagas de viento, también mantiene el generador para tener una variable de deslizamiento es decir un rango estrecho y seleccionar el deslizamiento óptimo, resultando pequeñas actuaciones en el torque del tren de engranaje y en la salida de potencia. La variable de deslizamiento es muy simple, segura y una forma económica de lograr reducciones de carga en comparación con las soluciones más complejas, como los aerogeneradores de velocidad variable utilizando convertidores a escala real. Esto da como resultado que el estator del generador esté conectado directamente a la red. Las desventajas son que su rango de velocidad está limitado típicamente a 0-10 %, tal que depende del tamaño de la resistencia variable del rotor, alcanza un control de potencia activa y reactiva poco favorable y la potencia de deslizamiento se disipa en la resistencia variable como pérdida (Soriano, 2015).

- **Generador de inducción doblemente alimentado**

Los Generadores de inducción Doblemente Alimentados (DFIG, por sus siglas en inglés) son máquinas de las cuales se puede extraer energía eléctrica tanto del devanado del estator como del devanado del rotor gracias a la tecnología puntera basada en inversores bidireccionales (Back to Back inverters). Los generadores DFIG son máquinas relativamente complejas. Están formadas por un rotor bobinado con tres anillos rozantes y un estator con sus propios devanados. El estator está conectado directamente a la red y proporciona parte de la potencia nominal de la máquina. Al rotor se encuentra conectado el inversor bidireccional a través de los anillos rozantes. Aquí la electrónica de potencia juega un papel fundamental ya que, con la correcta modulación de los IGBTs, es posible extraer potencia eléctrica del rotor incluso para bajas velocidades de viento (Edibon, 2020).

El DFIG tiene varias ventajas, una de las cuales es su capacidad para controlar la potencia reactiva y separar la corriente activa, de modo que el control de la potencia reactiva sea independiente, es decir, mediante el control independiente de la corriente de excitación establecida en el rotor. El DFIG no necesita ser magnetizado desde la red, también puede ser

magnetizado desde el circuito del rotor. Puede generar potencia reactiva que puede ser suministrada al estator por un convertidor del lado de la red. El tamaño del convertidor no está relacionado con la potencia total del generador, pero para el rango de velocidad seleccionado sí lo está y, por lo tanto, afecta la potencia de deslizamiento. Por lo tanto, el costo del convertidor aumenta a medida que se amplía el rango de velocidad alrededor de la velocidad síncrona. Un inconveniente de la DFIG es la inevitable necesidad de anillos colectores (Soriano, 2015).

#### **1.6.2.2 Generador síncrono**

Los generadores síncronos son considerados como unas de las tecnologías más prometedoras tanto para sistemas de alta y baja potencia. Este tipo de generador es utilizado frecuentemente en sistemas que operan a velocidad variable. Aunque normalmente se necesita una caja reductora entre la turbina y el generador, en este tipo de máquinas es posible aumentar el número de polos en el rotor, permitiendo eliminar la caja reductora y trabajar a velocidades bajas, característica típica de los sistemas de baja potencia. Además, este tipo de máquina no requiere de condensadores para su funcionamiento (Freddy, 2013). El generador síncrono es mucho más caro y mecánicamente más complicado que un generador de inducción de un tamaño similar. Sin embargo, tiene una clara ventaja en comparación con el generador de inducción, es decir, que no necesita una magnetización de la corriente reactiva. Dos tipos clásicos de generadores síncronos han utilizado a menudo en el viento industria de turbinas los cuales son el Generador Síncrono de Rotor Bobinado (WRSG, por sus siglas en inglés) y el Generador Síncrono de Imanes Permanentes (PMSG, por sus siglas en inglés) (Quiñonez-Varela, 2008).

##### **a) Generador Síncrono de Rotor Bobinado**

En este tipo de máquina, para crear el campo magnético de excitación se necesita alimentar al devanado inductor con una tensión en continua por medio del sistema de excitación. La excitación es realizada por el sistema de anillos y escobillas o por un sistema sin escobillas, la cual es rectificadora desde el convertidor de potencia. Puede ser un tipo de generador de conexión directa a la red de velocidad fija (su rotación en esta dada por la frecuencia de la red y el número de polos de la máquina), o puede comportarse como un generador de velocidad variable a través un convertidor de potencia de corriente alterna de frecuencia variable, a corriente alterna de frecuencia constante (Hernández & Iracheta, 2022). A diferencia del generador de inducción, el generador síncrono no necesita de ningún sistema de compensación de energía reactiva. El devanado del rotor, a través de los flujos de corriente continua generan el campo de excitación, que gira con velocidad síncrona (Soriano, 2015).

## **b) Generador síncrono con imanes permanentes**

El funcionamiento es similar a los generadores síncronos, pero estas máquinas son controladas asincrónicamente es decir es un generador síncrono en el que se ha sustituido el bobinado de excitación, normalmente en el rotor, por un sistema formado por imanes permanentes que suministran un campo de excitación constante (Quispe & Apaza, 2017). Al no necesitar una fuente externa que alimente el rotor bobinado se ahorra el hecho de tener que conectar un circuito externo al circuito rotórico. Por tanto, se elimina el sistema de escobillas y anillos rozantes. Lo que implica que el rotor no necesita de ningún tipo de mantenimiento (Rodrigálvarez, 2018). Además, el generador síncrono de imanes permanentes produce un menor nivel de ruido en comparación con otros tipos, lo que resulta ser más confortable, de igual forma este trabaja a bajas revoluciones y no requiere un sistema de multiplicación de velocidades para su funcionamiento, su diseño es compacto y fácil de instalar (Aguilar, 2017). Es un tipo de máquina eléctrica usada con frecuencia para aplicaciones eólicas, debido a que la energía obtenida con un generador síncrono de imanes permanentes es mayor que la obtenida con otro tipo de generadores (Monica, 2001). Es actualmente el tipo de generador de elección en la mayoría de los pequeños generadores de turbinas eólicas de hasta 10 kW, asimismo pueden ser usados en aerogeneradores más grandes (Carlosama, 2019). El general el generador síncrono de imán permanente ha tenido un creciente uso en pequeños sistemas de generación por la alta confiabilidad, la alta eficiencia y un factor de potencia elevado (Salazar A. , 2015).

Su clasificación se da principalmente por la dirección del flujo magnético con respecto al eje de giro, estos son de tipo axial y radial.

- **Generador de flujo axial**

Según Castillo (2017) y Romañach (2018), los motores de flujo axial son aquellos que tienen el flujo orientado en el sentido del eje del rotor, es decir las líneas de campo fluyen en la dirección axial, y los devanados están orientados a lo largo de la dirección radial, como se muestra en la Figura 1.5. Estos motores presentan elevados rendimientos ya que las pérdidas en el cobre son escasas. Sin embargo, conforme aumentan los pares de polos su densidad de potencia disminuye en mayor medida que las de flujo radial, pudiendo tener un diámetro excesivo. También requieren una gran cantidad de material magnético para generar la tensión en el estator, además de requerir un entrehierro muy pequeño, aumentando así las tolerancias y el precio de la máquina.

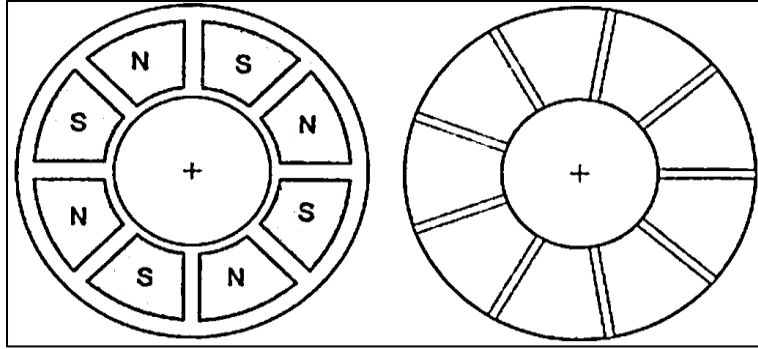


Fig. 1.5. Configuración de máquina de imanes permanentes de flujo axial  
Fuente: (Castillo, 2017)

- **Generador de flujo radial**

En los generadores de flujo radial, el grupo de imanes se colocan sobre un cilindro que gira alrededor de su propio eje como se muestra en la Figura **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** 1.6. En este caso el campo magnético generado por los imanes es perpendicular al eje de giro, por lo cual crea el flujo en el entrehierro en dirección radial (León & Rodríguez, 2016).

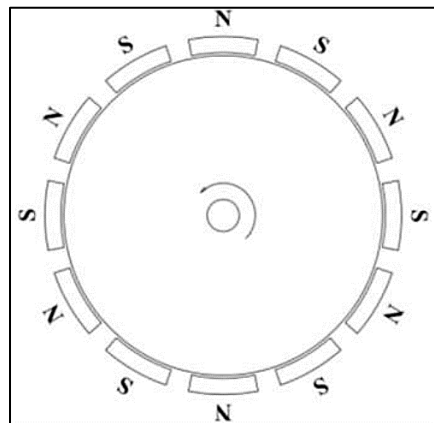


Fig. 1.6. Distribución de los imanes permanentes en máquina de flujo radial  
Fuente: (León & Rodríguez, 2016)

### 1.6.3 Rectificador

Los rectificadores son dispositivos electrónicos utilizados para convertir de AC (corriente alterna) en DC (corriente directa). Están formados por diodos conectados en un circuito llamado puente rectificador. A la salida del generador no se tiene un control del valor de la tensión (el valor del voltaje y frecuencia cambian con la velocidad de giro del rotor y este giro depende del viento), por tanto, la corriente directa es más fácil de controlar (Paco, 2014). En la Fig. 1.7 se muestra el diagrama eléctrico de un rectificador trifásico.

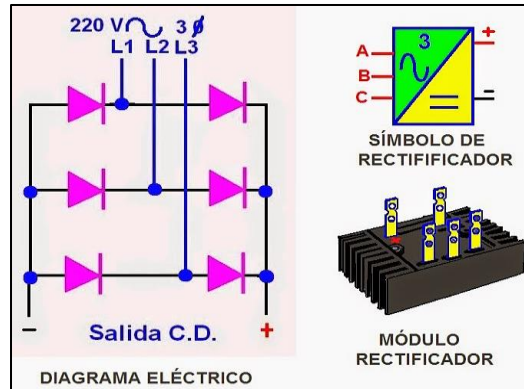


Fig. 1.7. Rectificador trifásico  
Fuente: (Paco, 2014)

### 1.6.4 Convertidor DC-DC

Los convertidores DC-DC se emplean para, partiendo de una fuente de tensión continua, ya se fija o variable, conseguir un valor de tensión estable a la salida sin que esta se vea afectada por las posibles fluctuaciones en la tensión de entrada o en la carga conectada en la salida. Los convertidores generalmente se componen de semiconductores que, aplicando una serie de señales de control, actúan como interruptores que se abren y se cierran para convertir un nivel de tensión determinado en otro diferente (Ramos, 2017).

Entre los diferentes métodos de control existentes, uno de ellos consiste en la modulación de ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés) de control de tensión de salida y otro método más general consiste en variar la frecuencia de conmutación y el tiempo de conducción. Dependiendo de la tensión de salida necesaria se tienen convertidores reductores, elevadores o reductores-elevadores. Este último tipo de convertidor se emplea cuando se quiere conseguir una tensión de salida que puede ser mayor o menor que la tensión continua de entrada (Ramos, 2017). En la Fig. 1.8 se puede observar dicho convertidor que comprende la conexión en cascada de un convertidor reductor y un elevador.

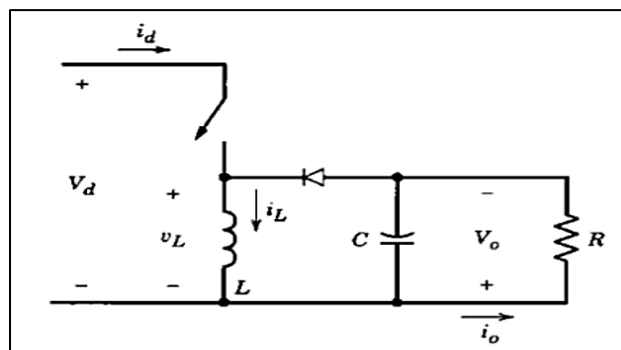


Fig. 1.8. Convertidor reductor elevador  
Fuente: (Ramos, 2017)

### 1.6.5 Baterías

Las baterías son las encargadas del almacenamiento de la energía producida por el aerogenerador, suministrándola posteriormente para su consumo. La autonomía mínima recomendada es de tres días (Arratia, Chocala, Rodriguez, & Ramiro, 2017). Las baterías son un componente muy importante dentro del sistema, debido a que realizan varias acciones para el buen funcionamiento de la instalación tales como: almacenamiento de energía eléctrica en períodos de alto recurso eólico y/o bajo consumo de energía eléctrica, proveen de energía necesaria en periodos de calma del viento y suministran energía eléctrica estable y adecuada para la utilización de aparatos eléctricos (Aguilar, 2017).

Las baterías que más se utilizan en las aplicaciones eólicas son las de níquel-cadmio y las de plomo-ácido, en la Tabla 1.6 se presentan sus ventajas y desventajas.

**TABLA 1.6**  
**CARACTERÍSTICAS DE LAS BATERÍAS**

	Níquel-Cadmio	Plomo-Ácido
<b>VENTAJAS</b>	Más fiables y resistentes.	Son mucho más económicas.
	Soportan descargas de hasta 90% de su capacidad teórica.	
	Soportan bajas temperaturas.	Son idóneas para pequeñas instalaciones.
	Soportan los cortocircuitos.	
	Mínimo mantenimiento. No producen gases corrosivos.	La vida útil puede ser mucho más larga con un mantenimiento adecuado.
<b>DESVENTAJAS</b>	Son bastante caras.	No admite muchos ciclos por debajo del 40% de su capacidad.
		Tiene un "efecto memoria", puede que no se recuperen totalmente.
		Los cortocircuitos afectan en el rendimiento.
		Necesitan un mayor mantenimiento.

Fuente: (Aguilar, 2017)

#### 1.6.5.1 Inversor

Los inversores convierten la energía DC a AC. Este dispositivo es necesario debido a que los módulos, baterías y la generación de la mayoría de los pequeños aerogeneradores se transforma a energía DC, mientras que la mayoría de las aplicaciones y dispositivos requieren energía AC. Los inversores se dimensionan de acuerdo a su producción de energía continua máxima. La mayoría de los inversores son capaces de manejar energía adicional a su tamaño,

pero únicamente por cortos periodos de tiempo. Esta capacidad de pico es útil para satisfacer las ocasionales subidas de carga tales como cuando arranca un motor (Argudo, 2016).

Según su forma de onda como se observa en la Figura 1.9, existen dos tipos de inversores.

#### a. Inversores de onda senoidal modificada

Son sofisticados, y utilizan la modulación de ancho de onda (PWM) para modificarla y acercarla a la forma de la corriente de salida a una señal sinusoidal. La salida no es una auténtica onda senoidal, pero es muy próxima. Contiene pocos armónicos. Su relación calidad/precio es muy buena (Varillas, 2015).

#### b. Inversores de onda senoidal pura

Este tipo de inversor es utiliza para aparatos más sensibles debido a que es más caro, aunque produce una onda sinusoidal de gran calidad. Ejemplo de la utilización de este inversor serían aparatos electrónicos de un hospital (Clavería, 2016).

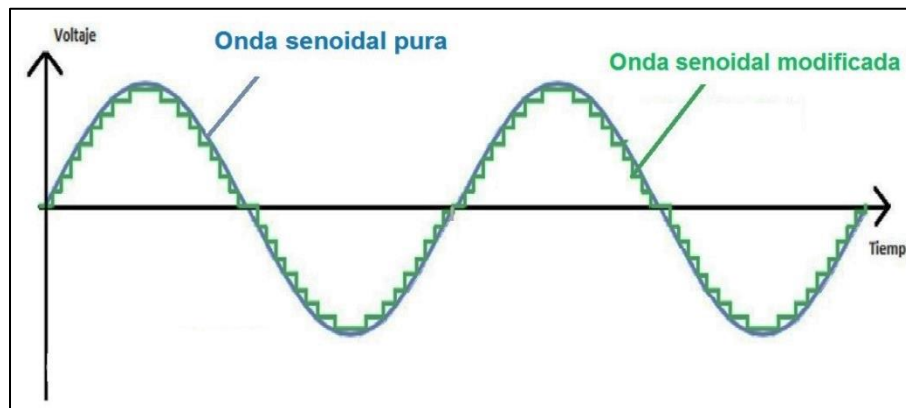


Fig. 1.9. Formas de onda senoidal pura y modificada de un inversor  
Fuente: (FullWatt, 2020)

## 1.7 Configuraciones del sistema de energía eólica

Para reducir costos, aumentar la confiabilidad y mejorar la eficiencia de los sistemas de conversión de energía eólica, se han desarrollado varias configuraciones de sistemas WECS. La clasificación de las configuraciones más comunes se muestra en la Fig. 1.10, donde las turbinas eólicas se pueden clasificar en términos generales en turbinas de velocidad constante y turbinas de velocidad variable. Las turbinas de velocidad constante utilizan generadores de inducción de jaula de ardilla (SCIG) que se conectan directamente a la red y, por lo tanto, no requieren un convertidor para funcionar (Wu, Lang, Zargari, & Kouro, 2011).



En tanto que los WECS de velocidad variable tienen la necesidad de una interfaz de convertidor de potencia para controlar la velocidad del generador, lo que agrega costo y complejidad al sistema (Wu, Lang, Zargari, & Kouro, 2011). Las turbinas eólicas de velocidad variable se pueden dividir en turbinas de transmisión directa e indirecta. En las turbinas de accionamiento directo se emplean generadores síncronos (SG) de baja velocidad con un gran número de polos. La velocidad de los generadores síncronos está diseñada para coincidir con la velocidad de la turbina, de modo que se elimina la caja de engranajes. Tanto los generadores síncronos de rotor bobinado (WRSG) como los generadores síncronos de imanes permanentes (PMSG) son adecuados para las turbinas de transmisión directa (Wu, Lang, Zargari, & Kouro, 2011).

Las turbinas de transmisión indirecta requieren una caja de engranajes para hacer coincidir la baja velocidad de la turbina con la alta velocidad del generador. Los WRSG, PMSG y SCIG equipados con convertidores de potencia de plena capacidad se han utilizado en sistemas prácticos de energía eólica. Además, los generadores de inducción doblemente alimentados (DFIG) con convertidores de capacidad reducida y los generadores de inducción de rotor bobinado (WRIG) con resistencia de rotor variable controlada por convertidor también han encontrado aplicaciones prácticas (Wu, Lang, Zargari, & Kouro, 2011).

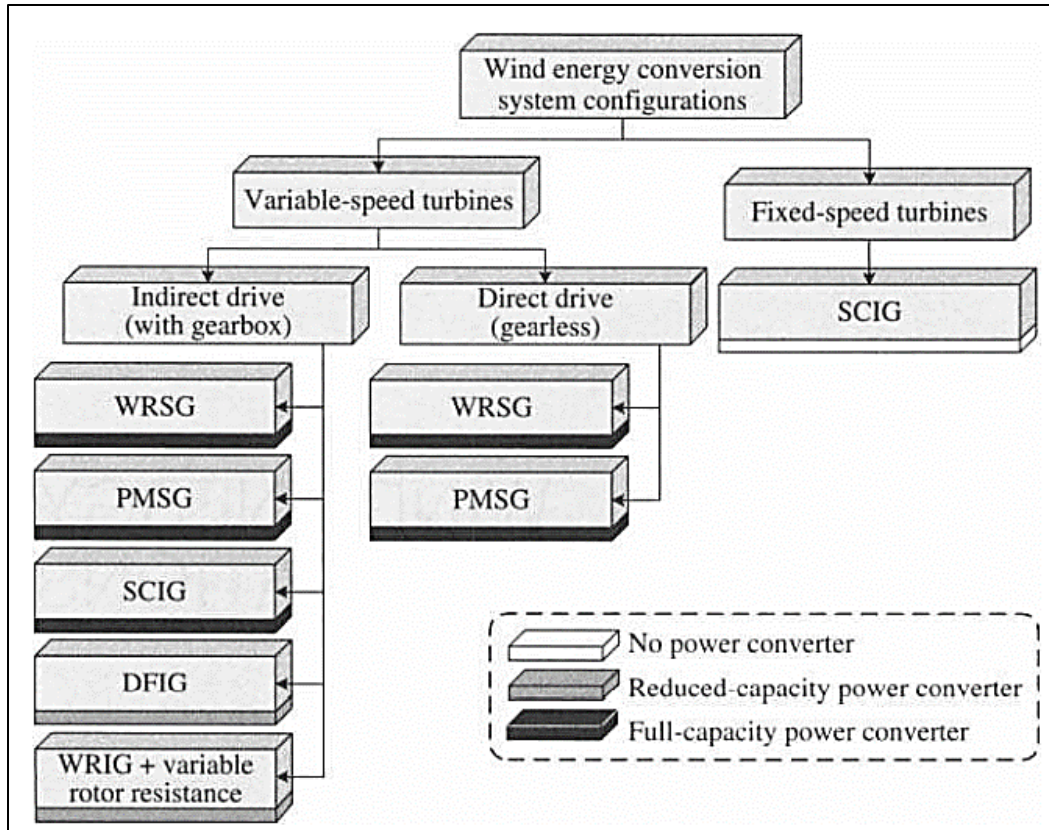


Fig. 1.10. Configuraciones del sistema de energía eólica  
 Fuente: (Wu, Lang, Zargari, & Kouro, 2011)

La operación a velocidad variable se logra combinando generadores eléctricos (síncronos o asíncronos) con una interfaz de electrónica de potencia (convertidor) (Peña, 2017), esto con el fin de modificar la velocidad de giro de la máquina y de esta manera desacoplar su frecuencia de trabajo con respecto a la frecuencia de la red o la de una instalación o carga (Soria, 2019). Además, de acuerdo a un estudio realizado por (Chen & Cuchara, 2001) se demuestra que con la utilización de convertidores electrónicos de potencia se puede minimizar el contenido de armónicos y la fluctuación de la tensión, y mediante un sistema de control adecuado, un sistema eólico puede extraer la máxima energía del viento.

Por lo tanto, los diferentes diseños y combinaciones de estos dos componentes conducen a una amplia variedad de configuraciones de WECS, que se pueden clasificar en tres grupos: WECS de velocidad fija sin interfaz de convertidor de potencia, y para los WECS de velocidad variable se dividen en dos tipos según la potencia nominal del convertidor con respecto a la potencia total del sistema: WECS que utilizan convertidores de capacidad reducida y WECS operados por convertidor de capacidad total como se observa en la Fig. 1.10 (Wu, Lang, Zargari, & Kouro, 2011).

### 1.7.1 WECS de velocidad fija sin interfaz de convertidor de potencia

En este tipo de WECS se utiliza exclusivamente un generador de inducción de jaula de ardilla (SCIG), y su velocidad de rotación está determinada por la frecuencia de la red y el número de polos del devanado del estator. El rango de velocidad del generador es tan pequeño que este sistema a menudo se conoce como WECS de velocidad fija, como se mencionó anteriormente. En la Fig. 1.11 se muestra una configuración típica de WECS sin una interfaz de convertidor de potencia, donde se observa que el generador está conectado a la red a través de un transformador (Valenzuela, 2018).

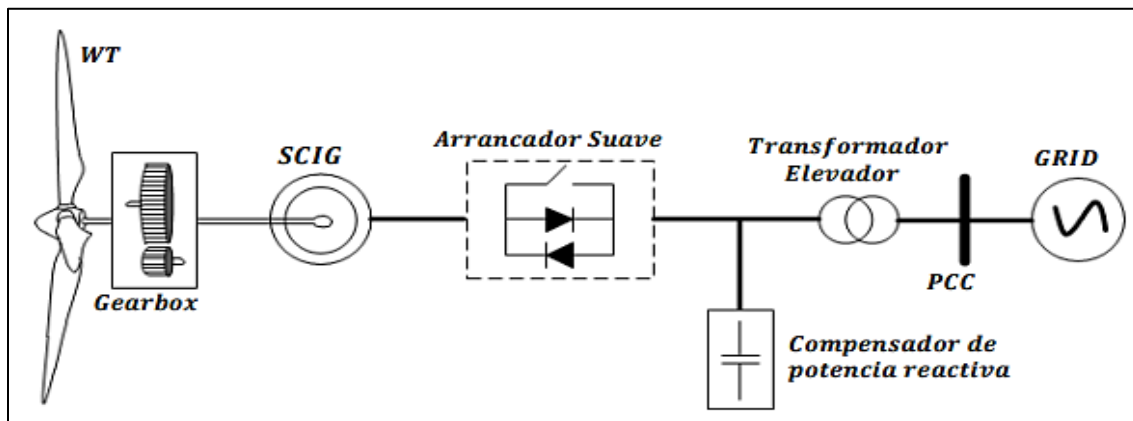


Fig. 1.11. WECS sin interfaz de convertidor de potencia  
Fuente: (Meraz, 2018)

En este sistema se requiere una caja de engranajes para igualar la diferencia de velocidad entre la turbina y el generador, de modo que el generador pueda entregar su potencia nominal a la velocidad del viento nominal. Durante el funcionamiento, el sistema no necesita ningún convertidor de potencia. Por lo general, se requiere un banco de capacitores trifásicos para compensar la potencia reactiva consumida por el generador de inducción. Este sistema de energía eólica representa simplicidad, bajos costos de fabricación/mantenimiento y operación confiable. Los principales inconvenientes incluyen: (1) el sistema entrega la potencia nominal a la red solo a una determinada velocidad del viento, lo que genera una baja eficiencia de conversión de energía a otras velocidades del viento; y (2) la energía entregada a la red fluctúa por la velocidad del viento, causando perturbaciones en la red (Wu, Lang, Zargari, & Kouro, 2011).

### 1.7.2 WECS de velocidad variable con convertidores de capacidad reducida

A diferencia de los sistemas de velocidad fija, los WECS de velocidad variable tienen una eficiencia de conversión de energía mayor, debido a que, reducen el estrés mecánico causado por ráfagas de viento, lo cual tiene un impacto positivo en el diseño de la estructura y las partes

mecánicas de la turbina. También reduce el desgaste de la caja de engranajes y los cojinetes, lo que extiende el ciclo de vida útil y facilita el mantenimiento (Valenzuela, 2018).

Los WECS de velocidad variable con convertidores de capacidad reducida solo son factibles con generadores de inducción de rotor devanado (WRIG, por sus siglas en inglés) ya que se puede lograr una operación de velocidad variable controlando las corrientes del rotor sin la necesidad de procesar la potencia total del sistema. Hay dos diseños para las configuraciones del WRIG: uno con una resistencia variable controlada por convertidor (ver la Fig. 1.12) y el otro con un sistema de convertidor de potencia de cuatro cuadrantes (ver la Fig. 1.13) (Valenzuela, 2018).

### a) Generador de Inducción de Rotor Devanado con Resistencia de Rotor Variable

El objetivo principal de esta configuración es mantener constante la potencia activa a la salida del aerogenerador. Para lograrlo ante ráfagas de viento se cambia la resistencia vista desde el rotor, de manera que el exceso de potencia se disipe en la resistencia del rotor. Con operación de velocidad variable, el sistema puede capturar más potencia del viento, pero también tiene pérdidas de energía en la resistencia del rotor lo que hace que esta configuración no sea la más eficiente. Este tipo de control permite operar al generador hasta un 10% por encima de la velocidad nominal, así como también obtener un bajo factor de potencia. La resistencia del rotor normalmente se puede ajustar mediante un convertidor de potencia. Esta configuración también requiere un arrancador suave y compensación de potencia reactiva (Yero, 2016).

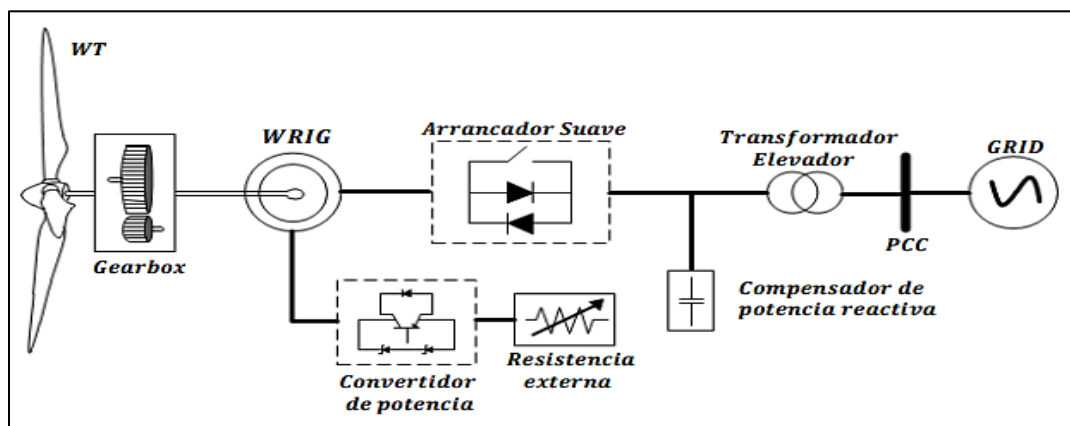


Fig. 1.12. WECS de velocidad variable con resistencia variable del rotor  
Fuente: (Meraz, 2018)

### b) Generador de Inducción doblemente alimentado con convertidor conectado al rotor

La configuración de este tipo de sistema es la misma que la del sistema con WRIG, excepto que en este caso la potencia generada se conecta a la red eléctrica a través de un

convertidor de potencia y no es necesario el arrancador suave o compensación de potencia reactiva. Al usar los convertidores de potencia se logra un flujo bidireccional en el circuito del rotor, lo cual permite aumentar el rango de velocidad del generador. Por tanto, este sistema presenta una eficiencia de conversión de energía mejorada, un rango de velocidad del generador más amplio y un rendimiento dinámico mejorado en comparación con el WECS de velocidad fija y la configuración de resistencia variable (Nieves, 2022).

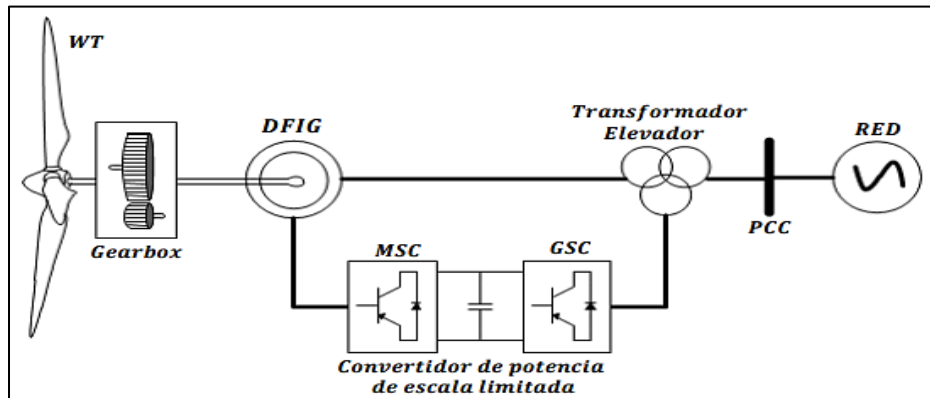


Fig. 1.13. WECS de velocidad variable con convertidores de capacidad reducida.  
Fuente: (Meraz, 2018)

### 1.7.3 WECS de velocidad variable con convertidores de plena carga

El rendimiento de un sistema eólico puede ser mejorado con el uso de un convertidor de potencia de plena carga. En la Fig. 1.14 se observa este sistema, en el cual el generador se conecta a la red a través de un sistema convertidor de plena potencia. En este tipo de configuración tienen aplicación generadores de inducción de jaula de ardilla, generadores síncronos de rotor devanado y generadores síncronos de imanes permanentes. La potencia nominal del convertidor es normalmente la misma que el del generador (Valenzuela, 2018).

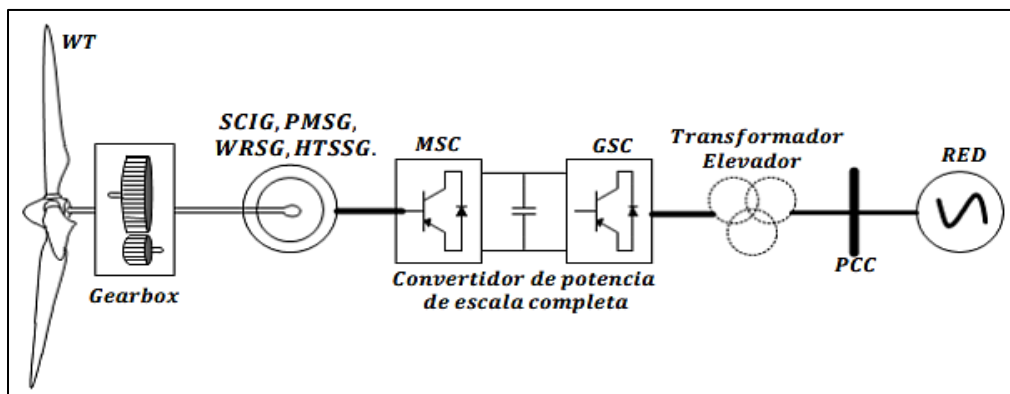


Fig. 1.14. WECS de velocidad variable con convertidores de capacidad total  
Fuente: (Meraz, 2018)

Si se utiliza un generador síncrono de baja velocidad con una gran cantidad de polos el sistema de energía eólica puede funcionar sin la necesidad de una caja de engranajes. La eliminación de la caja de engranajes mejora la eficiencia del sistema y reduce el costo inicial y de mantenimiento (Valenzuela, 2018).

## **1.8 Configuraciones de WECS con generador síncrono**

Los sistemas de energía eólica de generador síncrono tienen muchas más configuraciones que el generador de inducción WECS. Esto se debe principalmente al hecho de que el generador síncrono proporciona el flujo del rotor por sí mismo a través de imanes permanentes o del devanado del campo del rotor y, por lo tanto, los rectificadores de diodo se pueden usar como convertidores del lado del generador y es más fácil y rentable para el generador síncrono tener configuraciones multipolares (por ejemplo, 72 polos) y multifásicas (por ejemplo, seis fases) que su contraparte (Wu, Lang, Zargari, & Kouro, 2011).

Dado que dentro del alcance de este proyecto se encuentra planteado un sistema de baja potencia, de velocidad variable que emplea un generador síncrono de imanes permanentes, es importante mencionar que es necesario el uso de un convertidor de potencia de plena carga de acuerdo a las configuraciones, por tal razón en esta sección se enfoca principalmente en proporcionar una descripción general de las configuraciones WECS con generador síncrono de velocidad variable más comúnmente utilizadas según (Wu, Lang, Zargari, & Kouro, 2011) y (Baroudi, Dinavahi, & Knight, 2007).

### **1.8.1 Configuración con convertidores de potencia Back-to-Back**

La estructura de convertidores de potencia conocida como Back-to-Back consiste en dos convertidores conectados en serie unidos por el bus de continua como se observa en la Fig. 1.15. La turbina se conecta a un rectificador (AC-DC) para después conectarse a un inversor (DC-AC) que se acopla a la red eléctrica. Esta configuración normalmente es empleada en sistemas de energía eólica de baja tensión. La estructura real de un convertidor de fuente de voltaje (VSC, por sus siglas en inglés) consta de 6 IGBTs, dos para cada fase, su funcionamiento está basado en controlar el tiempo de apertura de estos interruptores de potencia mediante técnicas PWM. Para la estructura completa del Back-to-Back mencionada trabajan 12 IGBTs y paralelo con los dos convertidores se encuentra un condensador que tiene la función de garantizar el equilibrio de potencias entre ambos convertidores (Vesperinas, 2019).

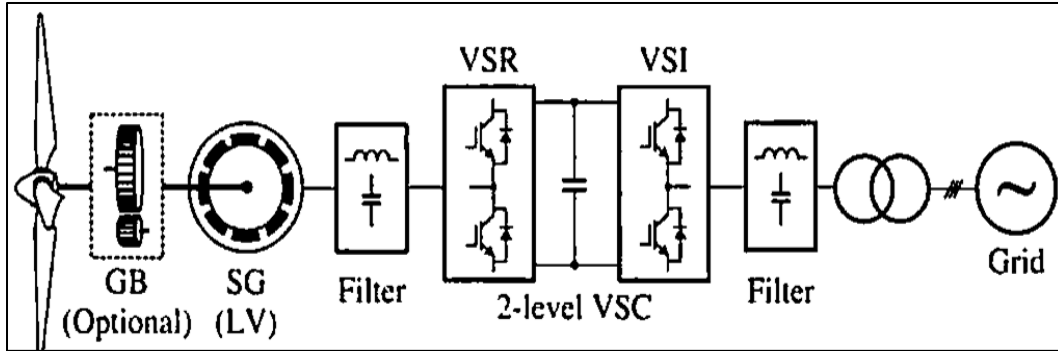


Fig. 1.15. Configuración con convertidores de potencia "back-to-back" de plena carga  
Fuente: (Wu, Lang, Zargari, & Kouro, 2011)

### 1.8.2 Configuración con rectificador de diodos y convertidores DC-DC

Para reducir el costo de los sistemas de energía eólica, el rectificador de fuente de voltaje de dos niveles se puede reemplazar por un rectificador de diodos y un convertidor DC-DC como se muestra en la Fig. 1.16. Esta configuración de convertidor no se puede utilizar para aerogeneradores SCIG ya que el rectificador de diodos no puede proporcionar la corriente de magnetización necesaria para el generador de inducción (Wu, Lang, Zargari, & Kouro, 2011).

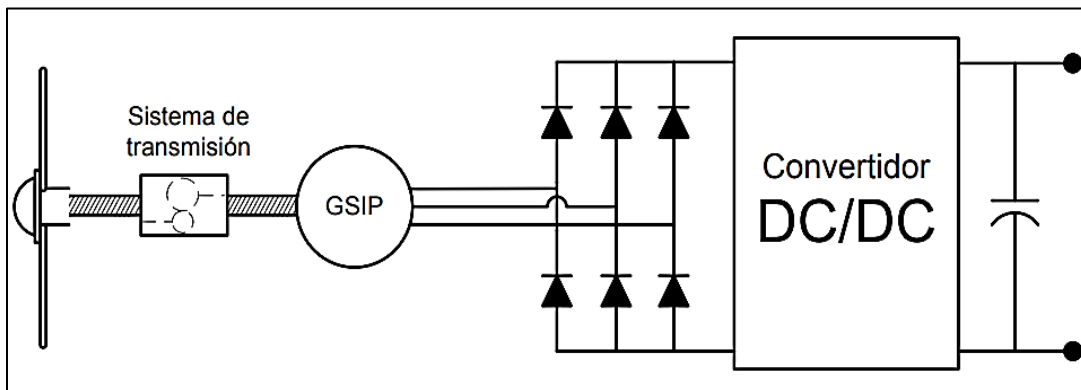


Fig. 1.16. Configuración con rectificador de diodos y convertidores DC-DC  
Fuente: (Freddy, 2013)

Dentro de esta configuración se tienen diferentes topologías de convertidores DC-DC usados en aplicaciones renovables. Iniciando con los convertidores de tipo Boost o elevador, estos se utilizan para convertir la magnitud del voltaje de salida en un valor mayor que la magnitud del voltaje de entrada; Es importante que el voltaje del generador a bajas velocidades del viento se eleve a un nivel lo suficientemente alto para los inversores, lo que garantiza la entrega de la potencia máxima capturada a la red en todo el rango de velocidades del viento (Wu, Lang, Zargari, & Kouro, 2011).

Debido a su simplicidad en general esta configuración con convertidor tipo Boost suele ser aplicada en sistemas de generación eólica de baja potencia. En comparación con el rectificador de fuente de voltaje PWM, el rectificador de diodo y el convertidor DC-DC elevador son más simples y rentables. Sin embargo, la forma de onda de la corriente del estator está distorsionada debido al uso del rectificador de diodo, lo que aumenta las pérdidas en el generador y también provoca una ondulación del par. A pesar de esto, esta topología proporciona una alternativa de bajo costo en comparación con la solución del VSC Back to Back de capacidad total (Freddy, 2013). Los convertidores elevadores son muy recomendables para aplicaciones de turbinas eólicas, ya que, debido a la fluctuación del viento, los voltajes de salida de los generadores son bajos y, por lo tanto, son muy importante para estas aplicaciones (Pragaspathy\* & Anand, 2016).

Por otro lado, se tiene el convertidor Buck o reductor, en general, estos convertidores están destinados a reducir la magnitud del voltaje de entrada a una magnitud de voltaje de salida. El convertidor Buck también es utilizado en sistemas de generación eólica de baja potencia que alimentan cargas aisladas. Una ventaja del convertidor Buck sobre el convertidor Boost es que en el primero el voltaje de salida puede ser controlado con un solo lazo de control, por lo que existen varios estudios en los que reporta el uso de un convertidor Buck para alimentar cargas aisladas y regular su voltaje de salida (Ramírez, Saavedra, & Ramos, 2013).

También se suele encontrar el convertidor Buck-Boost o reductor-elevador, el cual realiza ambas funciones, la de disminuir y aumentar la tensión de salida. El voltaje de salida es ajustado cuando se varía el ciclo de trabajo del transistor de conmutación. Es un tipo de regulador sin aislamiento, además, el inconveniente de este tipo de reguladores es que no tiene un terminal conectado a tierra y la polaridad del voltaje de salida es opuesta al voltaje de entrada (Calvache, 2019). En algunas aplicaciones de baja potencia, los requisitos de salida son de muy bajo potencial y, por lo tanto, son suficientes pequeñas variaciones o cambios en el voltaje de entrada, para esos casos se pueden utilizar convertidores de tipo Buck o Boost. Sin embargo, en un cuadro comparativo realizado por (Pragaspathy\* & Anand, 2016) se observa que el convertidor Buck-Boost tiene una eficiencia alta en comparación con el convertidor reductor y elevador.

Adicional a los convertidores DC-DC antes mencionados existen otras configuraciones básicas ampliamente estudiadas como lo son las topologías: Cuck, Flyback, Sepic, Forward, etc (Rivera & Cardona, 2018). El convertidor Flyback es un tipo de regulador que posee un aislamiento galvánico entre la entrada y la salida. Posee dos bobinas acopladas en lugar de una como el Buck-Boost, almacenando de esta manera toda la energía en el núcleo magnético, su



uso se basa en aplicaciones de baja potencia (Calvache, 2019). El circuito se realiza por medio de un conmutador, el cual puede ser un MOSFET, un IGBT, un transistor bipolar BJT, un Tiristor o un GTO, cualquier semiconductor controlado, con capacidad de trabajar en corte o saturación y con capacidad de potencia, es decir, que resista la corriente o tensión que exija el convertidor. Y como se trata de un convertidor con aislamiento, también incorpora un transformador de alta frecuencia para realizar este aislamiento galvánico entre la entrada y la salida. Incluye además un condensador a la salida, que sirve de filtro de la tensión, y un diodo para evitar que la energía almacenada en el condensador circule hacia el transformador descargándose (Soto, 2018).

Es la topología más conocida para fuentes de alimentación aisladas ya que puede suministrar múltiples salidas aisladas con un único transistor y una limitada cantidad de componentes externos (Gimenez, 2016), es decir la ausencia de un inductor en su etapa de salida hace que tenga una ventaja respecto al coste y al tamaño con el resto de convertidores (Soto, 2018).

En síntesis, es importante realizar un estudio de los componentes y las distintas tecnologías que se pueden aplicar en un sistema de generación eólico. Se parte del hecho de que la energía eólica como parte de las energías renovables posee múltiples ventajas por lo que hoy en día le han permitido tener un gran crecimiento y por ende se han desarrollado diferentes tecnologías que permiten su conversión a energía eléctrica de manera más eficiente. Es así que se tiene turbinas eólicas de eje vertical y horizontal, siendo estas más eficientes y con mayor auge en el mercado, también se puede distinguir las turbinas de acuerdo a su velocidad de giro, es decir turbinas de velocidad fija y variable, presentando mayores ventajas una turbina de velocidad variable. Un sistema de conversión de energía eólica está compuesto por diferentes componentes, entre mecánicos, eléctricos y de control. Los dos componentes eléctricos principales son el generador y el convertidor, en la Figura 1.10 se presenta una variedad de configuraciones en función de la combinación de estos dos componentes.

# CAPÍTULO 2

## Modelo del sistema de generación eólico de baja potencia

En esta sección se presenta el modelado matemático del sistema de generación eólico de 10 kW a una velocidad nominal de 12 m/s, el cual está conformado por: una turbina eólica de velocidad variable y ángulo de paso fijo, un generador síncrono de imanes permanentes, un rectificador de potencia, utiliza un convertidor de potencia DC-DC tipo Flyback en donde la barra de continua se respalda mediante un banco de baterías, y un inversor trifásico que conecta al sistema con la carga. Por otra parte, para el sistema de control se emplea un esquema de máxima captura de energía del viento (MPPT) en conjunto con un control de la velocidad del generador por medio del convertidor DC-DC tipo Flyback, además se utiliza un control de voltaje que regula el inversor trifásico que conecta al sistema con la carga.

### 2.1 Metodología

El método utilizado para desarrollar el presente proyecto es de tipo investigativo descriptivo con un enfoque cuantitativo. Para el desarrollo de este trabajo se recopiló y analizó información referente a sistemas de generación de energía eólica para así identificar las diferentes topologías y lógicas de control que se aplican a estos tipos de sistemas. Se recopiló también información de convertidores de potencia de tipo AC-DC, DC-DC y DC-AC con el objeto de controlar de manera correcta todas las instancias que implican la transformación de energía eólica a energía eléctrica y que esta se pueda utilizar para alimentar una carga en modo isla. La recolección de información se la hizo a partir de artículos científicos, tesis y libros con contenido relacionado a la temática de este trabajo. En la Fig. 2.1 se muestra el diagrama de bloques del sistema.

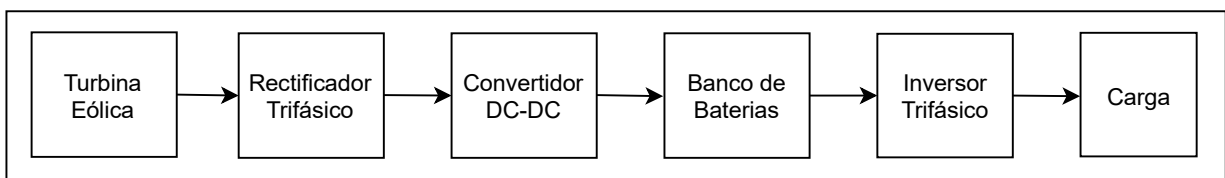


Fig. 2.1. Diagrama de bloques del sistema  
Fuente: Autor

### 2.2 Sistema eólico propuesto

Según (Clementi & Jacinto, 2021) y (Dodero & Garcia, 2012) un generador eólico de baja potencia es aquel que tiene la capacidad de entregar una potencia de hasta 100 kW, considerando esto y a criterio del investigador se propone para este trabajo modelar y simular un

aerogenerador de 10 kW. Además, considerando que en la provincia de Loja se tiene la mayor posibilidad de explotar el recurso eólico y específicamente en la zona de Yangana es la que mayor potencial promete, con valores de viento máximos superiores a 20 m/s y valores medios por encima de 8 m/s anualmente, según un estudio realizado (Álvarez, Maldonado, Montaña, & Tenechagua, 2014), se propone a criterio del investigador trabajar en esta investigación con una velocidad máxima de 12 m/s.

Un sistema de generación eólico se puede categorizar en 3 etapas importantes como son: el sistema aerodinámico, el sistema mecánico y el sistema eléctrico. El principio de funcionamiento se basa en obtener la potencia de un aerogenerador mediante la fuerza de empuje del viento sobre las palas del rotor, el ángulo de pitch y la velocidad del viento al incidir sobre las palas obteniendo así el par mecánico de la turbina girando a velocidad baja debido al buje que está acoplado el rotor (Ouro, 2014). Las turbinas se clasifican en turbinas de eje vertical y horizontal, así como turbinas eólicas de velocidad fija y variable. Las turbinas de eje horizontal son las que predominan en el mercado en la actualidad, debido a las múltiples ventajas presentadas en la Tabla 1.2 y además brindan la posibilidad de aplicación a la generación de baja potencia. Así también, los fabricantes se han permitido desarrollar grandes y pequeñas turbinas de velocidad variable ya que son más rentables según las ventajas presentadas en la Tabla 1.3. Por tal razón se toma como referencia una turbina de eje horizontal y de velocidad variable para este proyecto.

El sistema mecánico mediante su multiplicador toma el par de la turbina a baja velocidad y lo hace girar a alta velocidad donde está acoplado el generador donde posteriormente el par mecánico se convierte en par eléctrico y a su vez se genera energía eléctrica. Según lo investigado en el capítulo anterior, los generadores eléctricos comúnmente utilizados en los sistemas de conversión de energía eólica de velocidad variable ya sean síncronos o de inducción son los mencionados en la Tabla 2.1, en la cual se presenta las ventajas y desventajas de cada uno de ellos:

**TABLA 2.1**  
**VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS GENERADORES SÍNCRONOS Y ASÍNCRONOS**

Generador	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>SCIG</b>	Sencillez mecánica y robusto	Baja eficiencia
	Costo y mantenimiento bajo	Consumo de potencia reactiva elevado (banco de condensadores)
<b>DFIG</b>	Control de potencia activa y reactiva	Costo promedio
	No necesita ser magnetizado desde la red	Necesita anillos colectores (mantenimiento)
		Necesita caja multiplicadora
<b>WRSG</b>	No requiere un sistema de compensación de energía reactiva	Necesita un sistema de excitación
	No requiere caja multiplicadora (opcional)	Frecuente mantenimiento
<b>PMSG</b>	Confortable, compacto y fácil de instalar	Problemas estructurales y térmicos
	Tiene excitación propia (imanes permanentes)	Costo elevado
	Mayor eficiencia	
	Trabaja a bajas revoluciones	
	Bajo mantenimiento	
	No requiere caja multiplicadora (opcional)	

Fuente: Autor

Según la Tabla 2.1. el generador síncrono de imanes permanentes presenta varias ventajas con respecto al resto de generadores, al tener una excitación propia por medio de los imanes permanentes, se elimina el sistema de escobillas y anillos rozantes, por lo que el rotor no necesita ningún mantenimiento, además de que las pérdidas eléctricas disminuyen aumentando el rendimiento de la máquina, por tales razones a pesar de representar un costo elevado, es actualmente el tipo de generador de elección en la mayoría de los pequeños generadores de turbinas eólicas de baja potencia. Es así que este trabajo se encuentra enfocado en un sistema de generación eólico compuesto por un generador síncrono de imanes permanentes.

Teniendo en cuenta que el sistema es de velocidad variable, es necesario el uso de un convertidor de potencia, que permita el control de la velocidad del generador que está acoplado mecánicamente al rotor (palas) de la turbina eólica. Según (Wu, Lang, Zargari, & Kouro, 2011) las configuraciones de conversión comúnmente utilizadas para generadores síncronos son: convertidores de potencia "Back-to-Back" y la configuración con rectificador de diodos y convertidores DC-DC, siendo esta más simple, rentable y una alternativa de bajo costo en comparación con el convertidor de potencia Back to Back. En una revisión de los convertidores DC-DC para sistemas autónomos de turbinas eólicas de velocidad variable basados en un PMSG realizado por (Pragaspathy\* & Anand, 2016) se muestra una comparación de los distintos convertidores, los cuales se muestran en la Tabla 2.2.

**TABLA 2.2**  
**CUADRO COMPARATIVO DE CONVERTIDORES DC-DC**

	Buck	Boost	Buck Boost	Flyback
<b>Polaridad</b>	Salida no invertida	Salida no invertida	Salida invertida	Salida no invertida
<b>Aislamiento</b>	Sin aislamiento	Sin aislamiento	Sin aislamiento	Con aislamiento
<b>Corriente</b>	Pulsante	Pulsante	Pulsante	Pulsante
<b>Conmutación</b>	Tipo flotante	Tipo flotante	Tipo flotante y a tierra	Tipo flotante
<b>Relación de trabajo</b>	$\frac{V_o}{V_{in}} = D$	$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1-D}$	$\frac{V_o}{V_{in}} = -\frac{D}{1-D}$	$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{nD}{1-D}$
<b>Configuración</b>	1-Interrumtor 1-Capacitor 1-Inductor	1-Interrumtor 1-Capacitor 1-Inductor	1-Interrumtor 1-Capacitor 1-Inductor	1-Interrumtor 1-Capacitor 1-Transformador
<b>Eficiencia</b>	Baja	Baja	Alta	Alta
<b>Costo</b>	Medio	Medio	Medio	Bajo

Fuente: (Pragaspathy\* & Anand, 2016)

Se utiliza en este trabajo un convertidor Flyback debido a su aislamiento galvánico, ya que la falta de aislamiento entre la salida y la entrada de un convertidor provoca que las masas de las dos etapas sean las mismas, es decir que tienen la misma tierra, por lo que cualquier variación de las tensiones o corrientes de entrada por causas ajenas a la carga, se vean reflejadas en ésta, pudiendo incluso destruirla (Soto, 2018). Otra de las razones por la cual se escogió este convertidor es la alta eficiencia que presenta con respecto al convertidor Buck y Boost según la Tabla 2.2, además de que la ausencia de un inductor en su etapa de salida hace que tenga una ventaja respecto al coste y al tamaño con el resto de convertidores.

Para alimentar la carga en modo aislado es necesario un inversor trifásico que convierta la tensión continua de la salida del convertidor en una tensión alterna la cual es regulada mediante un control, además el sistema se respalda mediante un banco de baterías, es decir cuando el recurso eólico no sea suficiente para abastecer la carga, el banco de baterías aportará la potencia necesaria. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.2** muestra el esquema del sistema propuesto.

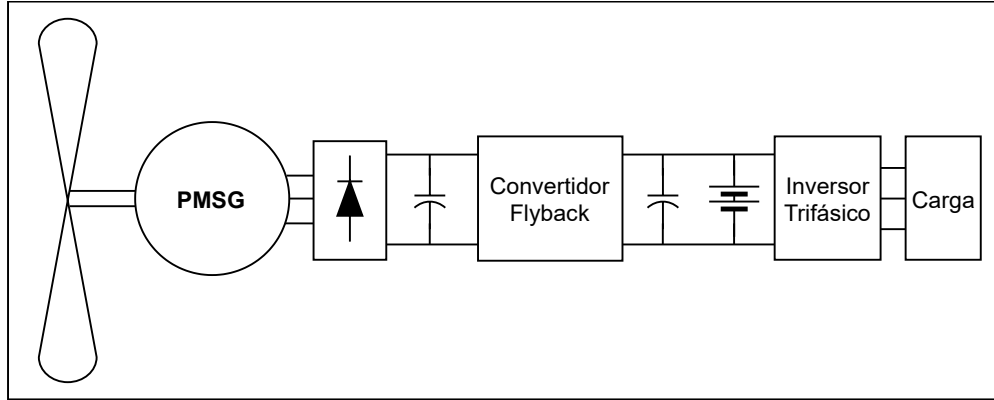


Fig. 2.2. Esquema del sistema propuesto  
Fuente: Autor

### 2.2.1 Modelo aerodinámico

Se parte de la rotación de las palas del aerogenerador cuando el aire incide en ellas aprovechando la energía cinética del viento. Dentro de este trabajo se toma en consideración que las palas están perfectamente orientadas es decir  $\beta$  o el ángulo de ataque de la sección transversal de las palas con respecto a la dirección del viento se aproxima a cero, ya que en turbinas de pequeña escala este valor es fijo y cero es el valor del ángulo en el que mayor eficiencia alcanza la turbina (Peláez, Herrera, González, & Serna, 2019). Además, la energía cinética extraída del viento se basa en el principio de balances de energía y la ecuación de Bernoulli dando una justificación a la diferencia de presión antes y después de que el aire atraviese las palas produciendo una velocidad en el flujo de aire como se puede ver en la Fig. 2.3 (Ouro, 2014).

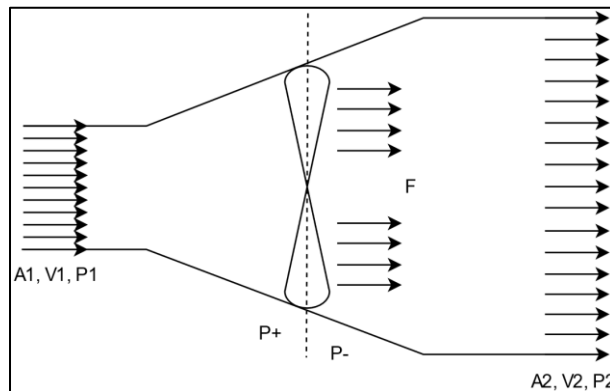


Fig. 2.3. Paso de flujo de aire a través de las palas del aerogenerador  
Fuente: (Ouro, 2014)

La potencia eléctrica de un aerogenerador depende de cómo interactúan las palas y el viento que incide sobre estas, convirtiendo la energía cinética en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica (Rodríguez E. , 2018). La cantidad de potencia del

aerogenerador y la energía cinética del viento son directamente proporcional a la densidad del aire. Donde la densidad del aire a presión atmosférica normal es de  $1.225 \text{ kg/m}^3$  a una temperatura de  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , dato que se toma como referencia para este trabajo (Çengel & Cimbala, 2006). La potencia presente en el viento se representa a través de la energía cinética que este posee y se describe mediante la ecuación (2.1)

$$P_V = \frac{1}{2} \rho A \omega_V^3 \quad (2.1)$$

Donde:

$P_p$ : potencia del viento W

$\rho$ : densidad del aire ( $1.225 \text{ kg/m}^3$  a una temperatura de  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ )

A: área de barrido de la turbina en  $\text{m}^2$

$\omega_V$ : velocidad del viento en  $\text{m/s}$

En la práctica no es posible extraer la potencia total del viento, por lo cual la potencia que recibe la turbina es:

$$P_T = \frac{1}{2} * \rho (A_1 \omega_{V1}^3 - A_2 \omega_{V2}^3) \quad (2.2)$$

La eficiencia de conversión de energía eólica a energía mecánica se conoce como coeficiente de potencia ( $C_p$ ) y se obtiene a partir de la relación existente entre  $P_T$  y  $P_V$  (Valenzuela, 2018).

$$C_p = \frac{P_T}{P_V} \rightarrow P_T = \frac{1}{2} \rho A \omega_V^3 C_p \quad (2.3)$$

De manera teórica el máximo valor de  $C_p$ , desarrollado por el físico Alemán Albert Betz en 1992, se establece en  $16/27$  (59.3%) y se conoce como el límite de Betz. En la Fig. 2.4 se muestran las características de  $\lambda$  vs  $C_p$  para diferentes tipos de turbinas.

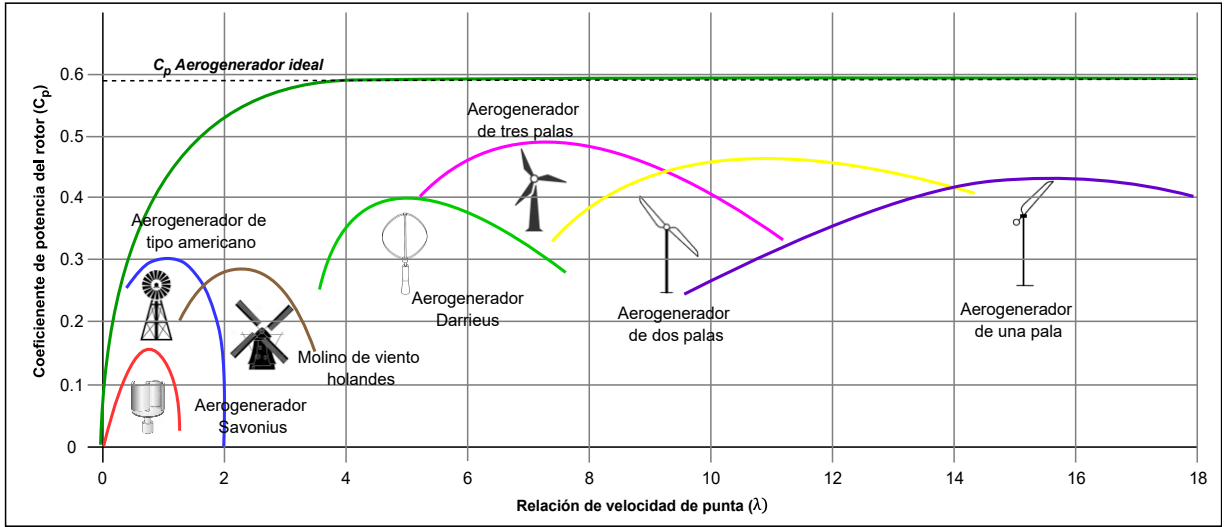


Fig. 2.4. Límite del coeficiente de potencias respecto a la velocidad del viento  
Fuente: (Jaramillo, 2013)

El coeficiente de potencia de una turbina eólica es dependiente de varias características de la propia turbina tales como el perfil de las palas del rotor, el arreglo de las palas y su configuración. Los parámetros de los cuales depende el coeficiente de potencia se representan en función de la relación de velocidad de punta ( $\lambda$ ) y del ángulo de paso de la pala ( $\beta$ ), y se describe mediante la ecuación (2.4) y definiendo  $\lambda_i$  como se muestra en la ecuación (2.5) (Ouro, 2014):

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left( \frac{C_2}{\lambda_i} - C_3\beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6\lambda \quad (2.4)$$

$$\lambda_i = \left( \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right)^{-1} \quad (2.5)$$

Y la relación de velocidad de punta se describe mediante la ecuación (2.6)

$$\lambda = \frac{\omega_T r_T}{\omega_V} \quad (2.6)$$

Donde  $r_T$  es el radio de la turbina.

Los coeficientes  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$ ,  $C_5$  y  $C_6$  dependen de las características aerodinámicas de las aspas. Para este trabajo se supone una turbina con los valores utilizados en (Corradini, Ippoliti, & Orlando, 2013) y (González & Morales, Control de Velocidad de Aerogenerador mediante Realimentación de Variables de Estado, 2017), quienes realizaron estudios enfocados a este tema y bajo escenarios similares. Los coeficientes son  $C_1 = 0.51763$ ;  $C_2 = 116$ ;  $C_3 = 0.4$ ;  $C_4 = 5$ ;  $C_5 = 21$ ;  $C_6 = 0.006795$ . Bajo estas condiciones se obtiene para  $\beta=0$  la curva de  $C_p$  en



función de  $\lambda$  mostrada en la Figura 3.2 donde se puede apreciar que la eficiencia de la turbina alcanza su valor máximo de  $C_{pmax} = 0.48$  para un valor particular de relación de velocidad de punta  $\lambda_{opt} = 8.1$ .

### 2.2.2 Modelo mecánico

La parte mecánica de una turbina eólica se conforma por la turbina, una caja multiplicadora y un generador. Estos tres componentes a su vez se pueden representar mecánicamente mediante un modelo de dos masas. En la Fig. 2.5 se observa el modelo mecánico de dos masas de un aerogenerador (Jianxing, Yabin, Sijia, & Ligang, 2017).

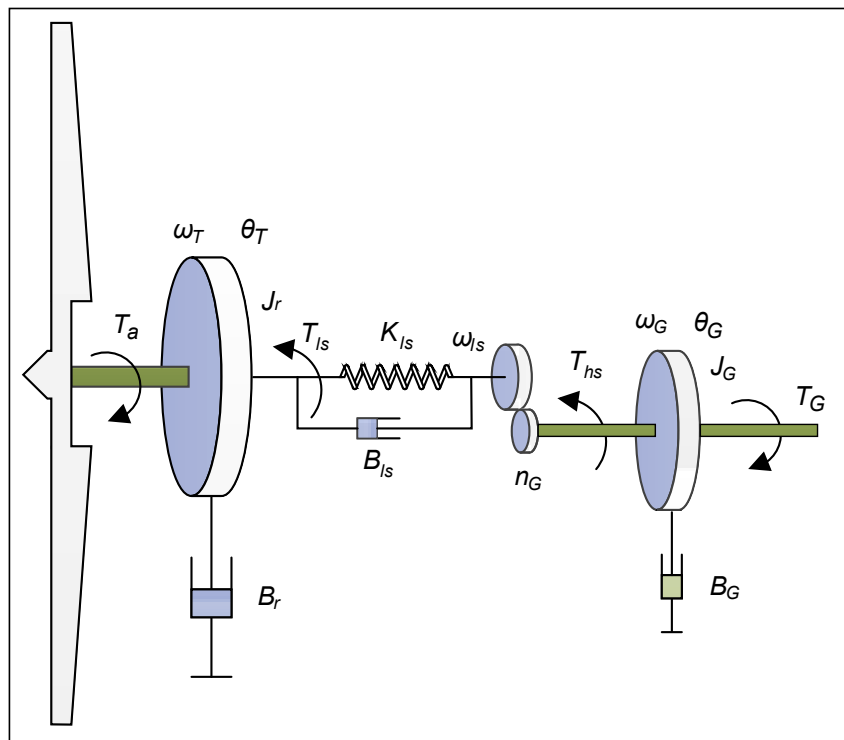


Fig. 2.5. Modelo mecánico de dos masas de un aerogenerador  
Fuente: (Jianxing, Yabin, Sijia, & Ligang, 2017)

Donde:

$T_a$ : Torque aerodinámico Nm

$\omega_T$ : Velocidad de la turbina rad/s

$\theta_T$ : Desviación angular del rotor rad

$J_r$ : Inercia del rotor Kg.m<sup>2</sup>

$B_r$ : Amortiguamiento externo del rotor Nm/(rad. s)

$T_{ls}$ : Torque del eje de baja velocidad Nm

$K_{ls}$ : Rigidez del eje de baja velocidad Nm/rad

$B_{ls}$ : Amortiguamiento del eje de baja velocidad Nm/(rad. s)

$\omega_{ls}$ : Velocidad del eje de baja velocidad rad/s

$n_G$ : Relación de caja multiplicadora

$T_{hs}$ : Torque del eje de alta velocidad Nm

$\omega_G$ : Velocidad del generador rad/s

$\theta_G$ : Desviación angular del generador rad

$J_G$ : Inercia del generador Kg.m<sup>2</sup>)

$B_G$ : Amortiguamiento externo del generador Nm/(rad. s)

$T_G$ : Torque del generador Nm

El rotor y el eje de baja velocidad se modelan mediante el momento de inercia rotacional  $J_r$ , dos amortiguadores viscosos con constantes de amortiguamiento  $B_r$  y  $B_{ls}$ , respectivamente, y con un resorte  $K_{ls}$  que representa la rigidez del eje. El generador y el eje de alta velocidad se modelan a partir del momento de inercia rotacional  $J_G$  y de un amortiguamiento viscoso con constante de amortiguamiento  $B_G$ . La caja multiplicadora se modela a partir de la relación de multiplicación  $n_G$ , que se asume como perfectamente rígida (Jianxing, Yabin, Sijia, & Ligang, 2017). El modelo dinámico del sistema mostrado en la Fig. 2.5 se describe por las siguientes ecuaciones:

$$J_r \frac{d\omega_T}{dt} = T_T - B_r \omega_T \quad (2.7)$$

$$J_G \frac{d\omega_G}{dt} = T_G - B_G \omega_G \quad (2.8)$$

$$T_G = K_{ls}(\theta_T - \theta_G) + B_{ls}(\omega_T - \omega_G) \quad (2.9)$$

Y la caja multiplicadora se define de la siguiente forma:

$$n_G = \frac{\omega_G}{\omega_T} = \frac{\theta_G}{\theta_T} \quad (2.10)$$

### 2.2.3 Modelo del Generador Síncrono de Imanes Permanentes

El modelo del Generador Síncrono de Imanes Permanentes se puede representar tanto en coordenadas trifásicas sinusoidales (ABC) como en coordenadas de régimen permanente (dq0) (Wu, Lang, Zargari, & Kouro, 2011).

Para la simulación del generador se utilizará el bloque "Permanent Magnet Synchronous Machine" que se incluye en la librería "Electrical" de Simulink de Matlab

A continuación, se presentará la representación del PMSG en ambos sistemas de referencia.

### 2.2.3.1 Modelo del generador en coordenadas ABC

El modelo del generador síncrono se obtiene a partir del circuito eléctrico de la máquina, mismo que consta del devanado del rotor y del devanado del estator, el desarrollo analítico de las ecuaciones del generador se puede obtener de (Goran, 2008), (Machowski, Janusz, & Bumby, 2011) y (Salazar A. , 2015). La Fig. 2.6 muestra el esquema circuital del generador síncrono.

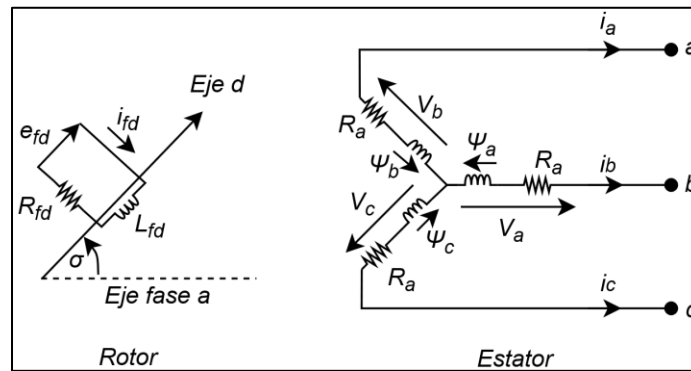


Fig. 2.6. Circuito devanado del rotor y estator del generador síncrono  
Fuente: (Salazar A. , 2015)

Donde:

$e_{fd}$ : tensión de campo

$i_{fd}$ : corriente del devanado del rotor

$R_{fd}$ : resistencia del devanado del rotor

$L_{fd}$ : inductancia del devanado del rotor

$\sigma$ : ángulo entre el eje de la fase a y el eje d

$R_a$ : resistencia de armadura

$i_a, i_b, i_c$ : corrientes del estator en las fases a, b y c

$v_a, v_b, v_c$ : tensiones del estator fase-neutro

$\psi_a, \psi_b, \psi_c$ : flujos enlazados de los devanados de fase

Los flujos enlazados de los devanados de fase están determinados por la corriente de fase que circulan por las inductancias de los devanados y se describen de la siguiente forma:

$$\psi_a = -l_{aa}i_a - l_{ab}i_b - l_{ac}i_c + l_{afd}i_{fd} \quad (2.11)$$

$$\psi_b = -l_{ab}i_a - l_{bb}i_b - l_{bc}i_c + l_{bfd}i_{fd} \quad (2.12)$$

$$\psi_c = -l_{ca}i_a - l_{cb}i_b - l_{cc}i_c + l_{cfd}i_{fd} \quad (2.13)$$

Donde:

$l_{aa}, l_{bb}, l_{cc}$ : inductancias propias del devanado del estator

$l_{ab}, l_{bc}, l_{ca}$ : inductancias mutuas del estator

$l_{afd}, l_{bfd}, l_{cfd}$ : inductancias del devanado del rotor

Las inductancias se definen mediante las siguientes ecuaciones:

$$l_{aa} = L_{aa0} + L_{aa2} \cos(2\sigma) \quad (2.14)$$

$$l_{bb} = L_{aa0} + L_{aa2} \cos\left(\sigma - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.15)$$

$$l_{cc} = L_{aa0} + L_{aa2} \cos\left(\sigma + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.16)$$

$$l_{ab} = -L_{ab0} - L_{ab2} \cos\left(2\sigma + \frac{\pi}{3}\right) \quad (2.17)$$

$$l_{bc} = -L_{ab0} - L_{ab2} \cos(2\sigma - \pi) \quad (2.18)$$

$$l_{ca} = -L_{ab0} - L_{ab2} \cos\left(2\sigma - \frac{\pi}{3}\right) \quad (2.19)$$

$$l_{afd} = L_{afd} \cos(\sigma) \quad (2.20)$$

$$l_{bfd} = L_{afd} \cos\left(\sigma - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.21)$$

$$l_{cfd} = L_{afd} \cos\left(\sigma + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.22)$$

Donde:

$L_{aa0}, L_{aa2}, L_{ab2}$  : inductancias mutuas referidas a la fase a

El flujo del rotor se describe mediante las ecuaciones (2.23) y (2.24)

$$\frac{d\psi_{fd}}{dt} = e_{fd} - R_{fd}i_{fd} \quad (2.23)$$

$$\psi_{fd} = l_{ffd}i_{fd} - l_{afd}i_a - l_{bfd}i_b - l_{cfd}i_c \quad (2.24)$$

Reemplazando (2.20), (2.21) y (2.22) en (2.24), se tiene:

$$\psi_{fd} = L_{ffd}i_{fd} - L_{afd} \left[ i_a \cos(\sigma) + i_b \cos\left(\sigma - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cos\left(\sigma + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (2.25)$$

### 2.2.3.2 Modelo del generador PMSG en coordenadas dq0

El modelo del PMSG en ejes dq0 se modela en el marco de referencia síncrono del campo, esto es, en ejes directo y de cuadratura (dq0). La Fig. 2.7 muestra el modelo del PMSG en ejes dq0 (Wu, Lang, Zargari, & Kouro, 2011).

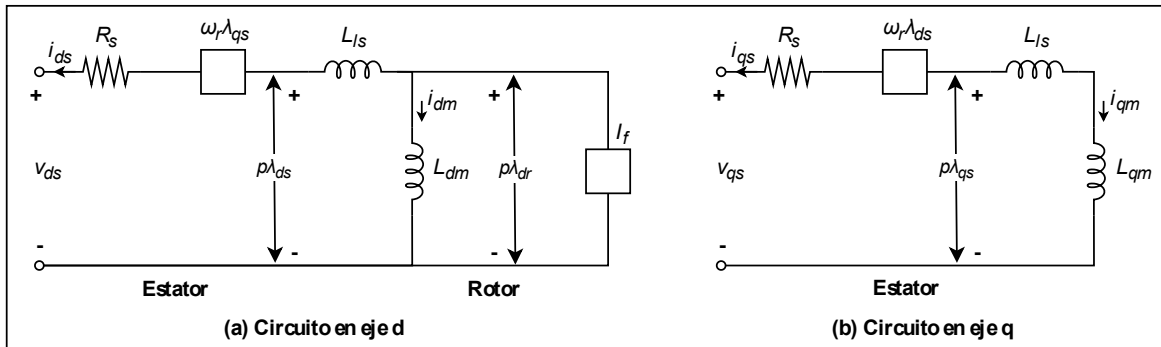


Fig. 2.7. Modelo en ejes dq0 del PMSG en el marco de referencia síncrono del rotor  
Fuente: (Wu, Lang, Zargari, & Kouro, 2011)

Donde:

$v_{ds}$ : Voltaje síncrono en eje directo

$i_{ds}$ : Corriente síncrona en eje directo

$i_{qs}$ : Corriente síncrona en eje de cuadratura

$R_s$ : Resistencia de estator

$\omega_r$ : Velocidad síncrona del rotor

$\lambda_{qs}$ : Flujo del estator en eje de cuadratura

$\lambda_{ds}$ : Flujo del estator en eje directo

$L_{ls}$ : Inductancia de fuga del estator

$i_{dm}$ : Corriente de magnetización en eje directo

$i_{qm}$ : Corriente de magnetización en eje de cuadratura

$L_{dm}$ : Inductancia de magnetización en eje directo

$L_{qm}$ : Inductancia de magnetización en eje de cuadratura

$\lambda_{dr}$ : Flujo del rotor en eje de directo

$I_f$ : Corriente de campo

$p$ : Operador de derivada ( $p = \frac{d}{dt}$ )

Para modelar el circuito del rotor, el imán permanente que cumple la función de devanado de campo se modela como una fuente de corriente  $I_f$  con magnitud fija. El modelo del PMSG mostrado en la Fig. 2.7 se representa mediante las siguientes ecuaciones.

$$\begin{aligned} v_{ds} &= -R_s i_{ds} - \omega_r \lambda_{qs} + p \lambda_{ds} \\ v_{qs} &= -R_s i_{qs} + \omega_r \lambda_{ds} + p \lambda_{qs} \end{aligned} \quad (2.26)$$

Donde  $\lambda_{ds}$  y  $\lambda_{qs}$  son los flujos del estator en eje d y eje q, respectivamente, y describen de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \lambda_{ds} &= -L_{ls} i_{ds} + L_{dm} (I_f - i_{ds}) = -(L_{ls} + L_{dm}) i_{ds} + L_{dm} I_f = -L_d i_{ds} + \lambda_r \\ \lambda_{qs} &= -(L_{ls} + L_{qm}) i_{qs} = -L_q i_{qs} \end{aligned} \quad (2.27)$$

Donde  $\lambda_r$  es el flujo del rotor, y  $L_d$  y  $L_q$  son las autoinductancias del estator en ejes dq0, y se definen así:

$$\begin{aligned} \lambda_r &= L_{dm} I_f \\ L_d &= L_{ls} + L_{dm} \\ L_q &= L_{ls} + L_{qm} \end{aligned} \quad (2.28)$$

Reemplazando la ecuación (2.27) en la ecuación (2.26), y considerando que el flujo del rotor es constante debido a los imanes permanentes, entonces la derivada de este con respecto al tiempo es cero ( $\frac{d\lambda_r}{dt} = 0$ ), y se tiene:

$$\begin{aligned} v_{ds} &= -R_s i_{ds} + \omega_r L_q i_{qs} - L_d p i_{ds} \\ v_{qs} &= -R_s i_{qs} - \omega_r L_d i_{ds} + \omega_r \lambda_r - L_q p i_{qs} \end{aligned} \quad (2.29)$$

El torque electromagnético producido por el PMSG se puede calcular a partir de la ecuación (2.30).

$$T_e = \frac{3P}{2} (i_{qs} \lambda_{ds} - i_{ds} \lambda_{qs}) \quad (2.30)$$

Donde  $P$  es el número de pares de polos.

Reemplazando la ecuación (2.27) en la ecuación (2.30), se tiene:

$$T_e = \frac{3P}{2} [\lambda_r i_{qs} - (L_d - L_q) i_{ds} i_{qs}] \quad (2.31)$$

### 2.3 Convertidor DC-DC tipo Flyback

Los convertidores Flyback son un tipo de convertidores DC-DC con una característica especial, poseen aislamiento galvánico (Portillo, 2018). Esto se logra con un transformador en el medio del circuito que almacena energía para luego liberarla a la carga. El diseño especial de este convertidor convierte al Flyback en un convertidor indirecto ya que no tiene un camino directo entre la entrada y la carga en ningún momento de la operación. La Fig. 2.8 muestra el esquema del convertidor Flyback

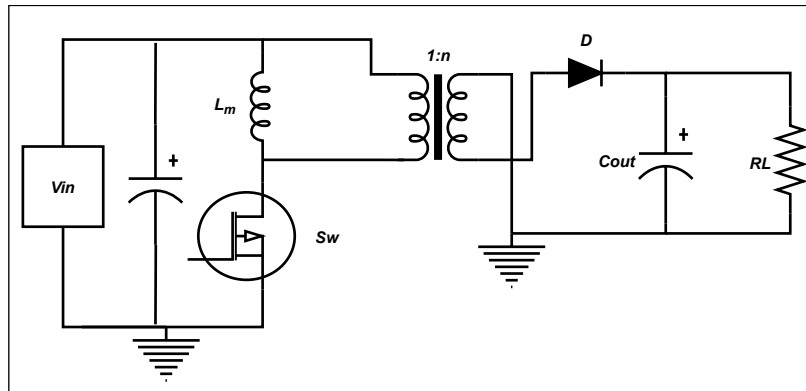


Fig. 2.8. Circuito convertidor Flyback  
Fuente: (Portillo, 2018)

Donde:

- $V_{in}$ : Voltaje de entrada
- $C_{in}$ : Capacitor de entrada
- $L_m$ : Inductancia de magnetización
- $n$ : relación de transformación
- $D$ : diodo
- $C_{out}$ : Capacitor de salida
- $RL$ : resistencia de carga
- $Sw$ : Interruptor de potencia

Para analizar el funcionamiento del Flyback se lo divide en dos puntos de operación de interruptor de potencia, esto es, cuando el interruptor está cerrado y cuando el interruptor está

abierto. Primero se analizará el circuito cuando el interruptor de potencia está cerrado. La Fig. 2.9 muestra el circuito equivalente.

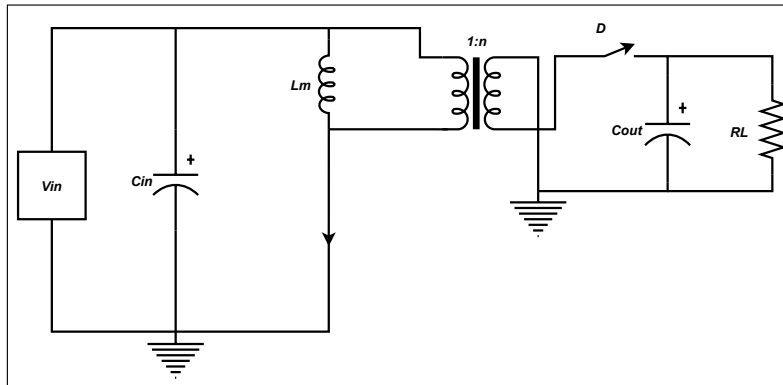


Fig. 2.9. Circuito equivalente cuando el interruptor de potencia está cerrado  
Fuente: (Portillo, 2018)

Asumiendo que el transformador es ideal y que no existen pérdidas se define el voltaje del inductor de la siguiente forma:

$$V_L = V_{in} \quad (2.32)$$

Ahora, analizando la operación del convertidor cuando el interruptor de potencia está abierto (ver Fig. 2.10) se tiene:

$$V_L = -\frac{V_{RL}}{n} = -\frac{V_{out}}{n} \quad (2.33)$$

El punto clave para calcular la función de transferencia a partir del voltaje del inductor es tener en cuenta que el voltaje promedio a través de un inductor debe ser igual a cero en estado estable. El voltaje del inductor varía en el tiempo en función de la posición del interruptor de potencia (cerrado o abierto), y esto depende del ciclo de trabajo ( $\delta$ ) y del periodo de conmutación ( $T$ ), por lo cual cuando el interruptor de potencia se encuentra cerrado el inductor se carga durante el lapso tiempo determinado por  $\delta T$ , mientras que cuando el interruptor de potencia se encuentra abierto el inductor se descarga durante el lapso de tiempo complementario al ciclo de trabajo ( $(1 - \delta)T$ ). Partiendo de que el voltaje promedio de un inductor es cero se pueden sumar las ecuaciones (2.32) y (2.33) multiplicadas por el tiempo que permanece el interruptor cerrado y abierto respectivamente. De esta manera se obtiene la función de transferencia del convertidor, expresada en la ecuación (2.34).

$$\overline{V_L} = \delta T V_{in} - (1 - \delta) T \frac{V_{out}}{n} = 0 \rightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{n\delta}{1 - \delta} \quad (2.34)$$



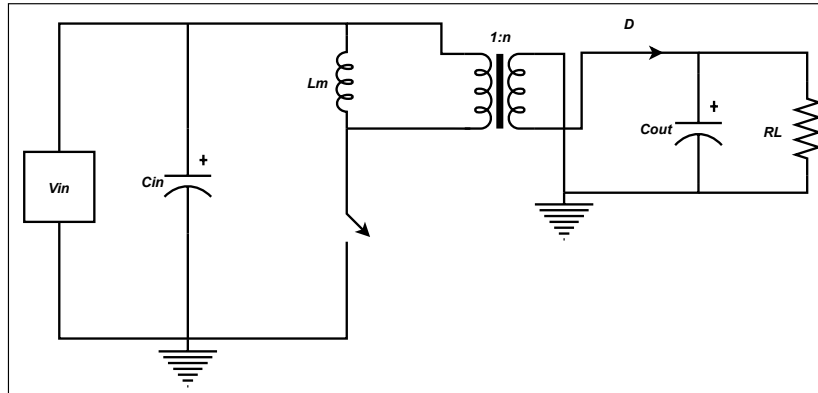


Fig. 2.10. Circuito equivalente cuando el interruptor de potencia está abierto  
Fuente: (Portillo, 2018)

Para el diseño de un convertidor Flyback se deben considerar varios aspectos tales como:

- Frecuencia de conmutación del interruptor de potencia
- Relación de transformación del transformador
- Resistencia de carga
- Inductancia de magnetización
- Capacitor de salida
- Capacitor de entrada

### 2.3.1 Frecuencia de conmutación

La frecuencia de conmutación es el primer parámetro que se debe seleccionar debido a que a partir de esta se determinan los componentes que conformarán al convertidor. Un elevado valor de este parámetro puede provocar pérdidas de conmutación elevadas, aunque reduce los valores de inductancias y capacitancias (esto es, un tamaño más pequeño de los componentes) (Hudson & Ametller, 2022). Para este trabajo se utilizará un transistor IGBT, debido a que soporta mayores intensidades que un MOSFET, por lo tanto, tendrá menores pérdidas por conducción (Berenguer, 2011). El IGBT también soporta valores de voltaje mayores y es más robusto, frente a un MOSFET (López, 2014). Un IGBT tiene un rango de operación de frecuencia de conmutación de 0.2 kHz a 20 kHz (Freire, Toapanta, & Quinatoa, 2022), para este trabajo se ha seleccionado una frecuencia de conmutación de 20 kHz, ya que, con un valor de frecuencia alto el tiempo de transición del estado de conducción (zona de saturación) al estado de bloqueo (zona de corte) es menor, según la curva característica de un IGBT, lo que quiere decir que se tiene una respuesta mucho más rápida (Ramos F. , 2020). Además de que, con este valor de frecuencia los elementos almacenadores de energía (capacitores e inductor) no tendrán valores de capacitancias e inductancia elevados.

### 2.3.2 Relación de transformación de transformador

El parámetro de la relación de transformación del transformador se obtiene a partir de la ecuación (2.34) y se define a continuación:

$$n = \frac{V_{out}}{V_{in}} \frac{1 - \delta}{\delta} \quad (2.35)$$

### 2.3.3 Resistencia de carga

Una vez definida la relación de transformación se puede calcular la resistencia de carga del convertidor para lo cual se parte de la potencia y voltaje de entrada que ingresan al convertidor y se define la resistencia equivalente a la entrada del circuito de la siguiente forma:

$$R_{eq} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{V_{dc}^2}{P_{in}} \quad (2.36)$$

Y la resistencia de carga se define por la ecuación (2.37)

$$R_L = \frac{R_{eq} n^2 \delta^2}{(1 - \delta)^2} \quad (2.37)$$

### 2.3.4 Inductancia de magnetización

La inductancia de magnetización es el elemento que almacena la energía cuando el interruptor de potencia está cerrado y luego la libera al secundario del transformador cuando el interruptor se abre. El valor de la inductancia de magnetización determina el porcentaje de corriente de rizado que fluye a través del inductor (Portillo, 2018). Para obtener el valor de la inductancia de magnetización se parte del voltaje en el inductor cuando el interruptor está cerrado, el cual está definido por la ecuación (2.32)

$$V_L = V_{in} = L_m \frac{di_{Lm}}{dt} \quad (2.38)$$

El voltaje en la entrada del convertidor es constante, además, el voltaje promedio en un inductor es cero, por lo cual se puede obtener el valor del inductor a partir (2.38), donde el interruptor de potencia está cerrado y permanece en esta posición durante el intervalo de tiempo que dura el ciclo de trabajo ( $\delta$ ). Este intervalo de tiempo a su vez se lo puede ver como un diferencial de tiempo, y al relacionarlo con un diferencial de corriente, el voltaje del inductor definido por (2.38) se puede expresar de la siguiente manera:

$$V_{in} = L_m \frac{\Delta i_{Lm}}{\Delta t} \quad (2.39)$$

$$\Delta t = \delta T = \frac{\delta}{f}$$

$$\rightarrow L_m \geq \frac{V_{in} \delta}{\Delta i_{Lm} f}$$

Donde  $\Delta t$  es el intervalo de tiempo que está cerrado el interruptor de potencia,  $T$  es el periodo que dura la conmutación total del interruptor de potencia y  $f$  es la frecuencia correspondiente al periodo de conmutación. Para determinar el tiempo que permanece cerrado el interruptor de potencia, se multiplica el ciclo de trabajo ( $\delta$ ) por el período de conmutación del interruptor ( $T$ ). Además, se considera que el valor de la inductancia puede ser mayor o igual, para asegurar que el valor máximo de rizado de corriente sea el valor que requiera el autor o menor que sería aún mejor. Esta consideración se realiza tanto como para la inductancia como para los capacitores.

### 2.3.5 Capacitor de salida

Este elemento se encarga de limitar el rizado del voltaje de salida del convertidor Flyback. Para determinar el valor de capacitancia que deberá tomar el capacitor de salida se parte de la corriente que pasa por este elemento cuando el interruptor de potencia se encuentra cerrado, esta corriente se define de la siguiente manera:

$$i_c = -i_{out} \quad (2.40)$$

Donde  $i_{out}$  es la corriente de salida. La corriente promedio en el capacitor debe ser cero, por lo que la carga en el capacitor debe ser la misma tanto cuando el interruptor está cerrado como cuando el interruptor está abierto, por lo cual se puede definir la carga de la siguiente manera:

$$Q = \Delta v_c C_{out} \rightarrow \int_0^{\delta T} i_c dt = \Delta v_c C_{out} \quad (2.41)$$

$$-i_{out} \delta T = \Delta v_c C_{out} \rightarrow C_{out} \geq \frac{i_{out} \delta}{f \Delta v_c}$$

### 2.3.6 Capacitor de entrada

Para el capacitor de entrada se parte del circuito con el interruptor de potencia abierto, lo que significa que se trabaja con el complemento del ciclo de trabajo ( $1 - \delta$ ), y se tiene que la corriente en la entrada en ese momento es igual a la corriente del capacitor, esto se describe de la siguiente manera:

$$i_{in} = i_{cin} = C_{in} \frac{dV_{cin}}{dt} \approx C_{in} \frac{\Delta V_{cin}}{\Delta t} \quad (2.42)$$

Despejando el valor del capacitor de entrada de la ecuación (2.42) y reemplazando el ciclo de trabajo en la misma se tiene:

$$C_{in} \geq \frac{i_{in}(1 - \delta)}{f\Delta V_{in}} \quad (2.43)$$

## 2.4 Sistema de control

Los sistemas de energía eólica se componen principalmente por la turbina eólica, el generador y los convertidores de potencia, donde se pueden escoger diferentes estrategias de control dependiendo de la arquitectura mecánica de la turbina, del tipo de generador (de inducción o síncronos) y de si el sistema funciona conectado a la red o en modo isla. El sistema utilizado en este proyecto consta de una turbina eólica de tres palas de velocidad variable de la cual se podrá extraer la máxima potencia a distintas velocidades de viento inferiores a la máxima o nominal. La turbina eólica se encuentra acoplada con una máquina tipo PMSG la cual se conecta a un rectificador trifásico cuyo voltaje rectificado de salida alimenta a su vez a un convertidor DC-DC tipo Flyback el cual se encarga de regular la velocidad del generador para extraer su máxima potencia y crear a su salida un bus DC que estará conectado a un banco de baterías que sirve como fuente para un inversor trifásico que se controla mediante un control de voltaje y se conecta a una carga en modo aislado. El banco de baterías que se utilizará tendrá una capacidad nominal de 10 kW, esto se debe a que la turbina que se modelará será diseñada para tener una capacidad nominal de 10 kW.

### 2.4.1 Control del lado del generador

El control del convertidor conectado al generador puede emplear diferentes esquemas para controlar la máxima transferencia de potencia posible a velocidades de viento variable desde la turbina eólica hacia el banco de baterías y a su vez a la carga que se conecta a la salida del inversor. Para ello se utiliza un control de seguimiento de máximo punto de potencia (MPPT). En el presente proyecto se empleará un MPPT basado en la relación de velocidad de punta óptima.

El control de potencia de una turbina eólica de velocidad variable que opera a una velocidad inferior a la nominal se logra controlando el generador. El objetivo del control de potencia es alcanzar el máximo punto de transferencia de potencia para las diferentes velocidades del viento, para ello se controla la velocidad de la turbina por medio del generador

con el fin de que la relación de la velocidad de punta se mantenga en su valor óptimo ( $\lambda_{opt}$ ) (Valenzuela, 2018).

En la Fig. 2.111 se puede observar la característica de velocidad vs potencia de una turbina eólica, donde  $P_T$  y  $\omega_T$  son la potencia mecánica y la velocidad mecánica de la turbina, respectivamente. Se aprecia además que la turbina tiene tres zonas o modos de operación los cuales son: modo estacionario, modo de control del generador y modo de control del ángulo de paso.

La turbina se encuentra en modo estacionario cuando la velocidad del viento está por debajo de la velocidad mínima de arranque, lo que significa que la turbina genera menos potencia de la que consume para provocar su movimiento y, por lo tanto, la turbina se mantiene en modo estacionario. Cuando la velocidad del viento varía entre la velocidad de arranque y la velocidad nominal, los álabes de la turbina se encontrarán inclinados hacia el viento con un ángulo de ataque óptimo y la turbina opera a velocidad variable con el fin de obtener la máxima transferencia de potencia posible, esto se logra a través del control del generador. Finalmente, si la velocidad del viento supera la velocidad nominal de la turbina entonces actúa el mecanismo de control de ángulo de paso que se encargará de mantener constante la potencia en su valor nominal con el fin de salvaguardar la integridad de los elementos y así evitar daños o accidentes. Sin embargo, este control no es caso de estudio para este proyecto, ya que como se observa en la Figura 2.11 el control del generador el cual permite extraer la máxima potencia de la turbina no se ve afectado por el control del ángulo de paso, es decir el sistema siempre operará en el máximo punto de potencia posible sin superar la potencia nominal del aerogenerador.

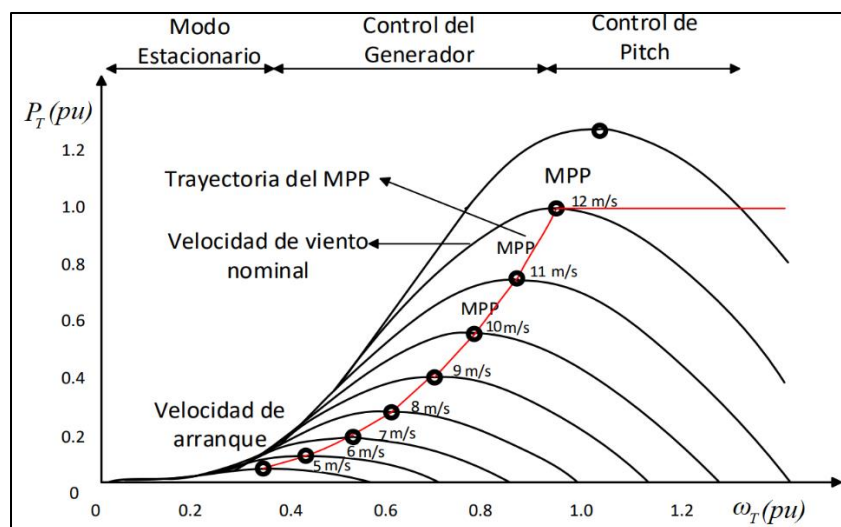


Fig. 2.11. Característica velocidad-potencia de la turbina eólica  
Fuente: (Valenzuela, 2018)

### 2.4.1.1 MPPT con relación de velocidad de punta

La relación de velocidad de punta es un parámetro importante en los sistemas eólicos y se define como la razón entre la velocidad de punta del ábabe y la velocidad del viento entrante (Valenzuela, 2018), dada por:

$$\lambda = \frac{\omega_T r_T}{\omega_v} \quad (2.44)$$

Donde  $\omega_T$  es la velocidad de la turbina,  $r_T$  es el radio de la turbina (longitud del ábabe), y  $\omega_v$  es la velocidad del viento.

Al igual que la relación de la velocidad de punta ( $\lambda$ ) existe otro parámetro importante en el diseño y funcionamiento de una turbina eólica, el cual es el coeficiente de potencia ( $C_p$ ) que determina la eficiencia de la conversión de energía eólica en energía mecánica, este es directamente proporcional a la potencia mecánica ( $P_T$ ) y a su vez es dependiente de la relación de velocidad de punta  $\lambda$  y del ángulo de paso  $\beta$ .

El coeficiente de potencia máximo se obtiene cuando la relación de velocidad de punta es la óptima ( $\lambda_{opt}$ ) y a su vez el ángulo de paso es el nominal u óptimo ( $\beta_{opt}$ ). La relación de velocidad de punta óptima ( $\lambda_{opt}$ ) es constante para un determinado ábabe y a su vez la velocidad de la turbina que produce la potencia máxima se relaciona con esta y con la velocidad del viento. Esta relación se expresa de la siguiente manera:

$$\omega_T^* = \lambda_{opt} \frac{\omega_v}{r_T} \quad (2.45)$$

A partir de la ecuación (2.45) se deduce que para obtener la máxima potencia y eficiencia de conversión de energía posible cuando la turbina se encuentre operando en una velocidad de viento superior a la velocidad de arranque e inferior o igual a la velocidad nominal de la misma, entonces la velocidad de la turbina se debe ajustar de acuerdo a la velocidad del viento y esto se logra mediante el control de velocidad del generador.

Para definir la velocidad de referencia del generador es necesario establecer un coeficiente de potencia óptimo el cual permitirá obtener la referencia de velocidad del generador a partir de la referencia de velocidad de la turbina para la máxima extracción de potencia posible. Esto se logra a través de la relación existente entre la velocidad nominal del generador ( $\omega_G^*$ ) a potencia nominal y la velocidad nominal de la turbina ( $\omega_T^*$ ), y se expresa así:

$$K_{opt} = \frac{\omega_G^*}{\omega_T^*} \quad (2.46)$$

Entonces la velocidad de referencia del generador se define de la siguiente forma:

$$\omega_G^* = K_{opt}\omega_T^* = K_{opt}\lambda_{opt} \frac{\omega_v}{r_T} \quad (2.47)$$

La velocidad del generador se controla por medio del convertidor de potencia que se encuentra conectado a la salida del rectificador, este convertidor de potencia es DC-DC de tipo Flyback (ver Fig. 2.122) y regula la velocidad del generador ( $\omega_G$ ) mediante el control de la corriente del inductor de magnetización ( $i_L$ ). La corriente del inductor se controla a partir de la conmutación del IGBT la cual se establece de acuerdo al ciclo de trabajo ( $\delta$ ) que sale del controlador PI de corriente. Para el controlador de corriente se escoge un controlador tipo PI, debido a que el sistema puede tener cambios bruscos en la velocidad del viento, asemejándose a variaciones tipo escalón y si se tuviera una parte derivativa en el controlador al derivar la señal tipo escalón se obtendría una señal tipo impulso, la cual haría que la acción de control sea muy brusca y posiblemente presente un elevado amortiguamiento en la respuesta del sistema.

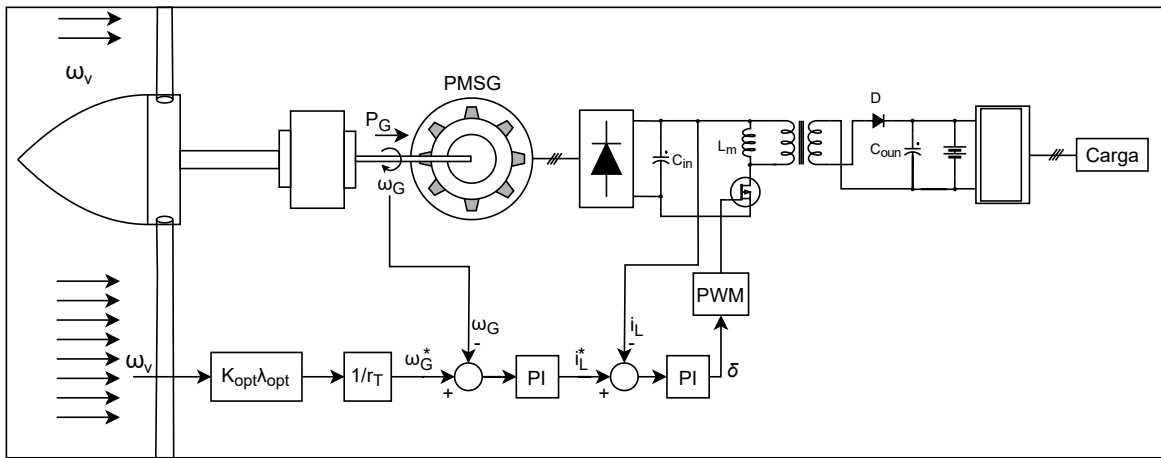


Fig. 2.12. Esquema de control de velocidad con MPPT basado en  $\lambda_{opt}$   
Fuente: Autor

Para el desarrollo de los lazos de control se parte del circuito del convertidor Flyback y se analiza su dinámica en sus dos modos de operación, esto es, cuando el interruptor de potencia está cerrado y cuando el interruptor de potencia está abierto. La Figura 2.13 muestra el circuito del convertidor Flyback a partir del cual se desarrollará el control del mismo.

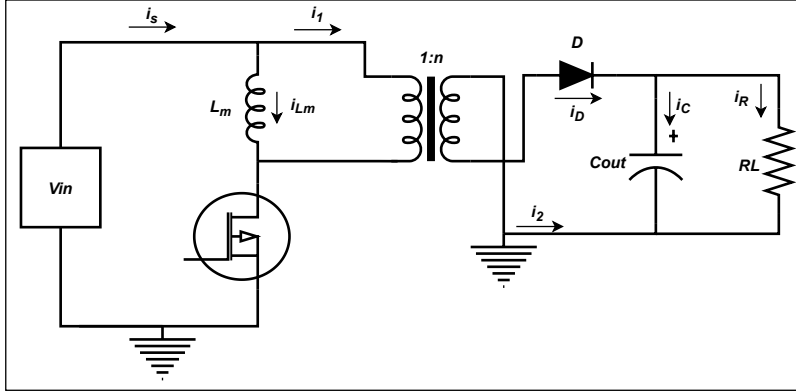


Fig. 2.13. Circuito del convertidor Flyback  
Fuente: Autor

Cuando el interruptor de potencia ( $Sw$ ) está cerrado (ver Figura 2.9), en el ánodo del diodo se tiene un voltaje negativo por lo cual este se convierte en un interruptor abierto y la corriente tanto en el primario como en el secundario del transformador es cero, por consiguiente, se tiene:

$$i_s = i_{L_m} \quad (2.48)$$

$$V_{L_m} = V_{in} = L_m \frac{di_{L_m}}{dt} \quad (2.49)$$

$$i_D = 0 \quad (2.50)$$

$$i_2 = 0 \quad (2.51)$$

$$i_c = C_{out} \frac{dv_c}{dt} = -i_R = -\frac{v_{RL}}{R_L} \quad (2.52)$$

Cuando el interruptor de potencia ( $Sw$ ) está abierto (ver Figura 2.10) la corriente que entrega la fuente es cero, sin embargo, la inductancia de magnetización ( $L_m$ ) libera la energía que almacenó mientras el interruptor de potencia se encontraba cerrado. Esta corriente se traslada desde el devanado primario del transformador hacia el devanado secundario de este y polariza directamente al diodo, convirtiéndolo en un interruptor cerrado, por consiguiente, se tiene:

$$i_s = 0 \quad (2.53)$$

$$V_{L_m} = -\frac{v_{RL}}{n} = L_m \frac{di_{L_m}}{dt} \quad (2.54)$$

$$i_2 = i_D = ni_{L_m} \quad (2.55)$$

$$i_c = ni_{L_m} - i_R = C_{out} \frac{dv_c}{dt} \quad (2.56)$$



Una vez obtenida la dinámica del convertidor tanto cuando el interruptor de potencia se encuentra cerrado como cuando el interruptor de potencia se encuentra abierto, se debe obtener un modelo conmutado completo, es decir, un modelo que describa el comportamiento del convertidor en todo momento, para ello se combina la ecuación (2.49) con la ecuación (2.54), y la ecuación (2.52) con la ecuación (2.56) teniendo en cuenta que cuando el interruptor de potencia está cerrado se debe multiplicar a la ecuación correspondiente por el ciclo de trabajo ( $\delta$ ) y cuando el interruptor de potencia está abierto se debe multiplicar a la ecuación correspondiente por el complemento del ciclo de trabajo ( $1 - \delta$ ), entonces el modelo conmutado completo es:

$$L_m \frac{di_{L_m}}{dt} = v_{in}\delta - \frac{v_c}{n}(1 - \delta) \quad (2.57)$$

$$C_{out} \frac{dv_c}{dt} = ni_{L_m}(1 - \delta) - i_R \quad (2.58)$$

Debido a que se tiene un sistema multivariable, se opta por la representación del mismo en espacio de estados, ya que esta representación proporciona un modo compacto y conveniente de modelar un sistema con múltiples entradas y salidas, tanto para sistemas lineales como no lineales, y a su vez de esta manera es más sencillo hallar una función de transferencia que relacione la acción de control con la variable a controlar (Vesga, 2021).

Un sistema representado en variables de estado se puede expresar de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} X' &= AX + BU \\ Y &= CX + DU \end{aligned} \quad (2.59)$$

Donde  $X'$  son las derivadas de los estados del sistema,  $X$  son los estados del sistema,  $U$  son las entradas del sistema,  $Y$  es la salida del sistema,  $A$  es la matriz de estado,  $B$  es la matriz de entrada,  $C$  es la matriz de salida y  $D$  es la matriz de transmisión directa entre la entrada y la salida.

Entonces, expresando el sistema en espacios de estado se tiene:

$$X = \begin{bmatrix} i_{L_m} \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

$$U = [\delta] \quad (2.61)$$

$$f_1 = \frac{di_{L_m}}{dt} = \frac{v_{in}\delta - \frac{v_c}{n}(1-\delta)}{L_m} \quad (2.62)$$

$$f_2 = \frac{dv_c}{dt} = \frac{ni_{L_m}(1-\delta) - i_R}{C_{out}} \quad (2.63)$$

$$F = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \quad (2.64)$$

Para obtener las matrices  $A$  y  $B$  del sistema en variables de estado se deriva  $F$  con respecto a  $X$  y  $F$  con respecto a  $U$  respectivamente.

$$A = \frac{\partial F}{\partial X} \quad (2.65)$$

$$B = \frac{\partial F}{\partial U} \quad (2.66)$$

$$A_{00} = \frac{\partial f_1}{\partial i_{L_m}} = 0 \quad (2.67)$$

$$A_{01} = \frac{\partial f_1}{\partial v_c} = -\frac{1-\delta}{L_m n} \quad (2.68)$$

$$A_{10} = \frac{\partial f_2}{\partial i_{L_m}} = \frac{n(1-\delta)}{C_{out}} \quad (2.69)$$

$$A_{11} = \frac{\partial f_2}{\partial v_c} = 0 \quad (2.70)$$

$$B_{00} = \frac{\partial f_1}{\partial \delta} = \frac{v_{in} + \frac{v_c}{n}}{L_m} \quad (2.71)$$

$$B_{10} = \frac{\partial f_2}{\partial \delta} = \frac{-ni_{L_m}}{C_{out}} \quad (2.72)$$

A partir de (2.67), (2.68), (2.69) y (2.70) se establece la matriz  $A$  descrita por (2.73), en tanto que la matriz  $B$  descrita por (2.74) se obtiene a partir de (2.71) y (2.72).

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-\delta}{L_m n} \\ \frac{n(1-\delta)}{C_{out}} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.73)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{v_{in} + \frac{v_c}{n}}{L_m} \\ \frac{ni_{L_m}}{C_{out}} \end{bmatrix} \quad (2.74)$$

La respuesta del sistema que se desea controlar es la corriente en el inductor ( $i_{L_m}$ ) la misma que es la primera variable de estado, por lo cual la matriz  $C$  se define mediante (2.75), ya que al multiplicar la matriz  $C$  por matriz de estados ( $X$ ) se obtiene una única respuesta que es la corriente de magnetización y al no haber interacción directa entre la salida (corriente de magnetización) y la entrada (relación de trabajo) se define  $D$  mediante (2.76)

$$C = [1 \quad 0] \quad (2.75)$$

$$D = [0] \quad (2.76)$$

Para obtener la función de transferencia, a partir de la representación del estado de un sistema lineal e invariante, se utiliza la ecuación (2.77), en donde al remplazar las matrices obtenidas se encuentra la función de transferencia de este sistema  $G(s)$ .

$$G(s) = C(sA^0 - A)^{-1}B + D$$

$$G(s) = \frac{s(C_{out}v_{in0}n + C_{out}v_{c0}) + ni_{L_m0}(1 - \delta_0)}{nC_{out}L_m \left( s^2 + \frac{\delta_0^2 - 2\delta_0 + 1}{C_{out}L_m} \right)} \quad (2.77)$$

Donde  $\delta_0$ ,  $v_{in0}$  y  $v_{c0}$  son los valores en estado estacionario que tendrán  $\delta$ ,  $v_{in}$  y  $v_c$ .

La ecuación (2.78) (2.77) representa la función de transferencia del lazo interno de control (control de corriente) y este controlador PI se define a continuación:

$$G_{cc}(s) = k_{cc} \left( 1 + \frac{1}{\tau_{ic}s} \right) = \frac{k_{cc}(s + \frac{1}{\tau_{ic}})}{s} \quad (2.78)$$

Donde las constantes  $k_{cc}$  y  $\tau_{ic}$  se sintonizan de manera empírica.

Una vez definido el lazo interno de control (control de corriente) solo queda definir el controlador para el lazo externo de control (control de velocidad), ver Fig. 2.12. El controlador PI de velocidad se define mediante la ecuación (2.79).

$$G_{c\omega}(s) = k_{c\omega} \left( 1 + \frac{1}{\tau_{i\omega}s} \right) = \frac{k_{c\omega}(s + \frac{1}{\tau_{i\omega}})}{s} \quad (2.79)$$

Donde las constantes  $k_{c\omega}$  y  $\tau_{i\omega}$  se sintonizan de manera empírica

## 2.4.2 Control del lado del inversor

El sistema de generación eólico propuesto se encuentra operando en modo aislado y alimenta una carga trifásica que se conecta a la salida del inversor por medio de un filtro (con inductancia  $L_F$  y capacitancia  $C_F$ , ver Fig. 2.15) que permite obtener formas de onda de corriente y de voltaje sinusoidal, y además permite compensar reactivos, es decir, corregir el factor de potencia. La energía que se transfiere es unidireccional, esto es, desde el inversor hacia la carga, entonces la potencia activa que el sistema entrega a la carga se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$P = 3V_L I_L \cos(\varphi) \quad (2.80)$$

Donde:

- $V_L$  = Voltaje de línea
- $I_L$  = Corriente de línea
- $\varphi$  = ángulo del factor de potencia

Y el ángulo del factor de potencia se define mediante la ecuación (2.81)

$$\varphi = \arccos\left(\frac{P}{S}\right) = \arctan\left(\frac{Q}{P}\right) \quad (2.81)$$

El funcionamiento de un inversor trifásico se basa en un balance de potencias que se da entre la potencia generada por el DC-Bus ( $P_{DC}$ ) y la potencia consumida por la carga, o red generada ( $P_{AC}$ ) fluyendo la energía desde el lado DC hasta el lado AC ( ver la Figura 2.14). Y si se consideran despreciables las pérdidas de potencia por los dispositivos IGBT's y el filtro de red, se puede modelar el DC-Bus como un condensador ideal (Del Toro, 2017).

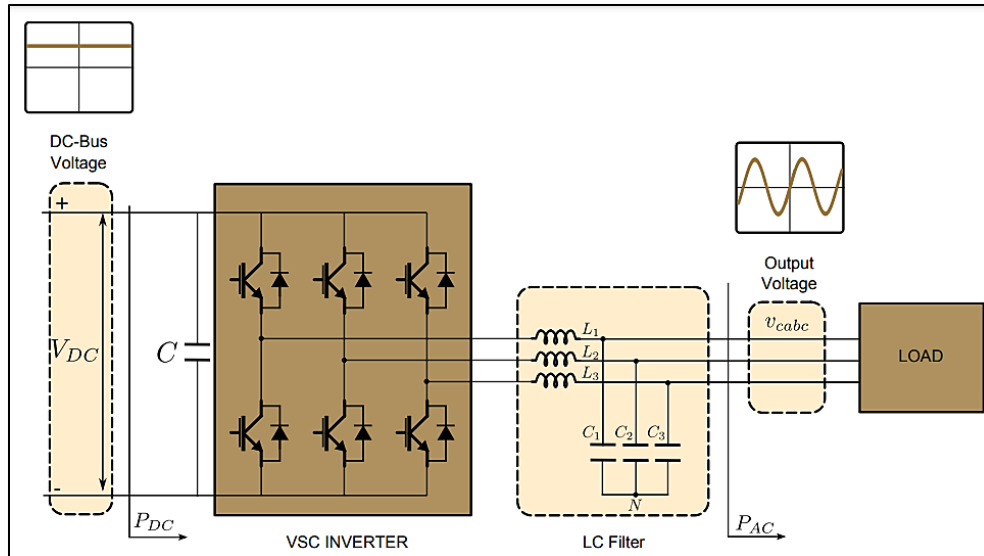


Fig. 2.14. Balance energético entre la  $P_{DC}$  y la potencia de la carga  
Fuente: (Del Toro, 2017)

El objetivo del control en el lado del inversor es entregar un voltaje alterno trifásico con voltaje entre líneas de 220  $V_{RMS}$ . Hay muchas maneras de controlar un inversor VSC trifásico, pero para este trabajo se va realizar un único lazo de tensión con modulación PWM sinusoidal o SPWM tal y como se muestra en la Figura 2.15. Donde  $v_\alpha$  y  $v_\beta$  son los valores de tensión en un marco de referencia ortogonal ( $\alpha\beta$ ) obtenidos a la salida del inversor, mientras que  $v_\alpha^*$  y  $v_\beta^*$  son los voltajes de referencia establecidos a partir de una fuente trifásica sinusoidal pura. Se establece un controlador proporcional integral derivativo (PID) que determina las acciones de control de voltaje que al cambiar de marco de  $V_{\alpha\beta}$  a  $V_{abc}$  son moduladas para enviar las señales de puerta de los IGBT's.

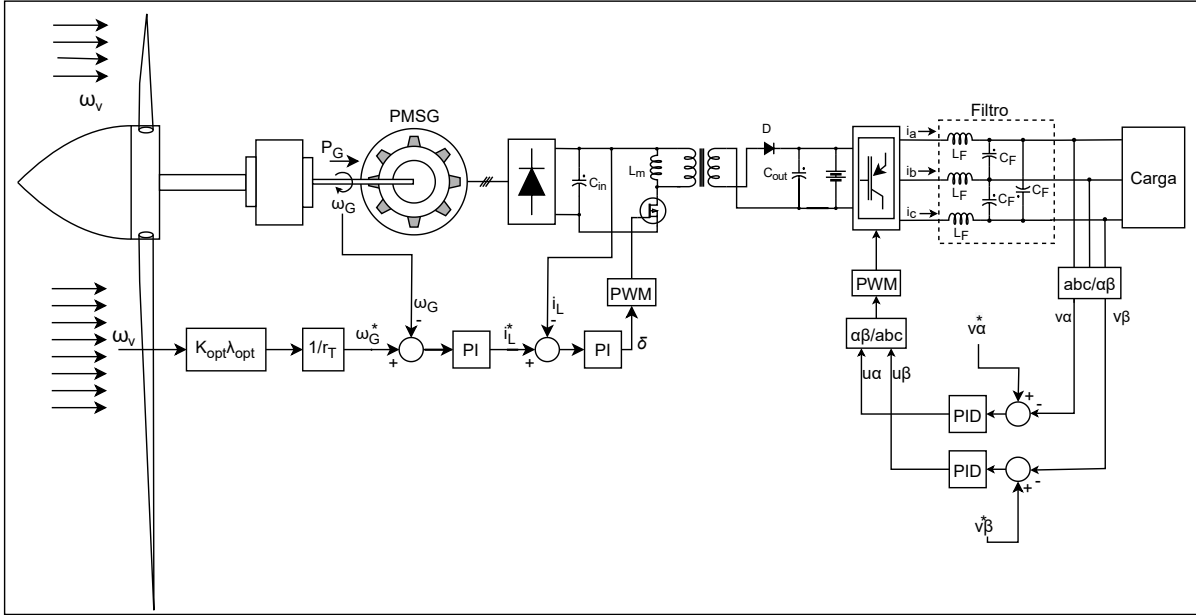


Fig. 2.155. Esquema del inversor trifásico con control de voltaje  
Fuente: Autor

Para transformar las variables trifásicas en el marco de referencia estacionario (ABC) en variables bifásicas también en el marco estacionario ( $\alpha\beta$ ) se aplica la transformada de Clarke. El cambio de sistema de coordenadas a ejes  $\alpha\beta$  y de  $\alpha\beta$  al sistema de ABC, están dadas mediante las ecuaciones (2.82) y (2.83). Realizar el cambio de sistemas de coordenadas a ejes  $\alpha\beta$  tiene ciertas ventajas con respecto a realizar el cambio de sistemas de coordenadas a ejes dq0 como no aparecer acoplamiento entre canales, reduciendo la complejidad del sistema de control (Del Toro, 2017).

$$f_{\alpha\beta} = K f_{abc} \quad (2.82)$$

$$f_{abc} = K^{-1} f_{\alpha\beta} \quad (2.833)$$

Las matrices de transformación  $K$  y  $K^{-1}$ , se describen mediante las ecuaciones (2.84) y (2.85), las cuales son las mismas que se utilizan para cambiar del sistema de referencia ABC al sistema dq0 pero con  $\theta$  igual a cero.

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.84)$$



Donde:

$f(t)$  : función de sincronización del voltaje del inversor con la frecuencia angular de una fuente sinusoidal trifásica pura

$P^*$ : Potencia activa de referencia

$Q^*$ : Potencia reactiva de referencia

$v_d^*$  : voltaje de referencia en eje directo

$v_q^*$  : voltaje de referencia en eje de cuadratura

$i_d^*$  : corriente de referencia en eje directo

$i_q^*$  : corriente de referencia en eje de cuadratura

$i_d$  : corriente en eje directo

$i_q$  : corriente en eje de cuadratura

$u_d$  : acción de control en eje directo

$u_q$  : acción de control en eje de cuadratura

Para obtener los voltajes del sistema en ejes dq0 es necesario aplicar la transformada directa de Park la cual se define mediante la ecuación (2.87) y para pasar de ejes dq0 a ejes ABC se aplica la transformada de Park inversa, misma que se define por la ecuación (2.858) (Wu, Lang, Zargari, & Kouro, 2011). La implementación de la transformada simplifica los cálculos, al convertir los valores trifásicos ABC, variables sinusoidales en el tiempo, a valores constantes dq0, en régimen permanente, es decir convierte la forma de onda de la corriente y la tensión de AC en señales de DC (MathWorks, s.f.).

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\omega t) & -\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (2.87)$$

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) & 1 \\ \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (2.858)$$

Donde:

$\omega$  : variación angular entre las fases A y B



$V_A$ : voltaje de la fase A

$V_B$ : voltaje de la fase B

$V_C$ : voltaje de la fase C

$v_0$ : voltaje en eje cero

Un coeficiente de  $2/3$  se agrega arbitrariamente a la ecuación (2.87). El valor comúnmente utilizado es  $2/3$  o  $\sqrt{2/3}$ . Su selección dependerá de si se requiere una transformación invariante en potencia ( $\sqrt{2/3}$ ) o amplitud ( $2/3$ ). Al cambiar de marco de referencia de ejes ABC a ejes dq0 la potencia activa que el inversor entrega se puede definir en función a los voltajes y corrientes en ejes directos y de cuadratura. La expresión que permite calcular la potencia activa del inversor se define mediante la ecuación (2.869), en tanto que la ecuación (2.90) expresa la potencia reactiva en función a las corrientes y voltajes en ejes de cuadratura y ejes directos (Wu, Lang, Zargari, & Kouro, 2011).

$$P = \frac{3}{2}(v_d i_d + v_q i_q) \quad (2.869)$$

$$Q = \frac{3}{2}(v_q i_d - v_d i_q) \quad (2.9087)$$

Donde:

$i_d$ : corriente en eje directo

$i_q$ : corriente en eje de cuadratura

A partir de las ecuaciones (2.869) y (2.9087) se obtienen las referencias de corriente en eje directo ( $i_d^*$ ) y de corriente en eje de cuadratura ( $i_q^*$ ).

$$i_d^* = \frac{2P^* v_d^* + Q^* v_q^*}{3 v_d^{*2} + v_q^{*2}} \quad (2.9188)$$

$$i_q^* = \frac{2P^* v_q^* + Q^* v_d^*}{3 v_d^{*2} + v_q^{*2}} \quad (2.9289)$$

Donde:

$P^*$ : Potencia activa de referencia

$Q^*$ : Potencia reactiva de referencia

$v_d^*$ : Voltaje en eje directo de referencia

$v_q^*$ : Voltaje en eje de cuadratura de referencia

Los controladores PI de corriente en eje directo y en eje en cuadratura son gemelos, esto es, tienen las mismas constantes proporcionales e integrales y se definen mediante la ecuación (2.93)

$$G_c(s) = K \left( \frac{s + \frac{1}{\tau_i}}{s} \right) \quad (2.93)$$

Donde  $K$  y  $\tau_i$  se obtienen de manera empírica.

# CAPÍTULO 3

## Análisis de Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de la simulación del sistema eólico y se pondrán a prueba los controladores detallados en el capítulo anterior para así verificar el funcionamiento de cada uno de ellos, lo que significa que cuando la turbina se encuentre operando a una velocidad de viento superior a la velocidad de arranque e inferior a la velocidad nominal entonces el sistema trabajará en la zona de control del generador buscando el máximo punto de transferencia de potencia. De la misma forma se verifica el funcionamiento del control del inversor, el cual entrega un voltaje fijo de 220  $V_{RMS}$  entre líneas, para cualquier valor de carga que se encuentre conectada a la salida.

### 3.1 Valores de operación del sistema

El sistema eólico está conformado por una turbina eólica de velocidad variable y ángulo de paso fijo, tiene una capacidad nominal de 10 kW a una velocidad nominal del viento de 12 m/s. La turbina se conecta a un generador PMSG con velocidad y potencia nominal de 900 rpm y 10 kVA respectivamente. La salida del PMSG se conecta con un puente de diodos trifásico el cual alimenta un convertidor tipo Flyback diseñado con capacidad para 10 kW, opera con una frecuencia de conmutación de 20 kHz y carga un banco de baterías que respalda la barra de continua. En paralelo a la batería se conecta un inversor trifásico el cual alimenta una carga en modo isla con un voltaje fijo de 220 VRMS entre líneas. El inversor se conecta a la carga a través de un filtro pasivo LC y se controla mediante control de voltaje para lo cual se transforma el marco de referencia de ejes ABC al marco de referencia de ejes  $\alpha\beta$ . En la Fig. 2.15 se muestra de forma detallada el esquema completo del sistema eólico.

Para la simulación se han definido y calculado ciertos valores a los que opera el sistema de conversión de energía eólica, a continuación, se presentan dichos valores para cada parte que conforma el sistema.

#### 3.1.1 Turbina Eólica y PMSG

El sistema está diseñado para operar a una velocidad nominal o máxima del viento de 12 m/s y entregar 10 kW. Para que se cumplan estas características fueron seleccionadas las siguientes condiciones de operación:

- Densidad del aire  $\rho = 1.225 \text{ Kg/m}^3$
- Ángulo de paso nominal  $\beta = 0^\circ$

- Relación de velocidad de punta optima  $\lambda = 8.1$
- Coeficiente de potencia  $C_p = 0.48$

Con estas condiciones y a partir de las ecuaciones (2.2), (2.5) y (2.6) se obtienen la velocidad de giro de la turbina, el área de barrido y el radio de la turbina, respectivamente. En la Tabla 3.1 se muestran los valores de operación de la turbina eólica.

$$A = \frac{2P_T}{\rho\omega_v^3 C_p} = \frac{2(10000)}{1.225(12^3)0.48} = 19.683 \text{ m}^2 \quad (3.1)$$

$$\lambda_i = \left( \frac{1}{8.1 + 0.08(0)} - \frac{0.035}{(0)^3 + 1} \right)^{-1} = 11.305 \quad (3.2)$$

$$A = \pi r_T^2 \rightarrow r_T = 2.503 \text{ m} \quad (3.3)$$

$$\omega_T = \frac{\lambda\omega_v}{r_T} = 38.831 \text{ rad/s} \quad (3.4)$$

**TABLA 3.1**  
**VALORES DE OPERACIÓN DE LA TURBINA EÓLICA**

$P_T$	10 KW	$c_p$	0.48
$\omega_v$	12 m/s	$\lambda_i$	11.305
$\beta$	0 °	$A$	19.684 m <sup>2</sup>
$\rho$	1.225 Kg/m <sup>3</sup>	$r_T$	2.503 m
$\lambda$	8.1	$\omega_T$	38.831 rad/s

Fuente: Autor

Por otra parte, el PMSG que se utiliza es un generador síncrono de polos no salientes con velocidad síncrona nominal de 900 rpm, y entrega un voltaje trifásico igual a 220 V<sub>RMS</sub> entre líneas. Los datos del generador utilizados en la simulación se muestran en la Tabla 3.2. y fueron tomados y ajustados a partir del modelo número 16 del bloque Permanent Magnet Synchronous Machine de Simulink de Matlab.

**TABLA 3.2**  
**DATOS DE SIMULACIÓN DEL PMSG**

<b>Resistencia de estator</b>	0.05 $\Omega$
<b>Inductancia de armadura</b>	0.635 mH
<b>Constante de torque</b>	3.144 Nm/A <sub>pico</sub>
<b>Constante de voltaje</b>	380.1996 V <sub>LL-pico</sub> /Krpm
<b>Flujo de los imanes</b>	0.52404 Vs
<b>Inercia</b>	0.05 Kg m <sup>2</sup>
<b>Amortiguamiento viscoso</b>	10 <sup>-5</sup> Nms

<b>Pares de polos</b>	4
<b>Fricción estática</b>	0 Nm

Fuente: Autor

### 3.1.2 Convertidor DC-DC tipo Flyback

El rectificador trifásico tiene a su salida un voltaje pico nominal ( $V_{p\_nom} = 220\sqrt{2} V$ ) aproximadamente igual a 311 V, ver la Fig. 3.1. Al conectar un capacitor suficientemente grande en la salida del rectificador el voltaje DC alcanza un valor cercano a 311 V y teniendo en cuenta que la potencia nominal del generador es 10 kW, la corriente nominal que entrega el puente de diodos se obtiene mediante la ecuación (3.5).

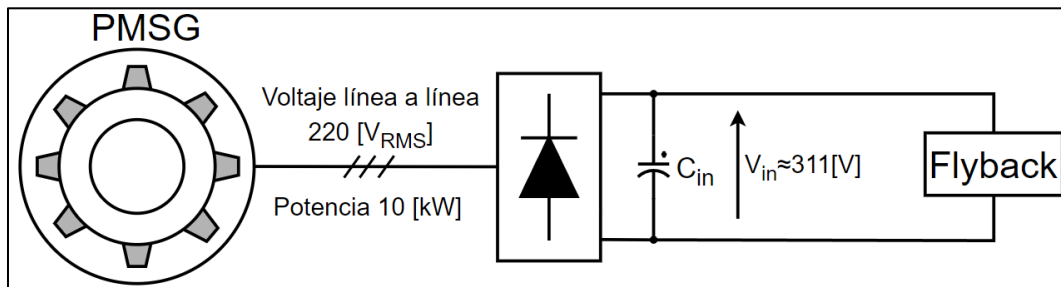


Fig. 3.1. Entrada de voltaje al convertidor Flyback  
Fuente: Autor

$$I = \frac{P}{V} = \frac{10000}{311} = 32.154 \quad (3.5)$$

El convertidor Flyback que se utiliza para controlar la velocidad del generador y obtener la máxima transferencia de potencia desde el viento hacia la turbina y a su vez al sistema, se diseña a partir de las ecuaciones (2.35), (2.39) y (2.43), y considerando que el voltaje de salida del Flyback es 640 V cuando la relación de trabajo sea igual a 0.5 y con un voltaje de entrada igual a 311 V. En la Tabla 3.3 se muestran todos los parámetros y valores de los elementos que conforman el convertidor Flyback.

$$n = \frac{V_{out}}{V_{in}} \frac{1 - \delta}{\delta} = \frac{640}{311} \frac{(1 - 0.5)}{0.5} = 640/311 \quad (3.6)$$

$$L_m \geq \frac{V_{in} \delta}{\Delta i_{Lm} f}$$

$$L_m \geq \frac{311(0.5)}{0.05(32.154)20000} \rightarrow L_m \geq 4.8361 \text{ mH} \quad (3.7)$$

$$L_m = 4.8361 \text{ mH}$$

$$C_{in} > \frac{I_{in}(1 - \delta)}{f\Delta V_{in}}$$

$$C_{in} > \frac{32.154(1 - 0.5)}{20000(2)} \rightarrow C_{in} > 401.91 \mu F \quad (3.8)$$

$$C_{in} = 2.2 \text{ mF}$$

$$C_{out} > \frac{i_{out} \delta}{f\Delta V_c}$$

$$C_{out} > \frac{\frac{32.154}{n} 0.5}{20000(5)} \rightarrow C_{out} > 78.124 \mu F \quad (3.9)$$

$$C_{out} = 100 \mu F$$

**TABLA 3.3**  
**VALORES DE DISEÑO DEL CONVERTIDOR FLYBACK**

$V_{in}$	311 V
$I_{in}$	32.154 A
$V_{out}$	640 V
$f$	20 kHz
$\delta$	0.5
$n$	640/311
$\Delta i_{Lm} = 0.05 I_{in}$	1.6077 A
$L_m$	4.8361 mH
$\Delta V_{in}$	2 V
$C_{in}$	2.2 mF
$\Delta V_{out}$	5 V
$C_{out}$	100 uF

Fuente: Autor

### 3.1.3 Inversor trifásico

El inversor trifásico se controla mediante control de voltaje por lo que los controladores del inversor son desarrollados en el marco de referencia de ejes  $\alpha\beta 0$ , donde se establece un voltaje de salida fijo de 220 V<sub>RMS</sub>, independientemente de la carga conectada a la salida. La Fig. 2.15 muestra el esquema de control del inversor.

La salida del inversor está conectado a un filtro LC el cual permite filtrar los voltajes y corrientes que salen de las ramas del inversor. Los valores de operación y parámetros del inversor se muestran en la Tabla 3.4.

**TABLA 3.4**  
**VALORES DE OPERACIÓN DEL INVERSOR**

<b>Frecuencia de salida</b>	60 Hz
<b>Frecuencia de conmutación</b>	20 kHz
<b>Voltaje entre líneas</b>	220 V <sub>RMS</sub>
<b>Potencia Aparente nominal</b>	10 kVA
$L_F$	12.84 mH
$C_F$	1.37 $\mu$ A

Fuente: Autor

### 3.1.4 Controladores

Este sistema eólico está compuesto por dos áreas de control, en donde se tiene el control del generador y el control del inversor trifásico. Para el control de lado del generador se tiene controladores PI y para el lado del inversor se tiene controladores PID. El generador se controla mediante un control en cascada en donde el lazo externo tiene un controlador de velocidad que obtiene su referencia a partir del MPPT basado en la relación de velocidad de punta óptimo y a su salida entrega la referencia para el lazo interno de control de corriente del convertidor Flyback el cual a través de la variación de la relación de trabajo del interruptor de potencia controla la velocidad de giro del generador. Finalmente, se tiene el control del inversor el cual está compuesto por dos controladores de voltaje, esto es, control de voltaje en  $\alpha$  y control de voltaje en  $\beta$  y a su vez estos controladores son gemelos, es decir, tienen los mismos parámetros de sintonización. La sintonización de todos los controladores se realizó de manera empírica. La Tabla 3.5 muestra los parámetros de sintonización de los controladores.

**TABLA 3.5**  
**PARÁMETROS DE SINTONIZACIÓN**

Controlador	$K_p$	$\tau_i$	$\tau_d$
<b>Lazo externo de velocidad</b>	-1.5	0.0625	-
<b>Lazo interno de corriente</b>	0.003	0.1333	-
<b>voltaje <math>\alpha\beta 0</math></b>	100	$5 \times 10^{-5}$	0.001

Fuente: Autor

### 3.2 Respuesta del sistema

Para evaluar el correcto funcionamiento del sistema es necesario determinar los puntos de operación ideales del mismo. Estos puntos se obtienen a partir de la curva característica de velocidad de la turbina vs la potencia mecánica frente a diferentes velocidades de viento. La Figura 3.2. muestra la característica de velocidad de la turbina vs la potencia mecánica ante diferentes velocidades, en tanto que la Figura 3.3 muestra la característica de relación de

velocidad de punta vs el coeficiente de potencia cuando la velocidad del viento es inferior a la velocidad nominal de diseño de la turbina.

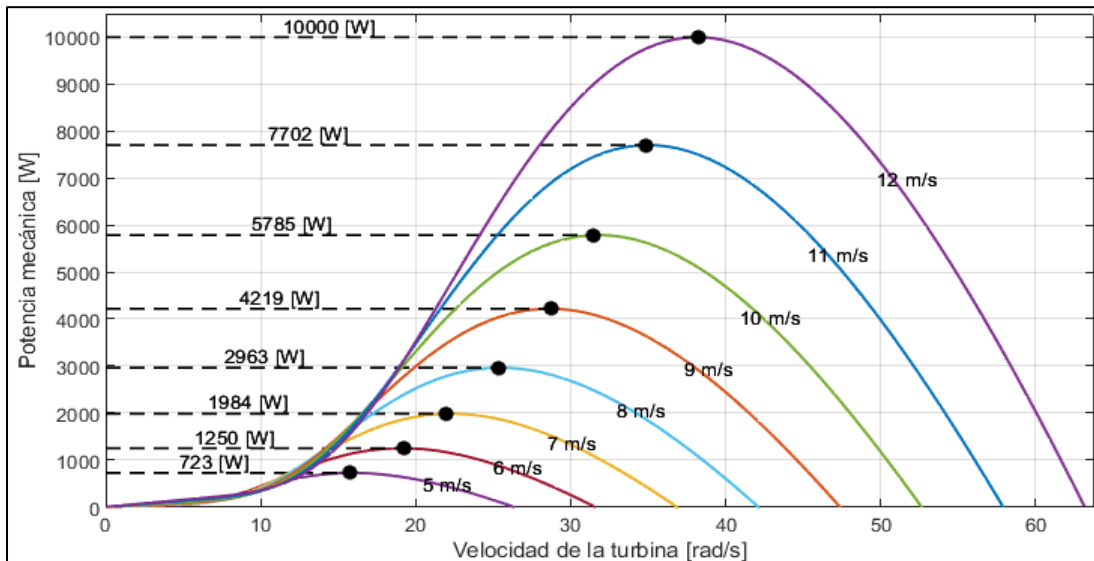


Fig. 3.2. Característica velocidad de la turbina vs Potencia mecánica  
Fuente: Autor

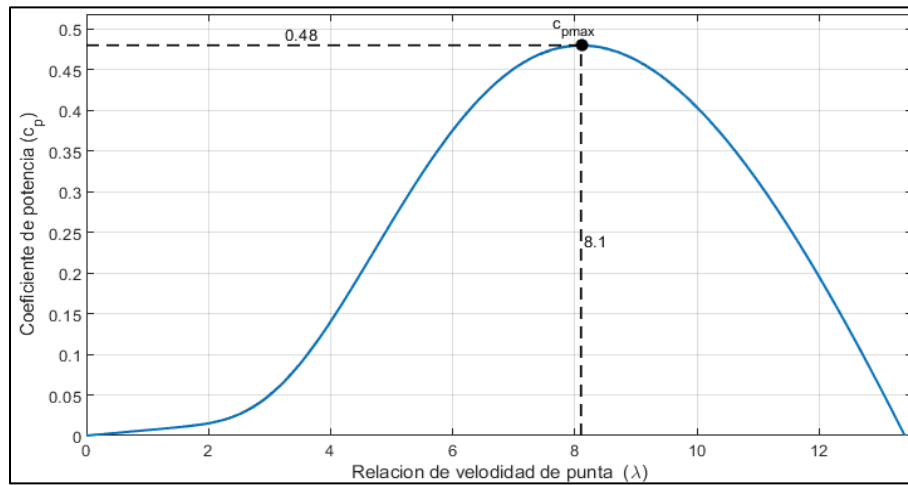


Fig. 3.3. Característica de relación de velocidad de punta vs coeficiente de potencia  
Fuente: Autor

La Tabla 3.6 muestra en detalle los valores esperados de potencia mecánica que la turbina eólica debe generar a velocidades menores a la nominal y de igual forma muestra el coeficiente de potencia que debe tener la turbina cuando está trabajando en este margen de operación.

**TABLA 3.6**  
**VALORES IDEALES DE POTENCIA Y COEFICIENTE DE POTENCIA**

Velocidad (m/s)	P(W)	C <sub>p</sub>	Ángulo de paso (°)
5	723	0.48	0



<b>6</b>	1250
<b>7</b>	1984
<b>8</b>	2963
<b>9</b>	4219
<b>10</b>	5785
<b>11</b>	7702
<b>12</b>	10000

Fuente: Autor

Una vez definidos los valores ideales de máxima transferencia de potencia que debe alcanzar la turbina para las diferentes velocidades del viento, se pone a prueba el sistema ante distintos valores de velocidad del viento, estas variaciones son de tipo escalón y tendrán los valores de {12, 11, 9, 7, 9} m/s en los instantes {0, 1.25, 2, 2.75, 4.25} s. Con estas variaciones en la velocidad del viento el sistema trabajará en el modo de control del generador (velocidad del viento superior a la velocidad de arranque e inferior o igual a la velocidad nominal). La Fig. 3.4 muestra las variaciones de la velocidad del viento descritas previamente.

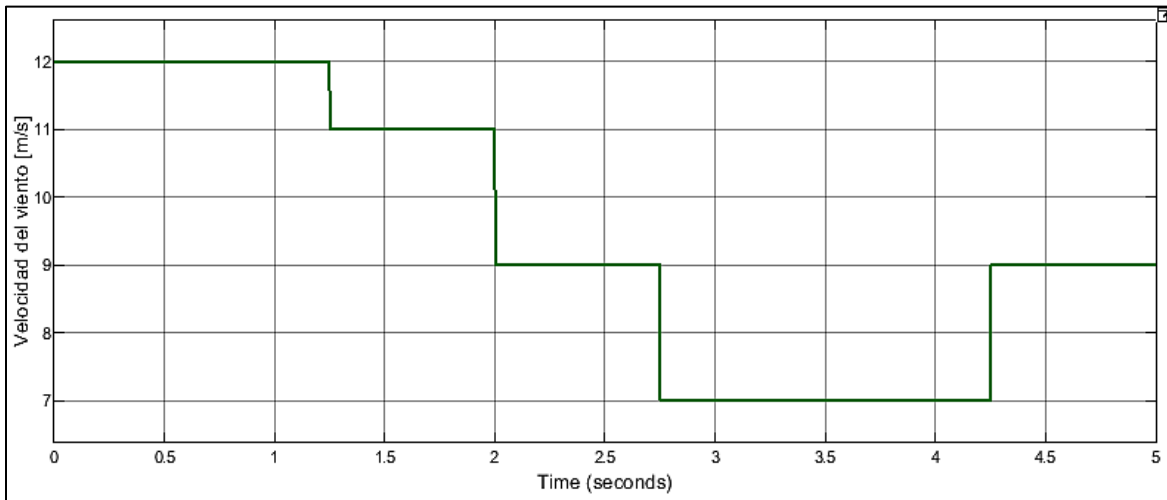


Fig. 3.4. Variaciones de la velocidad del viento

Fuente: Autor

Ante las variaciones del viento mostradas en la Fig. 3.4 se pone a prueba el correcto funcionamiento del sistema. En la Fig. 3.5 se muestra la respuesta de potencia de la turbina eólica, donde se puede observar que la potencia generada por la turbina a diferentes velocidades de viento es igual a la potencia ideal para este sistema a esas mismas velocidades.

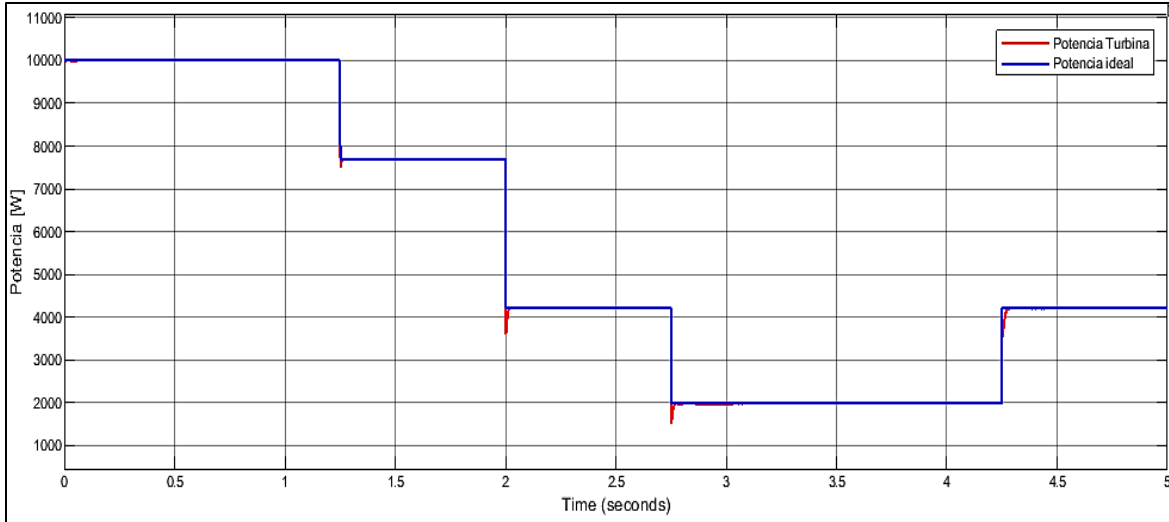


Fig. 3.5. Potencia generada por la turbina eólica  
Fuente: Autor

En la Fig. 3.6 se muestra la respuesta del ángulo de paso donde se observa que su valor se mantiene constante en cero para cualquier velocidad inferior a la máxima. En la Figura 3.7 y 3.8 se muestran las respuestas de la relación de velocidad de punta y el coeficiente de potencia, donde se observa que sus respuestas se mantienen en su valor óptimo (8.1 para la relación de velocidad de punta y 0.48 para el coeficiente de potencia) esto debido a que el sistema entra en el modo de control del generador lo que significa que la turbina extraerá la mayor potencia posible.

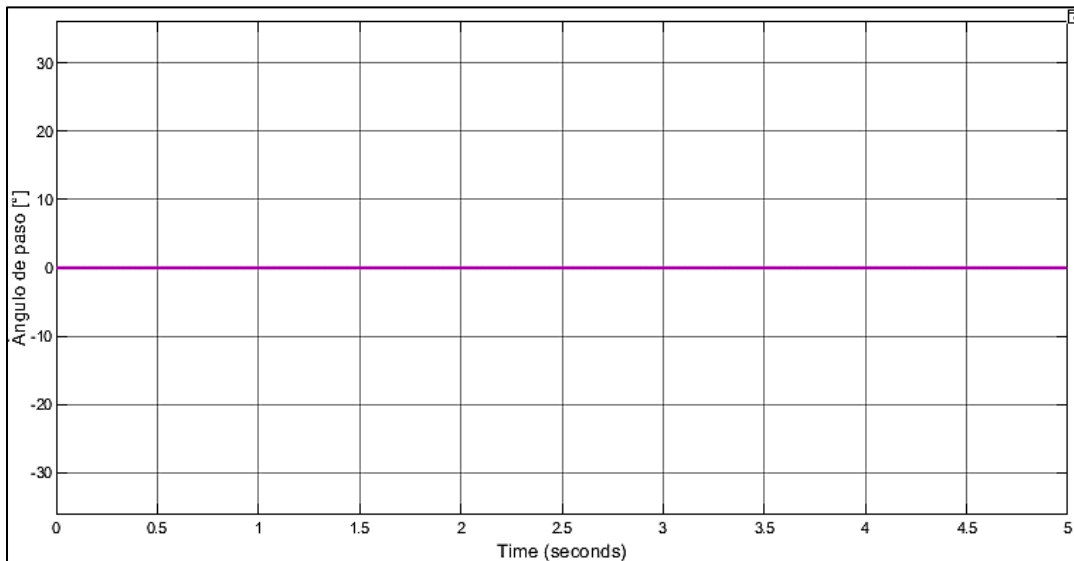


Fig. 3.6. Respuesta del ángulo de paso  
Fuente: Autor

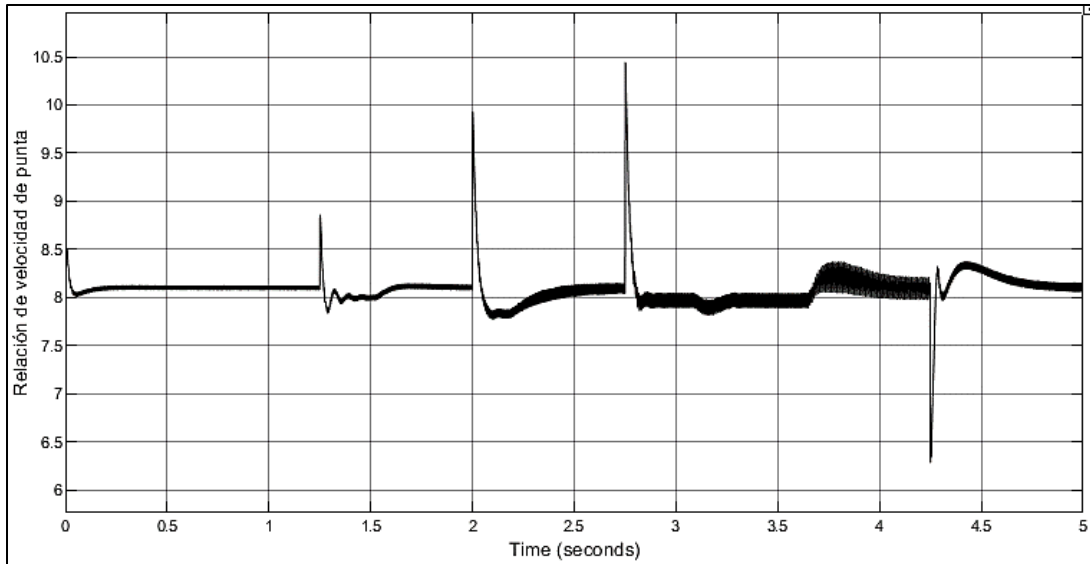


Fig. 3.7. Respuesta de la relación de velocidad de punta  
Fuente: Autor

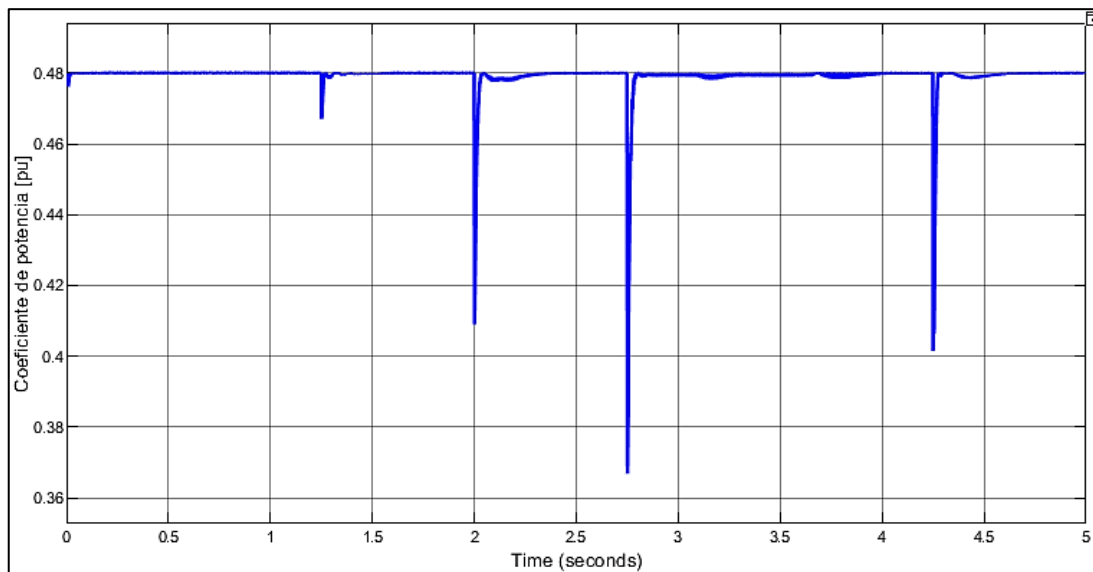


Fig. 3.8. Respuesta del coeficiente de potencia  
Fuente: Autor

En la salida de la turbina eólica se conecta el PMSG el cual a su vez está conectado a un rectificador trifásico que alimenta un convertidor DC-DC tipo Flyback (ver Fig. 2.15) el cual controla la velocidad de giro del rotor del generador. La señal de referencia de la velocidad del generador se obtiene a partir de la ecuación (2.47). En la Fig. 3.9 se muestra la respuesta de la velocidad del generador donde se puede observar que cuando la velocidad del viento es inferior actúa el control modificando la velocidad del generador, para que de esta manera se pueda extraer la máxima transferencia de potencia.

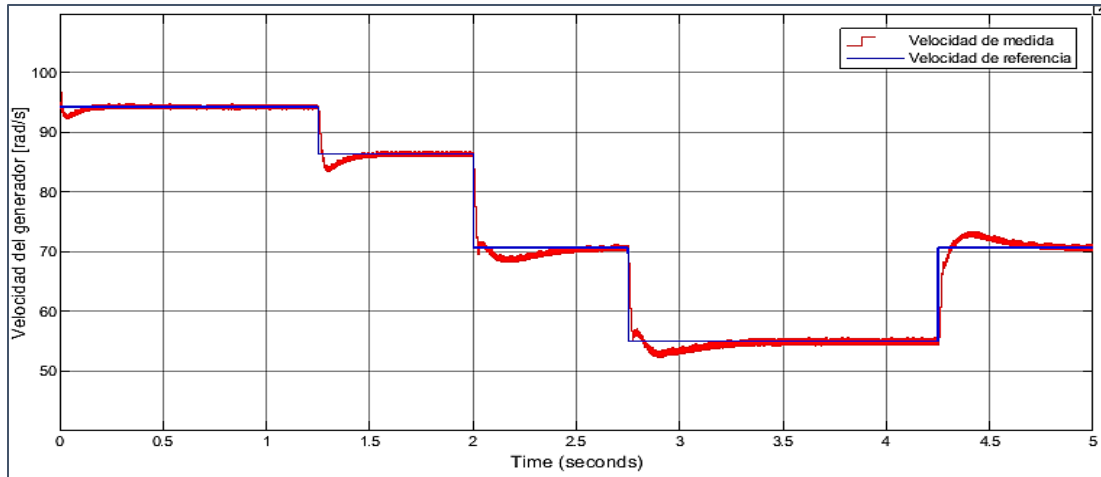


Fig. 3.9. Respuesta de la velocidad del generador  
Fuente: Autor

El convertidor Flyback se controla mediante un control en cascada, definido en el capítulo anterior, donde la referencia del lazo interno de control (control de corriente) se obtiene de la salida del lazo externo de control (control de velocidad). La Fig. 3.10 muestra la corriente en el primario del transformador junto con la referencia de la misma.

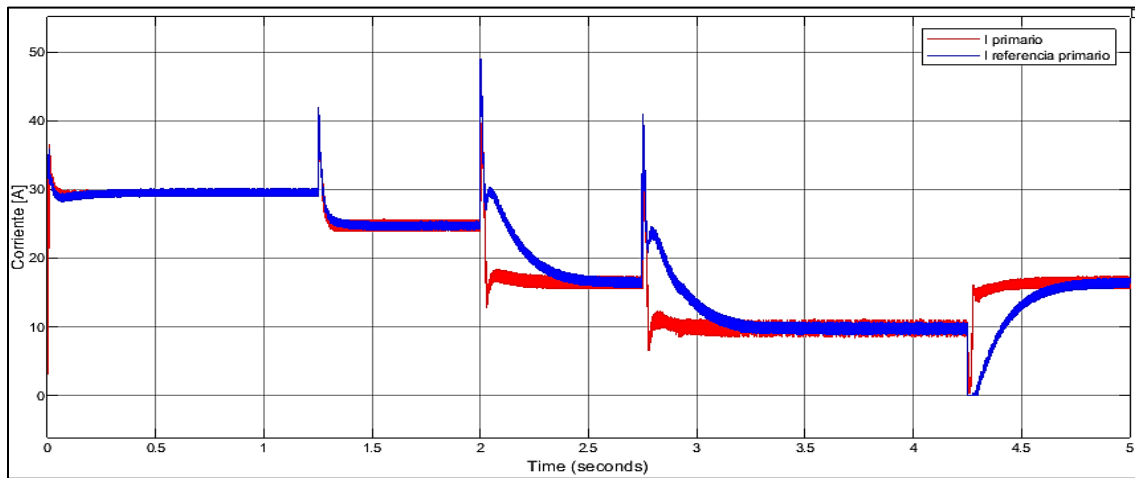


Fig. 3.10. Respuesta de la corriente del primario del transformador  
Fuente: Autor

En la Fig. 3.10 se observa que cuando la velocidad del viento es inferior a 12 m/s la referencia de corriente del primario del convertidor Flyback cambia con el objetivo de hacer que la velocidad del generador varíe y con ello modificar la velocidad del eje de la turbina para así extraer la máxima potencia posible desde el viento hacia el banco de baterías. De la misma forma se puede observar la existencia de sobrepicos inversos tanto en la referencia de la corriente como en la respuesta que esta presenta, estos sobrepicos ocurren debido a la inercia que tiene

el generador y se presentan en los instantes de tiempo en los que se dan los cambios de referencia tipo escalón.

En la Fig. 3.11 se muestra la respuesta del voltaje y de la corriente que ingresa al convertidor Flyback en tanto que la Fig. 3.72 muestra el voltaje y la corriente que se tienen a la salida del convertidor.

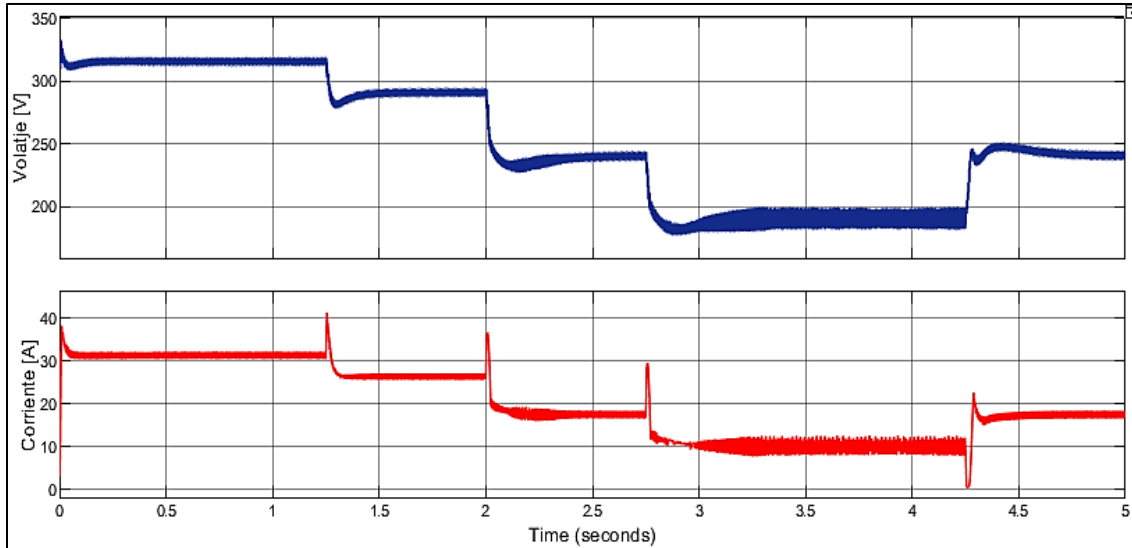


Fig. 3.11. Voltaje y corriente que ingresan al convertidor Flyback  
Fuente: Autor

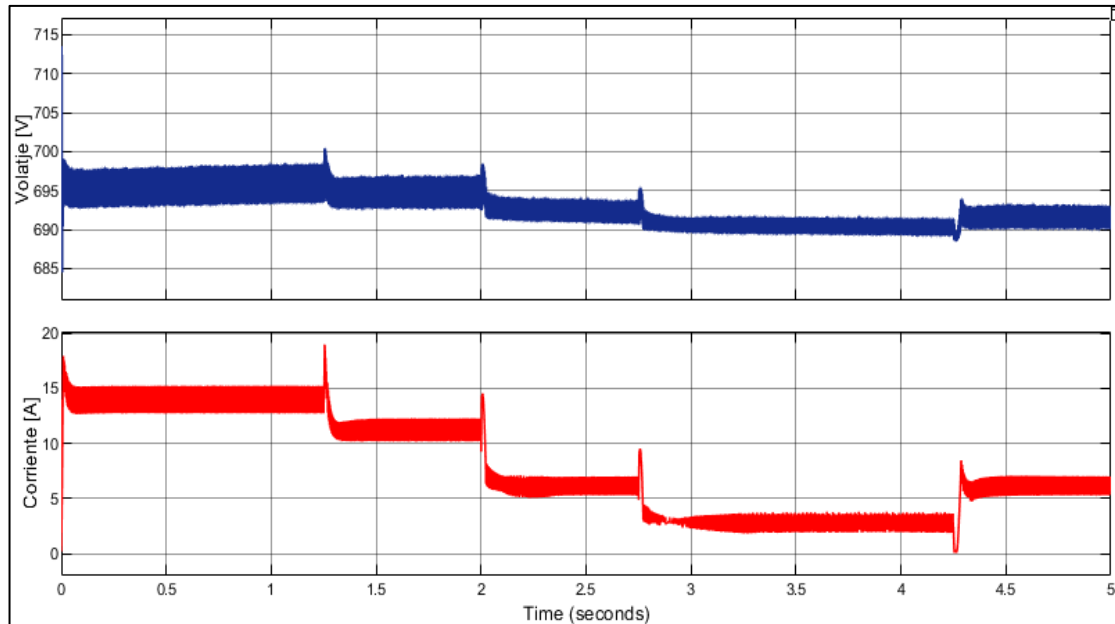


Fig. 3.72. Voltaje y corriente a la salida del convertidor Flyback  
Fuente: Autor

En la Figura 3.11 se observan el voltaje y corriente de entrada del convertidor en 308 V y 32.15 A, mientras que en la Figura 3.12 se observa un voltaje de 695 V y una corriente de 14.25 A en la salida del convertidor, de esta manera se puede apreciar que en los valores de salida se tiene un efecto del transformador que eleva el voltaje desde la entrada hacia la salida y reduce la corriente en la misma proporción que aumenta el voltaje ( $\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{I_{in}}{I_{out}}$ ). A partir de los voltajes y corrientes que ingresan y salen del convertidor Flyback se obtienen las potencias que transfiere el sistema. En la Fig. 3.83 se muestran la potencia que genera la turbina eólica junto a la potencia que ingresa al convertidor Flyback y a la potencia que se entrega al banco de baterías.

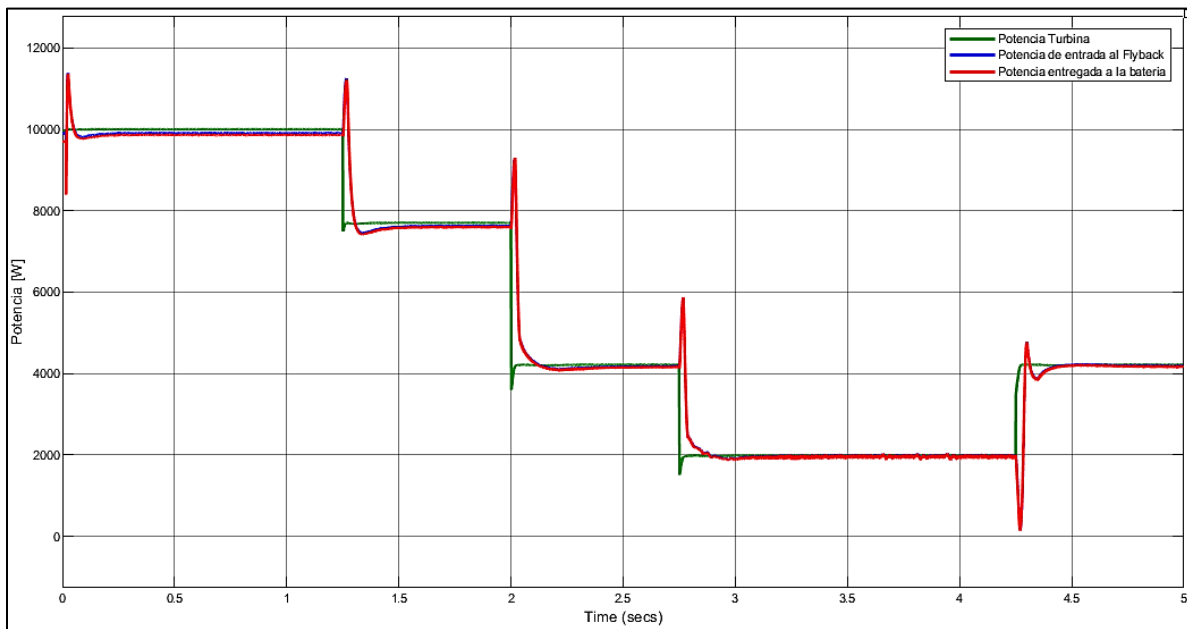


Fig. 3.83. Transferencia de potencia del sistema  
Fuente: Autor

A velocidad nominal el sistema tiene una eficiencia del 99 % entre la potencia que genera la turbina (10 kW) y la que ingresa al convertidor Flyback (9.9 kW) y una eficiencia del 98.5 % de la potencia que se entrega a las baterías (9.85 kW) con respecto a la potencia que genera la turbina, esto se puede observar en la Fig. 3.83, además de que mientras la potencia disminuye la eficiencia aumenta, esto se debe al uso del convertidor Flyback el cual tiene una mayor eficiencia al trabajar en bajas potencias.

El banco de baterías se conecta a un inversor trifásico que alimenta una carga en modo isla. Para evidenciar el correcto funcionamiento del control del lado del inversor, en la Fig. 3.94 se muestra la corriente y el voltaje de una fase que se conecta a la carga (7kW,  $f_p=0.92$ ) donde el valor nominal del voltaje de fase pico es 179.6 V lo cual equivale a un voltaje de 127 V<sub>RMS</sub> de

fase o  $220 V_{RMS}$  entre líneas, siendo este el valor esperado. En la Fig. 3.105 se muestra el voltaje trifásico de fase que se entrega a la carga.

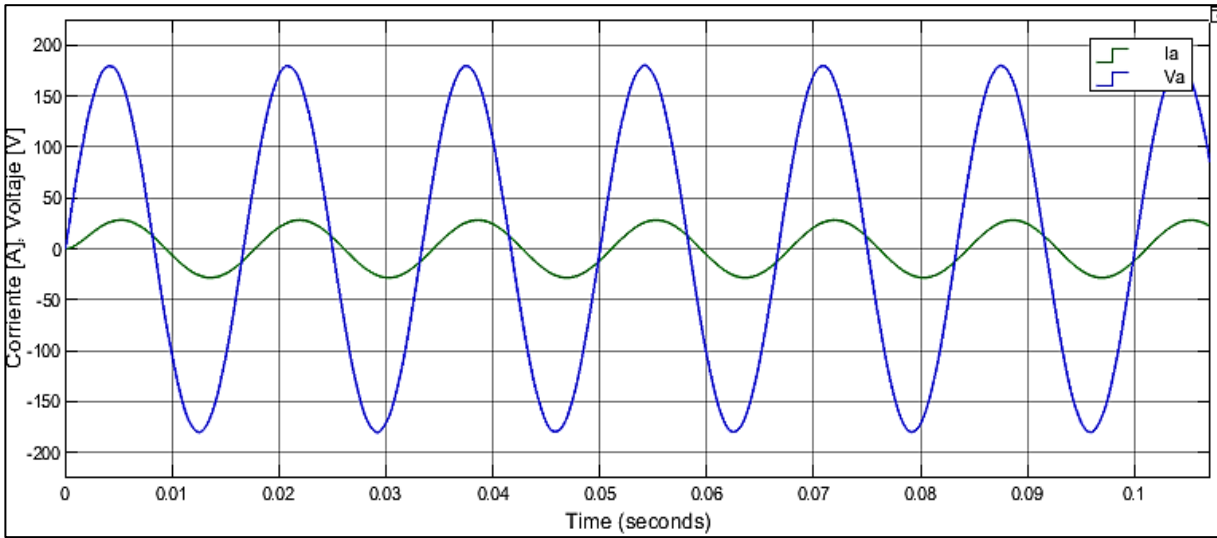


Fig. 3.94. Corriente y voltaje de la fase A  
Fuente: Autor

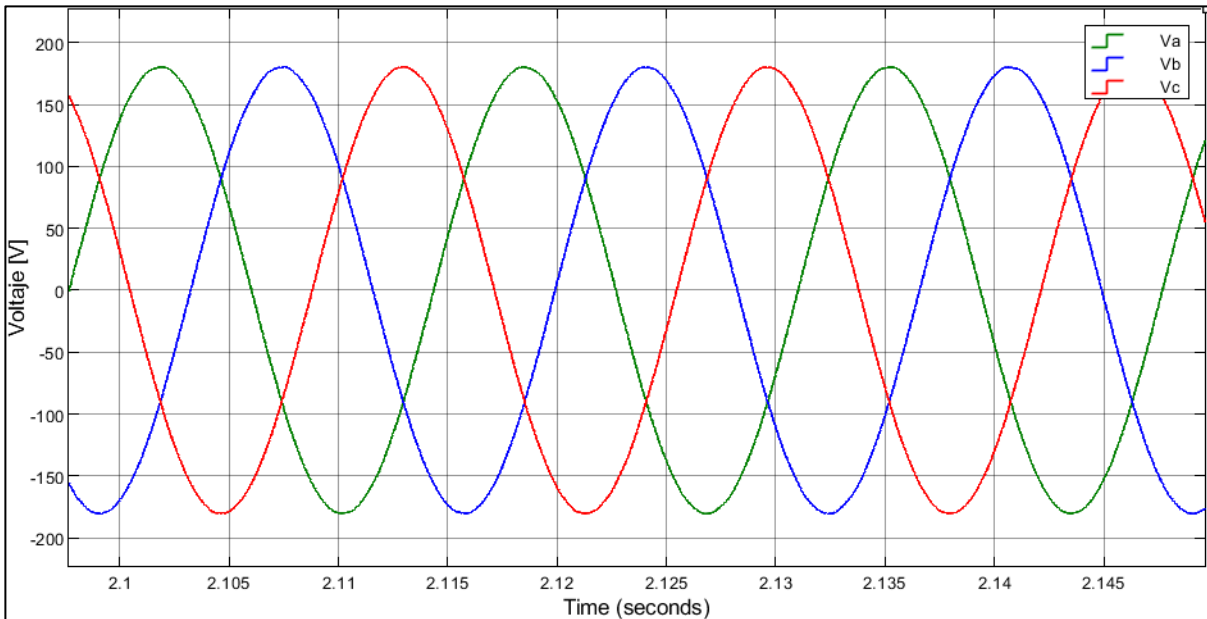


Fig. 3.105. Voltaje de fase trifásico que recibe la carga  
Fuente: Autor

Además, para probar que el inversor tiene la capacidad de entregar cualquier valor de potencia que demande la carga con un valor de voltaje constante de  $220 V_{RMS}$  entre líneas, se ha tomado los siguientes valores de prueba para la carga: 6 kW, 7 kW y 8 kW. En la Figura 3.16 se observa como el inversor trifásico entrega el valor de potencia de cada una de las cargas que fueron conectadas a la salida, verificando así su correcto funcionamiento.



Fig. 3.116. Valores de potencia de una carga variable  
Fuente: Autor

En la Figura 3.17 se observa la corriente de la batería (valores positivos cuando entrega corriente y negativos cuando recibe). El sistema aparte de alimentar la carga (7 kW,  $fp=0.92$ ), comienza a cargar la batería en determinados instantes con el exceso de potencia generada y de igual forma cuando la potencia generada no es suficiente para alimentar la carga, la batería aporta la potencia necesaria.

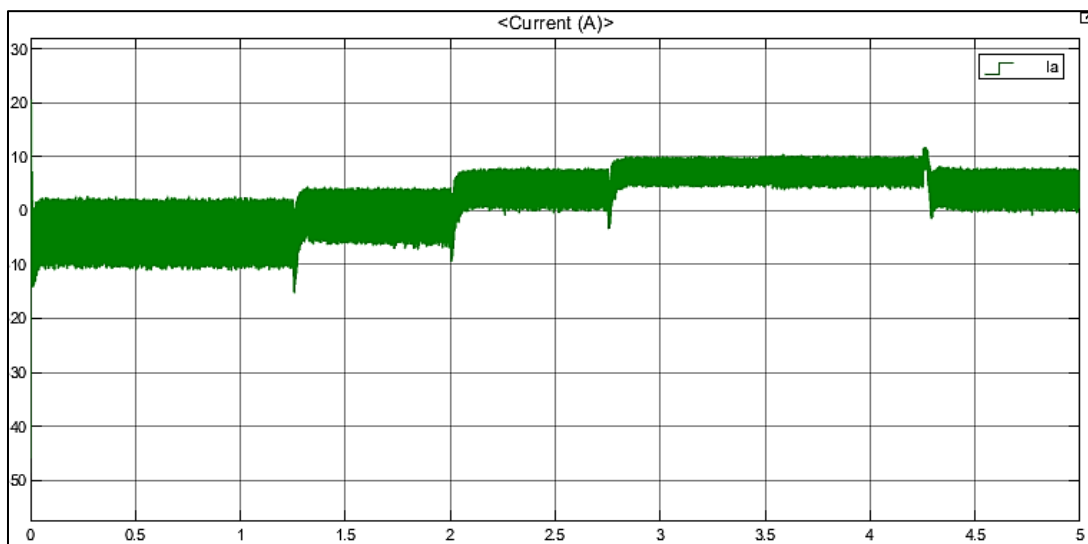


Fig. 3.17. Corriente del banco de baterías  
Fuente: Autor



### 3.3 Análisis del funcionamiento

El sistema de conversión de energía eólica presentado en este trabajo tiene el siguiente modo de funcionamiento.

En primer lugar, la turbina eólica es el dispositivo mecánico que convierte la energía del movimiento del viento (energía cinética) en energía mecánica. Para este trabajo fue seleccionada una turbina de eje horizontal, ya que estas presentan una mayor eficiencia de conversión, son capaces de soportar altas velocidades de viento y además permiten realizar el control de la velocidad del rotor y la energía de salida, a diferencia de las turbinas de eje vertical. La turbina está diseñada para entregar una potencia de 10 kW a una velocidad de viento nominal de 12 m/s, la potencia fue seleccionada en base a que, el objetivo de este trabajo es modelar una turbina de baja potencia que puede comprender valores de hasta 100 kW, por lo que a criterio propio del investigador se tomó un valor que se encuentre dentro del rango mencionado. La velocidad de viento nominal fue seleccionada considerando que, la provincia de Loja es la que mayor potencial eólico presenta y según estudios realizados, en cierto sector se puede encontrar valores de velocidad de viento promedio por encima de los 8 m/s y máximos de hasta 20 m/s, por lo cual para este trabajo se tomó un valor de velocidad que se encuentre dentro de este rango de velocidades.

La turbina se acopla mecánicamente al eje del generador mediante una caja de engranajes, la cual toma el par de la turbina de baja velocidad y lo hace girar a alta velocidad donde está acoplado el generador eléctrico el cual convierte el par mecánico en un par eléctrico. Sin el uso del multiplicador el generador debería ser de la misma velocidad de la turbina, por lo que tendría una velocidad de rotación baja, es decir sería una máquina lenta, con un mayor tamaño y un costo más elevado. Según lo investigado anteriormente, hay diferentes tipos de generadores eléctricos que se utilizan comúnmente en un sistema de conversión de energía eólica de velocidad variable. Para este trabajo se optó por un generador síncrono de imanes permanentes, debido a que, al tener una excitación propia por medio de los imanes se elimina el sistema de escobillas y anillos rozantes, por lo que el rotor no necesita de mantenimiento, al igual que las pérdidas disminuyen aumentando el rendimiento de la máquina, además este generador permite trabajar a bajas velocidades, razón por la cual es ampliamente utilizado en sistemas de baja potencia.

Teniendo en cuenta que el sistema es de velocidad variable, es necesario el uso de un convertidor de potencia, que permita el control de la velocidad del generador. La configuración de conversión compuesta por un rectificador de diodos no controlado y un convertidor DC-DC

resulta una alternativa simple, rentable y de bajo costo. Existen diferentes topologías de convertidores DC-DC aplicados a sistemas autónomos de turbinas eólicas de velocidad variable basados en un generador síncrono de imanes permanentes, para este trabajo se ha seleccionado un convertidor Flyback, debido a que es un tipo de convertidor que posee aislamiento galvánico entre la entrada y la salida, esta topología es la más conocida para fuentes de alimentación aislada ya que presenta una alta eficiencia de conversión a bajas potencias y tiene ventaja con respecto al coste y tamaño con el resto de convertidores.

El generador síncrono de imanes permanentes utilizado para este trabajo tiene una potencia nominal de 10 kW, una velocidad de 900 rpm y entrega un voltaje trifásico de 220 V<sub>RMS</sub> entre líneas, a la salida de este se conecta un rectificador no controlado que convierte la corriente alterna en continua, por lo que a la salida de este se tiene un voltaje pico nominal ( $V_{p\_nom} = 220\sqrt{2} V$ ) aproximadamente igual a 311 V. Con un capacitor suficientemente grande a la entrada del convertidor se obtiene un voltaje cercano a los 311 V y considerando un voltaje de salida de 640 V cuando la relación de trabajo sea igual a 0.5, se empieza a diseñar el convertidor Flyback. El voltaje de salida del convertidor se ha seleccionado tomando en cuenta que la tensión máxima que puede entregar un inversor trifásico es la mitad de su fuente de alimentación y el voltaje deseado a la salida del inversor es de 220 V<sub>RMS</sub> entre líneas.

El circuito de este convertidor se realiza por medio un conmutador con capacidad de potencia, es decir, que resista la corriente y tensión que exija el convertidor. Generalmente los convertidores conmutan por medio de un MOSFET o un IGBT, sin embargo, para este trabajo se ha seleccionado un IGBT, ya que presenta la ventaja de soportar valores de intensidad y voltaje mayores y es más robusto, frente al MOSFET. Se ha seleccionado una frecuencia de conmutación de 20 kHz, ya que un IGBT tiene un rango de operación de 0.2 kHz a 20 kHz y con un valor de frecuencia alto, el tiempo de transición del estado de conducción al estado de bloqueo es menor, teniendo una respuesta mucho más rápida, además, de esta manera los elementos almacenadores de energía (capacitores e inductor) no tendrán valores de capacitancias e inductancia elevados.

Para el sistema de control se utiliza un esquema de máxima captura del viento (MPPT) basado en la relación de velocidad de punta óptima, el cual permite extraer la máxima potencia a diferentes velocidades de viento inferiores a la velocidad nominal (12 m/s). Para lograr esto se debe controlar la velocidad del generador, lo cual es posible por medio de un control de la corriente del inductor de magnetización del convertidor, esta corriente es controlada mediante la

conmutación del IGBT la cual se establece de acuerdo al ciclo de trabajo que sale de un controlador proporcional integral de corriente.

Finalmente, el sistema se encuentra alimentando una carga en modo isla. Para alimentar la carga se utiliza un inversor trifásico que convierte la tensión continua de la salida del convertidor en una tensión alterna, la cual se establece en un valor constante entre líneas de 220  $V_{RMS}$ , para lograr esto se establece un control PID de voltaje en un marco de referencia estacionario ortogonal ( $\alpha\beta$ ). Además, este control permite entregar dicho voltaje, sin importar el valor de potencia que requiera la carga conectada la salida.

A la salida del inversor se conecta un filtro LC el cual permite obtener formas de onda de corriente y de voltaje sinusoidales, y además permite compensar reactivos, es decir, corregir el factor de potencia. El sistema también se respalda mediante un banco de baterías, es decir cuando el recurso eólico no sea suficiente para abastecer la carga, el banco de baterías aportará la potencia necesaria.

Para validar la propuesta diseñada, se pone a prueba el sistema ingresando diferentes velocidades de viento inferiores a la velocidad nominal y de acuerdo a los resultados obtenidos se puede decir los controladores de velocidad y de corriente están funcionando de manera correcta, ya que el sistema está extrayendo la máxima potencia para cada una de las velocidades de viento ingresadas. Así como también el control de lado del inversor está realizando su trabajo de manera correcta, ya que independientemente del valor de la carga conectada, el voltaje entregado tiene un valor constante de 220  $V_{RMS}$  entre líneas. Además, se evidencia el funcionamiento del banco de baterías, ya que cuando el recurso eólico no genera la potencia necesaria para alimentar la carga, el banco de baterías aporta la potencia necesaria.

## CONCLUSIONES

La generación de energía eléctrica a través de fuentes alternativas como la energía eólica ha ido incrementado a lo largo del tiempo a fin de satisfacer la demanda actual. Es así que se han desarrollado diferentes tipos de sistemas y configuraciones que permiten mejorar su eficiencia. Uno de los sistemas más eficientes actualmente son los que se basan en el uso de un PMSG debido al amplio rango de velocidades que maneja a través de su sistema de control, el cual le permite extraer la máxima potencia disponible del viento.

Un aerogenerador se conforma por el sistema aerodinámico, mecánico y eléctrico. El modelo del sistema aerodinámico determina la potencia capturada por el viento, teniendo en cuenta el coeficiente de potencia que puede variar dependiendo las características propias de la turbina. El sistema mecánico se puede representar mediante un modelo de dos masas. El modelo del PMSG se presenta en coordenadas dq0 ya que permite un análisis más sencillo del sistema. El control de la turbina eólica se consigue por medio del convertidor el cual controla la velocidad de giro del eje del generador para hacer que el sistema pueda extraer la mayor cantidad de potencia posible a diferentes velocidades de viento inferiores a la nominal. El modelo completo, en etapa de simulación, entrega índices que validan la bondad de la propuesta desarrollada.

Los resultados obtenidos de la simulación corroboran el buen desempeño del control de potencia en carga parcial, en decir que para valores de viento inferiores a los 12 m/s el MPPT permite adquirir la máxima potencia del viento incidente. De igual forma se evidencia que el sistema tiene una eficiencia de transferencia de potencia del 98.5 %, tomada desde la turbina hasta el banco de baterías, indicando su correcto funcionamiento. También se verifica que el inversor entrega un voltaje constante de 220  $V_{RMS}$  entre líneas sin importar el valor de la carga que este conectada a la salida.

## **RECOMENDACIONES**

El sistema propuesto está diseñado para alimentar una carga aislada, sin embargo, hay la posibilidad de que se pueda conectar a la red. Debido a esto se recomienda tomar el presente trabajo como base para el diseño de un sistema de conversión de energía eólica que pueda sincronizarse con la red eléctrica convencional.

## REFERENCIAS

- Aguilar, C. (2017). "DISEÑO DE UN AEROGENERADOR DE BAJA POTENCIA EN LA COMUNIDAD DE RÍO BLANCO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA.". Ambato, Ecuador.
- Álvarez, O., Maldonado, J., Montaña, T., & Tenechagua, L. (2014). Análisis Climático de la Velocidad del Viento en la Región Sur del. *Revista Politecnica*, 6-7.
- ARCONEL. (2016). *ESTADÍSTICA Anual y Multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano*. Obtenido de <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/08/Estad%C3%ADstica-anual-y-multianual-sector-el%C3%A9ctrico-2016.pdf>
- Argudo, A. (2016). Integración de aerogeneradores de baja potencia en la red de baja tensión. Las Palmas, España.
- Arratia, P., Chocala, M. d., Rodriguez, R., & Ramiro, R. (09 de 2017). Propuesta de abastecimiento energético en forma independiente para una vivienda rural basada en un aerogenerador. Santa Cruz, Argentina.
- Arriols, E. (Octubre de 2020). *Ecología Verde*. Obtenido de [https://www.ecologiaverde.com/ventajas-y-desventajas-de-la-energia-eolica-1085.html#anchor\\_1](https://www.ecologiaverde.com/ventajas-y-desventajas-de-la-energia-eolica-1085.html#anchor_1)
- Baroudi, J. A., Dinavahi, V., & Knight, A. M. (2007). A review of power converter topologies for wind generators. *Renewable Energy*, 2369–2385.
- Berenguer, J. (12 de Enero de 2011). "DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL Y POTENCIA APLICADO A ENERGÍAS RENOVABLES". Barcelona.
- Calvache, E. (Abril de 2019). DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL PARA LA OPERACIÓN DE TRES PLANTAS DE GENERACIÓN:HIDROELÉCTRICA, EÓLICA Y FOTOVOLTAICA. Quito, Ecuador.
- Camacho, J., Salamanca, J., & Gallego, A. (2020). Induction Generator Characterization for a Medium and Low Wind-PowerGenerator. *Revista Facultad de Ingeniería*, 54.
- Carlosama, C. (2019). IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO DE UN SISTEMA PARA MICROGENERACIÓN EÓLICA. Ibarra, Ecuador.
- Castillo, M. (2017). DISEÑO ELECTRMAGNÉTICO DE UN GENERADOR ELÉCTRICO PARA TURBINA EÓLICA DE 100kW. Madrid.

- Castro, J., Domínguez, M., & Villaseñor, R. (2019). MODELADO Y CONTROL DE UN AEROGENERADOR CON MATLAB Y SIMULINK. Madrid, España.
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). *Mécanica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill.
- Chen, Z., & Cuchara, E. (2001). Grid power quality with variable speed wind turbines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 148-154.
- Clavería, G. (Noviembre de 2016). "Diseño, construcción y prueba de funcionamiento de un sistema de ensayos de turbinas eólicas de baja potencia". Chile.
- Clementi, L., & Jacinto, G. (2021). Energía eólica distribuida: oportunidades y desafíos en Argentina. *Letras Verdes - Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales - N.º 29*, 48-64.
- Corradini, M., Ippoliti, G., & Orlando, G. (2013). Fully sensorless robust control of variable-speed wind turbines for efficiency maximization. *Automatica*, 3023-3031.
- Correa, P. F., González, D., & Pacheco, J. G. (2016). Energías renovables y medio ambiente. Su regulación jurídica en Ecuador. *Universidad y Sociedad*, 179-183.
- Defaz, A., & Pallasco, M. (2017). ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE UN PROTOTIPO DE GENERADOR EÓLICO DE EJE VERTICAL TIPO SAVONIUS PARA VELOCIDADES ENTRE 5 Km/h Y 20 Km/h. Quito.
- Del Toro, J. M. (2017). Control de tensión AC de salida de un inversor trifásico mediante técnicas clásicas y  $H^\infty$ . Madrid.
- Dodero, J., & Garcia, M. (Noviembre de 2012). GENERADOR EOLICO DE BAJA POTENCIA. Buenos Aires.
- Dominguez, E. (14 de Febrero de 2019). *Curvas de Potencia de Un Aerogenerador*.
- Edibon. (30 de Junio de 2020). ¿QUÉ SIGNIFICA DFIG? Obtenido de <https://www.edibon.com/es/blog/como-funciona/que-significa-dfig>
- Escalona, M., Coronel, K., Largacha, R., & Silva, M. (2016). LA FORMACIÓN PRÁCTICA DEL INGENIERO ELÉCTRICO EN LA UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ. . EXPERIENCIAS CON EL USO DE UN SIMULADOR DE ENERGÍA EÓLICA. *Revista Electrónica Formación y Calidad Educativa*, 78.

- Fernández, J. (Julio de 2018). Análisis estructural de una torre para aerogeneradores de baja potencia, mediante el método de elemento finito para la fábrica de Antenas. . Snata Clara, Cuba.
- Flores, F. (Noviembre de 2013). ESTRUCTURAS ELÉCTRICAS PARA LA INTEGRACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICA A LA RED ELÉCTRICA. Tarragona.
- Flores, F. (Noviembre de 2013). ESTRUCTURAS ELÉCTRICAS PARA LA INTEGRACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICA A LA RED ELÉCTRICA. Tarragona.
- Freddy, F. (Noviembre de 2013). ESTRUCTURAS ELÉCTRICAS PARA LA INTEGRACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICA A LA RED ELÉCTRICA. Tarragona.
- Freire, A., Toapanta, L., & Quinatoa, C. (2022). "Control orientado de voltaje del sistema de generación de energía eólica conectado a la red". *Revista Técnica "energía"*, 61-70.
- Fuentes, F. (2020). DISEÑO DE UN AEROGENERADOR COMO FUENTE PRINCIPAL DE ENERGÍA PARA UN CLÚSTER DE EXTRACCIÓN PETROLERA EN RUBIALES DE PUERTO GAITÁN. Bogotá D.C., Colombia.
- FullWatt. (Octubre de 2020). *INVERSORES: ¿QUÉ SON?* Obtenido de <http://blog.fullwat.com/inversores-que-son/>
- García, L. (2016). ENERGÍA EÓLICA Y DESARROLLO SOSTENIBLE EN LA REGIÓN DE LA RUMOROSA, MUNICIPIO DE TECATE. Tijuana, México.
- Gímenez, Á. (2016). DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN CONVERTIDOR FLYBACK PARA UN SISTEMA FOTOVOLTAICO. Valencia.
- González, F. (Junio de 2020). Análisis de aerogeneradores de eje vertical para entornos urbanos Modelación numérica 2D de rotores Savonius. Montevideo, Uruguay.
- González, L. (2018). Emulación del proceso de generación de energía eléctrica de un generador de baja potencia usando hardware In-The-Loop. Santiago de Calí, Colombia. Obtenido de <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/10784/T08408.pdf;jsessionid=AD41FDB75A16997CA39105A6AFF04FEA?sequence=6>
- González, A., & Morales, S. (2017). Control de Velocidad de Aerogenerador mediante Realimentación de Variables de Estado. *Ciencia e Ingeniería*, 123-130.



- González, A., & Morales, S. (2017). *Redalyc*. Recuperado el 20 de 09 de 2022, de Control de Velocidad de Aerogenerador mediante Realimentación de Variables de Estado: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=507555007004>
- Goran, A. (2008). Modelling and analysis of electric power systems. *Swiss Federal*, 89-100.
- Hernández, M., & Iracheta, R. (Marzo de 2022). GENERADOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES DE FLUJO TRANSVERSAL. Mexico.
- Hoyos, S., Franco, C., & Dyner, I. (2017). Integración de fuentes no convencionales. *Ingeniería y Ciencia*, 115-146.
- Hudson, T., & Ametller, M. (10 de Abril de 2022). *Monolithic Power*. Obtenido de How to Design a Flyback Converter: <https://www.monolithicpower.com/en/how-to-design-a-flyback-converter-in-seven-steps>
- IRENA. (2020). Renewable capacity statistics 2020 International Renewable Energy Agency.
- Jaramillo, O. A. (6 de septiembre de 2013). Energía Eólica Teoría y conceptos. Mexico.
- Jianxing, L., Yabin, G., Sijia, G., & Ligang, W. (2017). Nonlinear Control of Variable Speed Wind Turbines. *IEEE Acces*, 5, 27-34. doi:10.1109/ACCESS.2016.2599542
- Jianzhong, Z., Ming, C., Chen, Z., & Fu, X. (2008). Pitch angle control for variable speed wind turbines. *Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, (págs. 2691-2696).
- Lechón, E., & Zhungur, I. (Octubre de 2016). ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN AEROGENERADOR PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA ZONA DE CAYAMBE. Quito, Ecuador.
- León, M., & Rodríguez, M. (Agosto de 2016). " Análisis y aplicación de un generador de imanes permanentes para un sistema energía eólica". Guayaquil.
- Lima, F., Orellana, F., & Valencia, E. (2017). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE AEROGENERADOR DE BAJA POTENCIA. San Salvador, El Salvador.
- López, J. C. (2014). DISEÑO Y CONTROL DE CONVERTIDORES CC/CC APLICADOS A SISTEMAS HÍBRIDOS DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA . Jaen, España.
- Machowski, J., Janusz, B., & Bumby, D. J. (2011). *Power system dynamics: stability and control*. ISBN 9780470725580.

- MathWorks. (s.f.). Obtenido de Transformadas de Clarke y Park: <https://la.mathworks.com/solutions/power-electronics-control/clarke-and-park-transforms.html>
- Meraz, F. (Agosto de 2018). "Sistema de supervisión, control y adquisición de datos para un aerogenerador síncrono de imanes permanentes". Torreón, Coahuila, México.
- MERNNR. (2017). Plan Maestro de Electricidad 2016-2025. Quito, Ecuador.
- Mirapeix, J. (Junio de 2017). Energía y Telecomunicaciones: Energías Renovables(. Cantabria, España.
- Monica, C. (Julio de 2001). "Control de un sistema de generación eólica de velocidad variable con generador síncrono multipolar de imanes permanentes acoplado a red. Leganes.
- Nexe Energetic. (Julio de 2019). *¿Qué son las energías renovables? ventajas y desventajas.* Obtenido de <https://www.nexenergetic.com/que-son-las-energias-renovables/>
- Nieves, C. (2022). Análisis de rendimiento del Convertidor Back to Back para Generador Eólico Implementado en los Laboratorios de Energía de la Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca, Ecuador.
- Nistral Lastra, J. (16 de Enero de 2015). Modeling and dynamic control of a Wind Turbine. Cantabria.
- Noristz, M. (Julio de 2020). *Ecuador aprovecha responsablemente la energía eólica 15-JUN-2020.* Obtenido de <https://www.celec.gob.ec/electroguayas/index.php/sala-de-prensa/noticias/230-ecuador-aprovecha-responsablemente-la-energia-eolica-15-jun-2020>
- Opex Energy. (Mayo de 2017). *Tipos de Aerogeneradores.* Obtenido de [http://opex-energy.com/eolica/tipos\\_aerogeneradores.html#1.\\_SEGUN\\_EL\\_EJE\\_DE\\_GIRO\\_DEL\\_ROTOR](http://opex-energy.com/eolica/tipos_aerogeneradores.html#1._SEGUN_EL_EJE_DE_GIRO_DEL_ROTOR).
- Ouro, C. (2014). Modelado, simulación y control de un aerogenerador de velocidad variable. Barcelona.
- Paco. (Noviembre de 2014). *La rectificación de C.D. en un aerogenerador.* Obtenido de <https://coparoman.blogspot.com/2014/11/la-rectificacion-de-cd-en-un.html>
- Peláez, J., Herrera, J., González, D., & Serna, S. (2019). Emulación de una turbina de viento con MPPT en tiempo real. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 163-183.

- Peña, R. (Julio de 2017). Control de sistemas de Generación Distribuida Renovable mediante conceptos de Pasividad y de moldeo de potencia. La plata, Argentina.
- Pérez, A. (Junio de 2016). Diseño de la transmisión de un aerogenerador de 1,5 MW. . Bilbao, España.
- Portillo, D. (2018). DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN ISOLATED DC-DC FLYBACK CONVERTER FOR SOLAR MPPT PURPOSES. (*Senior Thesis in Electrical Engineering*). University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois.
- Pragaspathy\*, P., & Anand, B. (2016). A Review on DC-DC Converters for PMSG based Standalone Variable Speed Wind Turbine System. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 41-45.
- Prous, M. (Noviembre de 2018). Diseño y construcción de convertidor electrónico Back to Back para grupo de generación DFIG de 5KVA para turbinas eólicas. Madrid.
- Quiñonez-Varela, G. (2008). Modelling and validation of a squirrel cage induction generator wind turbine during connection to the local grid. *IET Generación, Transmisión y Distribución*, 301 - 309.
- Quiroa, M. (09 de Noviembre de 2019). *Energía Renovable*. Obtenido de <https://economipedia.com/definiciones/energia-renovable.html>
- Quispe, L., & Apaza, R. (2017). "DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN PROTOTIPO DE UN GENERADOR MAGNÉTICO APROVECHANDO LA FCEM COMO ENERGIA ALTERNATIVA" . Puno, Perú.
- Ramírez, C., Saavedra, A., & Ramos, C. (2013). Modelado y Estimación de Parámetros de un Sistema de Generación Eólico de Baja Potencia. *TecnoLógicas*, 213.
- Ramos, C. (Julio de 2017). Análisis de un convertidor destinado al almacenamiento híbrido de energía. Madrid.
- Rashad, A., Kamel, S., & Jurado-Melguizo, F. (2018). DEVELOPMENT OF EFFICIENT WIND FARMS BASED ON SQUIRREL CAGE INDUCTION GENERATOR AND DOUBLY-FED INDUCTION GENERATOR WITH STATIC VAR COMPENSATOR (SVC). *DYNA*, 93(1), 15-16.
- REVE. (Julio de 2018). *Las bases científicas de la energía eólica*. Obtenido de <https://www.evwind.com/2018/07/06/las-bases-cientificas-de-la-energia-eolica/>

- REVE. (2020). *La capacidad de energía eólica en todo el mundo alcanza 650,8 GW, 59,7 GW añadidos en 2019*. Obtenido de [https://www.evwind.com/2020/04/17/la-capacidad-de-energia-eolica-en-todo-el-mundo-alcanza-6508-gw-597-gw-anadidos-en-2019/?fbclid=IwAR2pfcZaYNMGuJSRF-CsEQRYa-kIMcl0DLgfRBuegQpw\\_FH\\_4AU4SSGz0fA](https://www.evwind.com/2020/04/17/la-capacidad-de-energia-eolica-en-todo-el-mundo-alcanza-6508-gw-597-gw-anadidos-en-2019/?fbclid=IwAR2pfcZaYNMGuJSRF-CsEQRYa-kIMcl0DLgfRBuegQpw_FH_4AU4SSGz0fA)
- Risueño, S. (Julio de 2017). "Estudio estructural del soporte de un aerogenerador". Leganés, España.
- Rivera, J., & Cardona, E. (Junio de 2018). ANÁLISIS COMPARATIVO DE DIFERENTES TOPOLOGÍAS DE CONVERTIDORES BUCK-BOOST . Pereira.
- Roch, E. (05 de 10 de 2022). *Transistores*. Obtenido de Transistores IGBT de Potencia: <https://transistores.info/transistores-igbt-de-potencia/>
- Rodrigálvarez, A. (Enero de 2018). MODELADO Y CONTROL DE UN AEROGENERADOR CONECTADO A LA RED MEDIANTE UN DFIG. Madrid, España.
- Rodríguez, E. (Abril de 2018). "OBTENCIÓN DE LA CURVA DE POTENCIA DE UN AEROGENERADOR DE 2MW, MEDIANTE UN MODELO CFD, PARA EL PRONÓSTICO DE GENERACIÓN". Cuernavaca, Mexico.
- Rodríguez, I. (Octubre de 2020). *Partes De Un Aerogenerador*. Obtenido de <https://www.e-renovables.es/partes-de-un-aerogenerador/>
- Rodríguez, J. (2017). ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN AEROGENERADOR MEDIANTE SIMULACIÓN 3D DE DINÁMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS. Madrid, España.
- Romañach, A. d. (Junio de 2018). Diseño de un generador síncrono de imanes permanentes para aerogeneradores en áreas marinas . Madrid.
- Romero, S., & Santiago, G. (2019). Principales componentes de un aerogenerador. *ENERGIZA*, 6-12.
- Ruiz, G. (Septiembre de 2020). *ENERGÍAS RENOVABLES: VENTAJAS Y DESVENTAJAS*. Obtenido de <https://erenovable.com/energias-renovables-ventajas-y-desventajas/>
- Ruiz, J., & Cholo, C. (2017). EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE MPPT UTILIZANDO LÓGICA DIFUSA COMPARADO CON UN ALGORITMO CONVENCIONAL APLICADO EN AEROGENERADORES DE BAJA Y MEDIANA POTENCIA. Colombia.

- Saavedra, A., & Alejos, R. (Septiembre de 2019). "Diseño de la geometría de un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius". Puebla, Mexico.
- Salazar, A. (2015). Modelado y simulación de un generador síncrono de imán permanente: caso de estudio generador a gasolina de 800 W. Manizales, Colombia.
- Salazar, D., & Ruíz, B. (2016). *Parque de Innovación Tecnológica*. Obtenido de Parque de Innovación Tecnológica: <http://innovacion.uas.edu.mx/resurgimiento-de-la-energia-eolica-el-arte-de-convertir-aire-en-electricidad/>
- Soria, F. (2019). Desarrollo y construcción de micro aerogenerador tipo PMSG con convertidor troceador de potencia plena. Madrid.
- Soriano, L. A. (Septiembre de 2015). Modelación de Aerogenerador con Compensación Difusa. Mexico D. F.
- Soto, J. (Julio de 2018). SIMULACIÓN DE FUENTES DE ALIMENTACIÓN CONMUTADAS CON AISLAMIENTO. Valladolid.
- Tello, M. (2017). Construcción de un Aerogenerador de Eje Vertical Tipo Savonius con Sistema de Giro. Quito.
- Tituaña, M. (Marzo de 2015). "MODELAMIENTO DE UN MICRO AEROGENERADOR EN SISTEMAS DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA PARA EL SECTOR RESIDENCIAL". Quito.
- Twenergy. (21 de Agosto de 2019). *¿Qué son las energías renovables?* Obtenido de <https://twenergy.com/energia/energias-renovables/que-son-las-energias-renovables-516/>
- UTEL. (julio de 2019). *Conoce los beneficios de las Energías Renovables*. Obtenido de <https://www.utel.edu.mx/blog/estudia-en-linea/conoce-los-beneficios-de-las-energias-renovables/>
- Valenzuela, A. (2018). Modelo de un Sistema de Generación Eólica basada en PMSG para el simulador de estabilidad ESTABI. (*Tesis de Maestría en Ciencias de Ingeniería Eléctrica*). Tecnológico Nacional de México, Torreon.
- Varillas, Á. (Octubre de 2015). SISTEMA DE ENERGIA HIBRIDA EOLICO-FOTOVOLTAICA PARA VIVIENDA UNIFAMILIAR AISLADA. Leganés.

- Vásquez, W., & Játiva, J. (2015). Modelación, Simulación y Control de Aerogeneradores con Generador de Inducción Doblemente Alimentado Utilizando Matlab. *Revista Técnica "energía"*, 144.
- Vesga, J. (2021). Obtenido de Espacio de estados: [https://issuu.com/jvesga29/docs/clase07-espacio\\_deestados](https://issuu.com/jvesga29/docs/clase07-espacio_deestados)
- Vesperinas, V. (2019). MODELIZACIÓN Y CONTROL DE UN AEROGENERADOR DE VELOCIDAD VARIABLE. Barcelona.
- Vivanco, E. (Agosto de 2020). Energías renovables y no renovables:Ventajas y desventajas de ambos tipos de energía. Chile.
- Wikilibros. (2017). Obtenido de [https://es.wikibooks.org/wiki/Electr%C3%B3nica\\_de\\_Potencia/IGBT/Estructura\\_y\\_principio\\_de\\_funcionamiento](https://es.wikibooks.org/wiki/Electr%C3%B3nica_de_Potencia/IGBT/Estructura_y_principio_de_funcionamiento)
- Wu, B., Lang, Y., Zargari, N., & Kouro, S. (2011). *Power Conversion and Control of Wind Energy Systems*. New Jersey: IEEE, Inc.
- Yero, D. (2016). SIMULACIÓN DE UN GENERADOR EÓLICO ASINCRÓNICO. Santa Clara, Cuba.
- Zhang, F., Leithead, W., & Anaya-Lara, O. (2011). Diseño de control de aerogeneradores para mejorar la capacidad de manejo de fallas. *IET Renewable Power Generation Conference*, (págs. 743-748).