

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICA DE INGENIERÍA EN ENERGÍA



**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO EN
ENERGIA**

**“Análisis comparativo de generadores eléctricos usados
en aerogeneradores para su aplicación con turbinas
eólicas en zonas rurales del Perú”**

AUTOR :

Bach. Josué Santiago Rojas Flores

ASESOR :

Mg. Gilmer Juan Lujan Guevara

Nuevo Chimbote, noviembre del 2019.

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICA DE INGENIERÍA EN ENERGÍA



UNS
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

**CARTA DE CONFORMIDAD DEL JURADO EVALUADOR DE
TESIS**

Damos la conformidad del presente informe, desarrollando el cumplimiento del objetivo propuesto y presentado conforme al Reglamento General para Obtener el Título Profesional en la Universidad Nacional del Santa (R. N° 492-2017-CU-R-UNS); intitulado:

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO EN
ENERGIA**

**“Análisis comparativo de generadores eléctricos usados
en aerogeneradores para su aplicación con turbinas
eólicas en zonas rurales del Perú”**

TESISTA:

BACHILLER: JOSUE SANTIAGO ROJAS FLORES

Mg. Robert F. Guevara Chinchayán
PRESIDENTE

M.Sc. Julio H. N. Escate Ravello
SECRETARIO

Mg. Gilmer J. Lujan Guevara
INTEGRANTE

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICA DE INGENIERÍA EN ENERGÍA



UNS
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

CARTA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR

La presente Tesis para Título ha sido revisada y desarrollada en cumplimiento del objetivo propuesto y reúne las condiciones formales y metodológicas estando en cuadrado dentro de las áreas y líneas de investigación conforme al reglamento general para obtener el Título profesional en la Universidad Nacional del Santa (R.D: N° 492-2017-CU-R-UNS) de acuerdo a la denominación siguiente:

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO EN ENERGIA

**“Análisis comparativo de generadores eléctricos usados
en aerogeneradores para su aplicación con turbinas
eólicas en zonas rurales del Perú”**

TESISTA:

BACHILLER: JOSUE SANTIAGO ROJAS FLORES

Mg. Gilmer Juan Lujan Guevara

ASESOR



UNS
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

FACULTAD DE INGENIERIA

Dirección E.P. de Ingeniería en Energía

Teléfono: 310445 - Anexo 3035

Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad

ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

A los veintisiete días del mes de diciembre del año dos mil diecinueve, siendo las once horas de la mañana, se instaló en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería en Energía, el Jurado Evaluador designado mediante Resolución N° 603-2019-UNS-CFI, integrado por los siguientes docentes:

- **Mg. ROBERT FABIAN GUEVARA CHINCHAYAN** : PRESIDENTE
- **M.Sc. JULIO HIPOLITO NESTOR ESCATE RAVELLO** : INTEGRANTE
- **Mg. GILMER JUAN LUJAN GUEVARA** : INTEGRANTE
- **M.Sc. ROBERTO CARLOS CHUCUYA HUALLPACHOQUE** : ACCESITARIO

Para dar inicio a la sustentación y evaluación de la Tesis titulada: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE GENERADORES ELÉCTRICOS USADOS EN AEROGENERADORES PARA SU APLICACIÓN CON TURBINAS EÓLICAS EN ZONAS RURALES DEL PERÚ", elaborada por el Bachiller de Ingeniería en Energía ROJAS FLORES JOSUE SANTIAGO, con código de matrícula 199911016, teniendo como asesor al docente Mg. GILMER JUAN LUJAN GUEVARA, designado con Resolución Decanal N° 067-2019-UNS-FI. Terminada la sustentación, el bachiller respondió las preguntas formuladas por los miembros del jurado y el público presente.

El Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, el contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, en concordancia con el artículo 103° del Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Santa, declara:

BACHILLER	PROMEDIO	PONDERACIÓN
ROJAS FLORES JOSUE SANTIAGO	16	Bueno

Siendo las once de la mañana, se da por terminado el acto de sustentación, firmando los integrantes del jurado en señal de conformidad.


Mg. Robert F. Guevara Chinchayán
PRESIDENTE


M.Sc. Julio H. N. Escate Ravello
SECRETARIO


Mg. Gilmer J. Lujan Guevara
INTEGRANTE



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por Turnitin. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Josue Rojas Flores
Título del ejercicio: R2
Título de la entrega: Análisis comparativo de generadore...
Nombre del archivo: Tesis_Josue_Rev_1.docx
Tamaño del archivo: 3.76M
Total páginas: 67
Total de palabras: 13,125
Total de caracteres: 68,757
Fecha de entrega: 09-nov-2019 11:18a.m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 1210363629

I. Introducción

1.1 Antecedentes

El acceso universal a la energía en Perú es aún un problema pendiente a resolver especialmente en las zonas rurales. Según datos del Banco Mundial el 46.2% de la población rural se encuentra sin acceso a la electricidad (Banco Mundial, 2015)

El abastecimiento de energía a las personas que se encuentran en situación de pobreza, resultaba ser un elemento vital para el logro de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM). Así, ante la falta de servicios energéticos confiables, se torna casi imposible la provisión de servicios de salud y educación de calidad, se ve seriamente limitado y la seguridad alimentaria se ve afectada de forma severa. Esta situación se posiciona como una grave amenaza para el logro de los objetivos de desarrollo de cada país, al limitar severamente el alcance de cualquier intervención orientada a mitigar la pobreza y mejorar la calidad de vida de las personas (EnDev GIZ Perú, 2016)

En el año 2006 se crea la Dirección General de Electrificación Rural (DGER) en el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), con el fin de optimizar las intervenciones en materia de abastecimiento de energía en el ámbito rural. En ese mismo año, se promulgó la Ley General de Electrificación Rural (LGER). En ella, se declara oficialmente la "necesidad nacional y utilidad pública de la electrificación de zonas rurales, localidades aisladas y de frontera del país" (Diario el peruano, 2006)

El Atlas Eólico del Perú muestra que las fuentes eólicas se ubican a 80 metros de altura. Se estima que el potencial de energía eólica del país es de 77.000 MW, de los cuales 22.000MW podrían ser explotados (Ministerio de energía y minas del Perú, 2016)

DEDICATORIA

Al único Dios verdadero dueño y dador de todo conocimiento y sabiduría. El cual me dio la luz de la vida y el sendero de su amor para andar y para el cual todo es posible. A mis padres quienes con su esfuerzo y esmero forjaron en mi un hombre de valor y cuyo trabajo nunca he de poder pagar

AGRADECIMIENTO

Por el esfuerzo, dedicación, paciencia, por su confianza y por todo lo que me ha dado a lo largo de mi carrera y de mi vida, este Proyecto de titulación va dedicado a mi madre

INDICE

I. Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Formulación del problema	3
II. Marco Teórico	9
2.1 Componentes principales de un aerogenerador.....	10
2.2 Clasificación general de las máquinas eléctricas	13
2.3 Análisis cualitativo de las principales máquinas eléctricas rotativas	15
2.4 Conversión de energía mecánica a eléctrica en aerogenerador	20
2.4.1 Generadores asincrónicos	21
2.4.2 Generador síncrono.....	26
2.5 Generadores en las configuraciones de aerogeneradores más comúnmente aplicadas	32
III. Materiales y métodos.....	36
3.1 Método(s) de la investigación	36
3.2 Diseño	36
3.3 Población y muestra	36
3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	36
3.5 Procedimiento de la recolección de datos	37
3.6 Técnicas de procesamiento y análisis de los resultados	37
3.6.1 Técnicas de procesamiento	37
3.6.2 Análisis de los resultados.....	37
IV. Resultados y discusión	38
4.1 Identificación de los diferentes tipos de generadores eléctricos utilizados en aerogeneradores.	38
4.1.1 características de funcionamiento de las turbinas eólicas.....	39
4.1.2 Generadores de última generación	45
4.1.3 Estrategias de control.....	46
4.2 Generadores eléctricos que pueden ser usados con turbinas eólicas basados las características del viento y el nivel de potencia a generar.....	48
4.3 Comparación de los tipos de generadores para según la transferencia de energía en un rango de velocidades.....	54
4.4 Generadores basados las características del viento y el nivel de potencia a generar para ser usados con turbinas eólicas en zonas del rurales del Perú.....	59
V. Conclusiones	64
VI. Referencias bibliográficas y virtuales	66

VII Anexos	67
- Anexo1	67
Centrales eólicas en el Perú que emplean diversos tipos de generadores eléctricos.....	67

RESUMEN

El propósito del presente trabajo fue realizar el análisis comparativo de generadores eléctricos usados en aerogeneradores según las características del viento y el nivel de potencia a generar, para concluir cuales producen mayor transferencia de energía con turbinas eólicas en zonas del rurales del Perú. Para cumplir este propósito se recurrió a libros especializados artículos científicos y documentos oficiales que usamos para obtener datos, así como la observación de campo de aerogeneradores en funcionamiento.

Se ha podido determinar que los tipos de generadores que se utilizan en los aerogeneradores tienen como base los generadores de inducción y síncronos: El estudio comparativo ha revelado que el generador de inducción doblemente alimentado y el generador síncrono de imán permanente son los que compiten muy cercanamente para ser propuesto en los fines del presente estudio, las eficiencias de los mismas son muy cercanas, pero el costo del generador de imanes permanentes supera al de alimentación doble

ABSTRACT

The purpose of this work was to carry out the comparative analysis of electric generators used in wind turbines according to the characteristics of the wind and the level of power to be generated, to conclude which produce greater energy transfer with wind turbines in rural areas of Peru. To fulfill this purpose, specialized books were used on scientific articles and official documents that we use to obtain data, as well as the field observation of wind turbines in operation.

It has been determined that the types of generators used in wind turbines are based on induction and synchronous generators: The comparative study has revealed that the double-powered induction generator and the permanent magnet synchronous generator are those that compete very closely to be proposed for the purposes of this study, their efficiencies are very close, but the cost of the permanent magnet generator exceeds that of double feed.

I. Introducción

1.1 Antecedentes

El acceso universal a la energía en Perú es aún un problema pendiente a resolver esencialmente en las zonas rurales. Según datos del banco mundial el 40.5% de la población rural se encuentra sin acceso a la electricidad (Banco Mundial, 2015)

El abastecimiento de energía a las personas que se encuentran en situación de pobreza, resultaba ser un elemento vital para el logro de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM). Así, ante la falta de servicios energéticos confiables, se torna casi imposible la provisión de servicios de salud y educación de calidad, se ve seriamente limitado y la seguridad alimentaria se ve afectada de forma adversa. Esta situación se posicionó como una grave amenaza para el logro de los objetivos de desarrollo de cada país, al limitar severamente el alcance de cualquier intervención orientada a mitigar la pobreza y mejorar la calidad de vida de las personas. (EnDev GIZ Perú, 2016).

En el año 2006 se crea la Dirección General de Electrificación Rural (DGER) en el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), que fusionaba al Fondo Nacional de Electrificación Rural (FONER) y la Dirección de Ejecución de Proyectos (DEP), con el fin de optimizar las intervenciones en materia de abastecimiento de energía en el ámbito rural. En ese mismo año, se promulgó la Ley General de Electrificación Rural (LGER), la primera enfocada exclusivamente en esta problemática. En ella, se declaró abiertamente la “necesidad nacional y utilidad pública de la electrificación de zonas rurales, localidades aisladas y de frontera del país” (Diario el peruano, 2006)

El Atlas Eólico del Perú muestra que las fuentes eólicas se ubican a 80 metros de altura. Se estima que el potencial de energía eólica del país es de 77,000 MW, de los cuales 22,000Mw podrían ser explotados (Ministerio de energía y minas del Perú, 2016)

En el informe recientemente publicado de la World Wind Energy Association (WWEA) se aprecia un crecimiento dinámico en el mercado mundial de aerogeneradores de pequeña potencia. A finales de 2015, se instaló un total acumulado de al menos 990,000 aerogeneradores pequeños en todo el mundo. Esto es un aumento del 5% (8% en 2014 y 7% en 2013) en comparación con el año anterior, cuando se registraron 944,000 unidades. (WWEA, 2012)

El Plan Nacional de Electrificación Rural (PNER) 2013-2022 incluye una inversión total de US\$ 38 millones en pequeños proyectos de energía eólica fuera de la red, que podría beneficiar a 167 comunidades. El reto está en poder aprovechar apropiadamente el potencial eólico y ponerlo a disposición de la electrificación rural; después de la turbina eólica, los generadores es un componente de suma importancia para poder lograr este objetivo. Los generadores eléctricos para turbinas eólicas convierten la energía mecánica en energía eléctrica. Los generadores de turbinas de viento son diferentes en comparación con otras unidades de generación que suelen encontrarse conectados a la red eléctrica. Una de las razones es que el generador tiene que trabajar con una fuente de alimentación que suministra potencia mecánica muy fluctuante.

A principios de la década de 1990, las turbinas eólicas estándar instaladas funcionaban a velocidad fija. Eso significa que, independientemente de la velocidad del viento, la velocidad del rotor de la turbina eólica es fija y determinado por la frecuencia de la red de suministro, la relación de transmisión y el diseño del generador. La turbina eólica de velocidad fija tiene la ventaja de ser simple, robusta y confiable y bien probado, el costo de sus partes eléctricas es bajo. Sus desventajas son un Consumo de energía reactiva incontrolable, tensión mecánica y calidad de energía limitada. También conducen a grandes fluctuaciones de voltaje, lo que, a su vez, dará como resultado pérdidas de línea significativas (Larsson, 2000).

Hoy en día, las turbinas eólicas en el mercado mezclan y combinan una variedad de conceptos innovadores, con tecnologías probadas tanto para generadores como para electrónica de potencia

(Gimenez & Gómez, 2011), en el artículo; generación eólica empleando distintos tipos de generadores considerando su impacto en el sistema de potencia afirman que el aprovechamiento del viento presenta ventajas y desventajas. Entre estas últimas, las dos limitaciones más serias desde el punto de vista de la ingeniería, son el rendimiento energético de los generadores y el impacto eléctrico que provocan sobre el sistema de potencia al cual inyectan generación. La mejora en una de las limitaciones puede afectar negativamente a la otra, por lo que la solución debe hallarse de ambas problemáticas en forma conjunta. Utilizar mayor energía del viento introduce mayores perturbaciones, mientras que el control de la misma reduce la posibilidad de aprovechamiento energético. Dado este inconveniente planteado, se considera de una importancia fundamental el estudio analítico de los esquemas de funcionamiento de los generadores eólicos, a fin de determinar cuáles son los que producen la mayor transferencia de energía, mejorando el aprovechamiento del viento y considerando su impacto desde el punto de vista eléctrico.

Varios conceptos de aerogeneradores se han desarrollado principalmente para maximizar la captura anual de energía, minimizar los costos y mejorar la calidad de la energía. Estos conceptos se pueden clasificar de varias maneras. Al principio, según el tamaño de la salida de energía eléctrica, los WECS pueden ser de tamaño pequeño (hasta 2kW), mediano (hasta 100kW) y grande (más de 100kW). Los sistemas de conversión de la energía eólica (WECS) de tamaño pequeño y mediano se utilizan para aplicaciones remotas en varias residencias o uso local, mientras que los WECS grandes generan energía para su distribución en las redes eléctricas. Debido a su mayor contribución e importancia a la capacidad total de energía eólica, los WECS para mediano y de gran tamaño son el motivo de este estudio.

1.2 Formulación del problema

La Historia del hombre está plagada de múltiples ejemplos que evidencia la búsqueda de una fuente inagotable y económica de energía y junto a esta búsqueda el desarrollo de procesos de conversión de energía más eficientes. Entre tantas fuentes energéticas destaca la energía eólica, que desde tiempos muy remotos ha sido empleada por la humanidad en las muchas actividades: navegación, molienda de granos, bombeo de agua a través de molinos de vientos (siglos XVI y XVII, países bajos de Inglaterra) entre otras.

La energía se ha convertido en uno de los pilares que soportan el desarrollo de la sociedad actual, por lo que su disponibilidad y buen uso son ya una pieza clave a la hora de determinar el éxito o el fracaso de las economías mundiales. Muy a pesar del mundo occidental, los años de energía barata y aparentemente infinita que se dieron durante gran parte del siglo XX han quedado definitivamente atrás. El nuevo siglo XXI ha dado paso a una época en la que las reservas probadas de petróleo y gas natural han dejado de aumentar año a año y el horizonte del 2050 para el primero de estos productos y 2075 para el segundo, se baraja ya como una posibilidad real para el agotamiento total de este tipo de recursos. (Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 2012)

La electricidad representa, actualmente, la forma más útil de energía, estando presente en todos los sectores de la sociedad gracias a su gran variedad de aplicaciones, que van desde el alumbrado, calefacción o ventilación, hasta el campo de las telecomunicaciones, tecnologías de la información, procesos industriales, etc. La mayoría de las plantas de generación se encuentran situadas a grandes distancias de los centros de consumo. Por ello, es necesario dotar al sistema de una compleja infraestructura que permita transportar la energía y hacerla llegar a los usuarios en óptimas condiciones para su consumo.

La generación de electricidad a pequeña escala gracias a la energía del viento, es una tecnología que necesita un impulso por parte de las Administraciones y empresas, habida cuenta de los beneficios potenciales que aporta, que, si bien tiene décadas de vida, su nivel de implantación es aún muy bajo, pese a que se podría instalar tanto en el sector primario, como en el industrial, en el de servicios y en el residencial.

En el Perú la organización que promueve esta tecnología es “Soluciones Prácticas” sus proyectos desarrollados consisten en pequeñas instalaciones que proveen electricidad a diferentes unidades: hogares, escuelas y centro de salud. Los pequeños generadores de energía eólica de 100W son de 10m de altura, mientras que los generadores de 500W son 12m de altura. El sistema consiste en diferentes componentes que aseguran su funcionamiento. El uso de los sistemas de generación de energía eólica ha sustituido el uso de la energía convencional, como queroseno, velas y baterías. El volumen total de la energía utilizada en el pueblo ahora asciende a 2.737 kW/año, lo que supone una reducción del 38,32 kg CO₂/año. El consumo se ha reducido del 43%, ya que las familias consumen menos

electricidad que la cantidad prevista de 400W /día/familia. Se espera que en el futuro el consumo de energía pueda aumentar, aunque de manera limitada (ITDG, 2008)

Aunque el recurso es el mismo que en la gran eólica, las instalaciones de media potencia (100 a 1000kW) tienen características propias:

- Generación de energía próxima a los puntos de consumo.
- Versatilidad de aplicaciones y ubicaciones, ligado al autoconsumo, con posibilidad de integración en sistemas híbridos, y tecnologías existentes para suelo y cubierta.
- Funcionamiento con vientos moderados, sin requerir complejos estudios de viabilidad.
- Aprovechamiento de pequeños emplazamientos o de terrenos con orografías complejas.
- Suministro de electricidad en lugares aislados y alejados de la red eléctrica.
- Optimización del aprovechamiento de las infraestructuras eléctricas de distribución existentes, a las que se conectan directamente, sin requerir infraestructuras eléctricas adicionales de evacuación.
- Bajo coste de operación y mantenimiento y elevada fiabilidad.
- Reducido impacto ambiental, por menor tamaño e impacto visual, y por su integración en entornos humanizados.

No obstante, se está avanzando considerablemente en las debilidades de esta tecnología que históricamente habían limitado su proliferación a zonas rurales y aisladas (ruido, vibraciones y turbulencias). A raíz de estos avances, la tecnología de mediana potencia ha despertado un gran interés, siendo considerada como una fuente energética de generación distribuida con gran potencial de desarrollo a nivel doméstico e industrial

Antiguamente se fabricaban aerogeneradores de dos palas para obtener un régimen de giro mayor que permitiese un mayor rendimiento al conjunto rotor y generador eléctrico, cuanto más alta es la velocidad de rotación del aerogenerador y la excesiva fatiga han hecho que la mayoría de los aerogeneradores de pequeña potencia existentes hoy en día sean tripalas. La mayoría de los aerogeneradores de pequeña potencia no disponen del

denominado tren de potencia, ya que normalmente el buje o cubo está acoplado directamente al generador eléctrico, que normalmente es un generador síncrono de imanes permanentes.

Los aerogeneradores con generador asíncrono o de inducción deben de estar siempre conectados a la red o a una fuente de potencia reactiva que sirva de excitación. La velocidad de rotación del aerogenerador en este caso es casi constante una vez conectado éste a la red eléctrica y será proporcional a la frecuencia de la señal de la red y al número de polos del generador. Es muy común que dispongan de generadores con conmutación de polos pudiendo operar a dos velocidades de rotación.

Por el contrario, el generador síncrono normalmente dispone de excitación propia mediante electroimanes o imanes permanentes, lo que hace que pueda operar aislado de la red fácilmente, variando su velocidad de rotación, normalmente aumentando con la velocidad de viento.

Por lo cual, a pesar de sus ventajas, el aprovechamiento del viento presenta también desventajas siendo la más compleja desde el punto de vista de la ingeniería el rendimiento energético de los generadores. Dado este inconveniente planteado, se considera de importancia fundamental el estudio analítico de los esquemas de funcionamiento de los generadores eólicos, a fin de concluir cuales son los que producen la mayor transferencia de energía, mejorando el aprovechamiento del viento y considerando su impacto desde el punto de vista eléctrico.

Desde esta perspectiva tecnológica se planteó el siguiente **problema**:

¿El análisis comparativo de generadores eléctricos usados en aerogeneradores, según las características del viento y el nivel de potencia a generar, permitirá concluir cuales producen mayor transferencia de energía con turbinas eólicas en zonas rurales del Perú?

Para afrontar este problema y llegar a la conclusión cual es el generador eléctrico que nos produzca mayor transferencia de energía para ser usado con turbinas eólicas en zonas rurales del Perú se plantearon los siguientes objetivos:

Objetivo general

Realizar el análisis comparativo de generadores eléctricos usados en aerogeneradores según las características del viento y el nivel de potencia a generar, para concluir cuales producen mayor transferencia de energía con turbinas eólicas en zonas del rurales del Perú.

Objetivos Específicos:

- a) **Identificar** los diferentes tipos de generadores eléctricos utilizados en aerogeneradores en base a información bibliográfica especializada.
- b) **Seleccionar** los generadores eléctricos que pueden ser usados con turbinas eólicas basados en las características del viento y el nivel de potencia a generar.
- c) **Comparar** los distintos tipos de generadores para determinar cuales producen mayor transferencia de energía en un rango de velocidades en zonas del rurales del Perú
- d) **Proponer** generadores basados en las características del viento y el nivel de potencia a generar para ser usados con turbinas eólicas en zonas del rurales del Perú

Con el fin de dar explicación tentativa del fenómeno investigado se planteó la siguiente **hipótesis:**

El análisis comparativo de generadores eléctricos usados en aerogeneradores nos permite concluir cuales producen mayor transferencia de energía con turbinas eólicas en zonas rurales del Perú

La Justificación para la realización del presente trabajo es que el creciente uso de las energías renovables, gracias a las nuevas normativas con las que cuenta el país, es el impulso que motiva la realización del presente trabajo de investigación. En particular, la energía eólica es, dentro de las energías renovables no convencionales, una de las más usadas a nivel mundial y con un prometedor avance en el Perú. Por esta razón, estudiar sobre el uso apropiado del generador eléctrico para contribuir en su aplicación a zonas aisladas, la característica de importancia que puede resultar beneficiosas a la vez.

Así como la energía eólica de gran potencia ya ha demostrado su viabilidad y contribuye de manera creciente al sistema eléctrico nacional, el segmento de la energía eólica de pequeña potencia (o energía minieólica) se proyecta como una de las formas de aportar energía renovable de forma distribuida, mediante su integración en entornos urbanos, semi-

urbanos, industriales y agrícolas, especialmente asociada a puntos de consumo de la red de distribución.

Se justifica tecnológicamente, ya que la sociedad actual depende totalmente de la producción de energía, pero cada vez hay más demanda energética y los recursos energéticos, como por ejemplo los combustibles fósiles, son cada vez más escasos. Por lo tanto, en la situación actual, la problemática está claramente definida, se debe investigar en formas de obtención de energía que no dependan de estos recursos escasos.

La idea principal es no depender de los combustibles fósiles, pero este objetivo implica investigar en las nuevas fuentes de energía para que sean lo más limpias, eficientes y rentables que se pueda.

La energía eólica ha experimentado grandes avances tecnológicos en los últimos años. El diseño de los aerogeneradores ha evolucionado hacia la producción de grandes máquinas, situadas en campos eólicos terrestres o marinos, capaces de generar varios megavatios de potencia. El diseño de pequeños aerogeneradores no ha evolucionado tanto como su hermano mayor, y aún se encuentra en una fase de desarrollo. La política tiene algo que ver en esto, ya que la minieólica debería estar reconocida de un modo diferenciado, en cuanto a legislación, de la eólica tradicional.

Se Justifica económicamente ya que según datos proporcionados por la comisión europea de energía, se espera que la evolución de las energías renovables para los próximos años tenga una importancia cada vez más fuerte, proyectando que la utilización de energía de origen renovable alcance el 12%, mientras que para el año 2020 pueda abastecer el 20% del consumo total de energía. (WWEA, 2012)

El proyecto se **justifica socialmente** porque está dirigido a brindar el uso de la energía a zonas rurales. Logrando, además, ahorros tanto como consumo de energía como en la economía de la población en general. Simultáneamente se logran reducciones en las emisiones de gases de efecto invernadero y mejoras en las finanzas de las empresas energéticas.

Las limitaciones del presente trabajo tienen que ver sobre todo con:

Limitaciones: topes externos

- Se limitó al estudio descriptivo de los aerogeneradores existentes, usando información científica especializada
- Se limitó a hacer el análisis y comparación teórica de los aerogeneradores

Restricciones: topes internos

- Se restringió solo a investigar, analizar y proponer.
- El tiempo de dedicación del investigador fue parcial.

II. Marco Teórico

La tecnología de aerogeneradores ha madurado a lo largo de los años y se ha convertido en la tecnología de energía renovable más prometedora y confiable hoy en día. Esta Se movió muy rápido, desde principios de la década de 1980, desde aerogeneradores de unos pocos kilovatios. a los aerogeneradores multimegawatt de hoy en día. Además de su tamaño, el diseño de los aerogeneradores ha cambiado de ser impulsado en forma convencional hasta ser optimizado impulsado dentro del régimen operativo y el entorno de mercado.

Los diseños de aerogeneradores han progresado desde velocidad fija, pasivo controlado y con trenes de transmisión con cajas de engranajes, para convertirse en velocidad variable, activo controlado, y con o sin reductores, utilizando lo último en electrónica de potencia, aerodinámica y diseños de trenes de transmisión mecánica. (Letcher, 2017)

Todos los generadores, sin importar de qué tipo, si DC o AC, funcionan en función de La ley de inducción de Faraday. En un generador hay un devanado que debe moverse con respecto a un campo magnético. Este movimiento es siempre un movimiento de rotación, ya que necesitamos aplicar el movimiento de un motor primario, como una turbina, etc., todo que tienen un movimiento de rotación. (Hemami, Wind Turbine Technology, 2012)

En general, el campo magnético puede ser proporcionado por un imán permanente o puede ser proporcionado por un electroimán. En este último caso, hay un devanado para el campo magnético y un devanado que genera la electricidad. Estos dos devanados deben moverse uno respecto al otro. Es posible que el devanado del campo permanece estacionario y el devanado generador gira, o el devanado del campo gira y el devanado generador permanece estacionario. (Hemami, Wind Turbine Technology, 2012)

Las máquinas pueden construirse como generadores síncronos o como generadores asíncronos (o de inducción). Ambas máquinas tienen el mismo diseño básico con respecto al bobinado trifásico del estator. La diferencia radica en la forma en que se genera el campo eléctrico en el rotor generador. (Hau, 2006)

2.1 Componentes principales de un aerogenerador.

Un aerogenerador moderno está compuesto por diferentes componentes con el fin de realizar la conversión de la energía cinética del viento a energía eléctrica.

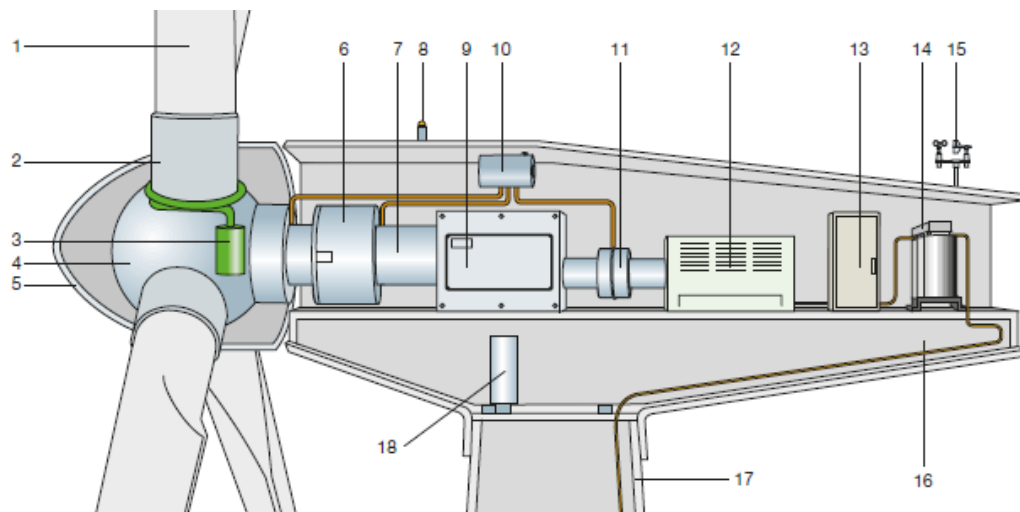


Figura 2.1 Elementos de un aerogenerador
Fuente: (Asea Brown Boveri S.A, 2012)

Los principales componentes de un aerogenerador de eje horizontal son (figura 2.1)

1. pala;
2. soporte de la pala;
3. actuador del ángulo de paso;
4. buje;
5. cubierta;

6. soporte principal;
7. eje principal;
8. luces de señalización aérea;
9. multiplicador;
10. dispositivos hidráulicos de refrigeración;
11. frenos mecánicos;
12. generador;
13. convertidor de potencia y dispositivos eléctricos de control, protección y seccionamiento;
14. transformador;
15. anemómetros;
16. estructura de la góndola;
17. torre de soporte;
18. mecanismo actuador de la orientación.

El rotor

Parte fundamental del generador, debido a que es la encargada de recibir la energía cinética del viento para así mover el eje del generador al que está acoplada. El tamaño del rotor puede variar de acuerdo a la función que va a cumplir y la potencia que se requiere que genere. (Villarrubia, 2013)

Palas

Las palas son los componentes que interactúan con el viento, por lo que se diseñan con un perfil que maximice su eficiencia aerodinámica. En la figura 2.2 se muestra la forma característica de una pala, así como sus secciones transversales.

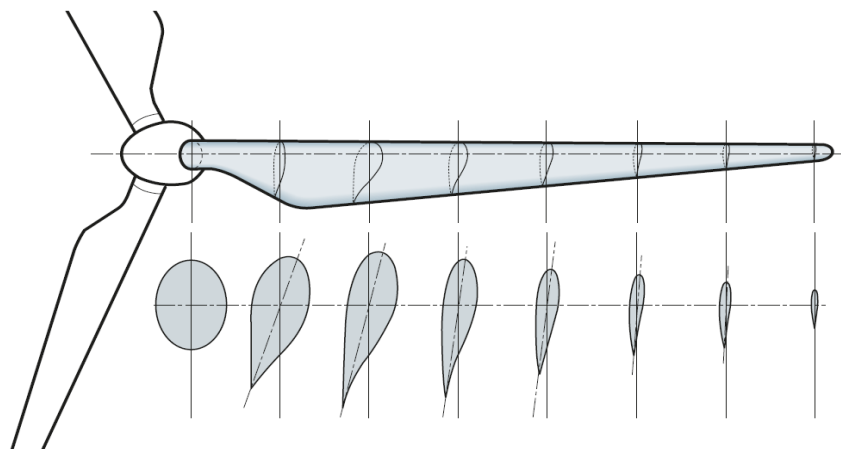


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento. 1.2 Forma característica de una pala y sus secciones Transversales

Fuente: (Asea Brown Boveri S.A, 2012)

Buje

El buje es el componente que conecta las palas al eje principal, transmitiéndole la potencia extraída del viento, incluye los mecanismos de regulación del ángulo de paso.

Hay tres tipos principales de buje (figura 2.3):

- rígido;
- basculante (*teetering*);
- para palas abisagradas.

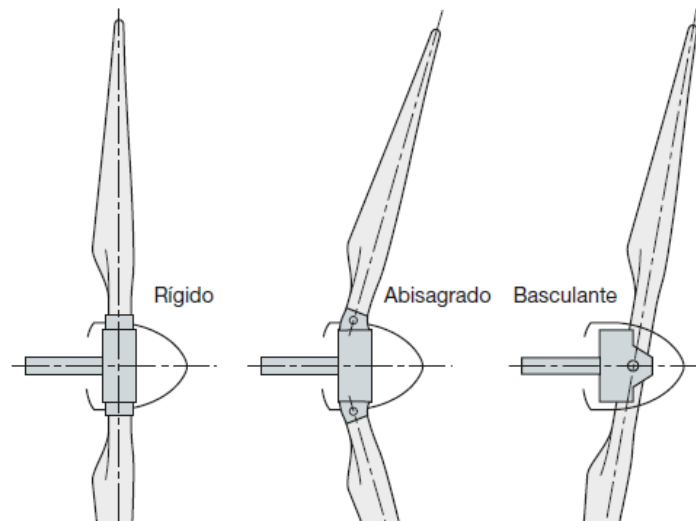


Figura 2.2 Tipos de Bujes en un aerogenerador

Fuente: (Asea Brown Boveri S.A, 2012)

Multiplicador

Tiene como misión aumentar la velocidad de rotación del rotor, para adaptarla a los valores requeridos por generadores convencionales (en algunos aerogeneradores, la relación de multiplicación puede ser mayor de 1:100). El multiplicador está constituido por una o varias parejas de engranajes de tipo epicicloidial o de ejes paralelos (figura 2.4).

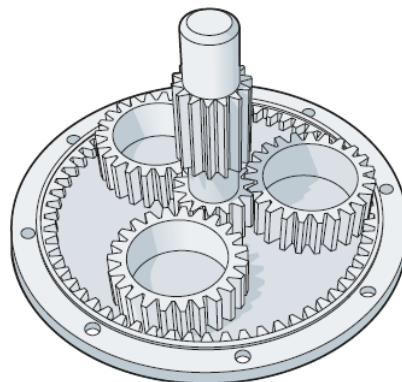


Figura 2.4 Multiplicador del rotor de un aerogenerador

Fuente: (Asea Brown Boveri S.A, 2012)

El generador

Un generador, convierte la energía mecánica en energía eléctrica. El tamaño es proporcional a la potencia. Un generador, de hecho, tiene la misma construcción como un motor esto es, puede ser referido como una máquina eléctrica. (Hemami, 2012)

2.2 Clasificación general de las máquinas eléctricas

En la expresión (1) se han relacionado las frecuencias del inductor e inducido de una máquina eléctrica por medio del número de polos y las r.p.m. del rotor, de acuerdo a la ecuación general:

$$f_2 = f_1 \pm \frac{np}{60} \quad \dots(1)$$

Los diferentes tipos de máquinas se pueden clasificar atendiendo a una serie de criterios selectivos y ordenados que tienen en cuenta la existencia de órganos móviles, el tipo de corriente aplicada al inductor y la forma de las conexiones externas. (Fraile Mora, 2008)

Primer criterio: Movimiento del inductor o inducido.

a) Si no existen órganos móviles, $n = 0$, lo que indica, de acuerdo con (1), que:

$$f_2 = f_1 \quad \dots(2)$$

En este caso las maquinas son llamadas **máquinas estáticas**.

b) En el caso en que $n \neq 0$, se sigue conservando la expresión general:

$$f_2 = f_1 \pm \frac{np}{60} \quad \dots(3)$$

dando origen a las **máquinas rotativas**.

Segundo criterio: Características del flujo inductor.

a) Si el flujo inductor es constante, es decir, independiente del tiempo, indica que la frecuencia de la corriente que alimenta este devanado es $f_1 = 0$. En el caso de máquinas estáticas, teniendo en cuenta (2) se cumpliría:

$$f_2 = f_1 = 0 \quad \dots(4)$$

no existiendo ninguna máquina que cumpla esta condición, ya que al no aparecer variaciones de flujo en el inducido no se tiene conversión de energía.

Para las máquinas dotadas de movimiento, la condición $f_1 = 0$, teniendo en cuenta (3), da lugar a la expresión general:

$$f_2 = \pm \frac{np}{60} \quad \dots(5)$$

es decir, la frecuencia del inducido es función directa de la velocidad del rotor.

Normalmente cuando el inductor está recorrido por una c.c. ($f_1 = 0$), la máquina tiene una estructura física en forma de **polos salientes**, tal como se observa en la Figura 2.5, sobre los cuales van arrolladas las bobinas inductoras.

- b) Si el flujo inductor es variable, es $f_1 \neq 0$, lo cual indica, en el caso de máquinas estáticas, y de acuerdo con (2), que:

$$f_2 = f_1 \neq 0 \quad \dots(6)$$

y para las máquinas rotativas se sigue cumpliendo la expresión general (1).

Tercer criterio: Dispositivo de conexión al circuito exterior.

- a) Si la máquina tiene un inducido cuya unión con el circuito exterior se realiza por medio de conexiones fijas (caso en que el inducido está situado en el estator) o por anillos (inducido en el rotor), la frecuencia en el circuito exterior definida por f_L es igual que la frecuencia del inducido f_2 , es decir:

$$f_L = f_2 \quad \dots(7)$$

en el caso de máquinas estáticas se obtiene el **transformador** y el **regulador de inducción monofásico**.

En el caso de máquinas móviles con $f_1 = 0$, teniendo en cuenta (1), se cumplirá:

$$f_L = f_2 \pm \frac{np}{60} \quad \dots(8)$$

que dan origen a las **máquinas síncronas** constituidas por el **generador síncrono** o **alternador** y el **motor síncrono**.

En el caso de máquinas móviles con $f_1 \neq 0$, teniendo en cuenta que responden a la expresión general (1), se cumplirá:

$$f_L = f_2 = f_1 \pm \frac{np}{60} \quad \dots(9)$$

que dan lugar a las **máquinas asíncronas o de inducción**, constituidas por el **generador asíncrono**, el **motor asíncrono** y los **convertidores asíncronos**.

- b) Si la máquina tiene un inducido cuya unión con el circuito exterior se realiza por medio de colector de delgas, la frecuencia en el circuito exterior es de diferente valor que la del inducido, es decir:

$$f_L \neq f_2 \quad \dots(10)$$

el colector de delgas se coloca siempre en el rotor, y por ello en las máquinas estáticas esta combinación no existe.

En las máquinas móviles en que $f_1 = 0$, de acuerdo con (5) se cumplirá:

$$f_L \neq f_2 \pm \frac{np}{60} \quad \dots(11)$$

que dan origen a las **máquinas de c.c.** (denominadas así porque en ellas se cumple: $f_L = 0$; estas máquinas incluyen: el **generador de c.c. o dinamo**, el **motor de c.c.**, la **conmutatriz** y **otras máquinas especiales**.

En las máquinas móviles en las que $f_1 = 0$, teniendo en cuenta que responden a la expresión general (1), se cumplirá:

$$f_L \neq f_2 = f_1 \pm \frac{np}{60} \quad \dots(12)$$

que dan lugar a los **motores de c.a con conmutador o con colector de delgas**.

2.3 Análisis cualitativo de las principales máquinas eléctricas rotativas

➤ **Máquinas síncronas**

Son máquinas rotativas, $n \neq 0$, se caracterizan por ser:

$$f_1 = 0 ; f_2 = \pm \frac{np}{60} ; f_1 = f_2 \quad \dots(13)$$

Es decir, consisten en un inductor alimentado por c.c ($f_1 = 0$), que se denomina también devanado de excitación o campo, que suele colocarse en el rotor (Fig. 2.5), alimentado por medio de dos anillos. (Fraile Mora, 2008)

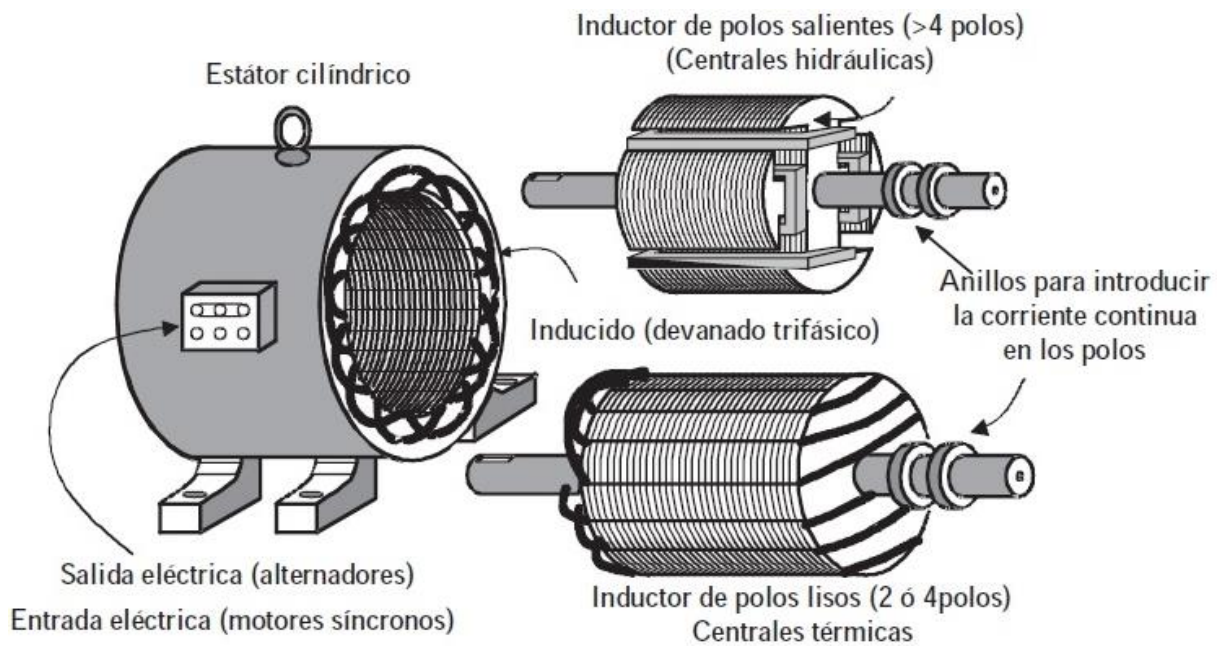


Figura 2.5 Tipos de máquinas síncronas

Fuente: (Fraile Mora, 2008)

El inducido normalmente es trifásico y suele colocarse en el estator (en las máquinas de pequeña potencia se utiliza con frecuencia la posición inversa, es decir, se sitúa el inductor en el estator y el inducido en el rotor, existiendo entonces tres anillos en el rotor). Cuando funciona como generador (**alternador**), se introduce energía mecánica por el eje, y al aplicar c.c. al inductor, se obtiene en el inducido una f.e.m. de frecuencia $f_2 = \pm np/60$, que se aplica a la carga. La c.c. necesaria para alimentar el inductor se obtiene de un pequeño **dinamo excitatriz**, que está situada en el mismo eje de la máquina. (Fraile Mora, 2008)

La máquina síncrona puede funcionar también como motor introduciendo una c.a. de frecuencia f_2 ; por el inducido (teniendo el inductor $f_1 = 0$), apareciendo un par en el rotor que lo hace girar a velocidad:

$$f_1 = \frac{60 f_2}{P} \quad \dots(14)$$

El mismo alternador de una central eléctrica puede funcionar como motor síncrono, operación que se realiza en las modernas centrales de bombeo tomando energía eléctrica de la red y acumulando energía hidráulica aguas arriba de la presa.

➤ **Máquinas de c.c.**

Son máquinas rotativas, $n \neq 0$, se caracterizan por ser:

$$f_1 = 0 ; f_2 = \pm \frac{np}{60} ; f_1 \neq f_2 \quad \dots(15)$$

El nombre de máquinas de c.c. se debe a que el valor de la frecuencia de la carga es $f_L = 0$, lo cual se consigue por la acción **rectificadora** del colector. Estas máquinas disponen de un inductor alimentado por c.c. ($f_1 = 0$), que al igual que las máquinas síncronas se denomina también **devanado de excitación o campo** y se sitúa en el estator (Fig. 2.6).

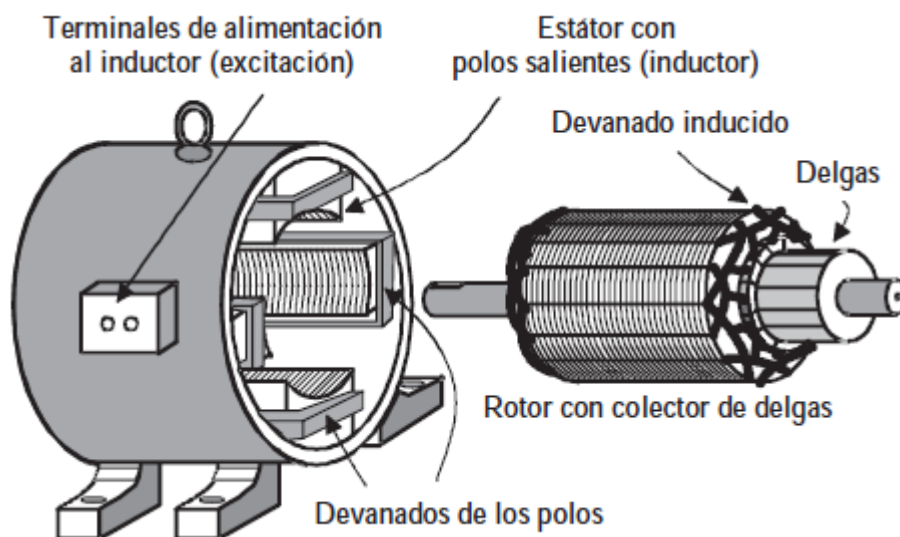


Figura 2.6 Máquina de Corriente Continua
Fuente: (Fraile Mora, 2008)

Cuando funciona en régimen generador; se suministra una energía de rotación al eje y se aplica una c.c. a la excitación, obteniéndose en el inducido una corriente alterna de frecuencia:

$$f_2 = \pm \frac{np}{60} \quad \dots(16)$$

Debido a la acción rectificadora del colector se obtiene una c.c. entre las escobillas de salida ($f_1 = 0$), energía que es aplicada a la carga: El generador de c.c. se conoce con el nombre de **dinamo**, y tiene la importancia histórica de ser el primer tipo de generador empleado para la obtención de energía eléctrica a gran escala. Hoy en día se han sustituido para esta misión por rectificadores que permiten obtener una c.c. por conversión de la c.a. de la red. (Fraile Mora, 2008)

Si los devanados inductor e inducido llevan alimentaciones separadas, se tiene la llamada máquina con excitación **independiente**. Normalmente, ambos circuitos se conectan eléctricamente entre sí; cuando se conectan en paralelo, se obtiene la máquina **shunt** o derivación, en la que el inductor está formado por un devanado de muchas espiras de hilo delgado por el que se deriva una corriente pequeña. Cuando se conectan **en serie**, el inductor tiene pocas espiras de hilo grueso, ya que por él circula toda la corriente del inducido (de gran valor). Si la máquina dispone de ambos tipos de excitación, serie y paralelo, se denomina **compound** o compuesta. Estos sistemas de conexión se emplean para producir la autoexcitación de la máquina, a partir del magnetismo remanente de los polos inductores. Es frecuente (aunque no son normas generales) emplear la conexión serie en motores y la **shunt** y **compound** en generadores. (Fraile Mora, 2008)

Si a la máquina de c.c. básica de la Figura 2.6 se la hacen conexiones adecuadas en el devanado del inducido y son llevadas al exterior por medio de anillos colectores se obtiene una máquina denominada **conmutatriz** o **convertidor síncrono**.

➤ Máquinas asíncronas o de inducción

Son máquinas rotativas, $n \neq 0$, y de acuerdo con el cuadro de clasificación general se caracterizan por:

$$f_1 \neq 0 ; f_2 = f_1 \pm \frac{np}{60} ; f_L = f_2 \quad \dots(17)$$

Están constituidas por un devanado inductor situado en el estátor por el que se introduce una c.a. de frecuencia f_1 . En el caso de máquinas de potencia superior a 1/2 CV, el devanado anterior es trifásico; al igual que la corriente de alimentación, un campo magnético giratorio cuya velocidad, es:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{P} \quad \dots(18)$$

El devanado inducido está en el rotor y puede ser trifásico o no; sin embargo, *debe estar bobinado para el mismo número de polos* que el devanado del estator. En la Figura 2.7 se indica el esquema básico, donde se ha supuesto un arrollamiento trifásico en el rotor, cuyas salidas van a tres anillos, donde se conecta no una carga, sino un reóstato de arranque.

En la mayoría de los casos el rotor está formado por una serie de conductores puestos en cortocircuito por dos anillos extremos, formando un devanado que se conoce con el nombre de **jaula de ardilla**.

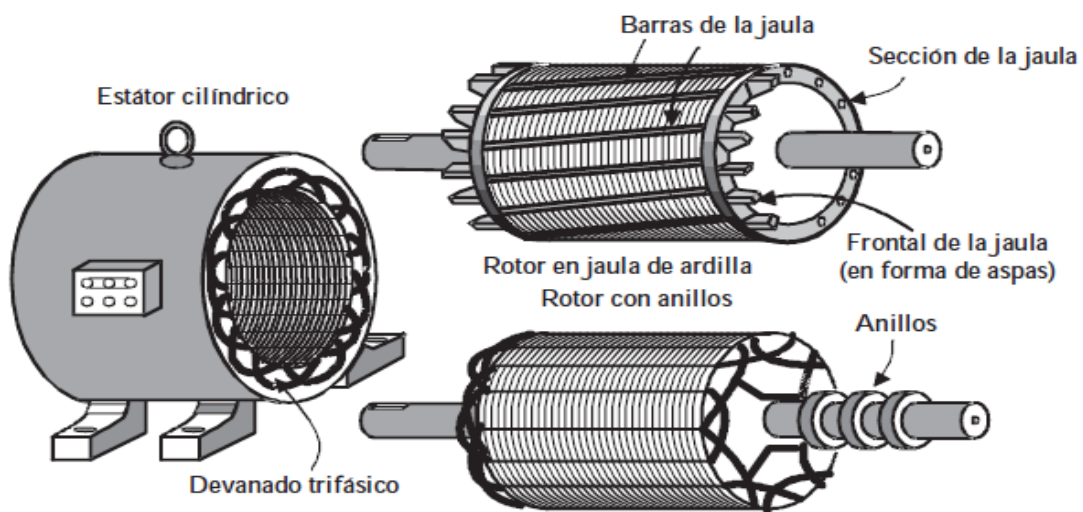


Figura 2.7 Tipos de máquinas asíncronas o de inducción. Fuente: (Fraile Mora, 2008)

La máquina como Generador. Si girando la máquina asíncrona como motor, a una velocidad $n < n_1$, se obliga a mover el rotor, por un medio exterior, a una velocidad superior a la de sincronismo y en su mismo sentido, el deslizamiento se hace negativo y la máquina absorbe entonces energía mecánica que se convierte en eléctrica, la máquina trabaja entonces como generador. (Fraile Mora, 2008)

2.4 Conversión de energía mecánica a eléctrica en aerogenerador

Un aerogenerador captura la energía cinética lineal del viento y la convierte en energía cinética rotacional. Esta energía cinética rotacional de una turbina se transfiere a un generador eléctrico ya sea directamente o a través de una caja de cambios. El generador eléctrico convierte entonces la energía mecánica en energía eléctrica.

Consideremos un generador de velocidad fija con una velocidad angular constante de ω ; sea E la cantidad de energía cinética por segundo y ε la eficiencia global de la transferencia de energía del viento al generador. El par transferido al rotor del generador es:

$$T_g = \varepsilon \frac{E}{\omega} \quad \dots(19)$$

A continuación, consideramos el estator del generador que está conectado a una red con un terminal de voltaje de CA de V_T con una frecuencia de ω . La potencia en un circuito eléctrico es $V_T i \cos \phi$, donde i es la corriente que fluye a través del circuito y ϕ es la diferencia de fase entre el voltaje y la corriente

$$T_g \omega = V_T i \cos \phi \quad \dots(20)$$

De manera simple, en la ecuación anterior, ω y V_T son constantes. Por lo tanto, el par rige la cantidad de corriente y el ángulo de fase. Si el par no está equilibrado, el rotor acelerará fuera de control. El par de equilibrio se proporciona mediante dos mecanismos que se describen a continuación:

- En un generador asíncrono, el par de equilibrio es proporcionado por la fuerza tangencial experimentada por los conductores portadores de corriente en el rotor en presencia del campo magnético creado por el estator. Para que se genere el par, la velocidad del rotor debe ser ligeramente superior a la velocidad del campo magnético del estator.
- En un generador síncrono, la atracción magnética entre el rotor y estator proporciona el par de equilibrio. Esta fuerza magnética es la fuerza tangencial aplicada cuando los polos opuestos del estator y el rotor no están alineados radialmente.

2.4.1 Generadores asincrónicos

Los generadores asincrónicos también se denominan generadores de inducción. (Fig. 2.8). Los principios son similares a un transformador en el que las bobinas primarias alrededor de un lado del núcleo generan un campo magnético. Este campo magnético cambiante produjo una *fem* en la bobina secundaria en el otro lado del núcleo. Aquí, la energía se transfiere de un nivel de voltaje de CA a un nivel diferente de voltaje de CA a la misma frecuencia.

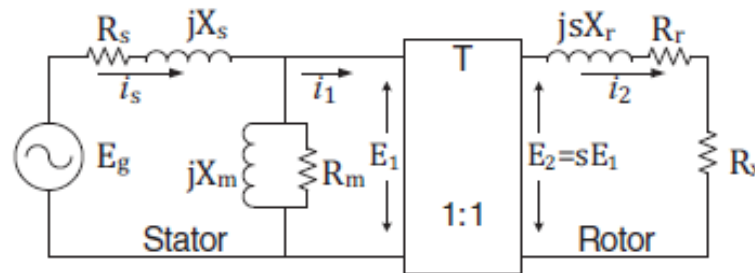


Figura 2.8 Circuito monofásico equivalente de un generador de inducción
Fuente: (Jain, 2011)

En un generador de inducción de jaula de ardilla, el circuito del rotor está en cortocircuito, por lo que, en un caso idealizado, la resistencia es cero y, por lo tanto, no hay carga eléctrica. Al igual que el generador síncrono, se crea un campo magnético giratorio conectando el estator a la red. Cuando la velocidad de rotación del rotor (ω_0) es la misma que la velocidad del campo magnético giratorio del estator, entonces la velocidad relativa es cero. En esta situación, no hay *fem* inducida en el rotor porque en relación con el rotor no hay cambio en el campo magnético. No hay corriente en el rotor y, por lo tanto, no hay fuerza, ni par, y ninguna energía.

Cuando la energía eólica entrega energía al generador, se entrega un par al rotor. La magnitud del par es: P / ω . El par hace que el rotor acelere. A medida que la velocidad del rotor se vuelve $\omega_1 (> \omega_0)$, el conductor en el rotor tiene una velocidad relativa ($= \omega_1 - \omega_0$) con respecto a un campo magnético giratorio del estator, Esto causa *fem* para ser inducido en el rotor y la corriente comienza a fluir. La frecuencia de la corriente en el conductor del rotor es: $(\omega_0 - \omega_1) f / \omega_0$, donde f es la frecuencia de la red. Dado que la corriente fluye en el conductor del rotor, que se sumerge en el campo magnético del estator, se ejerce una fuerza sobre el rotor conductor. Esta fuerza resiste el par externo.

La magnitud de la fuerza es proporcional a la corriente, que es proporcional a la velocidad relativa. El rotor continúa acelerando hasta que el par externo ha sido completamente resistido.

El deslizamiento se define como:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega_1}{\omega_0} \quad \dots(21)$$

Para la mayoría de los generadores, el deslizamiento está en el rango de 1.5 a 4%. La velocidad del rotor es, por lo tanto, muy cercana a la velocidad síncrona.

En la figura 2.8 se muestra un circuito de un generador de inducción con una resistencia variable en el rotor. La corriente en el rotor viene dada por

$$i_r = k_i \frac{s}{\sqrt{R_{rx}^2 + s^2 X_r^2}} \quad \dots(22)$$

donde

k_i es una constante,

R_{rx} y X_r reactancia del rotor

$R_r + R_x$ resistencia total del rotor

R_x es la resistencia variable en el rotor.

El par es proporcional a $i_r^2 R_{rx}/s$:

$$\tau = k_\tau \frac{s R_{rx}}{R_{rx}^2 + s^2 X_r^2} \quad \dots(23)$$

La potencia es, por lo tanto:

$$P = \tau \omega = k_\tau \frac{s R_{rx} \omega}{R_{rx}^2 + s^2 X_r^2} \quad \dots(24)$$

donde ω es la velocidad del rotor.

La relación entre el par y el deslizamiento viene dada por la curva en la figura 2.9. Cuando se agregan resistencias (R_x) al rotor, entonces la curva se desplaza hacia la derecha. A un nivel más alto de energía eólica, esto permite los generadores para trabajar a mayor valor de deslizamiento absoluto, es decir, permite generadores para trabajar a revoluciones más altas por minuto manteniendo un par constante.

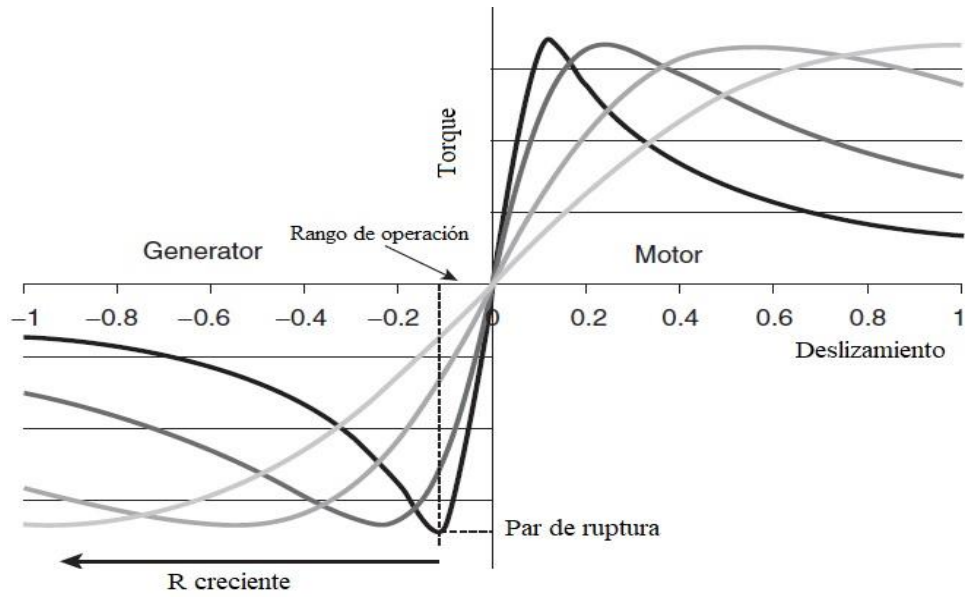


Figura 2.9 Características de funcionamiento de un generador asíncrono
 Fuente: (Jain, 2011)

Varias mejoras en el generador asíncrono básico son descritas a continuación.

En principio, hay una gran demanda de corriente de la red, que es costosa y, con el tiempo, daña el equipo. Un arrancador suave que controla el flujo de corriente es, por lo tanto, parte de un generador de inducción. Durante las operaciones normales, un generador de inducción requiere aproximadamente 30% de potencia reactiva de la red, y durante las operaciones de carga baja, la demanda de potencia reactiva aumenta.

La adquisición de energía reactiva de la red agrega costos; por lo tanto, los bancos de condensadores se implementan para reducir la necesidad de potencia reactiva. Esto se ilustra en la figura 2.10.

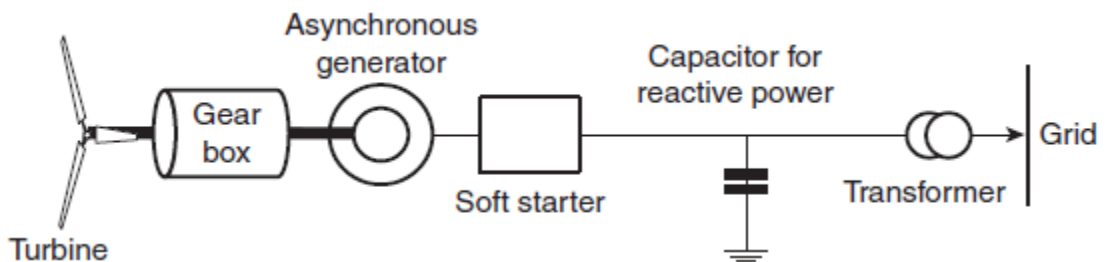


Figura 2.10 Conexión de un sistema de velocidad fija con un generador conectado directamente a la red.
 Fuente: (Jain, 2011)

Los generadores de inducción tradicionales funcionan con un muy pequeño rango de deslizamiento, es decir, la velocidad del rotor es casi constante. La velocidad variable del rotor permite que una turbina extraiga potencia adicional (Fig. 2.11).

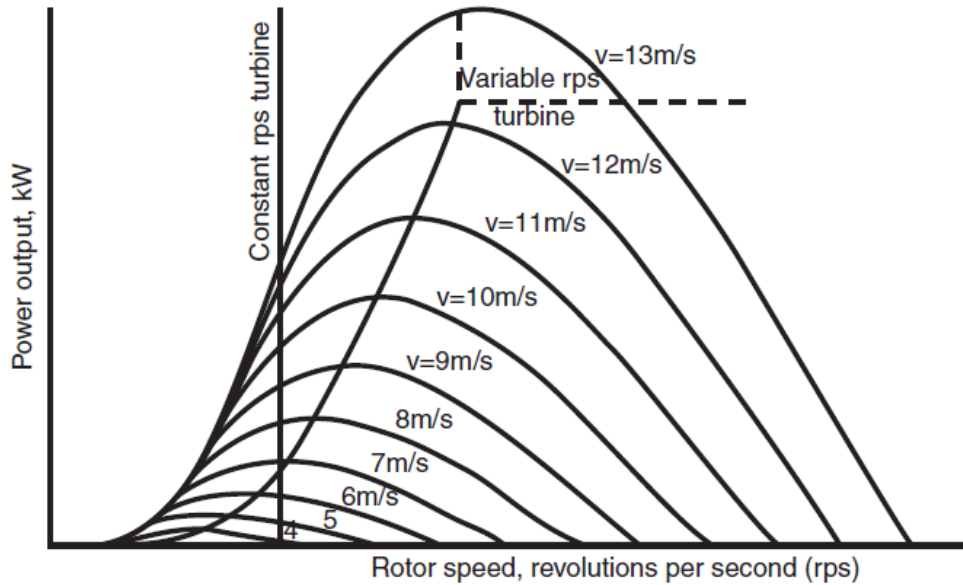


Figura 2.11 Características de potencia versus velocidad del rotor de una turbina eólica para diferentes velocidades del viento
Fuente: (Jain, 2011)

El primer esquema para aumentar el deslizamiento para hacer que el generador sea de velocidad variable es una resistencia variable en el rotor. Se implementa ampliamente en las turbinas Vestas bajo la etiqueta "Opti Slip". La figura 2.12 contiene un esquema de tal generador.

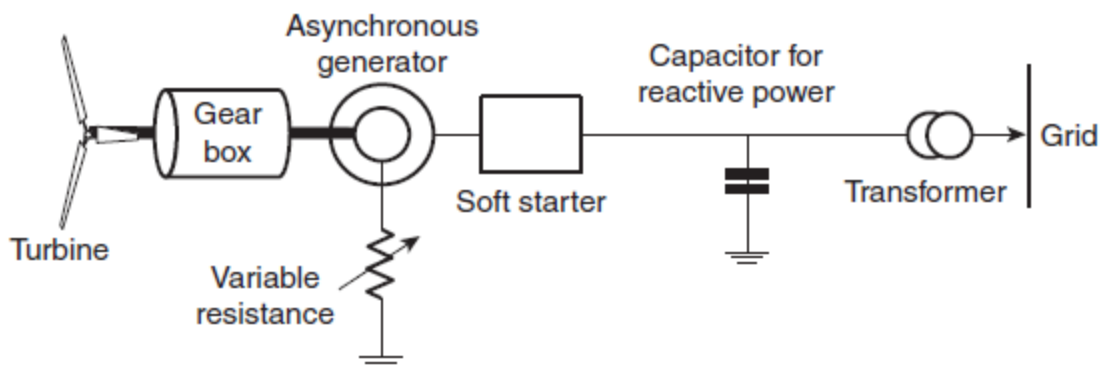


Figura 2.12 Esquema de un generador asíncrono en el que el deslizamiento es gestionado con una resistencia variable en el rotor
Fuente: (Jain, 2011)

Un segundo esquema para lograr velocidad variable es un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG), una variación de un generador de inducción con un rotor bobinado. Tengamos en cuenta que, aunque este es un generador asíncrono, las velocidades relativas del campo magnético son cero. Esto se debe a que el deslizamiento (la diferencia es la velocidad del campo magnético del estator y la velocidad de rotación del rotor) se compensa por la velocidad de la frecuencia de la corriente en el rotor.

Los generadores de inducción tradicionales funcionan con una pequeña cantidad de deslizamiento. Sin embargo, el DFIG funciona con un deslizamiento en el rango del 60 al 110%. Durante la zona de deslizamiento del 60 al 100%, se proporciona energía al rotor desde la electrónica de potencia a una frecuencia que asegura velocidad relativa cero; tenga en cuenta que el estator sigue produciendo energía. Durante la zona de deslizamiento del 100 al 110%, se extrae energía desde el rotor y alimentado a la red. Por encima del 110%, el mecanismo de inclinación de la pala se activa para limitar la energía que se entrega al rotor, la corriente en el rotor está en la frecuencia de deslizamiento; por lo tanto, debe rectificarse y luego invertirse antes de entregar a la red. La figura 2.13 es un esquema de DFIG.

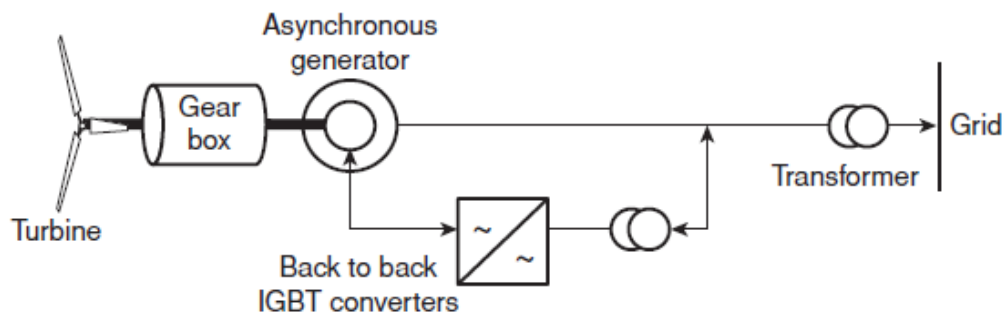


Figura 2.13 Esquema de un generador de inducción de doble alimentación.
Fuente: (Jain, 2011)

Velocidad variable

Los generadores de velocidad variable son más eficientes en la captura de energía eólica en un rango más amplio de velocidades del viento. Por lo tanto, el mercado de aerogeneradores a escala de servicios públicos se ha mudado a este tipo de generador. Tres tipos de generadores, se han vuelto populares en los últimos años: inducción de doble alimentación generador (DFIG), generador síncrono de accionamiento directo (DDSG) con Excitación de CC y generador de imán permanente de accionamiento directo (DDPM).

2.4.2 Generador síncrono

El rotor de un generador síncrono es un imán permanente o un electroimán excitado por CC. El generador más simple es un rotor bipolar (un polo norte y uno polo sur) con el estator conectado a la red. La red suministra el voltaje y la frecuencia, lo que significa que el voltaje y la frecuencia del circuito del estator son fijos. La red también suministra la corriente para energizar el estator. El estator produce un campo magnético giratorio de velocidad angular ω . A carga cero, la velocidad de rotación del rotor es la misma (sin velocidad relativa entre el rotor y el estator) y la diferencia de fase es cero (el polo norte del campo magnético generado por el estator está alineado con el polo sur del rotor). Hay cero torque en este escenario y, por lo tanto, cero potencia.

Desde el punto de vista del circuito eléctrico, la red alimenta el terminal Tensión de V_T al estator y corriente i . El campo magnético giratorio del rotor (que está sincronizado con el campo magnético giratorio del estator) corta el conductor en el estator y, por lo tanto, induce fem en las bobinas del estator; Esta fem generada se llamará E_g . Cuando los polos del estator y del rotor están perfectamente alineados, E_g y V_T están separados 180° . La perfecta alineación de los polos del estator y del rotor significa que el ángulo de la velocidad del campo magnético del estator es la misma que la velocidad angular de Rotación del rotor y los polos opuestos del estator y la cara del rotor entre sí (alineación radial). La magnitud de E_g está determinada por La fuerza del imán permanente o la corriente de excitación DC del electroimán, Suponiendo una resistencia cero en las bobinas del estator, el única carga en el circuito del estator es pura inductancia. Por lo tanto, la corriente que fluye a través de las bobinas del estator es 90° de $(V_T - E_g)$.

Análisis de generador síncrono

La relación entre la velocidad de rotación, la frecuencia de la red y los polos. Es:

$$f = \frac{p}{2} \frac{\omega}{60} \quad \dots(25)$$

Donde

f : es la frecuencia en Hz,

p : es el número de polos

ω : es el Velocidad de rotación del generador en revoluciones por minuto.

Hay dos tipos de generadores síncronos: velocidad fija y velocidad variable. Los generadores de velocidad fija tienen una velocidad angular constante del rotor que se rige por

la frecuencia de la red. El estator de este tipo de generador está conectado a la red, de donde deriva la frecuencia y voltaje terminal. Para un generador conectado a la red con Potencia de CA de 60 Hz y dos polos, la velocidad del rotor debe ser de 3600 rpm o 60 revoluciones por segundo (rps).

Los generadores de velocidad variable no están conectados directamente a la red, pero en cambio están conectados a un convertidor de potencia, que convierte corriente alterna de frecuencia variable (CA) en corriente continua (CC), y luego convierte CC a CA a frecuencia de red. Generadores de velocidad variable normalmente están conectados a turbinas de accionamiento directo sin caja de cambios. La velocidad de los rotores de la turbina y el generador dependen de la velocidad del viento y no son fijos.

La ecuación para la potencia total en las tres fases es:

$$P_T = 3V_T i \quad \dots(26)$$

Trabajando en el dominio complejo, la potencia total es:

$$P_T = P + jQ = 3 \frac{V_T}{Z} (E_g (90^\circ - \delta) - V_T 90^\circ) \quad \dots(27)$$

*La diferencia de fase entre E_g y V_T es δ :

Potencia real

$$P = 3 \frac{V_T}{Z} E_g \text{sen } \delta = P_{\max} \text{sen } \delta \quad \dots(28)$$

Potencia reactiva

$$Q = 3 \frac{V_T}{Z} (E_g \text{cos } \delta - V_T) \quad \dots(29)$$

$$\tau = \frac{P}{\omega} = \frac{P_{\max} \text{sen } \delta}{\omega} = 3 \frac{V_T}{Z\omega} E_g \text{sen } \delta = \tau_{\max} \text{sen } \delta \quad \dots(30)$$

Para los fines de este análisis simplificado, suponemos un generador síncrono de velocidad fija, por lo tanto, las siguientes son constantes: f , E_g , V_T , ω , Z . La red exige valores fijos de voltaje y frecuencia terminales. Frecuencia fija significa fixed fiijo. Por lo tanto, la potencia real P y el par τ son funciones del ángulo de potencia δ . Una gráfica de potencia versus ángulo de carga se encuentra en la figura 2.14.

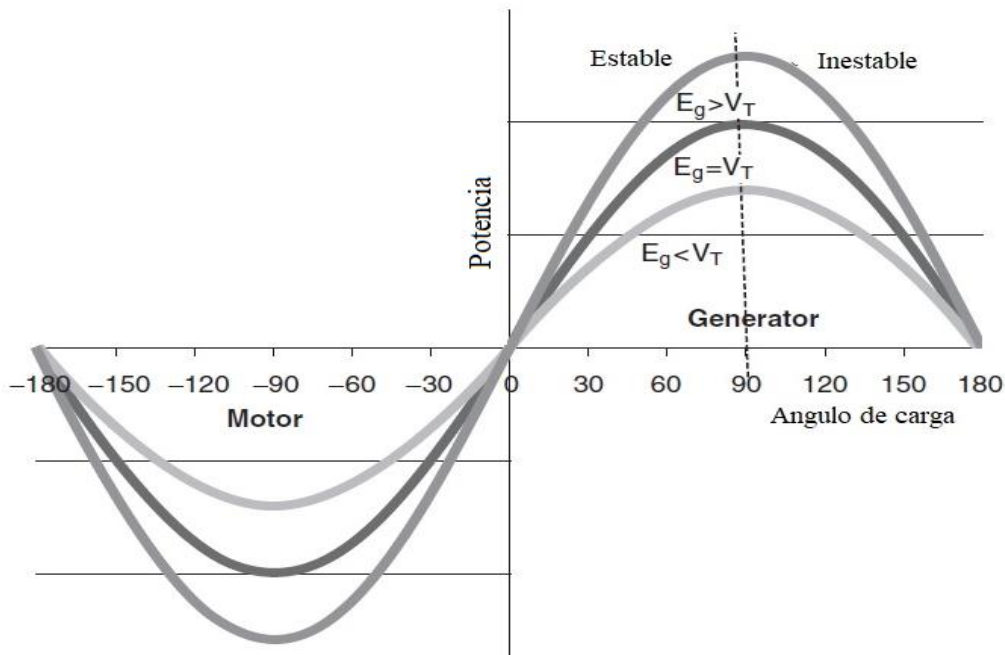


Figura 2.14 Características de potencia de un generador síncrono en curvas de ángulo de potencia versus carga
Fuente: (Jain, 2011)

Una máquina síncrona conectada a la red en la figura 2.15 que tiene su estator conectado directamente a la red se ve obligado a funcionar a una velocidad de rotación fija. A continuación, se describen las máquinas síncronas que no están conectadas directamente a la red. En estas máquinas, la potencia del estator pasa por un convertidor de potencia (CA a CC y luego de vuelta a CA) antes de entregarse a la red.

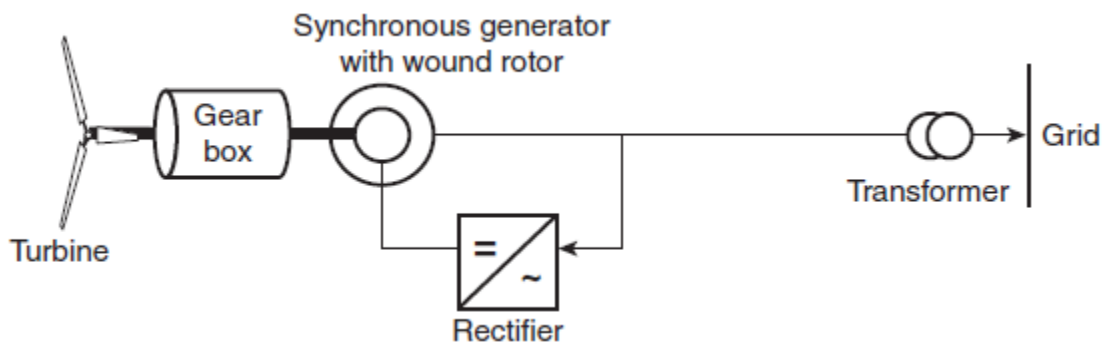


Figura 2.15 Esquema de un generador síncrono conectado a la red con rotor bobinado. El control del factor de potencia se logra controlando la excitación de CC del rotor a través del rectificador.
Fuente: (Jain, 2011)

Generadores síncronos de imanes permanentes de velocidad variable

La naturaleza inherente de la energía eólica exige generadores de velocidad variable. La razón puede verse en las curvas de velocidad del rotor de par para diferentes velocidades del viento. Un generador de velocidad constante puede capturar energía más eficiente solo para una sola velocidad del viento. En la figura 2.11, el generador de velocidad constante captura la potencia máxima solo para una velocidad del viento de 6 m / s; a otras velocidades del viento, este tipo de generador no funciona a la potencia máxima. La turbina de velocidad variable que puede cambiar la velocidad del rotor de modo que la turbina esté funcionando a la potencia máxima para todas las velocidades del viento (por debajo de la velocidad nominal del viento) producirá una mayor producción de energía. Esta es la motivación para el movimiento hacia generadores de velocidad variable.

Un caso especial de generador síncrono de imanes permanentes (PMSG) se discute en el que la velocidad del rotor es variable. Con p como el número de polos en el rotor, y el rotor girando a una velocidad de ω_r , el campo magnético FEM generado en el estator es:

$$E_g = k_{pm} \frac{\omega_r p}{2} \quad \dots(31)$$

donde

k_{pm} : es una constante que depende de la fuerza del imán,

ω_r : es la velocidad del generador y

p : es el número de polos.

Las ecuaciones de circuito y potencia son las mismas que las ecuaciones. (26) al (30). Para un generador síncrono conectado a la red, se conoce V_T . Sin embargo, para un generador de velocidad variable, hay un voltaje de frecuencia variable intermedio (V_g) que se entrega al rectificador.

$$-\bar{E}_g + i_g \bar{Z} + \bar{V}_g = 0 \quad \dots(32)$$

El voltaje, la potencia y el par están dados por

$$V_g = E_g \cos \delta \quad \dots(33)$$

$$P_g = \frac{3}{Z} V_g E_g \sin \delta = \frac{3}{2} \frac{E_g^2}{Z} \sin 2\delta = \frac{3}{8Z} (k_{pm} \omega_r p)^2 \sin 2\delta = \frac{3i_g^2 Z}{\tan \delta} \quad \dots(34)$$

$$\tau_g = \frac{3}{8Z} (k_{pm} p)^2 \omega_r \sin 2\delta = \frac{3}{4L} k_{pm}^2 p \sin 2\delta = T_{\max} \sin 2\delta = \frac{3i_g^2 Z}{\omega_r \tan \delta} = \frac{3i_g^2 L p}{2 \tan \delta} \quad \dots(35)$$

donde $Z = \omega L$ es la inductancia del estator.

La frecuencia angular de la corriente del generador es $\omega = p \omega_r / 2$

Donde ω_r es la velocidad angular del rotor.

Los generadores de velocidad variable generarán voltaje y corriente que varían en magnitud y frecuencia, a diferencia del voltaje constante y frecuencia de la red. Por lo tanto, el voltaje y la frecuencia de estos los generadores están condicionados para ser compatibles con la red mediante la conversión de AC variable a DC y luego a frecuencia constante y voltaje AC (ver figura 2.16. La primera parte de la conversión se realiza con un rectificador y la segunda mitad con un inversor. En consecuencia, se discute un tipo de inversor con modulación de ancho de pulso (PWM). El voltaje y la corriente de CC después de rectificar la salida de CA de PMSG son:

$$V_{DC} = \frac{V_g 3\sqrt{6}}{\pi}, \quad i_{DC} = \frac{i_g \pi}{\sqrt{6}} \quad \dots(36)$$

Como se esperaba, la potencia de CC es

$$P_{DC} = V_{DC} i_{DC} = 3V_g i_g \quad \dots(37)$$

Dirigiendo la atención al lado del viento del rotor, en una turbina de velocidad variable, el rotor de la turbina está conectado directamente al rotor del generador. Una de las ventajas de la turbina de velocidad variable es la capacidad de mantener un rendimiento óptimo cambiando la velocidad del rotor a medida que cambia la velocidad del viento (ver fig. 2.11). A continuación, un mecanismo de control simple es descrito que logra este objetivo de mantener la velocidad de rotación a un valor óptimo. Esto implica controlar cuánta corriente (i_{DC}) consume el inversor PWM (ver Fig. 2.16). Es decir, imagine un controlador en el inversor que regule la cantidad de i_{DC} que extrae el inversor.

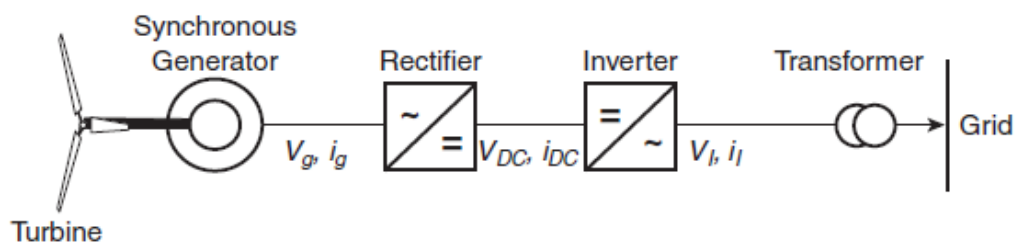


Figura 2.16 Esquema de un generador síncrono de velocidad variable con Rotor de imán permanente.

Fuente: (Jain, 2011)

En resumen, el inversor PWM se controla de tal manera que los valores óptimos de i_{DC} se extraen del rectificador. Este valor óptimo determina el valor óptimo de i_g , que determina el valor óptimo valor del par τ_g (ecuación 35), que determina el valor óptimo de ω . Se puede diseñar un mecanismo de control que logre este objetivo para ajustar la velocidad del rotor de la turbina para lograr una potencia óptima para diferentes velocidades del viento.

Además, dicho sistema puede entregar potencia reactiva a la red; La cantidad de potencia reactiva se controla mediante el uso de un inductor y controlando el voltaje de salida del inversor (VI) y su ángulo de fase (δ) en relación con la red. Si V_1 y V_T son el voltaje de salida del inversor y el voltaje de la red terminal, entonces la potencia real y reactiva entregada a la red es:

$$P_T = 3V_T i_T \cos \phi = \frac{3V_1 V_T \sin \delta}{Z_1} \quad Q_T = 3V_T i_T \sin \phi = \frac{3V_1 V_T \cos \delta}{Z_1} - \frac{3V_T^2}{Z_1} \quad \dots(38)$$

Generador síncrono de accionamiento directo (DDSG)

Enercon popularizó este tipo de generador. Enercon E66 1.5 MW. El generador tiene 72 polos y produce energía de seis fases, que es rectificado a DC. Esta corriente continua alimenta al rotor y a un inversor. Para acomodar la gran cantidad de polos, el rotor es grande. Como ilustración, considere una turbina DDSG con una velocidad de rotación de 10 a 22 rpm. En comparación con un generador de inducción de 1500 rpm, el par es aproximadamente 70 veces por la misma cantidad de energía.

Por lo tanto, el volumen de los generadores DDSG es grande, que generalmente es logrado aumentando el radio. Un mecanismo de control, similar al descrito para PMSG, puede usarse para capturar potencia óptima cambiando la velocidad angular del rotor. Un esquema del DDSG está en la figura 2.17.

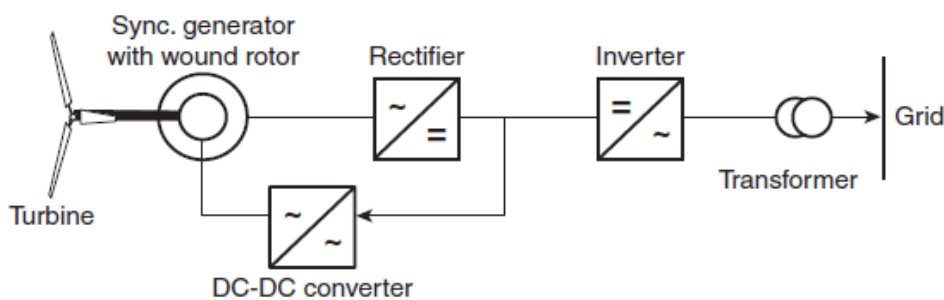


Figura 2.17 Esquema de un generador síncrono de accionamiento directo. Salida del generador es una potencia de frecuencia variable que se rectifica y luego se invierte a frecuencia de red.

Fuente: (Jain, 2011)

2.5 Generadores en las configuraciones de aerogeneradores más comúnmente aplicadas

Las configuraciones de las turbinas eólicas se pueden clasificar de manera adicional con respecto al tipo de control de potencia (pala): bloqueo, paso, bloqueo activo. La Tabla 2.1 indica los diferentes tipos de configuraciones de aerogeneradores, teniendo en cuenta ambos criterios (control de velocidad y control de potencia). Cada combinación de estos dos criterios recibe una etiqueta; por ejemplo, el tipo A0 denota la turbina eólica de velocidad fija controlada. Las zonas grises en la Tabla 2.1 indican las combinaciones que no se usan en la industria de turbinas eólicas en la actualidad (por ejemplo, Tipo B0).

Tabla 2.1
Conceptos de aerogeneradores.

Control de velocidad		Control de poder		
		Stall	Pitch	Active stall
Velocidad fija	Tipo A	Tipo A0	Tipo A1	Tipo A2
Velocidad variable	Tipo B	Tipo B0	Tipo B1	Tipo B2
	Tipo C	Tipo C0	Tipo C1	Tipo C2
	Tipo D	Tipo D0	Tipo D1	Tipo D2

Fuente:Ackerman

Analizaremos principalmente los tipos de aerogeneradores estándar, que se muestran en la Tabla 2.1. No se discutirán otros diseños de aerogeneradores alternativos, ligeramente diferentes. Por lo tanto, solo las configuraciones típicas de aerogeneradores y sus ventajas y desventajas se presentarán en la siguiente discusión.

Tipo A: velocidad fija

Esta configuración denota el aerogenerador de velocidad fija con un generador asíncrono de inducción de jaula de ardilla (SCIG) conectado directamente a la red a través de un transformador. Dado que el SCIG siempre extrae potencia reactiva de la red, esta configuración utiliza un banco de condensadores para la compensación de potencia reactiva. Una conexión a la red más suave se logra utilizando un arrancador suave.

Independientemente del principio de control de potencia en una turbina eólica de velocidad fija, las fluctuaciones del viento se convierten en fluctuaciones mecánicas y, en consecuencia, en fluctuaciones de la potencia eléctrica. En el caso de una red débil, estas pueden producir fluctuaciones de voltaje en el punto de conexión. Debido a estas fluctuaciones de voltaje, la turbina eólica de velocidad fija extrae cantidades variables de energía reactiva de la red eléctrica (a menos que haya un banco de condensadores), lo que aumenta tanto las fluctuaciones de voltaje como las pérdidas de línea. Por lo tanto, los principales inconvenientes de este concepto son que no admite ningún control de velocidad, requiere una rejilla rígida y su construcción mecánica debe ser capaz de tolerar una alta tensión mecánica. Las tres versiones (Tipo A0, Tipo A1 y Tipo A2) de la turbina eólica de velocidad fija Tipo A se utilizan en la industria de las turbinas eólicas y se pueden caracterizar de la siguiente manera.

Tipo A0: control de pérdida

Este es el concepto convencional aplicado por muchos fabricantes daneses de aerogeneradores durante los años 80 y 90 (es decir, un concepto de aerogenerador de tres palas regulado en contra del viento). Ha sido muy popular debido a su precio relativamente bajo, su simplicidad y su robustez. Los aerogeneradores controlados por pérdida de velocidad no pueden realizar arranques asistidos, lo que implica que la potencia de la turbina no puede controlarse durante la secuencia de conexión.

Tipo A1: control de paso

Estos también han estado presentes en el mercado. Las principales ventajas de una turbina Tipo A1 son que facilita el control de la potencia, el arranque controlado y la parada de emergencia. Su principal inconveniente es que, a altas velocidades del viento, incluso pequeñas variaciones en la velocidad del viento dan como resultado grandes variaciones en la potencia de salida. El mecanismo de inclinación no es lo suficientemente rápido para evitar tales fluctuaciones de potencia. Al lanzar la pala, las variaciones lentas en el viento se pueden compensar, pero esto no es posible en el caso de ráfagas.

Tipo A2: control de bloqueo activo

Estos se han vuelto populares recientemente. Esta configuración mantiene básicamente todas las características de calidad de la energía del sistema regulado por pérdida. Las mejoras se encuentran en una mejor utilización del sistema general, como resultado del uso del control de bloqueo activo. El acoplamiento flexible de las palas al cubo también facilita las paradas y los

arranques de emergencia. Un inconveniente es el mayor precio que surge del mecanismo de lanzamiento y su controlador.

Como se nota en la Tabla 2.1, el concepto de velocidad variable se usa en las tres configuraciones, Tipo B, Tipo C y Tipo D. Debido a las consideraciones de limitación de potencia, el concepto de velocidad variable se usa en la práctica hoy en día solo junto con un mecanismo de paso rápido. Los aerogeneradores de velocidad variable o los aerogeneradores controlados por velocidad activa no se incluyen aquí, ya que potencialmente carecen de la capacidad para una rápida reducción de potencia. Si la turbina eólica está funcionando a la máxima velocidad y hay una fuerte ráfaga, el par aerodinámico puede aumentar críticamente y puede resultar en una situación fuera de control. Por lo tanto, como se ilustra en la Tabla 2.1, el Tipo B0, el Tipo B2, el Tipo C0, el Tipo C2, el Tipo D0 y el Tipo D2 no se usan en la industria de turbinas eólicas de hoy.

Tipo B: velocidad variable limitada

Esta configuración corresponde a la turbina eólica de velocidad variable limitada con resistencia del rotor del generador variable, conocida como OptiSlip. Utiliza un generador de inducción de rotor bobinado (WRIG) y ha sido utilizada por el fabricante danés Vestas desde mediados de los años noventa. El generador está directamente conectado a la red. Un banco de condensadores realiza la compensación de potencia reactiva. Una conexión a la red más suave se logra utilizando un arrancador suave. La característica única de este concepto es que tiene una resistencia de rotor adicional variable, que se puede cambiar mediante un convertidor controlado ópticamente montado en el eje del rotor. Por lo tanto, la resistencia total del rotor es controlable. Este acoplamiento óptico elimina la necesidad de costosos anillos deslizantes que requieren escobillas y mantenimiento. La resistencia del rotor puede ser variada y por lo tanto se controla el deslizamiento. De esta manera, se controla la potencia de salida en el sistema. El rango del control dinámico de velocidad depende del tamaño de la resistencia variable del rotor. Normalmente, el rango de velocidad es de 0 - 10% por encima de la velocidad síncrona. La energía que proviene de la unidad de conversión de energía externa se descarga como pérdida de calor.

Wallace y Oliver (1998) describen un concepto alternativo utilizando componentes pasivos en lugar de un convertidor electrónico de potencia. Este concepto logra un 10% de deslizamiento, pero no admite un deslizamiento controlable.

Tipo C: velocidad variable con convertidor de frecuencia de escala parcial

Esta configuración, conocida como el concepto de generador de inducción de doble alimentación (DFIG), corresponde al aerogenerador de velocidad variable limitada con un generador de inducción de rotor bobinado (WRIG) y un convertidor de frecuencia de escala parcial (con una potencia nominal de aproximadamente el 30% de la potencia del generador) en el Circuito del rotor (en el Capítulo 2 muestra la góndola de una turbina Tipo C). El convertidor de frecuencia de escala parcial realiza la compensación de potencia reactiva y la conexión a la red más suave. Tiene un rango más amplio de control de velocidad dinámico en comparación con el OptiSlip, dependiendo del tamaño del convertidor de frecuencia. Normalmente, el rango de velocidad comprende una velocidad síncrona del -40% a +30%. El convertidor de frecuencia más pequeño hace que este concepto sea atractivo desde un punto de vista económico. Sus principales inconvenientes son el uso de anillos deslizantes y la protección en el caso de fallas en la red.

Tipo D: velocidad variable con convertidor de frecuencia de escala completa

Esta configuración corresponde a la turbina eólica de velocidad variable completa, con el generador conectado a la red a través de un convertidor de frecuencia de escala completa. El convertidor de frecuencia realiza la compensación de potencia reactiva y la conexión a la red más suave. El generador puede ser excitado eléctricamente [generador síncrono de rotor bobinado (WRSG) o WRIG) o por un imán permanente [generador síncrono de imán permanente (PMSG)].

Algunos sistemas de turbina eólica de velocidad variable completa no tienen caja de cambios. En estos casos, se utiliza un generador multipolo de accionamiento directo con un gran diámetro, por ejemplo. Las compañías de aerogeneradores Enercon, Made y Lagerwey son ejemplos de fabricantes que utilizan esta configuración.

III. Materiales y métodos

3.1 Método(s) de la investigación

La presente investigación se aplicaron los siguientes métodos:

Método deductivo. - Ya que el presente plan se fue de lo general a lo específico; es decir, que parte de un enunciado general del que se van desentrañando partes o elementos específicos.

Método descriptivo. - Porque se buscó responder la pregunta acerca de cómo es una determinada parte de la realidad en este caso diferentes tipos de generadores usados en los aerogeneradores para elegir el que cumpla con la condición de ser usado en zonas rurales del Perú.

3.2 Diseño

El tipo de diseño fue descriptivo, ya que lo que se hizo fue para analizar y conocer las características, rasgos, propiedades y cualidades de un hecho o fenómeno de la realidad en un momento determinado del tiempo.

3.3 Población y muestra

Población: generadores usados en los diferentes tipos de aerogeneradores en los últimos años

Muestra: el tipo de muestra es no probabilística intencionada ya que se seleccionará según el criterio del investigador, procurando que la muestra sea lo más representativa posible, esto es posible porque el investigador conoce objetivamente las características de la población que se está estudiando, sin embargo, se procede a seleccionar la muestra en forma intencional eligiendo aquellos elementos que considera convenientes y los más representativos

Muestra: generadores usados en los aerogeneradores de eje horizontal

3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para la presente investigación se usó las siguientes técnicas:

a) La técnica de análisis documental, utilizando como instrumentos fichas textuales y de resumen y recurriendo como fuentes a libros especializados y documentos oficiales que usamos para obtener datos de los dominios de las variables: *conceptos básicos, técnicas avanzadas*.

b) La técnica de la observación de campo, utilizando como instrumento un protocolo o guía de observación de campo, participando como informantes el propio investigador, que fue usado para para obtener los datos

3.5 Procedimiento de la recolección de datos

Implicó elaborar un plan detallado de procedimientos que nos llevó a reunir datos para el propósito de la presente investigación.

La elaboración de este plan implicó determinar:

- Las Fuentes y su localización
- Los medios o métodos para recolectar datos

Para desarrollar el plan se tuvo en consideración:

- Las variables de la investigación
- La muestra
- Los recursos disponibles

3.6 Técnicas de procesamiento y análisis de los resultados

3.6.1 Técnicas de procesamiento

Los datos obtenidos mediante la aplicación de las técnicas e instrumentos antes indicados, recurriendo a los informantes o fuentes también ya indicados, serán incorporados al programa a los programas Word, Excel y foto editor y con ellos se hicieron reportes, gráficos precisiones porcentuales, prelaaciones, ordenamientos de mayor a menor, etcétera.

3.6.2 Análisis de los resultados

Con respecto a las informaciones presentadas como figuras, resúmenes, gráficos, cuadros, etc., se formularán apreciaciones objetivas. Las apreciaciones resultantes del análisis correspondiente a informaciones del dominio de variables se usaron como premisas para contrastar la hipótesis, la cual nos dio base para formular las conclusiones de la investigación.

IV. Resultados y discusión

4.1 Identificación de los diferentes tipos de generadores eléctricos utilizados en aerogeneradores.

Básicamente, una turbina eólica puede estar equipada con cualquier tipo de generador trifásico. Hoy en día, la demanda de corriente eléctrica compatible con la red se puede satisfacer conectando convertidores de frecuencia, incluso si el generador suministra corriente alterna (CA) de frecuencia variable o corriente continua (CC). (Ackermann, 2005)

Se pueden usar varios tipos genéricos de generadores en aerogeneradores:

- **Generador asíncrono (inducción):**
 - generador de inducción de jaula de ardilla (SCIG);
 - generador de inducción de rotor bobinado (WRIG):
 - generador de inducción OptiSlip (OSIG),
 - Generador de inducción de doble alimentación (DFIG).

- **Generador síncrono:**
 - generador de rotor bobinado (WRSG);
 - generador de imán permanente (PMSG).

- **Otros tipos de interés potencial:**
 - generador de alto voltaje (HVG);
 - interruptor generador de reluctancia (SRG);
 - Generador de flujo transversal (TFG).

En base a la información Wind Energy Engineering se ha construido la tabla 4.1 donde se resumen las propiedades de los generadores síncronos y asíncronos (Jain, 2005)

Tabla 4.1

Comparación de propiedades de un generador síncrono y asíncrono

Generador asíncrono	Generador síncrono
Simple, económico, resistente y confiable.	Es más costoso.
Requiere potencia reactiva. Se pueden requerir condensadores para gestionar la potencia reactiva.	No requiere potencia reactiva; puede proporcionar potencia reactiva bajo demanda
El generador asíncrono tradicional no puede funcionar a velocidad variable.	Un generador síncrono de velocidad constante del rotor, no puede capturar la energía eólica de manera eficiente.
El generador Opti Slip o DFIG puede capturar la energía eólica de manera más eficiente.	Un generador síncrono de velocidad variable captura la energía eólica de la manera más eficiente.
Se requiere un circuito de arranque suave para gestionar el flujo de entrada de una gran corriente durante el arranque.	Durante el tiempo de inicio, hay una baja demanda en la red para la corriente
Durante el funcionamiento, exige potencia reactiva, que puede ser del orden del 30% de los kVA que se entregan a la red	Durante el funcionamiento, puede suministrar energía reactiva y activa.
Las ráfagas no causan problemas de sincronización. Con una resistencia externa variable, se permiten deslizamientos negativos más grandes.	Las ráfagas de viento pueden causar problemas de estabilidad para el generador de velocidad constante, ya que puede salir de la sincronización

Fuente: (Ackermann, 2005)

4.1.1 características de funcionamiento de las turbinas eólicas

Las turbinas eólicas pueden funcionar con una velocidad fija o una velocidad variable, en la tabla 4.2 se describen ventajas de cada una de ellas

Tabla 4.2

Principales ventajas de los sistemas de regulación de velocidad fija y variable

Sistemas de velocidad fija	Sistemas de velocidad variable
Sencillo y sistema eléctrico menos caro	Mayor eficiencia
Menor probabilidad de resonancia mecánica	Par motor más regular
Ausencia de armónicos en la potencia inyectada en la red	Mejor calidad de la potencia entregada
Menor coste de inversión	Sin problemas de sincronismo

Fuente ABB

Aerogeneradores de velocidad fija

Se utilizan en gran medida por su robustez y simplicidad constructiva, por su bajo coste relativo y por la simplicidad de su conexión y desconexión de la red (figura4.1).

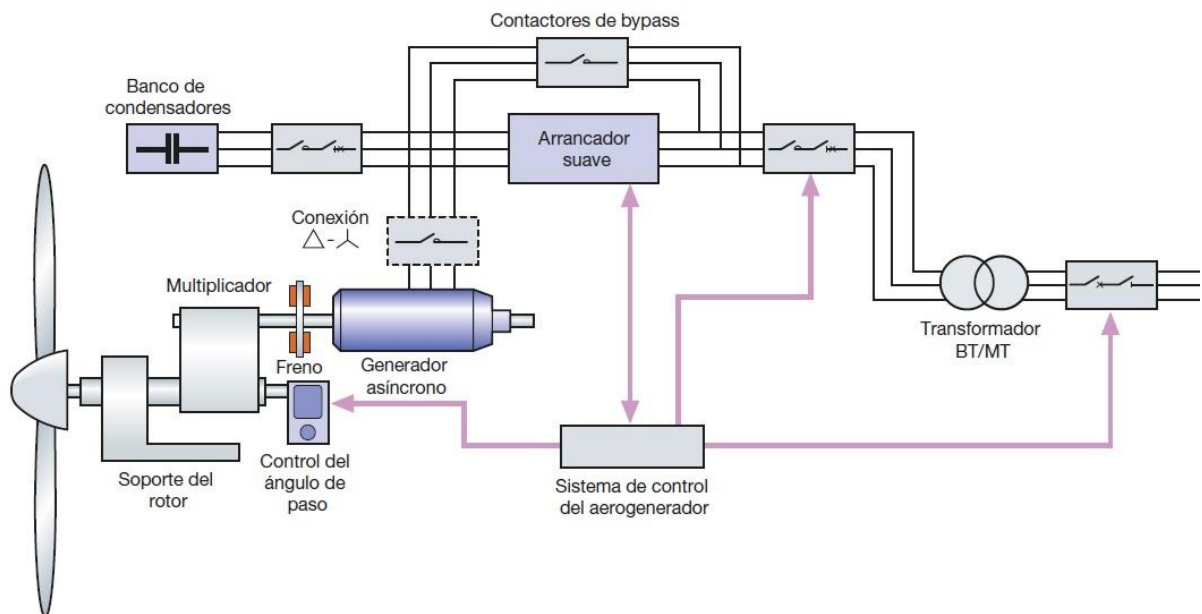


Figura 4.1 Aerogenerador de velocidad fija con generador asíncrono

Fuente: (ABB, 2012)

A principios de la década de 1990, los aerogeneradores funcionaban a una velocidad fija. Es decir, la velocidad del rotor es fija y determinada por la frecuencia de la red de suministro.

Generalmente equipados con un generador de inducción (jaula de ardilla o rotor bobinado) que esté directamente conectado a la red. Algunos aerogeneradores de velocidad fija tienen dos juegos de bobinado: uno se usa a velocidades de viento bajas (8 polos) y el otro a velocidades de viento medias y altas (4–6 polos). (Larsson, 2000).

Aerogeneradores de velocidad variable

Existen varias soluciones que permiten al rotor funcionar a velocidad variable, manteniendo al mismo tiempo la frecuencia constante. Estas soluciones pueden ser de naturaleza mecánica y eléctrica, aunque en la actualidad las más utilizadas son de tipo eléctrico, incorporando alguna de las siguientes configuraciones.

Tabla 4.3
Soluciones de funcionamiento del rotor a velocidad variable

Tipo de generador	Característica de funcionamiento
Asíncronos de rotor bobinado	Con resistencia variable externa
Asíncronos de rotor bobinado	Con convertidor de potencia interpuesto entre el rotor y la red. (configuración doblemente alimentado)
Asíncronos de jaula de ardilla	Con convertidor de potencia interpuesto entre el estator y la red. (configuración de convertidor total)
Síncronos	Con convertidor electrónico de potencia interpuesto entre el estator y la red. (configuración de convertidor total)

Fuente: (ABB, 2012)

Se menciona algunas características resumidas de cada solución de funcionamiento

a) Generador asíncrono con resistencia variable

Añadiendo una resistencia variable externa en serie con los bobinados del rotor de un generador asíncrono, se puede obtener una variación del par electromagnético del generador y de la velocidad a la que este se suministra.

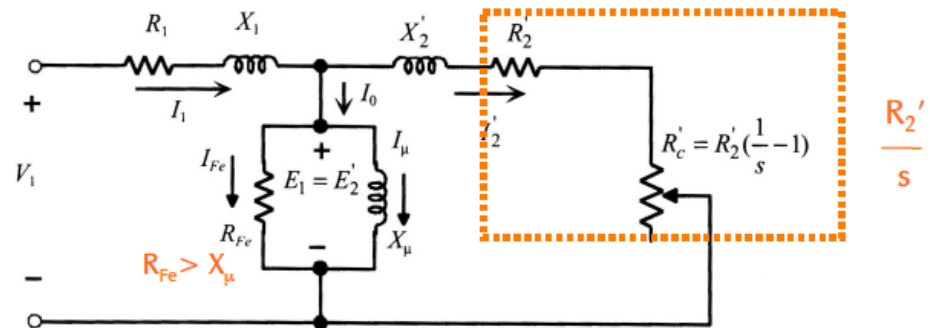


Figura 4.2 Esquema eléctrico equivalente de un generador asíncrono de resistencia variable R_c . Fuente: (Fraile Mora, 2008)

b) Configuración doblemente alimentado

Para no perder la potencia disipada en forma de calor en la resistencia añadida, se puede interponer un convertidor electrónico de potencia entre el rotor del generador asíncrono de anillos y la red, que primero convierte a continua la potencia en corriente alterna excedente en el rotor mediante un rectificador controlado, y luego la reconvierta en alterna a la frecuencia nominal mediante un inversor, inyectándola en la red (figura 4.3).

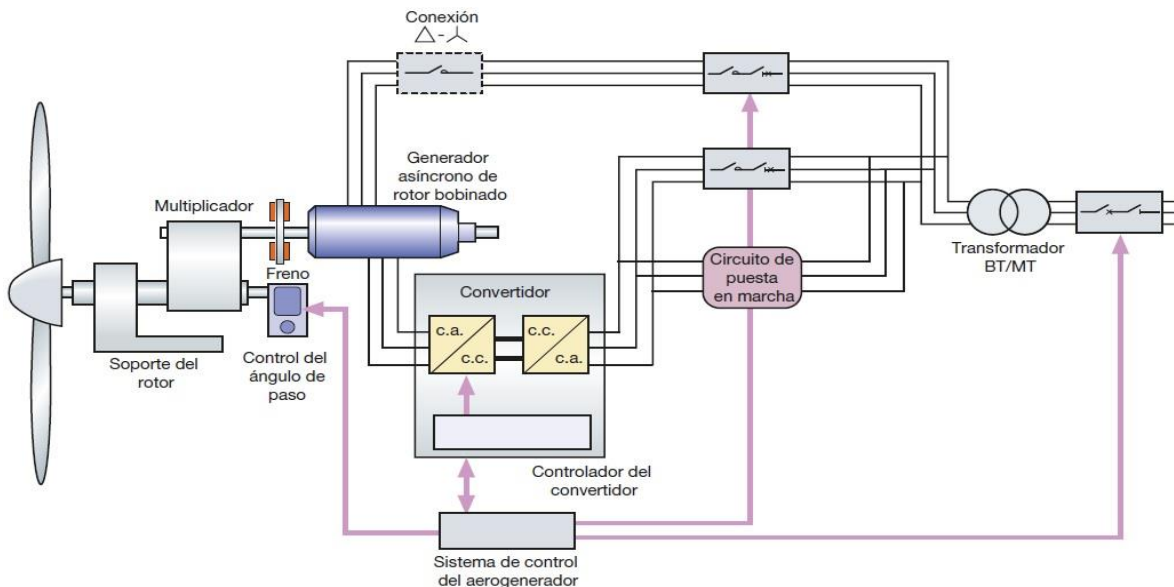


Figura 4.3 Aerogenerador de velocidad variable generador doblemente alimentado (DFIG). Fuente: (ABB, 2012)

c) Generador asíncrono y convertidor

En los aerogeneradores de velocidad variable puede usarse un generador asíncrono de jaula de ardilla interponiendo un convertidor electrónico entre el generador y la red. Este convertidor desacopla y desvincula la frecuencia del campo magnético rotativo de la frecuencia de la red; la frecuencia del campo magnético rotativo se modula para controlar la velocidad de rotación del rotor.

De forma análoga a la configuración doblemente alimentado, se dispone un sistema electrónico de potencia, pero esta vez conectado al estator del generador.

d) Generador síncrono y convertidor

Dado que la frecuencia a la salida del alternador depende de la velocidad de rotación del rotor y del número de pares de polos, para poder usar un generador síncrono en un aerogenerador de velocidad variable manteniendo siempre constante la frecuencia en el lado de red hay que interponer un convertidor de potencia de dos etapas:

1. Un rectificador tipo puente de diodos o controlado con tiristores convierte las magnitudes eléctricas alternas de frecuencia variable a la salida del alternador en magnitudes continuas;
2. Mediante un enlace de continua, se alimenta un inversor que reconvierte las magnitudes continuas de tensión y corriente en magnitudes alternas a la frecuencia de red.

Estas etapas deben gestionar toda la potencia eléctrica generada (figura 4.6):

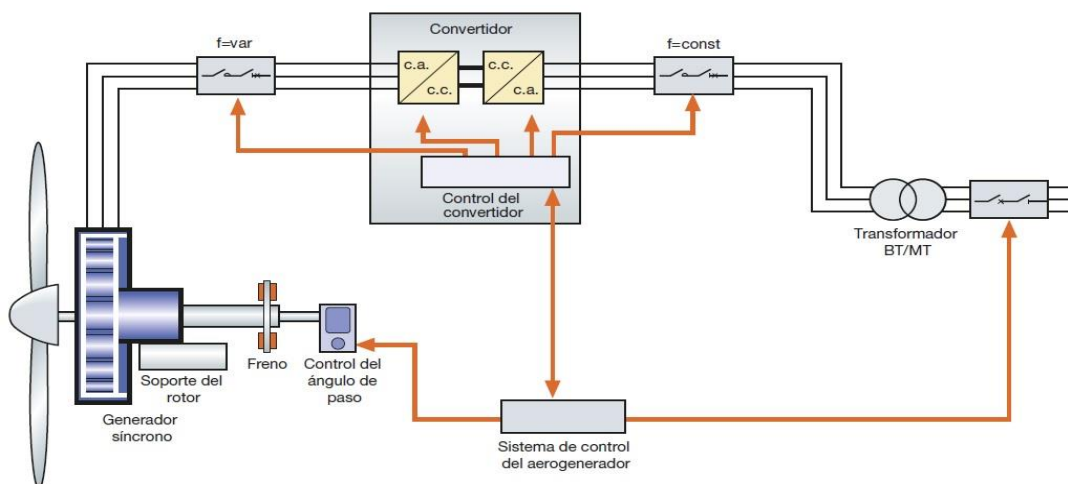


Figura 4.4 Generador síncrono con convertidor de potencia en un aerogenerador de velocidad variable

Fuente: (ABB, 2012)

El uso de la configuración alternador-convertidor de potencia permite, por tanto, desacoplar el generador de la red, reduciendo de esta manera las vibraciones mecánicas del aerogenerador durante los fallos de red.

La conversión de alta velocidad es similar a la configuración doblemente alimentada y comúnmente utiliza un multiplicador de tres etapas y un turboalternador (hasta 2000 rpm), con frecuencia de imanes permanentes, o un generador asíncrono (figura 4.5).

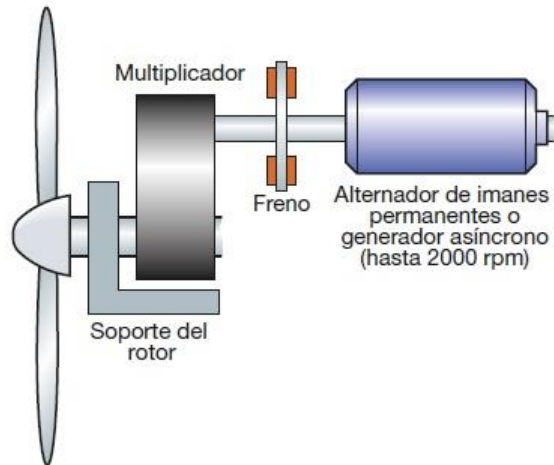


Figura 4.5 Turboalternador de imanes permanentes, o un generador asíncrono.
Fuente: (ABB, 2012)

En la conversión de media velocidad se usa en cambio un multiplicador de una o dos etapas con un alternador compacto de imanes permanentes (hasta 500 rpm) (figura 4.6a).

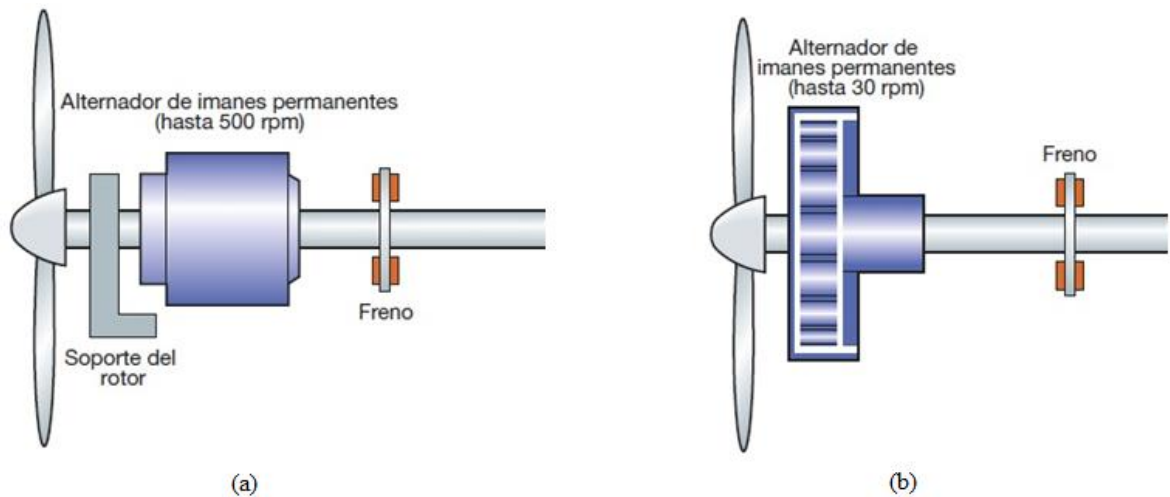


Figura 4.6 Conversión de media velocidad (a) y Conversión de baja velocidad (b). Con alternadores de imanes permanentes
Fuente: (ABB, 2012)

La conversión de baja velocidad suprime el multiplicador y usa un alternador lento (hasta 30 rpm), generalmente de imanes permanentes o de excitación separada, y por consiguiente con un número de polos más elevado que en los casos precedentes (figura 4.8b).

4.1.2 Generadores de última generación

Las configuraciones de aerogeneradores más comúnmente aplicadas se clasifican tanto por su capacidad para controlar la velocidad como por el tipo de control de potencia que utilizan. Aplicando el control de velocidad como criterio, existen cuatro tipos diferentes de aerogeneradores dominantes, como se ilustra en la Figura 4.7

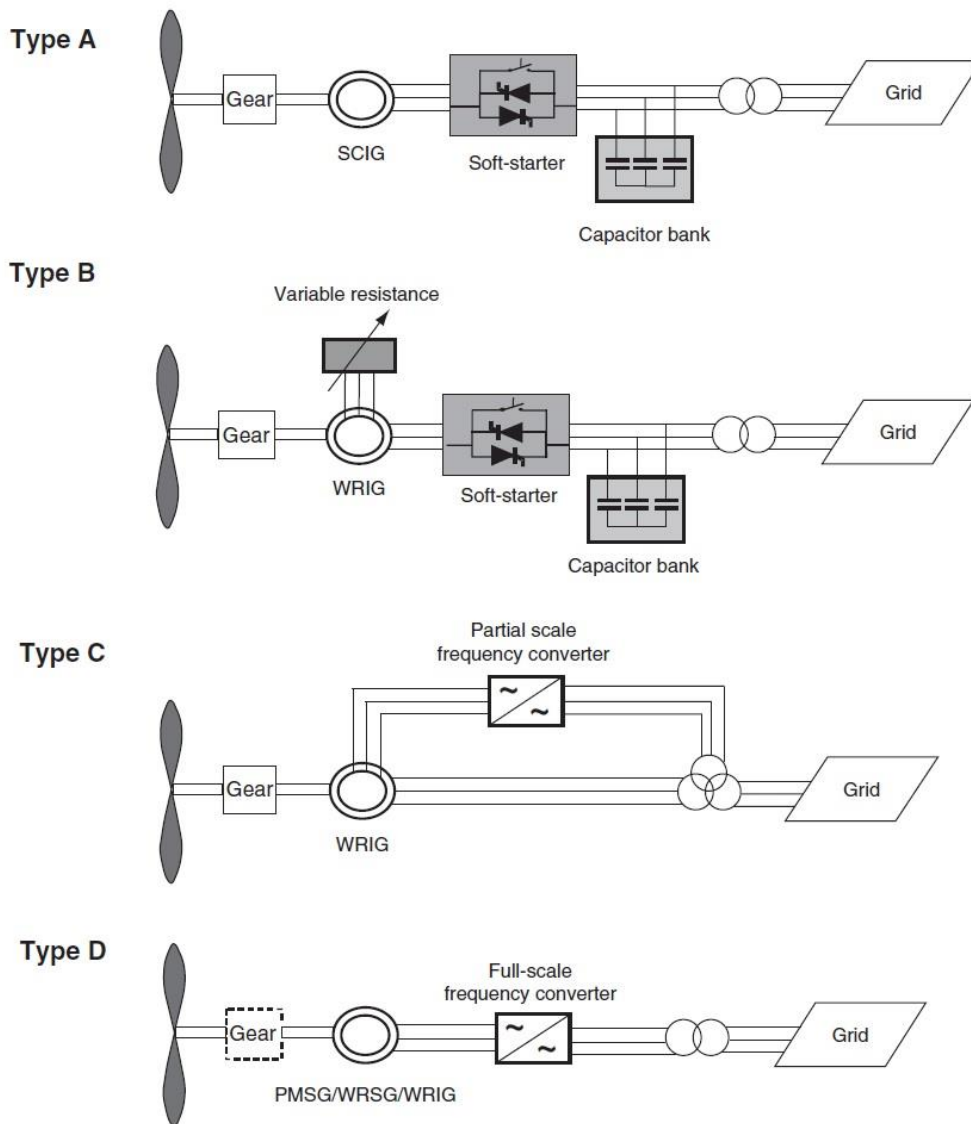


Figura 4.7 Configuraciones típicas de aerogeneradores.

Fuente (Ackermann,2005)

Donde:

SCIG = generador de inducción de jaula de ardilla;

WRIG = generador de inducción de rotor bobinado;

PMSG = generador síncrono de imán permanente;

WRSG = generador síncrono de rotor bobina

**La línea discontinua en la configuración Tipo D indica que puede haber o no una caja de cambios*

4.1.3 Estrategias de control

Las configuraciones de las turbinas eólicas se pueden clasificar de manera adicional con respecto al tipo de control de potencia (pala): bloqueo, paso, bloqueo activo. La Tabla 4.4 indica los diferentes tipos de configuraciones de aerogeneradores, teniendo en cuenta ambos criterios (control de velocidad y control de potencia).

Tabla 4.4

Diferentes tipos de configuraciones de aerogeneradores, teniendo en cuenta ambos criterios (control de velocidad y control de potencia).

Control de velocidad		Control de potencia		
		Stall	Pitch	Active stall
Velocidad fija	Tipo A	Tipo A0	Tipo A1	Tipo A2
Velocidad variable	Tipo B	Tipo B0	Tipo B1	Tipo B2
	Tipo C	Tipo C0	Tipo C1	Tipo C2
	Tipo D	Tipo D0	Tipo D1	Tipo D2

Fuente.(Ackermann,2005)

Generalmente, los objetivos de las estrategias de control de un aerogenerador son:

- maximizar la producción energética manteniendo el funcionamiento de los diversos componentes del aerogenerador dentro de unos límites de velocidad y de carga;
- evitar cargas extremas, incluidas cargas transitorias excesivas y cargas que pueden causar resonancia, minimizando los esfuerzos de fatiga;
- inyectar en la red una potencia de calidad aceptable;
- garantizar un funcionamiento seguro del aerogenerador.

En la figura 4.8 se muestra una estrategia de control en función de la velocidad del viento para aerogeneradores de velocidad de rotación fija o variable y de regulación pasiva de pérdida o activa del ángulo de paso.

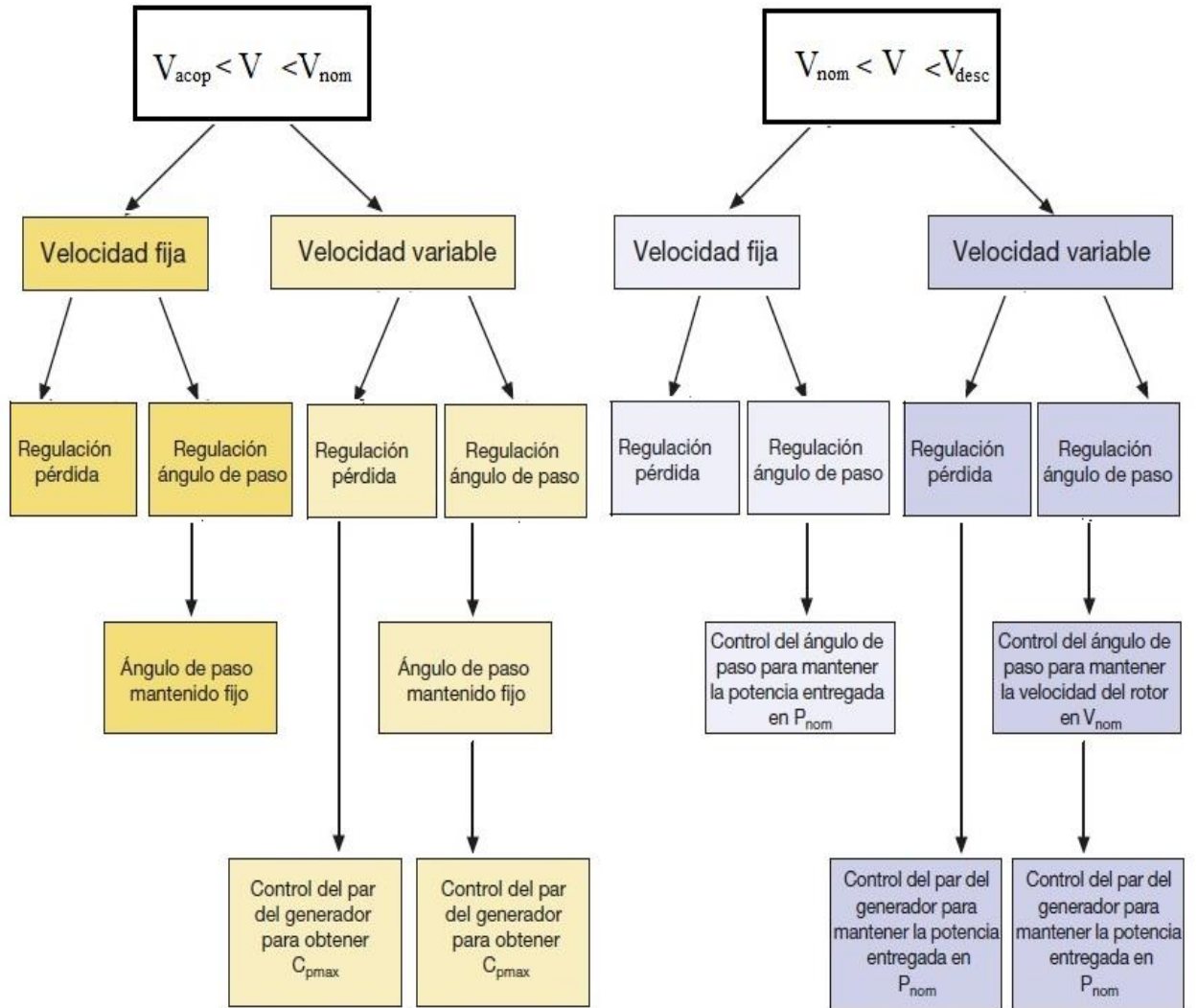


Figura 4.8 Estrategia de control en función de la velocidad del viento para aerogeneradores de velocidad de rotación fija o variable

Fuente: (ABB, 2012)

4.2 Generadores eléctricos que pueden ser usados con turbinas eólicas basados las características del viento y el nivel de potencia a generar.

Dentro del alcance de este estudio, se presenta un estudio comparativo de diferentes sistemas de conversión de energía eólica (WECS) con generadores que describen sus conceptos, clasificaciones, ventajas, desventajas y tendencias actuales del mercado.

A. Criterio de velocidad fija

Esta configuración denota la turbina eólica de velocidad fija con un generador de inducción de jaula de ardilla asíncrono (SCIG), ver Figura 4-9. Dado que el SCIG siempre extrae potencia reactiva de la red, esta configuración utiliza un banco de condensadores para la compensación de potencia reactiva. Se logra una conexión de red más suave utilizando un arrancador suave. (Ackermann, 2005)

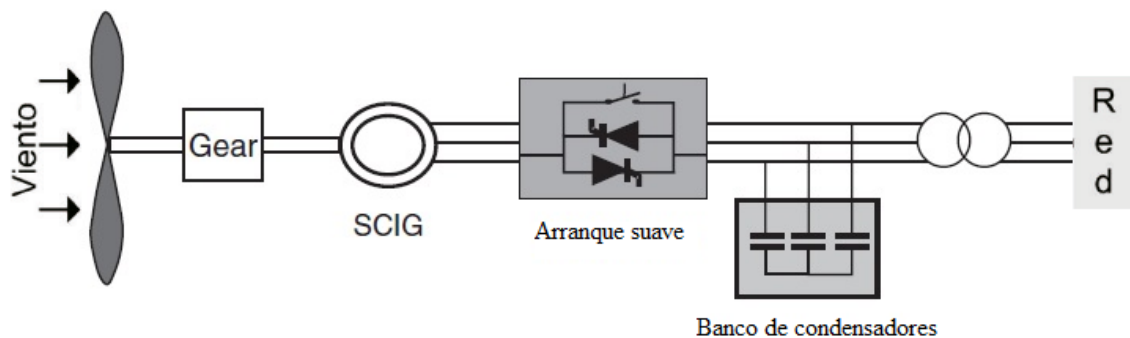


Figura 4.9 Esquema de un concepto de velocidad fija con sistema SCIG

Fuente: (Ackermann, 2005)

Tabla 4.5
Generador de inducción de jaula de ardilla (SCIG)

SCIG	
Ventajas	Desventajas
<p>-Es mecánicamente simple, muy robusto y estable.</p> <p>-Masa específica baja (kg / kW) y diámetro más pequeño (número bajo de polos), por lo tanto, un costo más bajo.</p>	<p>-No es posible el control de velocidad. Salvo se use SCIG que se puede cambiar por polos.</p> <p>-La velocidad de la turbina no se puede ajustar a la velocidad del viento para optimizar la eficiencia aerodinámica.</p>

-Permite que las máquinas con regulación de pérdida operen a una velocidad constante, por lo que proporciona una frecuencia de control estable.

-Las fluctuaciones de la velocidad del viento se traducen directamente en variaciones de par electromecánico que causan altas tensiones mecánicas y de fatiga en el sistema.

Fuente.(Ackermann, 2005)

B. Criterio de velocidad variable limitada

Esta configuración corresponde a la turbina eólica de velocidad variable limitada con resistencia del rotor del generador variable, conocida como OptiSlip. Utiliza un generador de inducción de rotor bobinado (WRIG) y ha sido utilizado por el fabricante danés Vestas desde mediados de la década de 1990. El generador está conectado directamente a la red. El rango del control de velocidad dinámico depende del tamaño de la resistencia variable del rotor. Típicamente, el rango de velocidad es 10% por encima de la velocidad síncrona. La energía proveniente de la unidad de conversión de energía externa se descarga como pérdida de calor. (Ackermann, 2005)

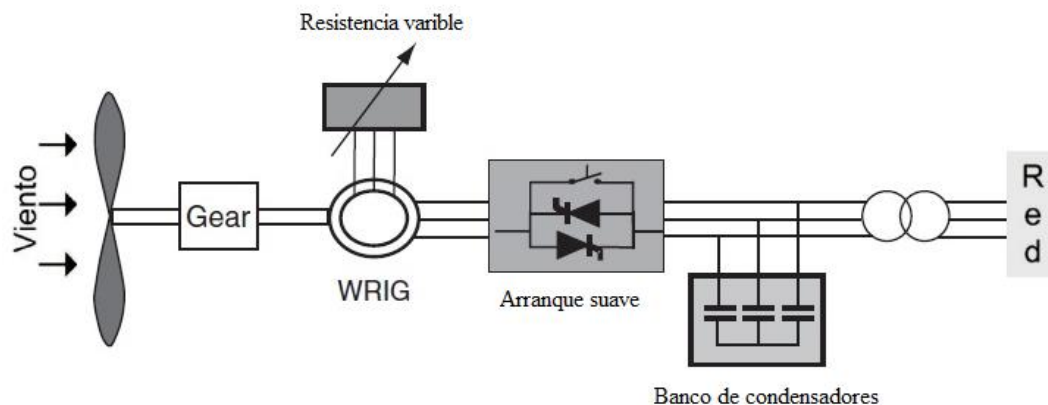


Fig. 4.10 Esquema de un concepto de velocidad variable limitada con el sistema WRIG
Fuente: (Ackermann, 2005)

Tabla 4.6
 Generador de inducción de rotor bobinado (WRIG)

WRIG

Ventajas

Desventajas

-Se puede lograr una velocidad variable.

-Se requiere compensación de potencia reactiva y arrancador suave.

-Debido al sistema de caja de cambios y convertidor, los costos se incrementan.

Fuente.(Ackermann, 2005)

C. Criterio de velocidad variable con un convertidor de escala parcial

Esta configuración se conoce como el concepto de "Generador de Inducción de Alimentación Doble (DFIG)" porque la tensión del estator se aplica desde la red conectada directamente y la tensión del rotor queda impresa por el convertidor de potencia de escala parcial. El convertidor del lado del rotor controla el generador en términos de potencia activa y reactiva, mientras que el convertidor del lado de la red controla la tensión del enlace de CC y garantiza el funcionamiento a un factor de potencia alto. (IEEE, 2011)

Este concepto se ilustra en la figura 4.11

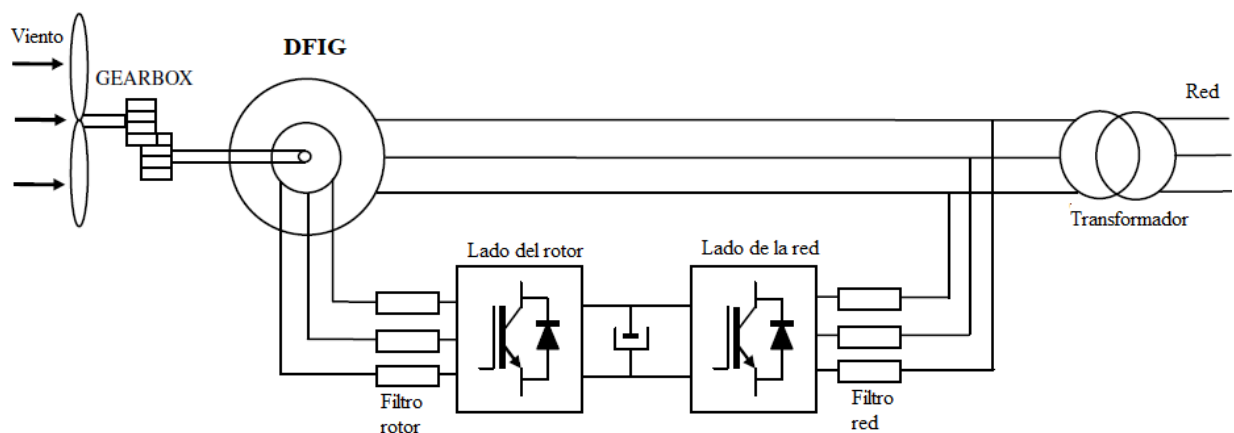


Figura 4.11 Esquema de un concepto de velocidad variable con el sistema DFIG

Fuente: (Ackermann, 2005)

Tabla 4.7
 Generador de inducción de doble alimentación (DFIG).

DFIG	
Ventajas	Desventajas
En lugar de disiparse, la energía del rotor puede alimentarse a la red mediante el convertidor electrónico de potencia.	Se requiere una caja de engranajes en el tren de transmisión que muestre un registro negativo de confiabilidad y cause un mayor costo.
DFIG soporta una operación de amplio rango de velocidad; el rango de velocidad típicamente variable es de + 30% alrededor de la velocidad síncrona.	DFIG tiene escobillas que necesitan inspección y reemplazo regulares. Son una causa potencial de falla de la máquina y pérdidas eléctricas.
La calificación del convertidor electrónico de potencia es solo del 25 al 30% de la capacidad del generador, lo que hace que este concepto sea atractivo desde el punto de vista económico.	En condiciones de falla de la red, las corrientes grandes del estator dan lugar a grandes corrientes del rotor, por lo que el convertidor electrónico de potencia debe estar protegido contra la destrucción.

Fuente.(Ackermann, 2005)

D. Criterio de accionamiento directo de velocidad variable con convertidor de potencia a gran escala

El generador de accionamiento directo gira a baja velocidad, porque el rotor del generador está conectado directamente al rotor de la turbina. Básicamente, los generadores de accionamiento directo utilizados en el mercado se pueden clasificar en dos categorías:

D1. Generador síncrono de accionamiento directo (DDSG)

Enercon popularizó este tipo de generador. El generador E66 de Enercon de 1,5 MW tiene 72 polos y produce energía de seis fases, que se rectifica a CC. Esta corriente continua se alimenta al rotor y a un inversor, figura 4.12. Así si tenemos una turbina DDSG con 10 a 22

rpm; en comparación con un generador de inducción 1500 rpm , el par es aproximadamente 70 veces para la misma cantidad de potencia. (Jain, 2011)

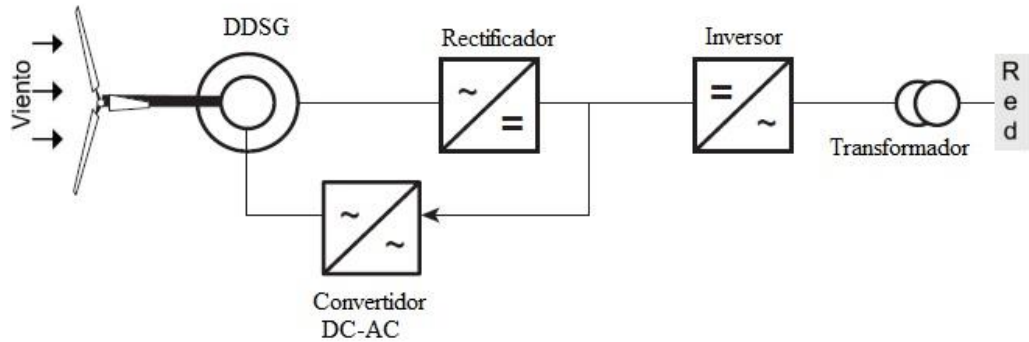


Figura 4.12 Esquema de un generador síncrono de accionamiento directo.
Fuente: (Jain, 2011)

Tabla 4.8
Generador síncrono de accionamiento directo (DDSG)

DDSG	
Ventajas	Desventajas
Al omitir la caja de cambios, tiene el tren de transmisión simplificado, alta eficiencia general, alta confiabilidad y disponibilidad.	Es necesario excitar el devanado del rotor con CC, utilizando anillos deslizantes y escobillas, las pérdidas de campo son inevitables.
No requiere el uso de imanes permanente (PMs), lo que representaría una gran parte de los costos del generador.	Tiene un costo pérdida de potencia, ya que toda la potencia mayor, generada ya que tiene que pasar a través del convertidor de potencia.

Fuente.(Ackermann, 2005)

D.2 Generador síncrono de imán permanente (PMSG)

El PMSG es una buena opción para usarse en WECS, debido a su propiedad de autoexcitación, que permite la operación con un alto factor de potencia y eficiencia. PMSG no requiere suministro de energía para la excitación, ya que es suministrado por los imanes permanentes (IEEE, 2011)

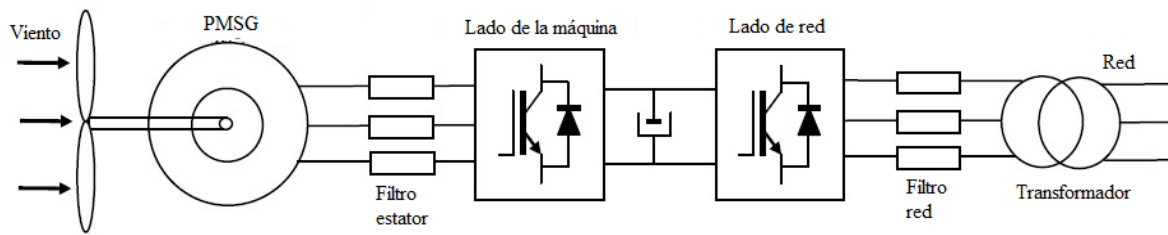


Fig. 4.13. Esquema de un sistema PMSG de accionamiento directo

Las máquinas PMSG no son máquinas estándar y ofrecen una gran flexibilidad en su geometría, por lo que se pueden utilizar varias topologías. Principalmente, los PMSG pueden clasificarse según su penetración de flujo: máquinas de PM de flujo radial, máquinas de PM de flujo axial y máquinas de PM de flujo transversal

Tabla 4.9
Generador síncrono de imán permanente

PMSG	
Ventajas	Desventajas
Mayor eficiencia y rendimiento energético.	Alto costo del material de PM.
No hay fuente de alimentación adicional para la excitación del campo magnético	Dificultades de manejo en la fabricación.
Mayor confiabilidad debido a la ausencia de componentes mecánicos tales como anillos de deslizamiento.	Desmagnetización de PM a alta temperatura.

Fuente.(Ackermann, 2005)

E. Otros criterios potenciales para WECSs

En el caso del concepto de engranajes de varias etapas de velocidad variable con un convertidor de potencia a gran escala, se presenta un sistema PMSG con una caja de engranajes múltiple o un sistema SCIG de engranajes de múltiples etapas con un convertidor a gran escala para obtener algunas ventajas sobre el “concepto Danes” como un generador sin escobillas con una mejor eficiencia, una capacidad de desplazamiento de fallas de la red menos compleja, un mejor rendimiento de la compensación de potencia reactiva, etc. Pero este concepto tiene la desventaja de usar un convertidor más caro (100% de la potencia nominal en lugar del 30%). Las pérdidas también serán mayores ya que todas las potencias son procesadas por el convertidor electrónico de potencia. (IEEE, 2011)

Este concepto se ilustra en la figura 4.14.

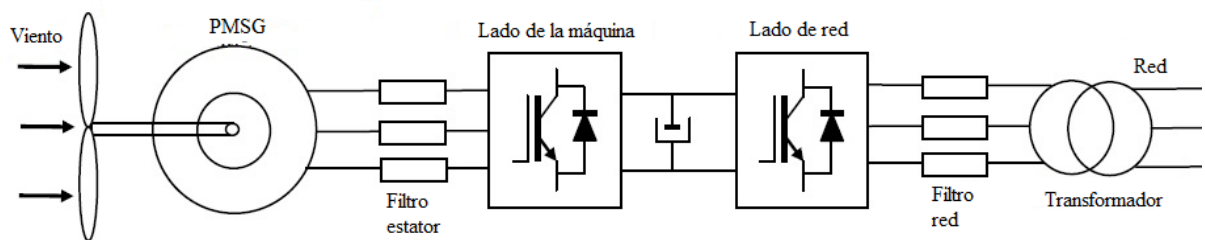
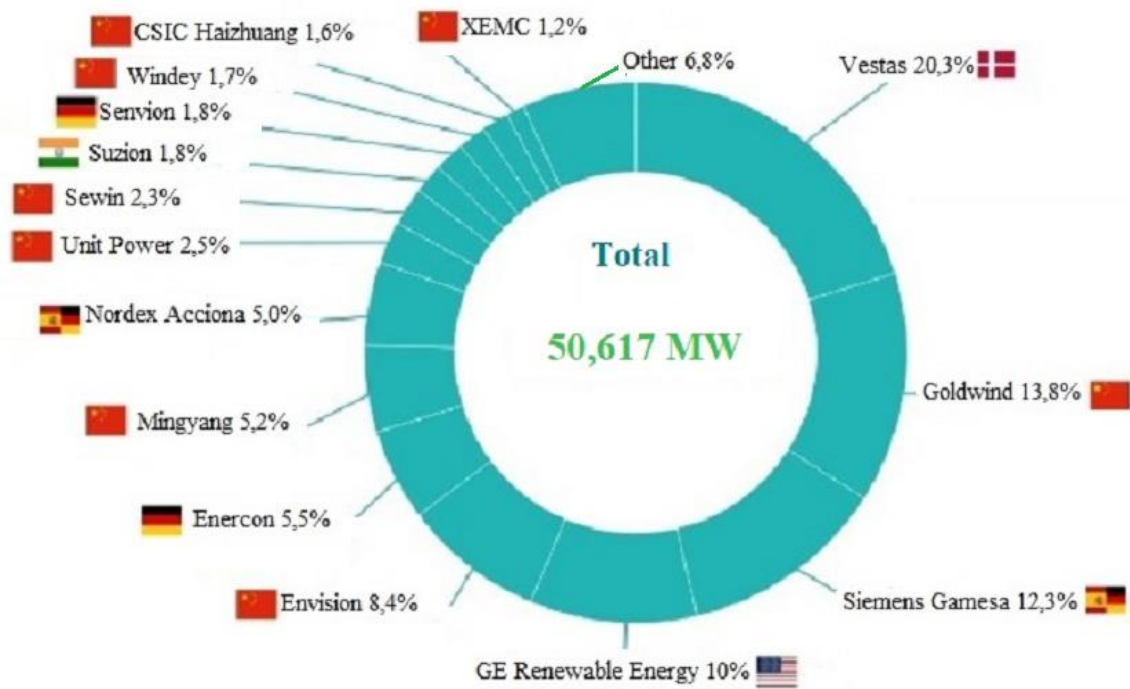


Figura 4.14. Esquema de un sistema de engranajes de etapas múltiples con un convertidor de escala completa.

4.3 Comparación de los tipos de generadores para según la transferencia de energía en un rango de velocidades.

El Consejo Mundial de Energía Eólica ha publicado el desarrollo anual del mercado eólico mundial. Vestas obtuvo el título como el mayor proveedor de turbinas del mundo en 2018, Goldwind subió una posición al segundo lugar. Siemens/ Gamesa cayó una posición al tercer lugar. (GWEC, 2019)



Figuran 4.15 Principales proveedores de aerogeneradores en el mercado mundial 2018

Los generadores de velocidad variable son más eficientes para capturar energía eólica en un rango más amplio de velocidades del viento. Por lo tanto, el mercado de aerogeneradores a escala de servicios públicos se ha mudado a este tipo de generador. (Jaid, 2011)

Tres tipos de generadores se han vuelto populares en los últimos años:

- Generador de inducción de doble alimentación (DFIG),
- Generador síncrono de accionamiento directo (DDSG) con excitación de CC
- Generador de imán permanente de accionamiento directo (DDPM)

La comparación de las características de los tres generadores se ve en la Tabla 4.10

Tabla 4.10

Comparación de las características de los generadores (DFIG), (DDSG) y (DDPM).

Generador de inducción de doble alimentación. (DFIG)	Generador síncrono de accionamiento directo. (DDSG)	Generador de imán permanente de accionamiento directo. (DDPM)
Funciona en rango amplio de deslizamiento. El rotor bobinado suministra o recibe	Requiere excitación de CC. La operación a velocidad variable produce potencia a frecuencia variable..	Rotor tiene imanes permanentes. La operación a velocidad variable

energía, dependiendo de la velocidad del rotor.		produce potencia a frecuencia variable.
El factor de potencia puede ser regulado	El factor de potencia puede ser regulado	Para regular el Fp. Requiere circuitos adicionales
Estator directamente conectado a la red. Las perturbaciones de la red pueden afectar al generador.	El generador está aislado de la red. Mejor capacidad para manejar el voltaje	El generador está aislado de la red. Mayor capacidad para gestionar el voltaje
La tensión de salida suele ser inferior a 1 kV	El voltaje de salida es alto, hasta decenas de kW.	El voltaje de salida es alto, hasta decenas de kW.
Caja de cambios requerida	Sin caja de cambios. Se eliminan: vibraciones, ruido y costos	Sin caja de cambios. Se eliminan: vibraciones, ruido y costos
Sin caja de cambios	Los generadores de múltiples polos son grandes	Generadores compactos
Las turbinas GE 1.5, Vestas (Opti Slip) y Siemens usan este generador	Enercon y Emergya usan este tipo de generador	GE2.5, Clipper, Vensys y NorthWind usan este tipo de generador
Anillos rosantes y escobillas en el devanado del rotor,	Sin anillos colectores o escobillas	Igual que DDSG
Rango de velocidad del viento es más estrecho	Rango de velocidad del viento es mayor	Igual que DDSG
La capacidad de manejar ráfagas de viento es limitada.	La energía de las ráfagas se convierte en energía eléctrica.	Igual que DDSG
Rpm 1800/3600 rpm para 60 Hz. El torque es menor	Rpm está en el rango de 15 a 30 rpm. El torque es grande	Igual que DDSG

Generador compacto, pero Requiere fabricación y El costo de material de los electrónica de potencia montaje de precisión y imanes es alto, y el montaje complicada. es complicado.

Fuente.(Ackermann, 2005)

Tabla 4.11

Los 10 mejores fabricantes de turbina de viento al 2018, conceptos de generador y rangos de potencia actualmente utilizados

Fabricante	Concepto	Diámetro del rotor (m)	Rango de potencia (MW)
Vestas	Asíncrono	20 – 90	1.5-2
(Dinamarca)	DFIG-DDPM	100-164	3.3-8
Goldwind	Asíncrono	43 – 184	0,6 – 8
(China)	DDPM		
Siemens/Gamesa	DFIG	112 – 142	2.1 – 3.4
(Alemania / España)	DDPM	145 – 193	4.2 –10
General Electric	DFIG	70 – 150	1.5 – 6.0
(EE. UU.)			
Envision	DFIG	70-148	1.5 – 4.5
(China)			

Enercon (Alemania)	DDSG	30 – 127	0.2 – 7.5
MingYang (China)	Asíncrono DDPM	77 – 158	1.5 -7
Nordex Acciona (España/Alemania)	Asíncrono DFIG	27-150	0,15-6
United Power (China)	DFIG DDPM	77 – 100	1.5 – 3
Sewin (China)	DFIG DDPM	77 – 100 100	1.5 – 3 3

Fuente.(Ackermann, 2005)

DFIG: Velocidad variable con caja de cambios, generador de inducción de doble alimentación y convertidor parcialmente clasificado

DDSG: Generador síncrono de accionamiento directo de velocidad variable con excitación eléctrica y convertidor completo

DDPM: Generador de imán permanente de accionamiento directo de velocidad variable y convertidor completo

4.4 Generadores basados las características del viento y el nivel de potencia a generar para ser usados con turbinas eólicas en zonas del rurales del Perú

Realizar una comparación cuantitativa no es simple. Las ventajas y desventajas de los conceptos eléctricos solo se pueden evaluar dentro del marco general de Sistema “turbina eólica y sus aplicaciones”. Algunos datos básicos se compilan en la Tabla 4.12. La comparación se basa en una potencia nominal de aproximadamente 1000 kW. Los valores son válidos dentro de un rango de aproximado de 500 kW a varios megavatios Sin embargo, no se pueden aplicar a salidas bajas de menos de 100 kW. (Hau, 2006)

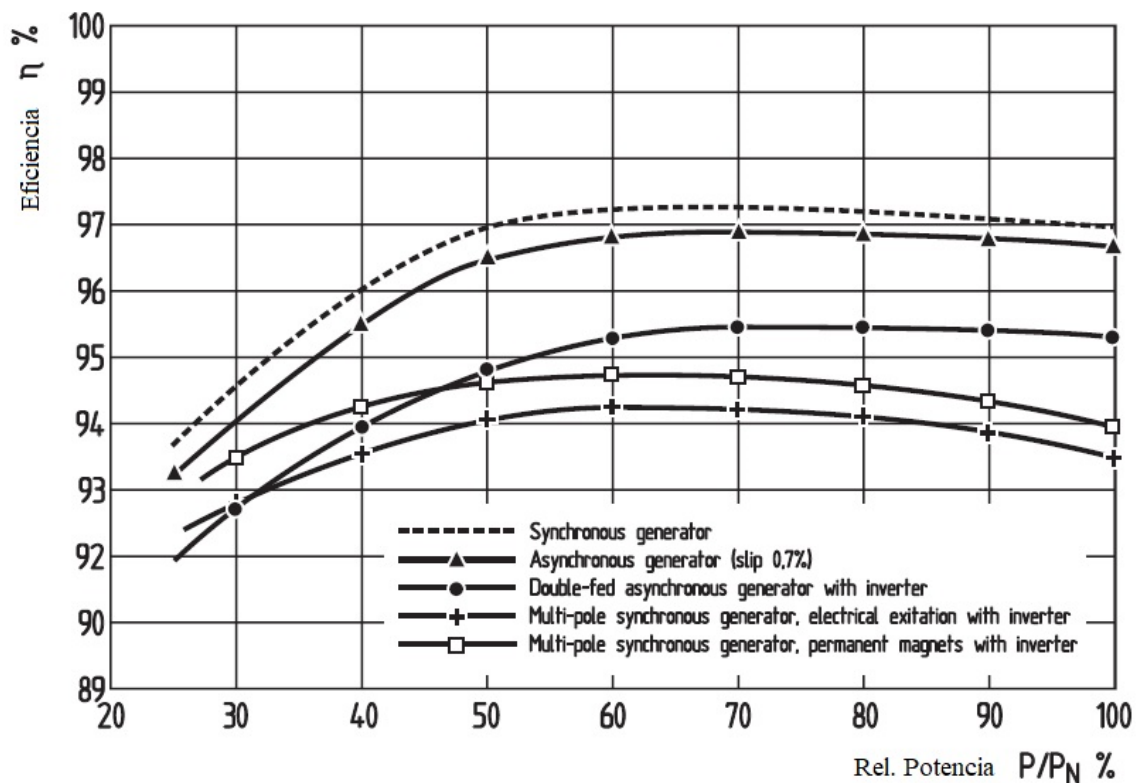


Figura 4.16. Eficiencia eléctrica versus carga para varios sistemas de generador / inversor

El rango de velocidad del sistema generador tiene una influencia considerable en la eficiencia eléctrica y en el costo. Independientemente de la eficiencia y el costo, se puede seleccionar un rango de velocidad más amplio. Las eficiencias enumeradas en la Tabla 4.12 deben entenderse como a la potencia nominal. En el rango de carga parcial, la eficiencia disminuye en diferentes cantidades dependiendo del sistema. (Fig. 4.16).

Tabla 4.12

Eficiencias eléctricas y relación de costo aproximada de sistemas de generadores eléctricos de turbinas eólicas en el rango de potencia de 0.5–3 MW

Sistema	Rango de velocidad típico	Máxima eficiencia del generador con relación inversor	Relación de costo Aprox.
- Generador de inducción (rotor de jaula de ardilla)		0.965	
(+)	100 ± 0.5%		100%
compensación de potencia reactiva estática		0.955	
- Generador de inducción de dos velocidades con cambio de polos	100 ± 0.5%	0.965	110%
	66 ⅔ ± 0.5%	0.945	
- Generador de inducción con cascada síncrona		0.95	
(+)	100 + 30%		150%
filtro de frecuencia armónica y compensación de potencia reactiva		0.935	
- Generador de inducción de doble alimentación con inversor estático (AC-DC-AC)		0.955	
(+)	100 ± 50%		160%
filtro de frecuencia armónica y compensación de potencia reactiva		0.94	
- Generador síncrono con		0.95	180%

inversor estático (AC-DC-AC)	100 ± 50%		
(+)			
filtro de frecuencia armónica		0.940	
- Generador síncrono de accionamiento directo con inversor estático (AC-DC-AC) y filtro de armónicos	100 ± 50%	0.94	350%
- Generador síncrono de accionamiento directo (excitación de imán permanente) e inversor estático (AC-DC-AC)	0.96	0.96	
(+)	100 ± 50%		450%
filtro de armónicos y compensación de potencia reactiva		0.94	

Fuente(Erich Hau ,2006)

Los equipos electrotécnicos de las pequeñas turbinas eólicas deben cumplir básicamente los mismos requisitos como turbinas grandes si se usan para alimentar la red. Sin embargo, las turbinas que producen algunas decenas o cientos de kilovatios suelen tener soluciones electrotécnicas que en general dan como resultado sistemas mucho más simples. La caja de interruptores está montada al pie de la torre, o también de forma independiente al lado de la turbina. En la tabla 4.13 se dan los tipos de generadores que hasta la fecha se usan en las centrales eólicas que están proveyendo energía al sistema interconectado del Perú

Tabla 4.13

Tipo de generadores usados actualmente en las centrales eólicas en el Perú

Nombre	Modelo aerogenerador	Funciones de control de potencia y velocidad	Tecnología del Generador
CENTRAL EÓLICA CUPISNIQUE	V100/1800 (Vestas) 1800 kW	Tipo;Pitch Cut-in wind speed: 4 m/s Cut-off wind speed: 20 m/s V_N del viento: 12 m / s	Asíncrono con rotor Bobinado WRIG
CENTRAL EÓLICA TALARA	V100/1800 (Vestas) Dinamarca 1800 kW	Tipo;Pitch Cut-in wind speed: 4 m/s Cut-off wind speed: 20 m/s V_N del viento: 12 m / s	Asíncrono con rotor Bobinado WRIG
CENTRAL EÓLICA PARQUE EÓLICO MARCONA	SWT-3.15-142 (Siemens) Alemania 3150kW	Tipo;Pitch Cut-in wind speed: 2,5 m/s Cut-off wind speed: 22.5 m/s V_N del viento: 12 m / s	Síncrono de imanes permanentes PMSG
CENTRAL EÓLICA PARQUE EÓLICO TRES HERMANAS	SWT-2.3-108 (Siemens) Alemania 2300kW SWT-3.15-142 (Siemens) Alemania	Tipo;Pitch Cut-in wind speed: 3 m/s Cut-off wind speed: 20 m/s V_N del viento: 11 m / s Tipo;Pitch Cut-in wind speed: 2,5 m/s Cut-off wind speed: 22.5 m/s	Asíncrono con rotor bobinado WRIG Síncrono de imanes permanentes PMSG

	3150kW	V _N del viento: 12 m / s	
CENTRAL EÓLICA	AW-3150/125 (Acciona)	Tipo;Pitch (Regulación de paso con velocidad variable)	Generador de inducción de doble alimentación (DFIG).
WAYRA I	España 3150kW		

Fuente(Osinergmin, 2014)

V. Conclusiones

- En base a la información especializada se ha podido determinar que los tipos de generadores que se utilizan en los aerogeneradores tienen como base los generadores de inducción y síncronos:

Generador asíncrono (inducción)

- generador de inducción de jaula de ardilla (SCIG);
- generador de inducción de rotor bobinado (WRIG):
 - generador de inducción OptiSlip (OSIG),
 - Generador de inducción de doble alimentación (DFIG).

Generador síncrono:

- generador de rotor bobinado (WRSG);
- generador de imán permanente (PMSG).

- Se realizó la Selección de los generadores eléctricos que pueden ser usados con turbinas eólicas basados las características de la velocidad del rotor de la turbina y el nivel control potencia a generar; Por pérdida aerodinámica o de palas de paso fijo (**Stall**) , por variación del ángulo de paso de pala (**Pitch**) y por pérdida activa aerodinámica (**Active stall**). Lo cual se resume en el siguiente cuadro:

Control de velocidad		Control de potencia		
		Stall	Pitch	Active stall
Velocidad fija	Tipo A	Tipo A0	Tipo A1	Tipo A2
	Tipo B		Tipo B1	
Velocidad variable	Tipo C		Tipo C1	
	Tipo D		Tipo D1	

- Se realizó la comparación de los distintos tipos de generadores para determinar cuales producen mayor transferencia de energía en un rango de velocidades para ser usados en zonas del rurales del Perú; determinándose que los generadores de velocidad variable son más eficientes para capturar energía eólica en un rango más amplio de velocidades del viento, siendo estos los siguientes:
 - Generador de inducción de doble alimentación (DFIG),
 - Generador síncrono de accionamiento directo (DDSG) con excitación de CC
 - Generador de imán permanente de accionamiento directo (DDPM)

- El estudio comparativo ha revelado que el generador de inducción doblemente alimentado y el generador síncrono de imán permanente son los que compiten muy cercanamente para ser propuesto en los fines del presente estudio, las eficiencias de los mismas son muy cercanas, pero el costo del generador de imanes permanentes supera al de alimentación doble

VI. Referencias bibliográficas y virtuales

- Asea Brown Boveri S.A. (2012). *Cuaderno de aplicaciones técnicas Nº 12 Plantas Eolicas*. Barcelona: ABB.
- Banco Mundial. (2015). *Informe anual 2015*. Washington, DC.
- Diario el peruano. (01 de juni de 2006). ley de electrificacion rural. pág. 15.
- EnDev GIZ Perú. (2016). *Energización rural mediante el uso de energías renovables para fomentar un desarrollo integral y sostenible. Propuestas para alcanzar el acceso universal a la energía en el Perú*. Lima: LuzAzul gráfica s.a.c.
- Fraille, J. (2003). *Maquinas Electricas*. Madrid: McGraw-Hill.
- Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. (2012). Guía sobre tecnología minieolica. *Comunidad de Madrid*, 13-20.
- Gimenez, J., & Gómez, J. (2011). GENERACIÓN EÓLICA EMPLEANDO distintos tipos de generadores considerando su impacto en el sistema de potencia TEMA DE POTENCIA. 10.
- Hau, E. (2006). *Wind Turbines*. Germany: Springer.
- Hemami, A. (2012). *Wind Turbine Technology*. Clifton Park, USA: Cengage Learning.
- ITDG. (2008). Microgeneradores de 100w para uso domestico en zonas rurales. *Soluciones practicas*, 10-12.
- Larsson, A. (2000). *The power Quality of wind turbines*. Sweden.
- Letcher, T. (2017). *Wind Energy Engineering*. Chennai, India: Project Manager.
- Ministerio de energía y minas del Perú. (2016). *Atlas eolico del Perú*. Lima.
- Villarrubia, M. (2013). *Ingenieria de la energía eólica*. Mexico: Alfaomega.
- WWEA. (2012). Small Wind World Report Summary. *World Wind Energy Association*, 11.

VII Anexos

- Anexo1

Centrales eólicas en el Perú que emplean diversos tipos de generadores eléctricos



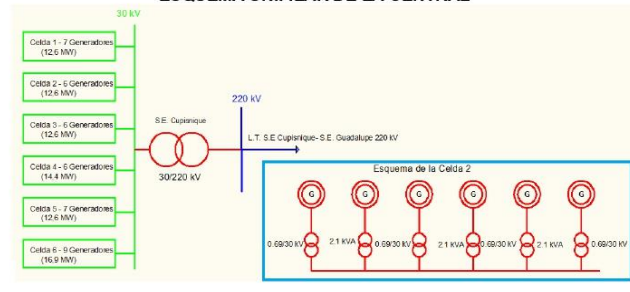
CENTRAL EÓLICA CUPISNIQUE

DENOMINACIÓN	CENTRAL EÓLICA CUPISNIQUE
EMPRESA CONCESIONARIA	ENERGIA EOLICA S.A.
TECNOLOGÍA	Generación Eólica
UBICACIÓN Departamento Provincia Distrito Altitud	La Libertad Pacasmayo Cupisnique 20 msnm
DATOS TÉCNICOS Potencia Instalada Punto de Oferta Cantidad de Aerogeneradores Potencia de Aerogenerador Cantidad de Circuitos de Aerogeneradores Nivel de Tensión de Transformadores Factor de Potencia de Generadores Factor de Planta	80 MW Barra Guadalupe 220 kV 45 x 1,8 MW (3 en reserva) 1,8 MW c/u 6 (4 x 12,6 MW, 1 x 14,4 MW y 1 x 16,9 MW) 0,69/30 kV (2,1 kVA) 0,95 43%
DATOS DE CONTRATO Firma de Contrato Puesta en Operación (POC) Precio de la Energía Ofertado Energía Anual Ofertada	31.03. 2010 20.02.2014 8,5 (Ctvs. US\$/kWh) 302 952 MWh

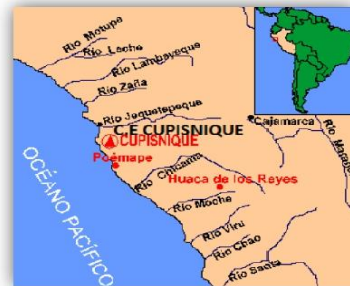
INFORMACIÓN RELEVANTE

- La central se encuentra ubicada en la costa peruana, entre los puertos de Malabrigo y Puémape, en las pampas de Cupisnique.
- La central contempla la instalación de 45 Aerogeneradores de 1,8 MW c/u. (3 en Reserva) dispuestos estratégicamente en 6 Celdas de Transformación de 30 kV.
- Cada aerogenerador está constituido por una turbina y un generador eléctrico situados en lo alto de una torre de acero, cimentada sobre una zapata de concreto armado. Además, en el interior de la torre se incluye un centro de transformación (de baja a media tensión).
- La marca y modelo de los aerogeneradores a instalar será VESTAS, modelo V100 de 1,8 MW o similar, el cual posee un rotor a barlovento equipado con tres Palas a 120° entre ellas. Dentro de cada aerogenerador, se encuentran los equipos de control y conexión en baja tensión, el transformador de baja tensión (generación) a media tensión, y las celdas de media tensión.
- La potencia individual de cada aerogenerador es de 1,8 MW. Las 45 máquinas que componen el parque se disponen en seis circuitos independientes, agrupados estos últimos en dos barras colectoras de media tensión independientes, cada una de las cuales corresponde a un transformador de evacuación.
- El EIA se aprobó mediante R.D. N° 008-2011-MEM/AE del 07.01.11.
- Mediante R.S. N° 029- 2011-EM del 15.04.11 se otorgó Concesión Definitiva de Generación.
- Mediante R.S. N° 034-2011-EM del 27.04.2011 se dio Concesión Definitiva a la Línea de Transmisión.
- Se continúa con la fase de excavación de la cimentación de los Aerogeneradores y la construcción de la L.T. 220 kV (simple terna) que conectará la S.E. Cupisnique con la S.E. Guadalupe.
- La inversión aproximada será de 198,861 MM US\$.
- La nueva fecha de POC de la central, según el MINEM, es el 20.02.2014.
- Al mes de setiembre se tiene un avance físico del 57%. Las Torres, Palas y Góndolas de los Aerogeneradores están siendo transportados desde el Puerto Salaverry a la central.

ESQUEMA UNIFILAR DE LA CENTRAL



Gerencia de Fiscalización Eléctrica
Unidad de Supervisión de Post Privatización- USPP – Octubre 2013



Plano de Ubicación



Palas de Torres de 48 m de longitud



Maniobras de descarga de Palas - Puerto Salaverry



Torres de 20 m (sección 1) y 30 m (sección 2 y 3)

CENTRAL EÓLICA PARQUE EÓLICO MARCONA (OPERANDO)

DENOMINACIÓN	CENTRAL EÓLICA PARQUE EÓLICO MARCONA
EMPRESA CONCESIONARIA	PARQUE EÓLICO MARCONA S.R.L. (COBRA PERÚ)
TECNOLOGÍA	Energía Eólica
UBICACIÓN	Ica
Departamento	Ica
Provincia	Marcona
Distrito	Marcona
Altitud	200 msnm
DATOS TÉCNICOS	
Potencia Instalada	32 MW
Punto de Oferta	Barra Marcona 220 kV
Cantidad de Aerogeneradores	11
Modelo de Aerogeneradores	8 - SWT-3,15-108 y 3-SWT 2,3-108
Potencia de Aerogenerador	8 x 3,15 MW + 3 x 2,3 MW
TRANSFORMADORES	
Cantidad de Transformadores	11
Potencia	2,6 MVA y 3,4 MVA.
Tensión	0,69 kV/20 kV
DATOS DE CONTRATO	
Firma de Contrato	31.03. 2010
Puesta en Operación (POC)	25.04.2014
Energía Anual Ofertada Precio de la Energía Ofertado	148 378 MWh 6,552 ctvs. US\$/kWh



Ubicación del Proyecto



Montaje de Palas



Aerogeneradores instalados

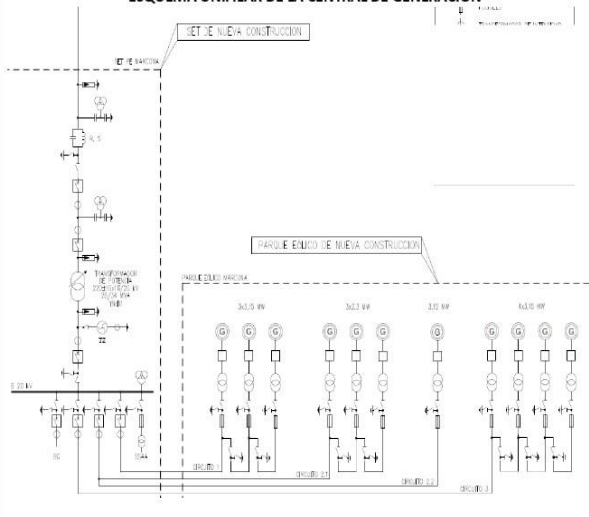


Transformador de 35 MVA – 220 kV

INFORMACIÓN RELEVANTE

- El proyecto contempló la instalación de 11 Aerogeneradores (8 x 3,15 MW + 3 x 2,3 MW).
- Los 11 Aerogeneradores tienen una tensión de generación de 0,69 kV. Se agrupan en 3 bloques, interconectados entre sí. Luego, cada uno de estos bloques se conecta a la S.E. de la Central Eólica en el nivel de 20 kV. En la S.E. se instaló un transformador 20/220 kV (35 MVA), el cual se conecta a la S.E. Marcona existente.
- El 13.08.2012, mediante R.S. N° 097-2012-EM, se otorgó la Concesión Definitiva de Generación y el 31.10.2012, mediante R.S. N° 104-2012-EM se otorgó la Concesión Definitiva de Transmisión.
- La potencia generada se inyecta al SEIN mediante una L.T. de 31 km en 220 kV que conecta la S.E. Central Parque Eólico Marcona con la S.E. Marcona existente.
- Con carta COES/D/DP-105-2014 del 27.01.2014 se aprobó el estudio de operatividad del Parque Eólico Marcona y su línea de Transmisión.
- La R.M. N° 301-2013-MEM aprobó la modificación de la Puesta en Operación Comercial para el 21.03.2014.
- Con Carta COES/D/DP-530-2014 del 23.04.2014 se aprueba la Operación Comercial del Parque Eólico Marcona desde las 00:00 horas del día 25.04.2014.
- La inversión total informada por la concesionaria fue de 61,1 millones US\$.

ESQUEMA UNIFILAR DE LA CENTRAL DE GENERACIÓN



CENTRAL EÓLICA TALARA

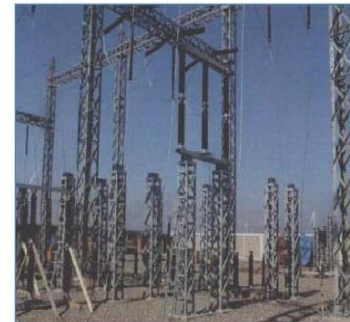
DENOMINACIÓN	CENTRAL EÓLICA TALARA
EMPRESA CONCESIONARIA	ENERGÍA EOLICA S.A.
TECNOLOGÍA	Generación Eólica
UBICACIÓN	
Departamento	Piura
Provincia	Pariñas
Distrito	Talara
Altitud	11 msnm
DATOS TÉCNICOS	
Potencia Instalada	30 MW
Punto de Oferta	S.E. Pariñas
Cantidad de Aerogeneradores	17
Potencia de Aerogenerador	1,8 MW c/u
DATOS DE CONTRATO	
Firma de Contrato	31.03.2010
Puesta en Operación (POC)	30.08.2014
Energía Anual Ofertada	119 673 MWh
Precio de la Energía Ofertada	8,7 Cts. US\$/kWh



Plano de Ubicación



Vista de los aerogeneradores montados



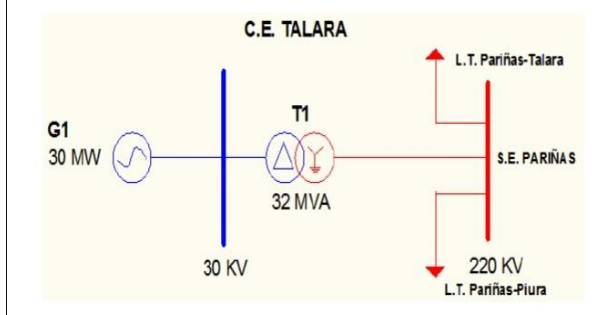
Vista de montaje de polos de seccionador tripolar 220 KV



Segundo Aero Completo (Aero 9)

INFORMACIÓN RELEVANTE

- La central se encuentra ubicada en la costa Peruana, en el departamento de Piura, en la provincia de Pariñas, a una altura de 11 msnm, en la pampa "La Campana" a 10 km de la ciudad de Talara. El área total del campo que alberga los aerogeneradores es de 700 hectáreas.
- Cuenta con 17 aerogeneradores, modelo V100 de 1,8 MW c/u; formado por 3 palas de 49 metros de longitud c/u y un ángulo de 120° entre ellas.
- Dentro de cada aerogenerador, se encuentra la caja multiplicadora, el generador eléctrico, el transformador de baja tensión a media tensión y los equipos de control.
- Cada aerogenerador V100 de 1,8 MW está provisto de un transformador trifásico tipo seco, con refrigeración forzada por aire, ubicado en la parte trasera de la góndola (sus características principales son: potencia primaria 2 100 kVA, potencia secundaria (690 V) 1900 kVA, potencia secundaria (480 V) 200 kVA, frecuencia 60 Hz, tensión primaria 30 kV y tensión secundaria 690/480 V.)
- La torre metálica que soporta al aerogenerador es de 80 m (3 cuerpos).
- Cada aerogenerador ocupa un área de 80 m², distanciados a 1,5 veces en diámetro que forman las palas (150 m) y 3 veces del diámetro en paralelo (300 m), distancia que permite evitar el efecto Estela (cola de viento turbulento).
- La energía generada se inyecta al SEIN a través de la L.T. 220 kV que parte de la S.E. Central Eólica Talara (30/220 kV) y se interconecta a la S.E. Pariñas. La interconexión comprende de un sistema de simple barra en la subestación de la central y una celda en la S.E. Pariñas.
- El EIA se aprobó mediante R.D. N° 016-2011-MEM/AAE del 19.01.11; asimismo, mediante R.S. N° 033-2011-EM del 26.04.11 se otorgó la Concesión Definitiva de Generación y con R.S. N° 045-2011-EM del 01.06.11 se aprobó la Concesión Definitiva de la L.T.
- Con carta COES/D/DP-344-2014 del 17.03.2014 se aprobó el Estudio de Operatividad de la C.E. Talara.
- La Supervisión de la ejecución de la obra estuvo a cargo de "SISENER ING".
- Las pruebas de comisionamiento se culminaron satisfactoriamente.
- El 27.08.2014 la C.E. Talara generó 23.3 MW a las 2:30 a.m.
- Con carta COES/D-643-2014, el COES declara fundado el recurso de reconsideración presentado por la concesionaria, señalando que la POC de la central es el 30.08.2014.
- La inversión aproximada es de 101 MM US\$



CENTRAL EÓLICA PARQUE EÓLICO TRES HERMANAS (90 MW)

DENOMINACIÓN	CENTRAL EÓLICA PARQUE EÓLICO TRES HERMANAS
EMPRESA CONCESIONARIA	PARQUE EÓLICO TRES HERMANAS S.A.C.
TECNOLOGÍA	Generación Eólica
UBICACIÓN	
Departamento	Ica
Provincia	Nazca
Distrito	Marcona
Altitud	496 msnm
DATOS TÉCNICOS	
Potencia Instalada	90 MW
Punto de Oferta	Subestación Marcona 220 kV
Cantidad de Aerogeneradores	33 (8x2.3 MW-25x3.15 MW)
Nivel de Tensión de Transformadores	0,69/20 kV (2,6 MVA y 3,4 MVA)
Modelo de Aerogenerador	SWT-2.3-108, SWT-3.15-108
Velocidad	4 m/s
DATOS DE CONTRATO	
Firma de Contrato	30.09.2011
Puesta en Operación (POC)	31.12.2015
Precio de la Energía Ofertado	8,9 Cts. US\$/kWh
Energía Anual	415 760 MWh



Plano de Ubicación

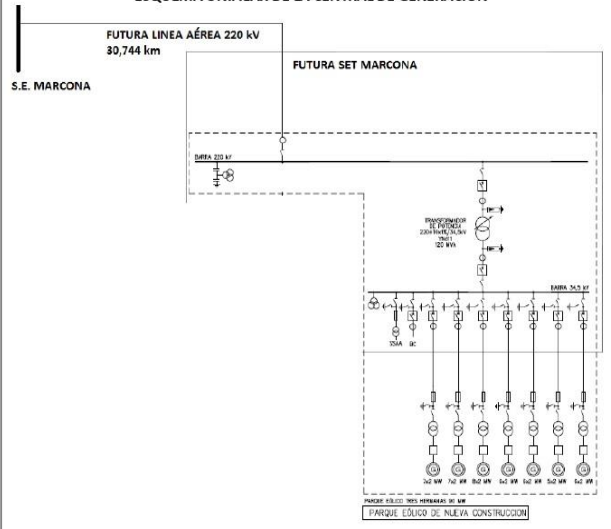
INFORMACIÓN RELEVANTE

- La central se encuentra ubicada en la costa peruana, en las cercanías al mar, en el distrito de Marcona, provincia de Nazca y departamento de Ica.
- La central consta de un conjunto de 33 aerogeneradores dispuestos en alineaciones distribuidas perpendicularmente a los vientos dominantes en la zona.
- Los circuitos eléctricos de media tensión del parque eólico se proyectan en 20 kV y conectan transformadores de cada turbina con la S.E. de la central.
- El proyecto contempla implementar una bahía de salida en el lado de 220 kV de la S.E. C.E. Parque Eólico Marcona para receptionar la conexión proveniente de la C.E. Tres Hermanas.
- Con R.D. N° 251-2013-MEM/AAE del 28.08.2013 se aprobó el Estudio de Impacto Ambiental. Mediante Oficio N° 2827-2013-MEM/AAE del 22.10.2013 se aprobó el informe de mejora tecnológica.
- Con R.M. N° 362-2013-MEM/DM se aprobó la primera modificación del contrato, cambiándose la POC del 31.12.2014 al 31.12.2015. Esto se debió a demoras en la aprobación del EIA.
- Con R.S. N° 049-2014-EM del 11.07.2014 se otorga la concesión definitiva de generación con recursos energéticos renovables a favor de Parque Eólico Tres Hermanas S.A.C.
- El transformador de potencia, las unidades de potencia de los alternadores, las palas, los cuerpos de la torre, los nacelles, los bujes, los cables, el hierro para las cimentaciones y todos los pernos se encuentran en la zona de montaje.
- La concesionaria ha concluido el Estudio de Operatividad, a la fecha se encuentra en proceso de revisión y levantamiento de observaciones.
- El avance de obras del proyecto es de 58,6%.
- La inversión aproximada será de 185,7 MM US\$.



Unidades de Potencia en la zona de obra

ESQUEMA UNIFILAR DE LA CENTRAL DE GENERACIÓN



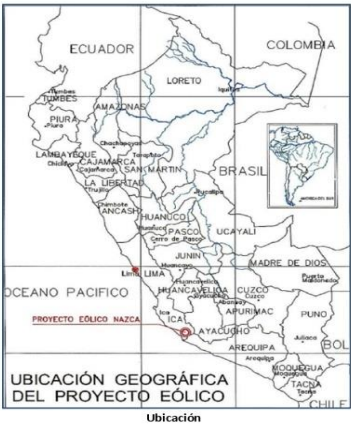
Palas y tramos de torre en la zona de obra



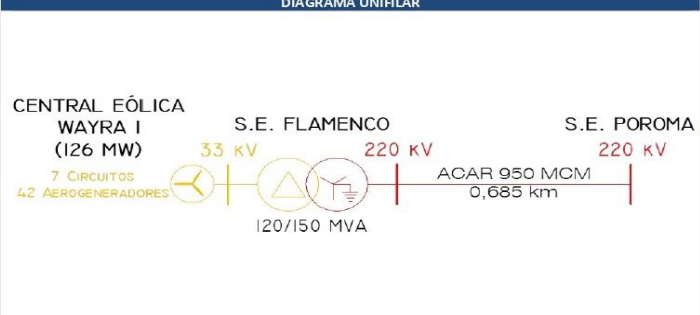
Componentes en el puerto San Martín (Paracas)

CENTRAL EÓLICA WAYRA I (PARQUE NAZCA) (126 MW)

EMPRESA CONCESIONARIA		ENEL GREEN POWER PERÚ S.A.
DESCRIPCIÓN		
La central tendrá una capacidad de 126 MW, que se obtendrá mediante la instalación de 42 aerogeneradores de 3,15 MW. La conexión al SEIN se realizará a través de la L.T. 220 kV S.E. Flamenco - S.E. Poroma, de simple circuito de 0,685 km.		
UBICACIÓN		
Departamento	Ica	
Provincia	Nazca	
Distrito	Marcona	
Altitud	27 msnm	
DATOS DE LA CENTRAL		
Potencia Instalada	126 MW	
N° de circuitos	7	
DATOS DEL AEROGENERADOR		
N° de unidades	42	
Potencia Nominal	3,15 MW	
Tensión de Generación	12 kV	
Factor de Potencia	-	
Marca	ACCIONA (Modelo AW3150)	
Año de Fabricación	-	
DATOS DEL TRANSFORMADOR		
	Transformador de Potencia	Transformador del Aerogenerador
Potencia Nominal	120/150 MVA	42x3,4 MVA
Relación de Transformación	33/220 kV	12/33 kV
Marca	Por definir	Por definir
Año de Fabricación	-	-
DATOS DE CONTRATO		
		HITOS
Tipo de Contrato	Suministro RER (4ta Subasta)	Cierre Financiero
Firma de Contrato	17.05.2016	Llegada de Equipos
Energía Ofertada	573,00 GWh/año	Inicio de Obras
Precio de la Energía Ofertada	37,83 US\$/MWh	Inicio de Montaje
Puesta en Operación Comercial	31.03.2018	POC
		15.12.2015 (si)
		13.09.2017 (si)
		16.01.2017 (si)
		22.09.2017 (si)
		31.03.2018



- INFORMACIÓN RELEVANTE**
- La Concesión Definitiva para desarrollar la actividad de generación eléctrica en la futura Central Eólica Nazca de 126 MW, fue otorgada mediante R.M. N° 290-2016-MEM/DM del 18.07.2016.
 - Con R.M. N° 314-2017-MEM/DM del 25.07.2017, se aprobó el cambio de nombre de la Central Eólica Nazca, por Central Eólica Wayra I.
 - El 18.01.2018, el COES aprobó el Estudio de Operatividad del proyecto.
 - El 26.01.2018, el COES autorizó la Conexión para las Pruebas de Puesta en Servicio de la Central.
 - El 04.02.2018, se energizó por primera vez la L.T. 220 kV Poroma-Flamenco por pruebas.
 - El 06.02.2018, se sincronizó por primera vez la C.E. Wayra I con el SEIN, como parte de sus pruebas de operación con una generación de 8 MW.
 - La C.E. Wayra I, actualmente viene inyectando energía al SIEN.
 - Actualmente se realizan pruebas de carga a los circuitos del 1 al 7.
 - El avance físico global es de 97%.
 - La POC estaba prevista para el 31.03.2018. La concesionaria solicitó ampliación de plazo para la POC hasta el 30.05.2018, la cual está pendiente de definición por el MINEM.
 - El monto de inversión aproximado será de 165,8 MM US\$, según lo indicado por la Concesionaria.
 - La ruta crítica del proyecto estuvo en el montaje de los componentes de los aerogeneradores, debido a las condiciones especiales del viento, necesarios para el montaje de los nacelles, aspas y torres. Fuertes vientos en la zona de trabajo motivaron atrasos en el montaje de aerogeneradores, motivo por el cual la Concesionaria solicitó al MINEM la ampliación de plazo de la POC.



RESULTADOS DE TURNITIN 23 % de SIMILITUD

Análisis comparativo de generadores eléctricos usados en aerogeneradores para su aplicación con turbinas eólicas en zonas rurales del Perú

INFORME DE ORIGINALIDAD

23%	23%	0%	9%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	edoc.pub Fuente de Internet	5%
2	cdigital.dgb.uanl.mx Fuente de Internet	4%
3	docplayer.es Fuente de Internet	3%
4	www.voltimum.es Fuente de Internet	2%
5	docslide.us Fuente de Internet	2%
6	Submitted to BENEMERITA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE PUEBLA BIBLIOTECA Trabajo del estudiante	2%
7	documentop.com Fuente de Internet	2%
8	upcommons.upc.edu	

Fuente de Internet 2%

9 www.die.eis.uva.es 2%
Fuente de Internet

Excluir citas Apagado Excluir coincidencias < 2%
Excluir bibliografía Apagado