

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHIHUAHUA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

---

**“DISEÑO Y CONTROL DE UN INVERSOR PARA UN  
GENERADOR EÓLICO”**

***TESIS***

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**PRESENTA:  
ING. RUBÉN ALONSO LÓPEZ VALLES**

**DIRECTOR DE TESIS:  
c.Dr. ROGELIO ENRIQUE BARAY ARANA**

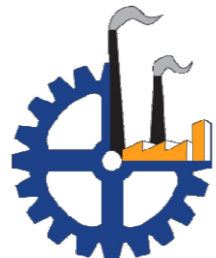
---



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



**TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO®**



**CHIHUAHUA CHIH. JULIO DEL 2020**



"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Chihuahua, Chih., 17 de agosto de 2020

**RUBEN ALONSO LÓPEZ VALLES  
PRESENTE**

Por este conducto le comunico que, a propuesta del Jurado de Examen, la División de Estudios de Posgrado e Investigación le ha concedido la autorización para la impresión de tesis para obtener el grado de Maestro, cuyo título es:

**"DISEÑO Y CONTROL DE UN INVERSOR PARA UN GENERADOR EÓLICO"**

Con el siguiente contenido de capítulos:

- I. Introducción.
- II. Turbina Eólica.
- III. Control del Generador Eólico.
- IV. Modelo de control del Generador Eólico.
- V. Resultados y conclusiones.
- VI. Conclusiones.

**ATENTAMENTE**  
*Excelencia en Educación Tecnológica®*

**M.C. ROGELIO E. BARAY ARANA**  
**JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

c.c.p. archivo  
/reba







"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Chihuahua, Chih., 17 de agosto de 2020

**M.C. ROGELIO E. BARAY ARANA**  
**JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**  
**PRESENTE**

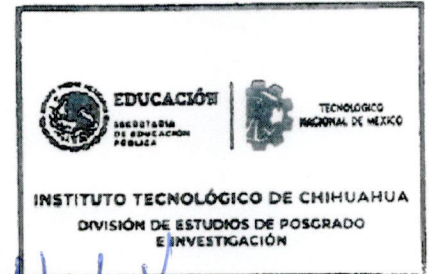
Por medio de la presente notificamos a usted que en cumplimiento de los requerimientos para la obtención de grado de Maestro, el documento de tesis del c. **RUBEN ALONSO LÓPEZ VALLES**, ha sido aprobado y aceptado para su impresión. El título de la tesis es:

**"DISEÑO Y CONTROL DE UN INVERSOR PARA UN GENERADOR EÓLICO"**

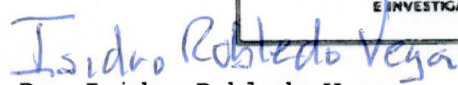
Por lo que proponemos, le sea concedida la autorización de impresión correspondiente.


Agradeciendo la atención a la presente, quedamos de usted:

**ATENTAMENTE**  
*Excelencia en Educación Tecnológica®*



  
**M.C. Rogelio Enrique Baray Arana.**  
**MIEMBRO DEL JURADO DE EXAMEN**

  
**Dr. Isidro Robledo Vega.**  
**MIEMBRO DEL JURADO DE EXAMEN**

  
**Dr. Pedro Acosta Cano de los Ríos**  
**MIEMBRO DEL JURADO DE EXAMEN**

  
**Dr. José Eduardo Acosta Cano de los Ríos**  
**MIEMBRO DEL JURADO DE EXAMEN**

c.c.p.archivo  
/reba



## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente quiero dar gracias a Dios por haberme dado salud, constancia y paciencia para la finalización de esta maestría, la cual me ha brindado conocimientos nuevos, así como también el saber analizar y resolver problemas de manera formal y con mayor eficiencia los cuales me han hecho crecer en el ámbito laboral de una manera excepcional.

El desarrollo de la maestría como de la tesis no puedo decir que fue fácil, en momentos pensé en dejarla de lado, esto por la carga de trabajo que se volvió muy demandante, pero con la constancia y organización con las que siempre he contado se convirtieron en los puntos importantes que me llevaron a la finalización de la maestría.

Quiero agradecer en especial a mi esposa quien me apoyó en todo el trayecto de la maestría, quien me ha brindado siempre consejos y me ha dado su apoyo incondicional, pero sobre todo ha sabido darme el espacio necesario para poder finalizar la maestría. Muchas Gracias!! Stephanie Ann Quintana Landeros.

Quiero agradecerles de igual manera a mis padres por todos los sabios consejos y su apoyo en los momentos difíciles, por lo cual agradezco a Dios que tengo la dicha de todavía tenerlos a mi lado.

Quiero agradecer no por último menos importante al Doctor Rogelio Enrique Baray Arana, quien me ha guiado en este difícil camino y con sus consejos tanto académicos como personales, pero especialmente a la paciencia que ha tenido sabiendo que tengo una carga laboral pesada, Muchas Gracias Doc!!

## RESUMEN

### “DISEÑO Y CONTROL DE UN INVERSOR PARA UN GENERADOR EÓLICO”

Ing. Rubén Alonso López Valles

Candidato a Maestro en Ingeniería Mecatrónica

División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de  
Chihuahua

Chihuahua, Chih. Enero 2020

Director de Tesis: c.Dr. Rogelio Enrique Baray

La sobreexplotación de los combustibles fósiles en el mundo en los últimos años para la generación de la energía eléctrica ha tenido un impacto catastrófico en el medio ambiente por la gran contaminación que es generada en su extracción y en su uso, además se está presentando el agotamiento de dichos combustibles por el excesivo uso de ellos. Por lo cual actualmente se realizan investigaciones en diversas aéreas de la ciencia para el desarrollo de fuentes de energía, tales como las denominadas energías renovables entre las cuales se mencionan fotovoltaica, eólica, mareomotriz, termo solar, químicas, entre otras, de las cuales la energía eólica es una de las que tiene mayor presencia en el mundo.

En el presente trabajo se realizará el análisis de las diferentes topologías de conversión y control actuales de las turbinas eólicas como a su vez de las diferentes topologías *Z Source* para la realización de un marco teórico de un sistema generador-convertidor de energía del tipo modulación de ancho de pulso sinusoidal (*SPWM por sus siglas en inglés*).

Por ello la presente investigación propone realizar un diseño de un sistema de control mediante transistores bipolares de compuerta aislada (IGBT por sus siglas en inglés) con el control mediante la modulación de ancho de pulso sinusoidal, realizando la implementación de una red de impedancias *Z-Source*, con el motivo de incrementar el voltaje de salida del sistema a distintas velocidades de viento de una manera eficiente y con calidad.

## ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 2. TURBINA EÓLICA.....	10
2.1 Aerogeneradores de eje vertical y horizontal.....	12
2.2 Aerogenerador de eje vertical .....	13
2.2.1 Aerogenerador con rotor <i>savonius</i> .....	14
2.2.2 Aerogenerador con rotor <i>darrieus</i> .....	15
2.3 Aerogenerador de eje horizontal.....	16
2.3.1 Tipos de aerogeneradores de eje horizontal .....	17
2.3.1.1 Tres-Aspas.....	17
2.3.1.2 Dos-Aspas .....	18
2.3.1.3 Una-Aspa .....	19
2.3.1.4 Aerogenerador orientado a barlovento.....	19
2.3.1.5 Aerogenerador orientado a sotavento .....	20
2.3.1.6 Torres de Celosía .....	21
2.3.1.7 Torres tubulares.....	21
2.4 Generadores eléctricos en aerogeneradores .....	25
2.5 Tipos de generadores eléctricos en aerogeneradores.....	26
2.5.1 Generadores asíncronos o de inducción.....	27
2.5.1.1 Generador de inducción con rotor jaula de ardilla con banco de capacitores (GIRJ).....	28
2.5.1.2 Generador de inducción con rotor jaula de ardilla con convertidor de frecuencia (GIRJ) .....	28
2.5.1.3 Generador de inducción con rotor de alimentación simple.....	29
2.5.1.4 Generador de inducción con rotor doblemente alimentado (GIRDA).....	30
2.5.2 Generadores síncronos.....	31
2.5.2.1 Generador síncrono con imanes permanentes (GSIP) .....	32
2.5.2.2 Generador síncrono con rotor devanado y convertidor .....	32
2.5.2.3 Generador síncrono con dos convertidores de potencia.....	33
2.5.2.4 Generador síncrono de múltiples polos.....	34

2.6 Sistemas de control de los aerogeneradores .....	34
2.6.1 Tipos de control de la energía.....	36
2.6.1.1 Control del generador de inducción con rotor jaula de ardilla (GIRJ), velocidad constante y variable .....	36
2.6.1.2 Control del generador de inducción con rotor devanado y resistencia variable (GIRDRV) .....	36
2.6.1.3 Control del generador de inducción con rotor doblemente alimentado (GIRDA) .....	37
2.6.1.4 Generadores síncronos .....	38
2.7 Generador a utilizar.....	38
2.8 Rectificadores CA-CD.....	40
2.8.1 CA-CD en forma no controlada.....	40
2.8.2 CA-CD en forma controlada .....	41
2.9 Convertidor CD-CD .....	42
2.9.1 Convertidor <i>Buck</i> .....	43
2.9.2 Convertidor <i>Boost</i> .....	44
2.9.3 Convertidor <i>Buck-Boost</i> .....	45
2.9.4 Convertidor <i>Cúk</i> .....	46
2.9.5 Convertidor de puente completo u onda completa.....	47
2.10 Inversor CD-CA .....	48
2.11 Convertidores Trifásicos .....	50
2.11.1 Convertidor de voltaje tradicional.....	50
2.11.2 Convertidor de corriente tradicional.....	51
2.11.3 Convertidor <i>Z-Source</i> .....	52
2.11.4 Principales topologías del convertidor <i>Z-Source</i> .....	55
2.11.4.1 Inversor <i>Z-Source</i> de flujo bidireccional (BZSI).....	55
2.11.4.2 Inversor <i>Z-Source</i> de alto rendimiento (HP-ZSI).....	55
2.11.4.3 Inversor <i>Z-Source</i> de corriente de energización baja (IZSI).....	56

2.11.4.4 Inversor Z-Source de alto rendimiento con corriente de energización baja (HP-IZSI) .....	57
2.11.4.5 Inversor Z-Source conexión serie (SZSI) .....	57
2.11.4.6 Inversor Z-Source conmutación suave cuasi-resonante (QRSSZSI).....	58
2.11.4.7 Inversores Z-Source con punto neutro.....	58
2.11.4.8 Inversor Z-Source con el punto neutral anclado.....	60
2.11.4.9 Inversor EZ-Source (fuente embebida EZSI).....	61
2.11.4.10 Inversor Z-Source dual .....	61
2.11.4.11 Inversor Z-Source de cinco niveles con sujeción de diodos.....	62
2.11.4.12 Inversor Z-Source con inductores en serie .....	63
2.11.4.13 Inversor Z-Source-Quasi (QZSI).....	64
2.11.5 Z-Source principio de operación y control .....	65
2.12 Convertidor CA-CD-CA ( <i>Back-to-Back</i> ) utilizado .....	68
2.13 Problemas presentados .....	70
2.13.1 Generación de alta cantidad de armónicos por los generadores doblemente alimentados y suministrados a los transformadores de las turbinas eólicas.....	70
2.13.2 Captura pobre de energía en turbinas eólicas de velocidad variable.....	71
CAPÍTULO 3 CONTROL DEL GENERADOR EÓLICO.....	72
3.1 Simulación Z-Source (MatLab-Simulink) .....	72
3.1.1 Generador de modulación de ancho de pulso sinusoidal.....	72
3.1.2 Simulación control <i>SPWM</i> .....	74
3.1.3 Implementación de los <i>Shoot-Through Zero States</i> .....	75
CAPÍTULO 4. MODELO DE CONTROL DEL GENERADOR EÓLICO .....	82
4.1 Fuente de voltaje trifásica y generador asíncrono .....	82
4.2 Modelo de la turbina eólica .....	84
4.3 Modelo del control vectorial orientado al rotor.....	85
4.4 Lazos de control de corriente del rotor .....	89
4.4.1 Estimación del ángulo $\phi$ de referencia.....	89
4.4.2 Transformación de las corrientes del rotor.....	89



4.4.3 Transformación de las corrientes del estator.....	90
4.4.4 Implementación de reguladores proporcionales e integrales (PI).....	91
4.4.5 Cancelación de los términos de acoplamiento.....	93
4.5 Lazos de control de velocidad.....	94
4.5.1 Regiones de control de velocidad de la turbina eólica.....	94
4.6 Convertidor CA-CD-CA .....	98
4.7 Filtro trifásico conexión estator-red y transformador de relación.....	99
4.8 Modelo de control vectorial orientado a la red o estator .....	99
4.8.1 Estimación del ángulo $\phi$ de referencia.....	99
4.8.2 Transformación de las corrientes de la red o estator .....	99
4.8.3 Implementación de reguladores proporcionales e integrales (PI).....	100
4.8.4 Transformación del voltaje de corriente directa referido al estator ( <b><i>v<sub>bus</sub></i></b> ) y de la potencia reactiva de referencia.....	101
4.8.5 Cancelación de términos de acoplamiento .....	101
4.8.6 Transformación de las corrientes del estator.....	102
CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	104
5.1 Datos de la simulación para el control de un generador doblemente alimentado para la aplicación en un aerogenerador .....	104
Tabla 5.1.1 Datos del generador .....	104
Tabla 5.1.2 Datos turbina.....	105
Tabla 5.1.3 Datos <i>SPWM</i> y puente de <i>IGBTs</i> .....	105
5.2 Bloque 1 fuente de voltaje trifásica.....	106
5.3 Bloque 2 modelo de la turbina.....	106
5.4 Bloque 3 generador doblemente alimentado.....	108
5.5 Bloque 4 control vectorial del rotor .....	111
5.6 Bloque 5 generador de ancho de pulsos sinusoidal.....	112
5.7 Bloque 6 convertidor trifásico CA-CD-CA.....	113
5.8 Bloque 7 control vectorial orientado a la red o estator .....	113

5.9 Análisis de los resultados.....	115
5.3 Conclusión.....	125
REFERENCIAS.....	127
BIBLIOGRAFÍA.....	129

## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

En los últimos años los recursos que proporciona la naturaleza para generar energía, se han limitado para el hombre debido a que ha sobreexplotado dichos recursos de tal forma que en los últimos 100 años se han generado consecuencias que a un futuro inmediato pueden tener un impacto catastrófico para el planeta. Como ejemplo, estamos sufriendo las consecuencias de la sobreexplotación de los combustibles fósiles, los cuales se encuentran en agotamiento en algunas regiones del mundo, entre ellas México, además de que su utilización sin control alguno, ha llevado a generar un alto nivel de contaminación del medio ambiente, y con ello el mundo se enfrenta a dos problemas básicos, uno es el desabasto de los combustibles fósiles para generar energía eléctrica y el otro la degradación de algunos ecosistemas por causa de la contaminación generada en el ambiente, en los ríos, el mar, en la población y como también se ve reflejado en la alteración del clima por la misma contaminación, en el efecto invernadero, la lluvia ácida, tensiones bélicas, entre otras, amenazando con ello la salud y existencia del ser humano, plantas y animales.

Actualmente las tecnologías para generar energía basadas en combustibles fósiles ya no son sostenibles, por consecuente fue necesario la creación de fuentes de energía renovables como son: la energía fotovoltaica, la energía eólica, la energía mareomotriz, la energía termo solar, las energías químicas, entre otras, y que en algunas partes del planeta se empezaron a implementar. México es uno de los países que firmaron el protocolo de Kioto, el cual es una estrategia para reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global, y debido a ese compromiso México a través de su Secretaría de Energía ha desarrollado iniciativas y estrategias para el uso y adopción de fuentes de energía renovables.

Con el actual aumento de la contaminación ambiental y la crisis económica que enfrentan las fuentes de energía convencionales nos ha hecho conscientes recientemente de la importancia de utilizar a fuentes de energía renovables para satisfacer la creciente demanda de generación de electricidad. El viento como fuente renovable tiene un potencial eficiente en el sector de generación. El generador de inducción doblemente alimentado (*DFIG por sus siglas en inglés*), es utilizado debido a sus diversas ventajas sobre otros tipos de generadores eólicos tiene una creciente popularidad, tanto en el pasado, como en el futuro cercano. Por lo tanto, el análisis de rendimiento del generador de inducción doblemente alimentado es necesario para un parque eólico particular en términos de calidad de energía. [1]

La generación de energía eólica en comparación con otras fuentes de energía renovables se ha desarrollado a un ritmo rápido. Como la mayoría de las plantas de energía convencionales, las plantas de energía eólica deben garantizar que la calidad de la energía entregada a la red sea lo mejor posible. Los armónicos son el problema de la calidad de la energía más importante relacionado con las plantas de energía eólica donde dichos armónicos ocurren debido a la conmutación frecuente de los convertidores de potencia y la velocidad variable del viento. [2]

La generación de la energía eléctrica, generada por los sistemas eólicos se considera como un sistema de conversión de energía del viento (*WECS por sus siglas en inglés*), estos han tenido un crecimiento considerablemente en el mundo, desarrollándose diversas tecnologías. Esta diversidad de tecnologías dependen del tipo de turbina o generador utilizado para convertir la energía del viento en energía eléctrica, ya sea en corriente directa o en corriente alterna.

La energía eólica y su interacción con la red de distribución es compleja y, con la variabilidad del viento, constantemente se generan diferentes problemas que se transmiten hasta la interfaz electrónica de potencia de la turbina eólica y al transformador de la turbina eólica (*WTT por sus siglas en inglés*) que se encuentra conectado a la red de distribución.

La energía eléctrica es la forma de energía más importante en el mundo, por lo que es necesario generarla, transportarla, distribuirla de forma confiable, económica y con el mayor aprovechamiento posible.

La creciente demanda de recursos energéticos de bajo impacto ambiental ha intensificado la importancia de los parques eólicos en muchos países. Sin embargo, varias discusiones técnicas sobre la integración de estos generadores a redes eléctricas están motivadas por los impactos de distorsión armónica en el bus de acoplamiento. De hecho, los dispositivos electrónicos de potencia juegan un papel importante en diferentes esquemas de generación eólica, aunque su emisión armónica afecta directamente los estándares de calidad del voltaje. [3]

Al considerar la integración de la red, se reconoce que los parques eólicos pueden generar impactos en la calidad de la energía en el punto de conexión. Enfocando la atención hacia este marco, se ha realizado un gran esfuerzo para lograr el nivel de compatibilidad requerido entre el aerogenerador y la red de CA. Entre los diversos fenómenos de calidad de potencia existentes, la distorsión armónica total (*THD por sus siglas en inglés*), emerge como un desafío relevante. De hecho, los convertidores de electrónica de potencia total o parcial existentes en los sistemas de conversión de energía eólica tienen un efecto directo sobre la distorsión armónica total y la búsqueda de soluciones para reducir la inyección de corriente armónica emerge como un problema importante. [4]

Hoy en día la energía eólica es uno de los sistemas de energía renovable de más rápido crecimiento. Los principales componentes necesarios para la generación de energía eólica son la turbina, la caja de cambios, el generador, el transformador elevador, la góndola y la torre. Los transformadores de la turbina eólica (*WTT por sus siglas en inglés*), actúan como un enlace entre las turbinas eólicas y la red de distribución. Se eleva el bajo voltaje de salida desde el generador a un nivel de voltaje de distribución más alto. Sin embargo, los transformadores de turbinas eólicas se consideran uno de los componentes sensibles y débiles en un parque eólico. El papel de los transformadores de turbinas eólicas generalmente se realiza

mediante transformadores convencionales, pero la intermitencia de la energía eólica impone algunas especificaciones exigentes. La salida variable de voltaje y corriente del generador debido a la velocidad variable del viento se identifica como una de las fallas generalizadas en los transformadores. Los transformadores de turbinas eólicas se enfrentan a varios problemas eléctricos, mecánicos y de corrosión. Esto resalta el hecho de que los transformadores de distribución convencionales no pueden actuar siempre como transformadores de turbinas eólicas, su diseño debe ser modificado de acuerdo con la salida generada y otros factores externos. [5]

Como se mencionó anteriormente algunos generadores eólicos producen o generan distorsiones armónicas, esto es debido a la electrónica de potencia que utilizan para su vinculación con la red. Estos armónicos son variables en el tiempo ya que se relacionan con las variaciones en la velocidad del viento. El propósito de ese trabajo es presentar una mejora a la metodología para el cálculo de incertidumbre en el flujo de cargas armónicas, a través de la teoría de la posibilidad, la cual fue previamente desarrollada por los autores Andrés Arturo Romero-Quete, Gastón Orlando Suvire, Humberto Cassiano Zini y Giuseppe Rattá. La mejora consiste en incluir la incertidumbre debida a las variaciones de la velocidad del viento. Para probar la metodología, se realizan simulaciones en el sistema de prueba de 14 barras de la IEEE, conectando en una de las barras, un parque eólico compuesto por diez turbinas del tipo FPC (*Full Power Converters*). Los resultados obtenidos muestran que la incertidumbre en la velocidad del viento tiene un efecto considerable en las incertidumbres asociadas a las magnitudes de las tensiones armónicas calculadas. [6] Por lo cual el rol que juega el convertidor electrónico de potencia para transferir la energía eléctrica es muy importante.

Teniendo en cuenta que el convertidor electrónico de potencia que está entre el generador eléctrico y el transformador tiene como una de sus características principales un convertidor CD-CD o estabilizador del bus de voltaje de CD que alimenta al inversor, es tema de investigación actual el mejorar el desempeño de este convertidor. En esta investigación se utilizó un convertidor denominado Z-



*Source* que emplea una red (o circuitos) de impedancias única para acoplar el circuito principal del convertidor (inversor) a la fuente de poder, en este caso, el generador eléctrico, proporcionando así características únicas que no se pueden obtener en los convertidores tradicionales de fuentes de voltaje y fuentes de corriente, donde se utilizan un condensador y un inductor respectivamente. Para este caso de estudio cuya fuente de alimentación es un generador eólico, se introdujo el uso del convertidor *Z-Source*, para dar estabilidad a la variación del voltaje generado, debido a la fluctuación del viento. El convertidor *Z-Source* supera las barreras conceptuales y teóricas, como también las limitaciones de los convertidores de voltaje tradicionales y los convertidores de corriente tradicionales, y proporciona un nuevo concepto de conversión de potencia. El concepto de *Z-Source* se puede aplicar a todas las conversiones de potencia como son: CD-CD, AC-CD, AC-AC y CD-CD. [7]

Utilizando el concepto del *Z-Source* enfocándonos principalmente en los convertidores de CD-CD, observamos que estos convertidores cuentan con una red de impedancias que generalmente tienen la característica de alta ganancia, y que es adecuada para ser aplicada en los sistemas de generación distribuida. A medida que se han propuesto más y más topologías, es importante resumir el método de construcción de los convertidores *Z-Source* CD-CD y comparar su rendimiento. Seleccionando el tipo de redes de impedancia, la forma de conexión a la fuente de poder y el estilo de la corriente de salida, se selecciona una de las tres formas típicas de conexión para el problema a solucionar. [8]

Lo anterior lleva a que los convertidores electrónicos de potencia encargados de transformar la forma de energía eléctrica proporcionada por el tipo de generador, se diseñen de tal manera que proporcionen la forma de energía eléctrica necesaria con la mayor eficiencia posible.

Por lo cual, los dos objetivos principales de los sistema de conversión de energía del viento (*WECS por sus siglas en inglés*) es extraer la máxima potencia del viento y alimentar a la red de distribución con electricidad de alta calidad.

Si se consideran esos dos objetivos en el proceso de la conversión y adecuación de la energía, se deben de considerar las siguientes tres etapas que se muestran en la figura 1.1.

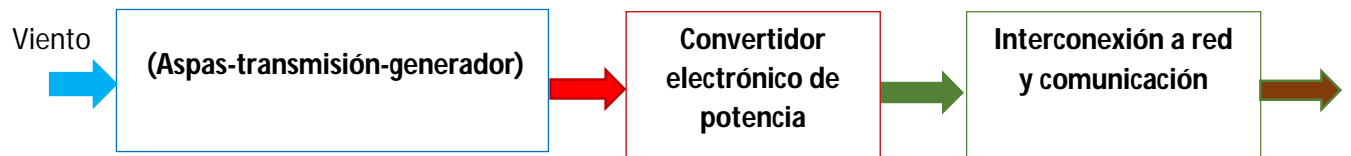


Figura 1.1 Diagrama a bloques de las tres etapas del proceso de conversión de la energía eólica a eléctrica.

La configuración anterior presenta tres problemas: el primero está relacionado con el problema eólico-mecánico del diseño de toda la turbina, desde las aspas hasta el generador, este problema no es competencia de la presente tesis, por lo cual, queda fuera de su alcance, sin embargo, la señal eléctrica generada si es un problema para la segunda etapa y es ahí donde se interviene con la presente tesis.

El segundo problema es el convertidor electrónico de potencia, el cual es el motivo principal de la presente tesis ya que debe de tomar la señal eléctrica enviada por el generador, eliminar todo aquello que no forme parte de la señal correcta y transformarla a la forma correcta de energía eléctrica que debe ser utilizada.

El tercer problema es la interconexión a la red de distribución eléctrica y la comunicación que el sistema debe tener con otros sistemas supervisores, el cual tampoco es competencia de este trabajo de tesis.

Entonces, para la presente tesis se considera que el problema a resolver es el segundo de los mostrados anteriormente y que tiene que ver con la señal que proporciona el generador ya que la etapa del convertidor electrónico de potencia debe de acondicionar la señal de forma que responda eficaz y eficientemente a las variaciones de la señal eléctrica (fluctuaciones del viento) proporcionada por el generador y a las variaciones de la demanda de la carga. Lo anterior depende de algunos factores, como el comportamiento de los niveles de voltaje y corriente que

proviene del generador y a su vez estos dependen de la velocidad y dirección del viento que mueven el eje del generador. Se considera que la velocidad del viento varía en un rango muy amplio, por lo tanto, la velocidad de la turbina debe ajustarse constantemente para que la potencia sea maximizada.

El cambio del viento y el ajuste constante de la turbina, provocan que se generen diversos factores que distorsionan tanto la magnitud como la forma de la energía. Algunos de estos factores son los sobre voltajes, e inclusive sobre corrientes, los cuales provocan calentamientos indeseados en la máquina generadora, vibraciones que provocan desgaste en los componentes, reduciéndose la eficiencia de la energía eléctrica, estos factores a su vez afectan considerablemente al sistema de control de potencia y a la interacción con el transformador de la turbina eólica (*WTT por sus siglas en inglés*), que alimenta las líneas de distribución.

Por lo anterior, se analizaron los distintos tipos de control de las diferentes turbinas eólicas, como también el análisis de generadores de inducción (asíncrono) y síncronos en turbinas eólicas y a su vez la interacción que tienen con el transformador de la turbina eólica, que se encuentra conectado a la red de distribución.

Se diseñó un sistema de control de potencia mediante *IGBT's* para una turbina eólica que cuenta con un generador asíncrono (Jaula de ardilla), con el objetivo de reducir los armónicos generados por el sistema de manera eficiente.

Se obtuvo un análisis de las diferentes tecnologías de conversión y control actuales de las turbinas eólicas, y un marco teórico de un sistema generador-convertidor de energía tipo modulación de ancho de pulso (*PWM por sus siglas en inglés*) para una turbina eólica con un generador asíncrono (Jaula de ardilla), así como también, un modelo matemático para el inversor considerando los modelos establecidos para las perturbaciones eólicas.

Se realizó el análisis del diseño y simulación del convertidor electrónico de potencia propuesto, mediante la dinámica del generador eólico y el modelo de carga no lineal, identificando las variables a controlar de acuerdo a las velocidades del viento, que cuenta con las siguientes etapas: CA-CD, CD-CD, CD-CA, para la turbina eólica con el generador asíncrono (Jaula de ardilla).

Se caracterizó el sistema obteniendo los parámetros del convertidor electrónico de potencia para el modelo matemático y se desarrolló la técnica de control para mantener estable el flujo de energía entre la fuente primaria (viento) y la demanda de la carga (conexión con el transformador de la turbina eólica).

El capítulo 2 (turbina eólica), describe la generación de energía mecánica por medio de la energía cinética del viento, la cual es transformada en energía útil, haciendo énfasis en la generación de energía eléctrica por medio de aerogeneradores, donde se muestra un desglose de como se encuentran divididos los aerogeneradores y los distintos tipos de generadores eléctricos, los cuales son utilizados en los generadores, además muestra los convertidores de voltaje y corriente tradicionales y las diferentes topologías de los convertidores *Z-Source*. Por último, se determina la configuración del aerogenerador a utilizar.

El capítulo 3 (control del generador eólico), muestra realización de la simulación del generador de pulsos sinusoidal (*SPWM por sus siglas en inglés*) y de la generación los estados de conmutación cero (*Shoot-Through Zero States*) los cuales son una de las características únicas de los convertidores *Z-Source*.

En capítulo 4 (modelo del control del generador eólico), se menciona la técnica utilizada para el desglose de las componentes vectoriales para la realización del control del generador eléctrico, al igual que se describen las distintas regiones óptimas del viento para la generación de la energía eléctrica, como también del convertidor de CD-CA-CD y la determinación de las fórmulas para la simulación.

En el capítulo 5 (resultados y conclusiones), se presentan los parámetros del generador, de la turbina eólica y del generador de pulsos. Además se explican los bloques de la simulación uno a uno, se evalúan los resultados de la simulación y se determina una conclusión.

## **CAPÍTULO 2. TURBINA EÓLICA**

Las fuentes de energías alternativas renovables son hoy en día, un área de desarrollo muy importante para cualquier país. De esas fuentes, la generación eólica es la más utilizada. Lo anterior se debe a que este tipo de generación es muy competitiva en zonas con gran cantidad de viento durante el año, requiere tiempos de construcción más cortos que otros y además sus costos también son competitivos.

La energía eólica es generada transformando la energía cinética del viento en energía mecánica, donde dicha energía proviene de la acción de la fuerza del viento que ejerce sobre las aspas que se encuentran unidas a un eje común. Este eje puede ser conectado a diferentes tipos de máquinas.

Como ejemplo, el molino de viento utilizado para moler, bombear agua o algún otro uso, para facilitar algún trabajo, aprovecha la energía almacenada en el viento, para transformarla en energía útil al ser humano. En este tipo de usos el viento es transformado en energía mecánica.

Los aerogeneradores pueden generar la energía por medio de dos métodos, un método puede ser cuando el viento empuja y hace girar las aspas generando movimiento rotatorio para mover la máquina generadora de energía eléctrica, o también puede ser por medio del principio de elevación (sustentación), en el cual las aspas se desplazan en dirección perpendicular a la dirección de la corriente de aire, generando la sustentación del aspa debido a las diferencias de presión entre cada lado y de esa forma generar una fuerza de empuje que genera el movimiento rotatorio del eje.

Los aerogeneradores que funcionan por elevación giran a velocidades mayores y son más eficientes por su diseño aerodinámico, que los aerogeneradores en el cual el viento hace girar las aspas. Si el eje común se encuentra conectado a



alguna máquina que realice bombeo de agua o se utilice para moler, el nombre que lleva es molino de viento. Pero si el eje común se encuentra conectado a alguna máquina que se utilice para generar energía eléctrica se denomina aerogenerador. Por lo tanto, el elemento principal del aerogenerador es el rotor giratorio, en el cual se encuentran conectadas las aspas que están unidas en el eje común, a través de ellas circula o pasa un flujo de viento de forma continua y esto hace que se genere una fuerza giratoria.

La energía eléctrica generada depende de la cantidad y la velocidad del viento. La energía es generada cuando las aspas giran y hacen girar el eje común al cual se encuentran conectadas. A su vez, el eje se encuentra conectado a una caja multiplicadora o caja de engranes, como se muestra en la figura 2.1, donde la caja multiplicadora se encarga de incrementar la velocidad rotatoria e impulsar al generador que convierte la energía rotatoria en energía eléctrica.



Figura 2.1 Aspas, generador y caja de engranes. [1]

Para calcular la potencia aerodinámica desde la energía cinética del viento se puede usar la ecuación 2.1:

$$P_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p (\lambda \beta) V^3 \quad (2.1)$$

Donde:

$P_a$  = Potencia

$R$  = Radio del rotor

$C_p$  = Coeficiente de Potencia del Rotor

$\beta$  = Paso del Aspa

$\lambda$  = Relación de Velocidad de la Punta del Aspa

$V$  = Velocidad del Viento

En el cual el coeficiente de potencia ( $C_p$ ) depende del ángulo del aspa, ( $\beta$ ) y de la relación de velocidad de la punta ( $\lambda$ ), la cual se define como la relación entre la velocidad lineal en la punta del aspa y la velocidad del viento, determinada en la ecuación 2.2.

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{V} \quad (2.2)$$

Donde:

$\omega_r$  = Velocidad Angular del Rotor

El tipo y capacidad de los convertidores del rotor determina el ámbito de velocidades de operación del aerogenerador, todo esto debido al que el rotor entrega una fracción de potencia a la red que es proporcional al deslizamiento.

### **2.1 Aerogeneradores de eje vertical y horizontal**

En la generación de la energía eólica se utilizan principalmente dos tipos de turbinas, las turbinas que cuentan con un eje horizontal (*HAWT* por sus siglas en inglés), y las turbinas que cuentan con un eje vertical (*VAWT* por sus siglas en

inglés), pero actualmente las turbinas que cuentan con un eje horizontal son las más utilizadas debido a la gran versatilidad para el control, conversión y generación eficiente de la energía que es brindada a la red de distribución.

## **2.2 Aerogenerador de eje vertical**

Históricamente los aerogeneradores de eje horizontal han sido utilizados en mayores aplicaciones que los de eje vertical, los aerogeneradores de eje vertical han sido utilizados para ciertas situaciones de interés, este tipo de aerogeneradores pueden contener rotores accionados por arrastre o impulsados por elevación, donde la turbina de eje vertical impulsada por arrastre es más común y es conocida como rotor *savonius* representado en la figura 2.2, que ha sido utilizada para bombeo de agua o en aplicaciones que requieran alto torque, una de las principales características de este tipo de turbinas es que pueden ser relativamente económicas de construir, donde en la práctica una máquina impulsada por arrastre tiene coeficientes de potencia intrínsecamente bajos. Este tipo de aerogeneradores son muy pesados en relación con la potencia que producen, como también son difíciles de proteger del daño de vientos fuertes.

Cuando los generadores de eje vertical han sido utilizados para la generación de energía eléctrica se han utilizado rotores accionados por elevadores donde este tipo de rotores cuentan con dos configuraciones: cuchillas rectas o cuchillas curvas. Principalmente se utiliza el rotor tipo *darrieus* representado en la figura 2.3, las principales ventajas de este rotor son: es omnidireccional y no requiere de algún mecanismo para orientarse continuamente hacia la dirección del viento, el eje de transmisión vertical simplifica la instalación de la caja de cambios, el generador eléctrico se ubica en el suelo por lo que es más sencillo el mantenimiento del mismo, consecuentemente la estructura es simple, como parte negativa de la estructura, normalmente se requieren cables anclados al suelo y sujetos a la cima del aerogenerador para brindar soporte, teniendo limitaciones en ciertas aplicaciones como podrían ser los sitios en el mar alejados de la costa (*offshore*).

En general, la máquina de eje vertical no se ha utilizado ampliamente porque su potencia de salida no puede controlarse fácilmente en existencia de vientos fuertes y cambiando simplemente el ángulo de la cuchilla.

### 2.2.1 Aerogenerador con rotor *savonius*

Son de los aerogeneradores más simples aerodinámicamente, son dispositivos de arrastre o resistencia que constan de dos o tres aspas. Mirando el rotor desde la parte superior las aspas forman la figura de una "S". Debido a la curvatura, las aspas experimentan menos resistencia cuando se mueven en contra del viento que a favor de él. Esta diferencia causa que la turbina *savonius* gire.

Como es un artefacto de arrastre, la turbina *savonius*, extrae mucho menos fuerza del viento que las turbinas de sustentación con similar tamaño. Por otro lado, no necesitan orientarse en la dirección del viento, soportan mejor las turbulencias y pueden empezar a girar con vientos de baja velocidad, es una de las turbinas más económicas y más fáciles de usar, pero no son útiles para la generación de electricidad debido a su elevada resistencia al aire.

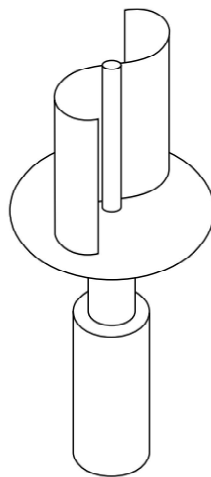


Figura 2.2 Aerogenerador con rotor *savonius*. [1]

### 2.2.2 Aerogenerador con rotor *darrieus*

El modelo de los aerogeneradores de eje vertical de más éxito comercial, consiste en un eje vertical asentado sobre el rotor, con dos o más aspas finas en curva unidas al eje por los dos extremos, el diseño de las aspas es simétrico y similar a las alas de un avión.

Evita la necesidad de diseños complejos en las aspas como los necesarios en los aerogeneradores de eje horizontal, permite mayores velocidades que las del rotor *savonius*, aunque sin alcanzar las generadas por los modelos de eje horizontal, además de que necesita de un sistema externo de arranque.

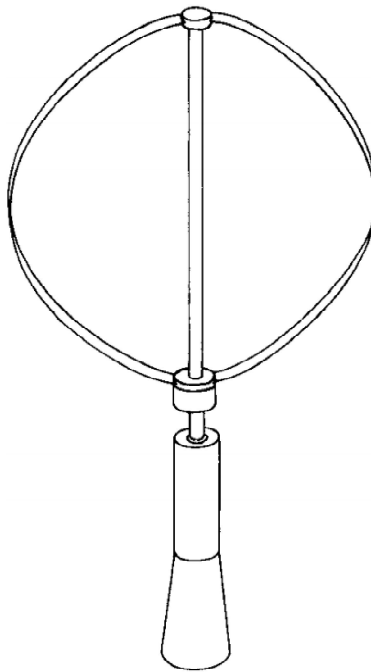


Figura 2.3 Aerogenerador tipo *darrieus* [1]

El subsistema principal de un aerogenerador de eje vertical tipo *darrieus* representado en la figura 2.3, está compuesto por:

- **Aspas:** Finas y simétricas con forma de ala de avión que se encuentran unidas al eje solo por los dos extremos y que cuentan con una curva especial

diseñada para para brindar un máximo rendimiento entra las dos uniones del eje.

- **Generador:** Utilizado para la generación de la electricidad, ubicado en la parte inferior del aerogenerador.
- **Engranajes:** Es el encargado de transportar y adecuar la energía del rotor a la carga de trabajo del generador.
- **Mástil:** Es el elemento estructural que soporta el peso de los elementos mecánicos del aerogenerador y las acciones exteriores, su función es transmitir los esfuerzos a la cimentación.
- **Motor de arranque:** Equipo instalado en la parte inferior del aerogenerador, el cual permite dar el primer impulso a las aspas.
- **Anemómetro:** Dispositivo el cual se localiza en la parte superior del aerogenerador y sirve para medir la velocidad del viento.
- **Cojinete:** Elemento que transmite las tenciones de las aspas a la estructura.
- **Sensor de vibraciones:** Elemento que evita vibraciones no deseadas producidas por altas velocidades de viento.
- **Freno:** Elemento que sirve para frenar o parar al rotor y las aspas, ya sea por vientos fuertes o por mantenimiento.

### 2.3 Aerogenerador de eje horizontal

La principal característica de este tipo de turbinas radica en que su eje de rotación se encuentra paralelo al suelo y a la dirección del viento, este tipo de aerogeneradores cuentan con un gran aprovechamiento de las corrientes de aire por la altura con la que cuentan (entre 40 a 100 metros de altura), por lo que tienen la capacidad de adaptarse a diferentes potencias con una eficiencia muy alta.

La velocidad del rotor y la potencia de salida pueden ser controladas mediante el ángulo de las aspas del rotor sobre su eje longitudinal, por otro lado, el control del ángulo de las aspas del rotor es la protección más eficiente contra el exceso de velocidad y velocidades extremas del viento, especialmente en aerogeneradores muy altos.



Una de las desventajas importantes de estos aerogeneradores es el transporte para la instalación, las dimensiones de las aspas requieren grandes distancias entre aerogeneradores, por tal motivo los parques eólicos con este tipo de aerogeneradores se localizan a las afueras de pueblos o ciudades, también las aspas tienen que estar diseñadas para soportar altas velocidades de viento por la gran altura a la que están localizadas.

### **2.3.1 Tipos de aerogeneradores de eje horizontal**

Los aerogeneradores de eje horizontal pueden clasificarse por el número de aspas, por la orientación con respecto a la dirección dominante del viento y por el tipo de torre utilizada.

#### **2.3.1.1 Tres-Aspas**

Es el tipo de aerogenerador más utilizado en la actualidad, consta de tres aspas colocadas formando  $120^\circ$  entre sí, para fines generadores de energía no se utiliza un mayor número de aspas por que aumentaría el peso y costo del aerogenerador, aunque para fines mecánicos como bombeo de agua se pueden encontrar diseños con un mayor número de aspas.

En la figura 2.4 se puede observar como varía el diámetro de las aspas y la altura del aerogenerador en función de la potencia requerida y que es necesario generar.

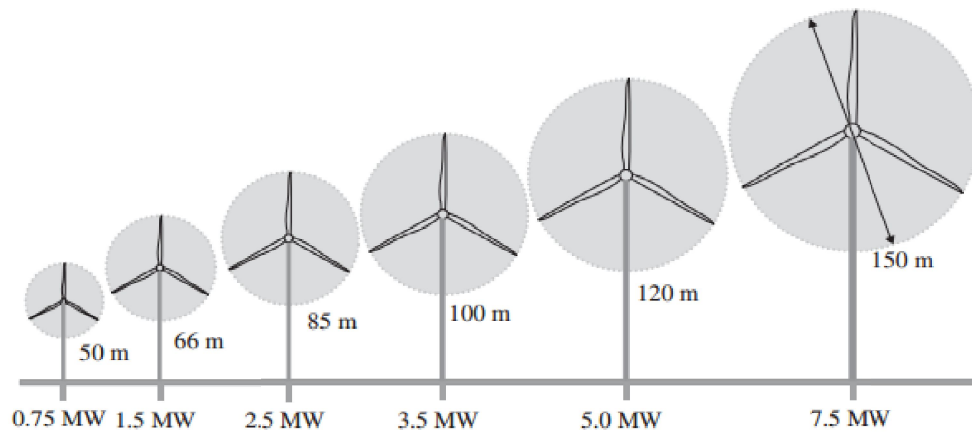


Figura 2.4 Diámetro de las aspas frente a la potencia nominal. [2]

### 2.3.1.2 Dos-Aspas

Este tipo de diseño ahorra en peso y costo del aerogenerador en relación al tres-aspas, pero se requieren mayores velocidades de giro para producir la misma energía que un aerogenerador de tres-aspas mostrado en la figura 2.5, y para evitar el efecto desestabilizador se requiere un diseño mucho más complejo, con un rotor oscilante y amortiguadores para evitar el choque de las aspas contra la torre.



Figura 2.5 Aerogenerador dos-aspas. [3]

### 2.3.1.3 Una-Aspa

Este tipo de aerogenerador, representado en la figura 2.6, tienen en mayor medida los mismos inconvenientes que los aerogeneradores de dos-aspas y requieren de un contra peso en el lado opuesto del aspa, por lo que el ahorro en peso no es tan significativo.



Figura 2.6 Aerogenerador una-aspa. [3]

### 2.3.1.4 Aerogenerador orientado a barlovento

Cuando el rotor se localiza orientado de frente a la dirección de viento dominante, consigue un mayor aprovechamiento de la fuerza del viento, pero requiere de un mecanismo de orientación hacia el viento, es el caso más utilizado actualmente para el diseño de los aerogeneradores, el cual se encuentra representado en la figura 2.7.

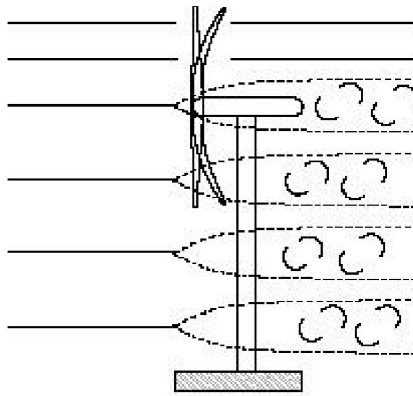


Figura 2.7 Orientación barlovento. [4]

### 2.3.1.5 Aerogenerador orientado a sotavento

Cuando el rotor se encuentra orientado en sentido contrario a la dirección del viento dominante, la estructura de la torre y la góndola o carcasa disminuyen el aprovechamiento del viento que debe tener el rotor, en este caso, el viento es el que orienta con su propia fuerza a la góndola o carcasa por lo que no son necesarios elementos de reorientación automatizada, aún cuando estos suelen ser utilizados como elementos de seguridad en los aerogeneradores, las aspas y la góndola o carcasa son construidas con una mayor flexibilidad que en el caso de las orientadas a barlovento mostrado en la figura 2.8.

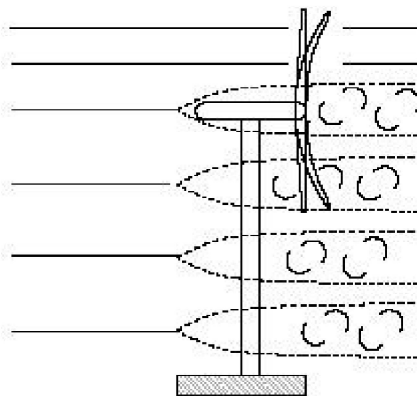


Figura 2.8 Orientación sotavento. [4]

### 2.3.1.6 Torres de Celosía

Son las construidas mediante perfiles de acero unidos mediante tornillería, son de bajo costo y fáciles de construir, pero requieren de verificaciones periódicas de la correcta sujeción de los segmentos de acero entre sí, un ejemplo de ellas se puede observar en la figura 2.9.



Figura 2.9 Torre de celosía. [5]

### 2.3.1.7 Torres tubulares

Consisten en grandes tubos de acero de forma tubular o cónica que proporcionan en su interior espacio para los equipos de suelo y para acceso a resguardo hacia la góndola o carcasa, requieren de una instalación más laboriosa y costosa, pero ofrecen una mayor resistencia y menos mantenimiento la cual se puede observar en la figura 2.10, este tipo de torres son las más utilizadas en la generación de energía.



Figura 2.10 Torre tubular. [3]

El subsistema principal de un aerogenerador de eje horizontal tipo torre tubular y tres-aspas, está compuesto por:

- **Base:** Parte fundamental del aerogenerador que le da sujeción y soporte contra las fuertes ráfagas de viento que tienen que soportar, esta principalmente forma una cimentación subterránea de hormigón armado que es adecuado o adaptado al terreno donde será colocado el aerogenerador.
- **Torre:** Parte del aerogenerador que soporta todo el peso de la góndola y a su vez mantiene las aspas elevadas del suelo, está principalmente construida de hormigón armado por la parte inferior y de acero por la parte de arriba, normalmente está hueca en su interior para poder tener acceso a la góndola para brindar mantenimiento o realizar alguna reparación.
- **Aspas y Rotor:** Los aerogeneradores actuales están formados principalmente por tres aspas por que proporcionan una mayor suavidad en el giro, las aspas están fabricadas principalmente de un compuesto de poliéster

reforzadas con fibras de vidrio o carbono, las cuales pueden llegar a medir hasta 100 metros de largo y se encuentran conectadas al buje del rotor donde con este buje las aspas son capaces de cambiar el ángulo de incidencia para tener un mejor aprovechamiento del viento.

En cuanto al rotor, generalmente son de tipo horizontal y pueden contar con articulaciones, como se muestra en la figura 2.11. También se encuentran normalmente posicionados en contra del viento (barlovento) para reducir las cargas cíclicas sobre las aspas, a diferencia de si se situara en la dirección del viento (sotavento).

- **Góndola o Carcasa:** Es la sala o el cuarto donde se ubica la sala de máquinas, que contiene: la caja de engranajes, el eje principal, el sistema de control, el generador, los frenos, los mecanismos de giro, entre otras cosas.
- **Caja de cambios:** Su función principal es la de adecuar la velocidad de giro del eje principal a lo que requiere el generador.
- **Generador:** En cuanto a los generadores se tienen diversos tipos como principalmente: Generador de inducción de jaula de ardilla, Generador de inducción bifásico y Generador síncrono, donde de ellos se derivan muchas combinaciones, y su principal función es el generar la energía de una manera óptima y de buena calidad.
- **Sistema de frenos:** Es un sistema de seguridad que está compuesto por discos de frenado que se activan en situaciones de emergencia o pueden ser activados manualmente para mantenimiento, su función proteger al aerogenerador de excesivas velocidades ocasionadas por fuertes ráfagas de viento.

- **Sistema de control:** Comprende un gran rango de componentes como son: sistemas de control del viento que se encuentra constituido por veletas y anemómetros colocados encima de la góndola para monitorear la dirección y velocidad del viento y el sistema de control de potencia el cual está encargado de rectificar, estabilizar e invertir la corriente generada.

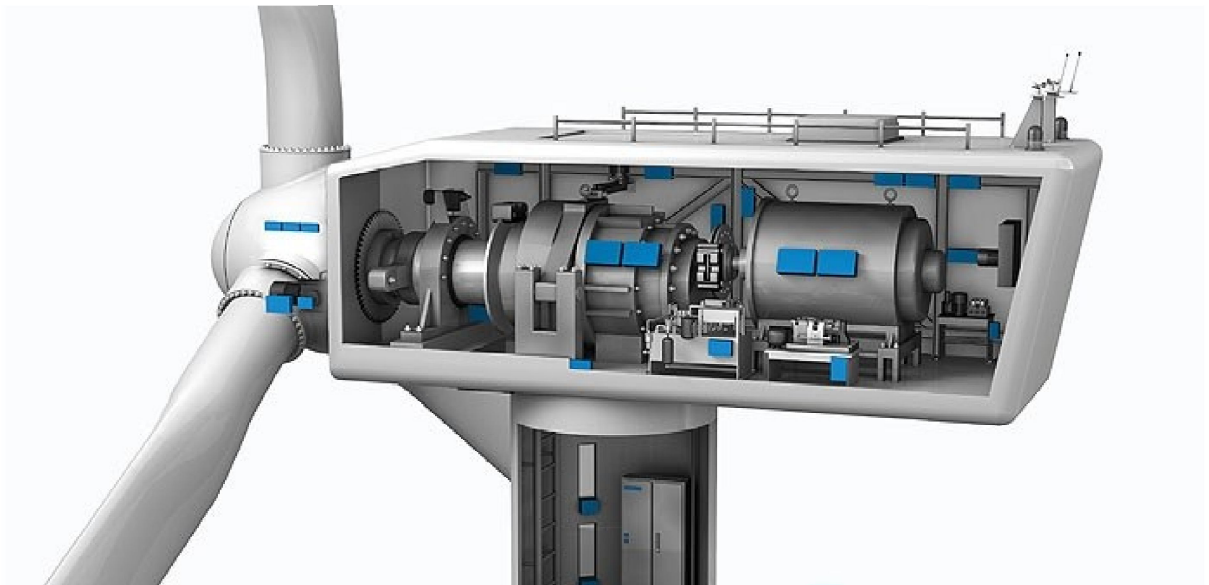


Figura 2.11 Aerogenerador tipo eje horizontal. [6]

La grafica de la figura 2.12 nos muestra el coeficiente de potencia en función de la velocidad especificada para los distintos tipos de aerogeneradores, donde la parte inferior de la gráfica nos muestra la velocidad específica y del lado izquierdo nos muestra el coeficiente de potencia de los aerogeneradores.



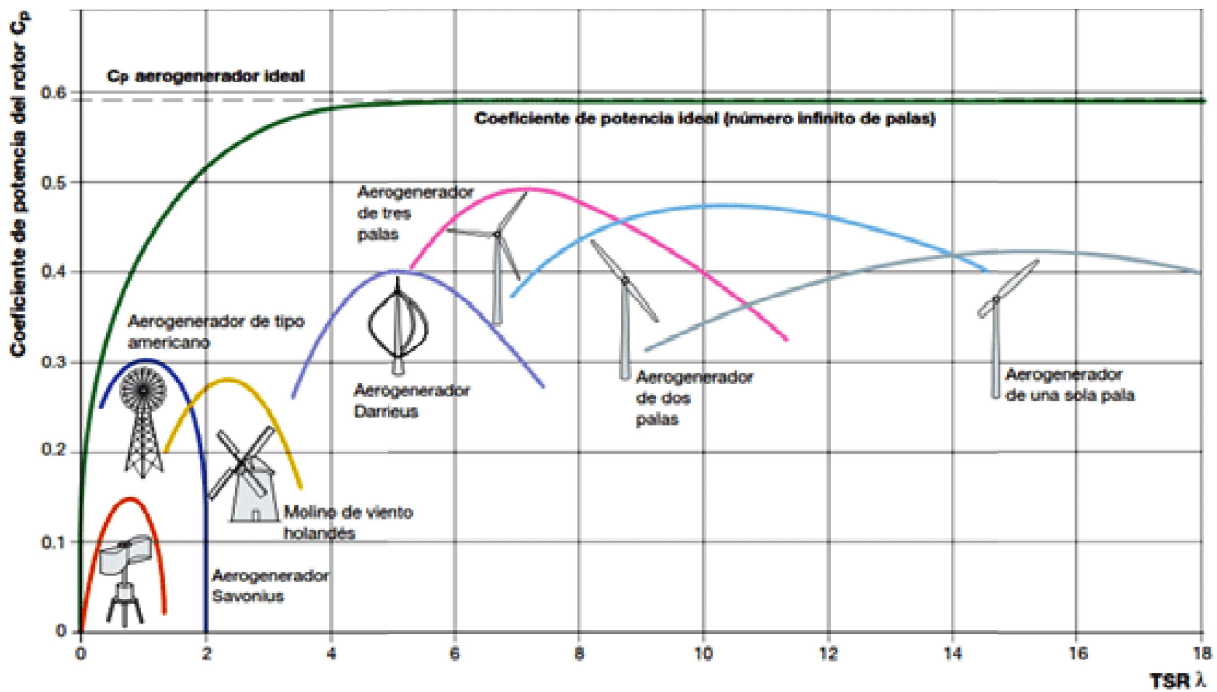


Figura 2.12 Gráfica de coeficiente de potencia contra velocidad especificada. [7]

Como se muestra en la gráfica de la figura 2.12, los aerogeneradores de eje horizontal presentan un coeficiente de potencia mayor que los de eje vertical, por lo cual los aerogeneradores de eje horizontal de tres aspas son los más usados para la producción de la energía eléctrica.

#### 2.4 Generadores eléctricos en aerogeneradores

Los generadores son los encargados de convertir la energía mecánica (energía de rotación), en energía eléctrica, pero tienen que trabajar con una fuente de alimentación, en este caso, el rotor de la turbina es la que suministra la energía mecánica. Los generadores son uno de los factores limitantes en los aerogeneradores, esto por las diversas topologías y tecnologías. Podemos encontrar generadores asíncronos o de inducción y generadores síncronos, entre otros de menos uso.

## 2.5 Tipos de generadores eléctricos en aerogeneradores

Las máquinas eléctricas usadas en los aerogeneradores son diversas, por lo tanto, es importante conocer las características de las máquinas eléctricas actuando como generadores de energía eléctrica, su comportamiento ante las variaciones de la velocidad del viento y como interactúan con los convertidores electrónicos de potencia encargados de transferir la energía de una forma a otra de acuerdo al tipo de generador, carga y las perturbaciones producidas en todo el proceso de conversión de la energía del viento a energía eléctrica en un aerogenerador eólico.

En el caso de los aerogeneradores que usan generadores de inducción se tiene la clasificación que se muestra en la figura 2.13.

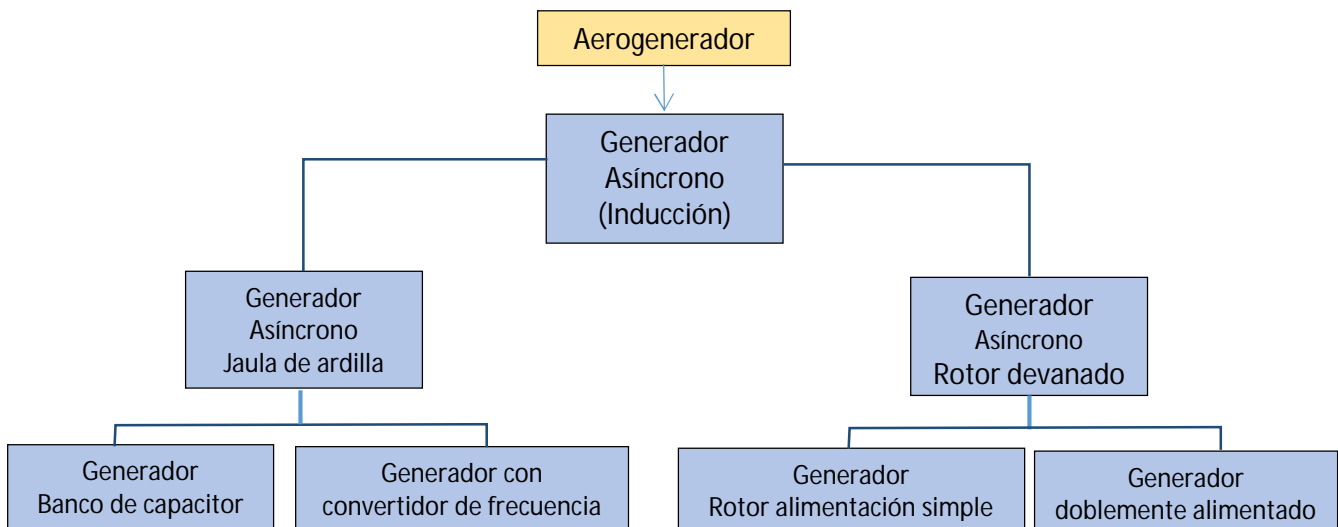


Figura 2.13 Clasificación de los generadores de inducción en los aerogeneradores

Por otro lado están las turbinas eólicas con generador síncrono y que también se desarrollan en diferentes configuraciones, como se muestra en la figura 2.14.

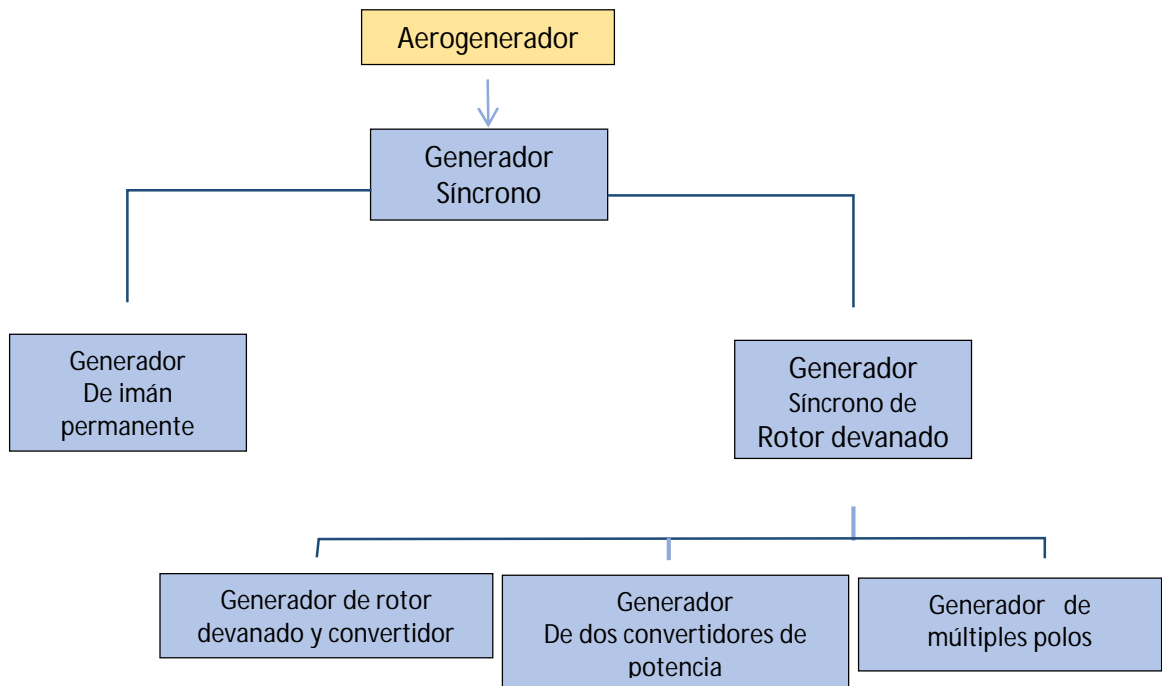


Figura 2.14 Clasificaciones de los generadores de síncronos en los aerogeneradores

### 2.5.1 Generadores asíncronos o de inducción

Estos generadores se pueden dividir dependiendo del tipo de rotor como se muestra:

- Rotor Jaula de Ardilla
  - Rotor Jaula de Ardilla con Banco de Capacitores
  - Rotor Jaula de Ardilla con Convertidor de Frecuencia
- Rotor Devanado
  - Rotor Alimentación Simple
  - Rotor Devanado Doblemente Alimentado

### 2.5.1.1 Generador de inducción con rotor jaula de ardilla con banco de capacitores (GIRJ)

En este sistema el rotor de la turbina eólica se encuentra acoplado al eje del generador eléctrico a través de una caja de engranes o transmisión, de relación fija, como se puede apreciar en la figura 2.15.

El generador eléctrico es de inducción con rotor de jaula de ardilla, este tipo de generador eléctrico consume potencia reactiva que puede tomar de la red o de bancos de capacitores, los cuales se usan desde la década de los 80's para compensar la potencia reactiva (de las bobinas).

Para limitar la corriente de arranque, se utiliza un sistema de arranque suave con tiristores principalmente, el cual es usado cuando la turbina se conecta a redes débiles que no son capaces de suministrar la potencia de arranque.

Los GIRJ son generadores de diseños simples pero robustos, de bajo costo y de mantenimiento simple, pero por otro lado presenta dificultades para la regulación del voltaje y frecuencia además de que depende de la energía reactiva del exterior.

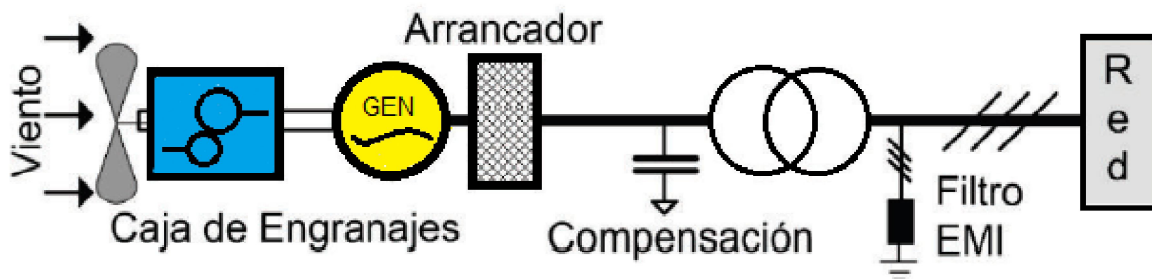


Figura 2.15 Generador de inducción con rotor jaula de ardilla con banco de capacitor. [8]

### 2.5.1.2 Generador de inducción con rotor jaula de ardilla con convertidor de frecuencia (GIRJ)

En este sistema se emplea un generador de inducción para producir corriente alterna de frecuencia variable, que posteriormente es convertida en corriente alterna

de frecuencia fija por medio de un convertidor de potencia conectado en serie con el generador, mostrado en la figura 2.16.

La ventaja de emplear este convertidor es que permite una variación de la velocidad del generador en función de las variaciones de la velocidad del viento, como desventajas el convertidor de potencia debe convertir al 100% la potencia entregada por el generador por lo tanto es costoso y genera altas pérdidas, los filtros de salida del inversor y los filtros de interferencia electromagnética deben de manejar también el total de potencia generada por lo tanto también son costosos.

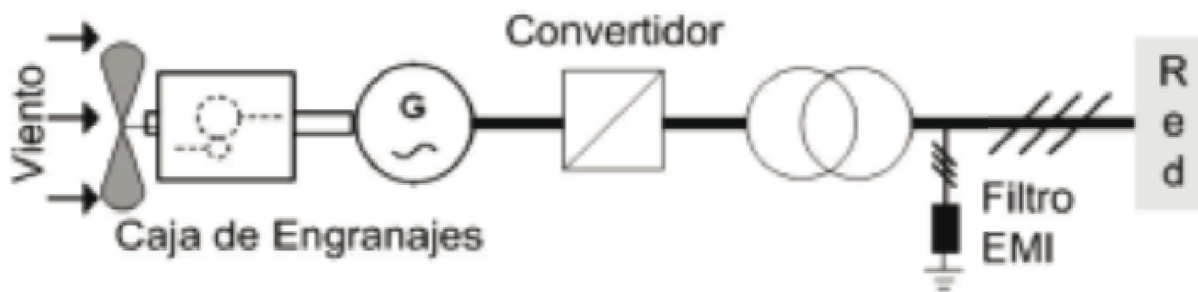


Figura 2.16 Generador de inducción con rotor jaula de ardilla con convertidor de frecuencia. [9]

### 2.5.1.3 Generador de inducción con rotor de alimentación simple

Este tipo de generador utiliza un motor de inducción con rotor bobinado a velocidad variable y un rotor eólico a velocidad variable con regulación activa, caja multiplicadora y con compensación de energía reactiva, el cual se muestra en la figura 2.17, donde el control es realizado variando la resistencia del rotor con un intervalo de velocidades de 2-5%, en el cual el sistema trabaja con velocidades de giro variables con estrecho margen de variación.

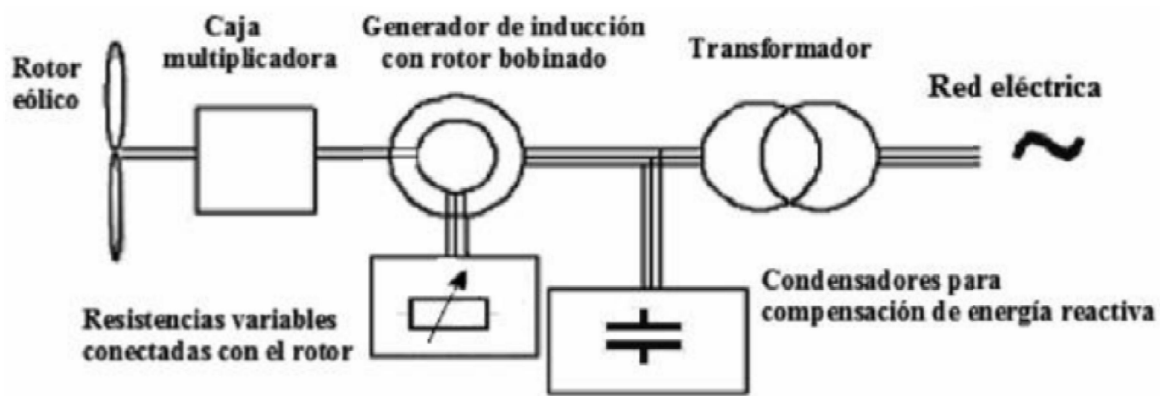


Figura 2.17 Generador de inducción con rotor devanado con resistencias variables. [8]

#### 2.5.1.4 Generador de inducción con rotor doblemente alimentado (GIRDA)

Este tipo de generadores es de los más utilizados en la actualidad y se emplea con rotores eólicos de velocidad variable y regulación de *pitch* en aerogeneradores de alta potencia, su configuración se encuentra mostrada en la figura 2.18.

La velocidad variable del rotor reduce los esfuerzos y la fatiga de los componentes mecánicos, como también las variaciones en el voltaje aprovechando mejor la energía del viento.

El funcionamiento se basa en inyectar al rotor corrientes trifásicas de amplitud, frecuencia y fase variables, mientras que el estator es conectado a la red de frecuencia constante para el envío a la misma de la energía eléctrica que es generada.

El estator está acoplado a la red de distribución por medio del transformador de la turbina eólica (WTT por sus siglas en inglés), y el rotor devanado con anillos rozantes está conectado a un convertidor que es instalado entre el rotor y la red.

El control se realiza por medio de la variación del voltaje y la frecuencia aplicada al rotor, si esta corriente fuera continua el generador funcionaría como un

alternador síncrono, por lo tanto, la variación del voltaje y la frecuencia permite controlar la excitación del generador y la velocidad de giro.

El convertidor está formado principalmente por dos unidades denominadas *Back to Back* en anti-paralelo, con transistores IGBT unidos a través de una conexión en corriente continua con un capacitor de aislamiento, este tipo de generadores permite controlar las intensidades de los dos lados del convertidor.

El costo de este sistema es más elevado que el de rotor de jaula de ardilla, por el costo del motor y el convertidor electrónico de potencia, también el mantenimiento presenta un alto costo, principalmente por las escobillas y los anillos rozantes en el rotor.

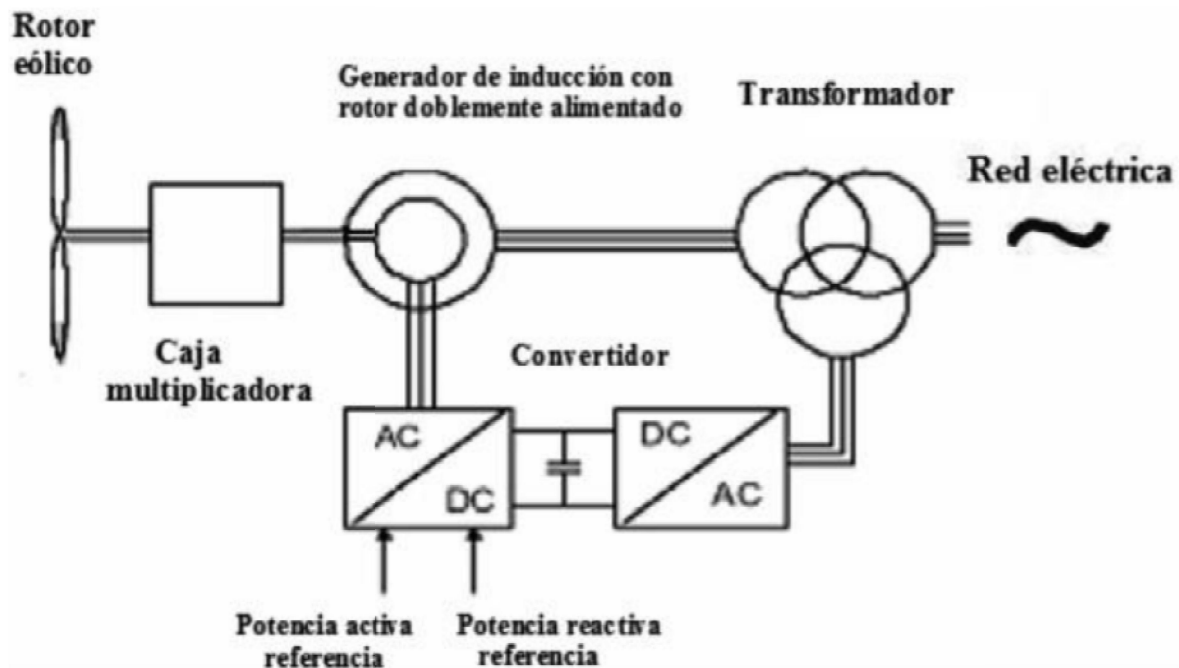


Figura 2.18 Generador asíncrono de rotor devanado doblemente alimentado. [8]

## 2.5.2 Generadores síncronos

Estos generadores se pueden dividir dependiendo del tipo de excitación:

- De imanes permanentes
- Rotor devanado

- Rotor devanado y convertidor
- Dos convertidores de potencia
- De múltiples polos

### 2.5.2.1 Generador síncrono con imanes permanentes (GSIP)

Estos generadores son similares a los generadores con excitación convencional, aunque se diferencia con la excitación de rotor, que es generada por imanes fijos y no por electroimanes, en este caso ni la regulación, ni el control reactivo puede ser realizado a través de la excitación, su configuración se muestra en la figura 2.19. Este tipo de generador no cuenta con escobillas, pero puede regular el *pitch*, además utiliza un convertidor para la totalidad de la potencia del generador, trabaja a velocidad variable y el cambio de frecuencia es realizado por el convertidor, pero cuentan con un mayor costo por los imanes fijos que están compuestos por elementos de tierras raras, en cambio cuentan con la ventaja de tener un mantenimiento de menor costo, así como de menores pérdidas por no contar con un circuito de excitación en el rotor.

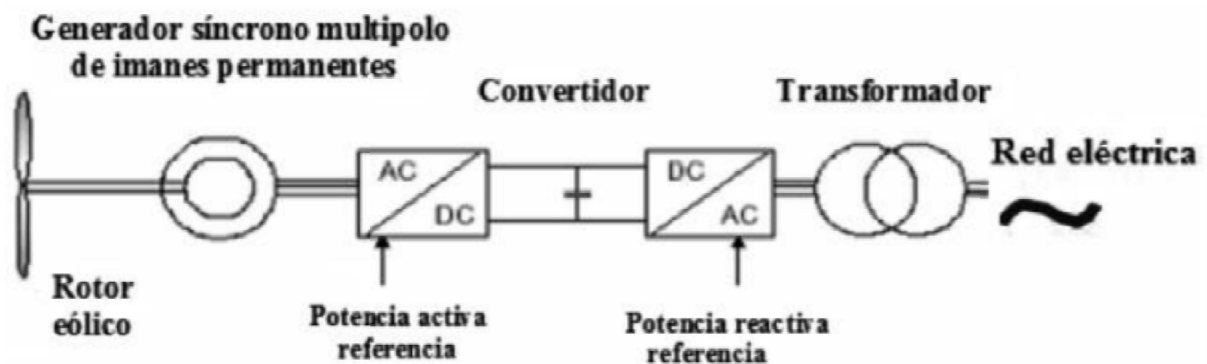


Figura 2.19 Generador síncrono sin escobillas de imanes permanentes con convertidor sin caja multiplicadora. [8]

### 2.5.2.2 Generador síncrono con rotor devanado y convertidor

Esta configuración es muy común en generadores eólicos, básicamente utiliza un generador sincrónico donde el bobinado del rotor es excitado con corriente continua a través de un convertidor de potencia, como se muestra en la figura 2.20.



La baja utilización en comparación a la configuración de imanes permanentes se debe a la necesidad de un circuito de excitación y a la necesidad de contar con anillos rozantes para ingresar a los bobinados del rotor.

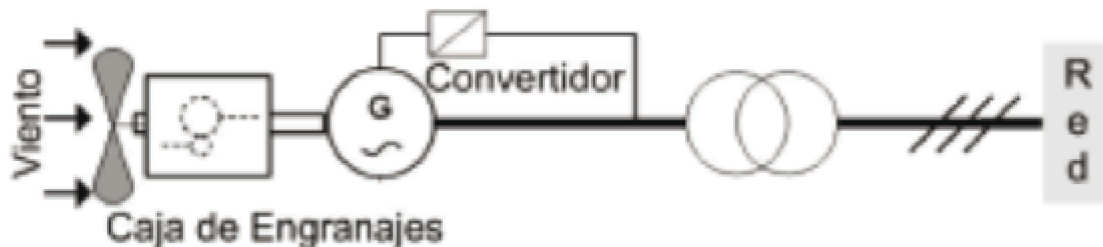


Figura 2.20 Generador síncrono de rotor devanado y convertidor. [9]

### 2.5.2.3 Generador síncrono con dos convertidores de potencia

Esta configuración utiliza un generador síncrono con rotor devanado, el cual es excitado con corriente continua rectificadas desde el convertidor de potencia, tiene además un convertidor de potencia de corriente alterna de frecuencia variable, a corriente alterna de frecuencia constante (50 o 60 Hz), como se muestra en la figura 2.21, respecto al generador síncrono de rotor devanado y convertidor, éste puede generar potencia a distintas velocidades del viento.

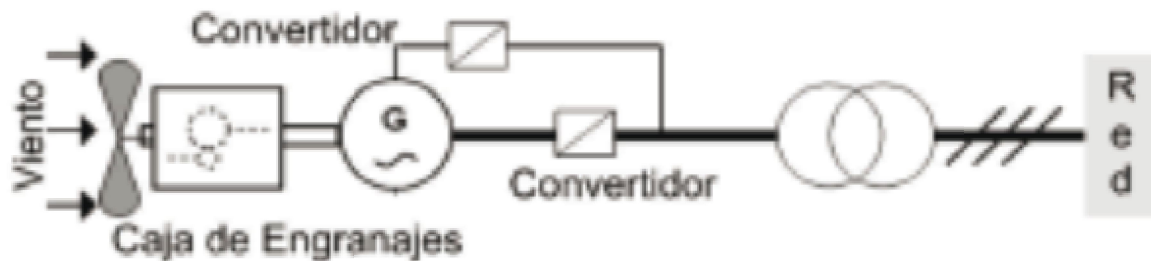


Figura 2.21 Generador síncrono con dos convertidores de potencia. [9]

### 2.5.2.4 Generador síncrono de múltiples polos

Estos generadores están formados por un rotor o inductor en el cual sus devanados son alimentados por corriente continua procedente de un rectificador y por un estator en donde es generada la corriente eléctrica, estos tipos de generadores son empleados en aerogeneradores de velocidad variable con control activo por variación de ángulo de las aspas, pueden ser acoplados también directamente al eje del rotor eólico sin caja multiplicadora o también con una caja multiplicadora, como se ve observa en la figura 2.22.

Como el accionamiento es a velocidad variable, el voltaje generado es a frecuencia variable y para la conexión a la red se requiere una frecuencia constante, por lo que se acopla un convertidor electrónico de frecuencia formado por un rectificador y un inversor acoplados por corriente continua. Tiene un mayor costo en comparación con los generadores de inducción debido al generador síncrono y al convertidor electrónico.

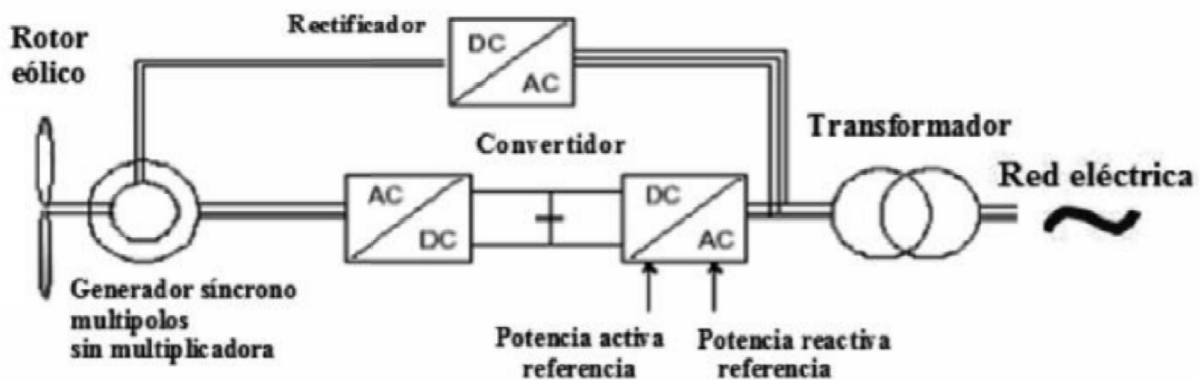


Figura 2.22 Generador síncrono de múltiples polos sin caja multiplicadora. [8]

## 2.6 Sistemas de control de los aerogeneradores

El sistema de control de un aerogenerador debe de estar diseñado según las características del terreno, los modelos del viento en relación a la ubicación y las características del aerogenerador y se compone principalmente de un convertidor CA a CD un convertidor CD a CD y un inversor CD a CA, como también pueden ser

un convertidor de CA a CD y un inversor de CD a CA o no presenta algún tipo de control, las principales funciones que el sistema de control debe realizar son:

- Maximizar la captura de la energía suministrada por el generador asíncrono doblemente alimentado, esto dentro del rango de operación de los convertidores e inversores.
- Mantener la calidad de la potencia generada que se suministrará al transformador de la turbina eólica.
- Ser capaz de reducir los armónicos generados por las variaciones del viento. Estos armónicos son transmitidos al rotor, el cual se encuentra conectado al sistema del control de potencia.
- Maximizar la vida útil del aerogenerador.

Los convertidores de potencia pueden ser organizados de varias maneras, mientras que el convertidor del lado del generador (*Generator Side Converter - GSC* por sus siglas en inglés), puede ser un rectificador de diodos o una fuente de voltaje convertidor a PWM (*Voltage Source Converter – VSC* por sus siglas en inglés), el convertidor del lado de la red (*Network Side Converter – NSC* por sus siglas en inglés), suele ser VSC PWM.

La estrategia para controlar el funcionamiento del aerogenerador y de la energía que fluye a la red de distribución depende en gran medida del tipo de convertidor empleado, en el cual la potencia activa se transmite a través de los convertidores con muy poca energía almacenada en el condensador de enlace (CC), por lo tanto, el par aplicado al generador puede controlarse mediante el convertidor del lado de la red. Cada convertidor puede generar o absorber potencia reactiva de forma independiente.

## 2.6.1 Tipos de control de la energía

### 2.6.1.1 Control del generador de inducción con rotor jaula de ardilla (GIRJ), velocidad constante y variable

- Velocidad Constante, el estator del generador se conecta a un banco de capacitores (para compensar la energía reactiva de la red) y a la vez al transformador de la turbina eólica mostrado en la figura 2.23.
- Velocidad Variable, el estator del generador se conecta a un convertidor de CA a CD que se encuentra conectado por medio de un capacitor al inversor CD a CA que está conectado al transformador de la turbina eólica, para conseguir una frecuencia constante.

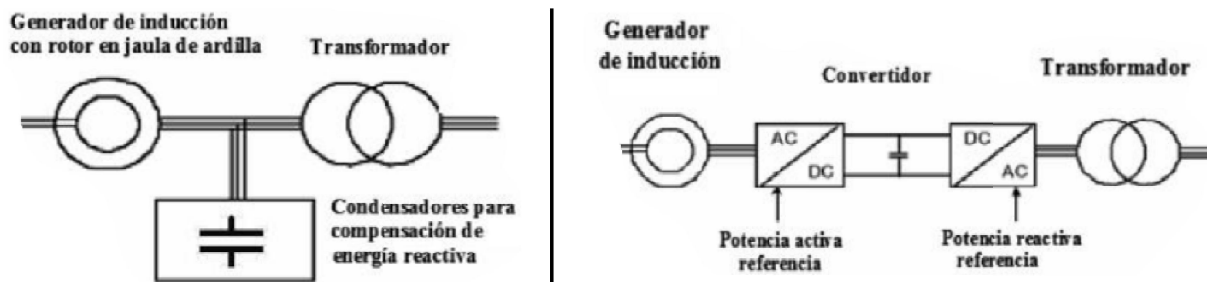


Figura 2.23 Control para el generador de inducción jaula de ardilla. [8]

### 2.6.1.2 Control del generador de inducción con rotor devanado y resistencia variable (GIRDRV)

- El control es realizado por medio de la variación de la resistencia del rotor, como es muestra en la figura 2.24.

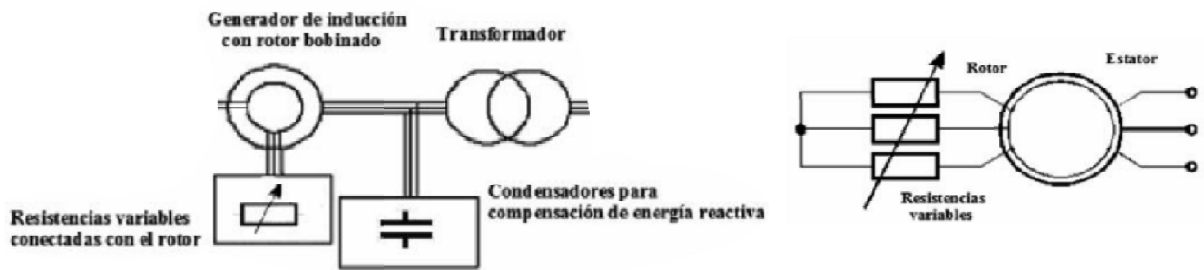


Figura 2.24 Control para el generador de rotor devanado y resistencia variable. [8]

### 2.6.1.3 Control del generador de inducción con rotor doblemente alimentado (GIRDA)

El control puede ser realizado por medio de:

- Un convertidor de CA a CD conectado a un capacitor que sirve como puente para la conexión al inversor de CD a CA,
- Un convertidor de CA a CD conectado a un convertidor CD a CD que sirve como estabilizado de la energía y puente para la conexión al inversor de CD a CA.
- Un rectificador de diodos conectado a un capacitor que sirve como puente para la conexión al inversor de CD a CA, donde sería la etapa final de la conversión, en la figura 2.25 se puede observar la configuración del control.

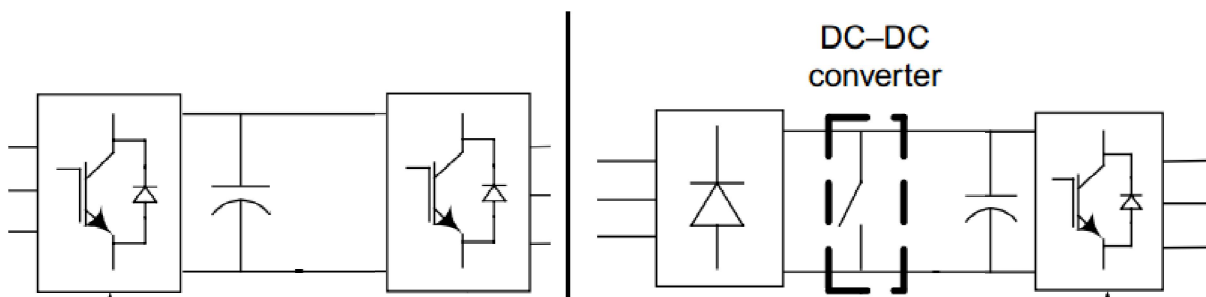


Figura 2.25 Control para el generador de inducción con rotor doblemente alimentado. [10]

#### 2.6.1.4 Generadores síncronos

- Generador Síncrono con Excitación Convencional (GSEC)
  
- Generador Síncrono con Imanes Permanentes (GSIP)

Pueden utilizar la misma topología que los generadores de inducción para la conversión de la energía.

#### 2.7 Generador a utilizar

La mayoría de las turbinas eólicas utilizan un generador asíncrono (o inducción) para generar corriente alterna, la utilización de este tipo de generadores es por la capacidad que tienen para producir potencia eléctrica útil a velocidades variables de rotación.

El generador de inducción se caracteriza por ser sencillo, de bajo mantenimiento, larga vida, versatilidad y de bajo costo, por estos motivos actualmente son muy utilizados en las turbinas eólicas.

En un generador doblemente alimentado (*DFIG Doubly Fed Induction Generator*), se refiere a una conexión en el que el rotor no está cortocircuitado sobre sí mismo o sobre resistencias externas, sino conectado a otra fuente de alimentación, y el estator se alimenta por una tensión y una frecuencia variable, normalmente estas fuentes no son independientes si no que están vinculadas entre sí por un convertidor de frecuencia y control de potencia.

En aplicaciones eólicas la conexión más usada para este tipo de generadores es donde las aspas se encuentran conectadas en común a un eje y este eje se conecta a una caja de engranes (caja multiplicadora) que a su vez está conectada al generador, los devanados del estator se conectan directamente al transformador y los devanados del rotor se conecta al convertidor electrónico de potencia, de aquí el nombre doblemente alimentado.

El tipo y capacidad de los convertidores del rotor determina el ámbito de velocidades de operación del aerogenerador, todo esto debido al que el rotor entrega una fracción de potencia a la red que es proporcional al deslizamiento, cuando la velocidad angular del aerogenerador es subsíncrona la potencia fluye de la red al rotor y cuando es supersíncrona, la potencia fluye del rotor al estator por medio de los convertidores.

La operación a velocidad variable es obtenida excitando mediante una tensión variable de cierta frecuencia al rotor, lo cual genera una corriente variable que permite esta función, los aerogeneradores de velocidad variable con generadores doblemente alimentados (*DFIG* por sus siglas en ingles), están siendo utilizados ampliamente en la actualidad en el campo de la generación eólica.

Debido a lo anterior los estándares de tolerancia de tensión para los aerogeneradores son cada vez más estrictos y este tipo de aerogeneradores presenta un mejor desempeño ante perturbaciones de tensión y regulación de tensión y potencia.

El generador es conectado directamente por medio del estator a la red de distribución eléctrica y cuando es conectado directamente a esta red se crea un lazo de retroalimentación por medio de un convertidor de frecuencia con el fin de controlar la excitación del rotor, con este lazo de retroalimentación tenemos dos ventajas:

- El voltaje del rotor está siendo controlado por el convertidor electrónico de potencia esto para controlar la potencia de salida del aerogenerador, regulando la tensión y la frecuencia de alimentación del rotor, con esto el aerogenerador será capaz de importar y exportar potencia reactiva, esto es muy importante para la estabilidad del sistema eléctrico y que permitirá permanecer a la máquina conectada al sistema, aún y cuando haya perturbaciones severas en el viento.

- Con las modificaciones de la frecuencia en las corrientes del rotor, estas frecuencias se traducen en una modificación de la velocidad de giro del rotor, que nos permite tener sincronizada la turbina con la red eléctrica, además hace que la turbina trabaje en el punto máximo de rendimiento cuando las velocidades del viento cambian.

Este tipo de arreglos permiten desacoplar las frecuencias mecánicas y eléctricas, y ayudan a mantener una frecuencia de salida estable independientemente de la velocidad con la que cuente el generador, su esquema se muestra en la figura 2.26. Un aerogenerador con control de dirección aprovecha siempre de la manera más eficientemente la dirección del viento.

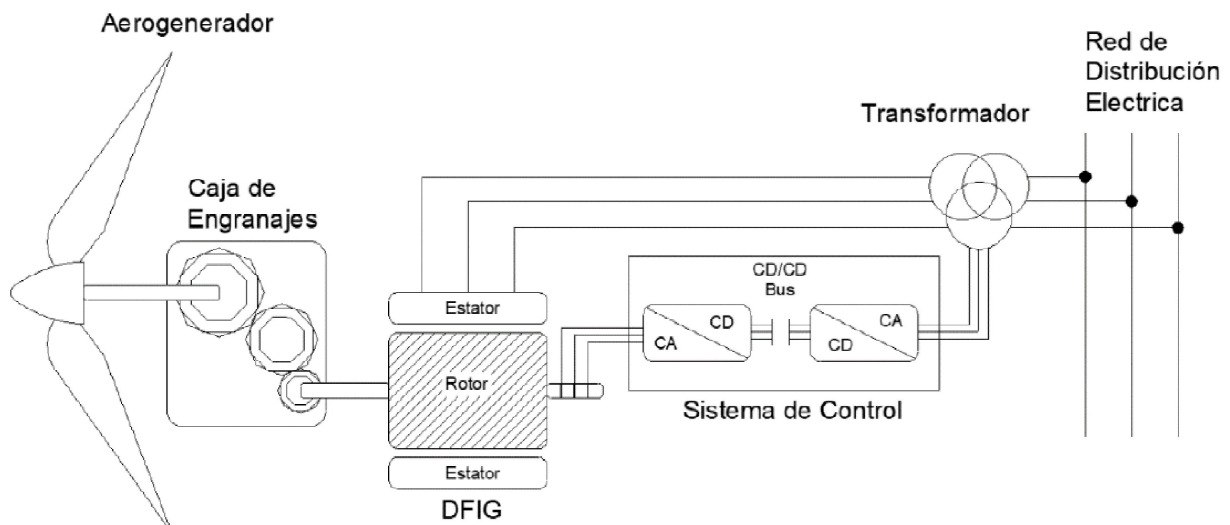


Figura 2.26 Esquema de un generador asíncrono doblemente alimentado.

## 2.8 Rectificadores CA-CD

### 2.8.1 CA-CD en forma no controlada

En la mayor parte de las aplicaciones de la electrónica de potencia, la entrada de la energía se presenta en ondas puras de voltaje de CA, ya sea de 50 o 60 Hz. Este tipo de rectificadores están compuestos por diodos, por el cual el flujo de la energía solo puede provenir desde el lado de CA (entrada) hacia el lado de CD



(salida), donde su utilización principalmente es en los suministros de conmutación, control de motores, servomotores, etc.

El voltaje de CD de la salida del rectificador debe tener la menor cantidad de rizados como sea posible, por lo tanto, la salida de este tipo de rectificadores es conectada a un condensador que tiene como función el realizar el filtrado, el cual se carga con un valor cerca del pico del voltaje de CA (entrada), por lo cual la corriente a través del rectificador es muy grande, la cual no fluye en forma continua (se vuelve cero por periodos infinitos durante cada semiciclo de la frecuencia de línea). Una de las principales desventajas de este tipo de rectificadores es que consumen corriente muy distorsionada de la fuente de alimentación principal, con lo cual se tiene un mayor calentamiento en los componentes. En la figura 2.27 se muestra la típica conexión de un rectificador trifásico de forma no controlada.

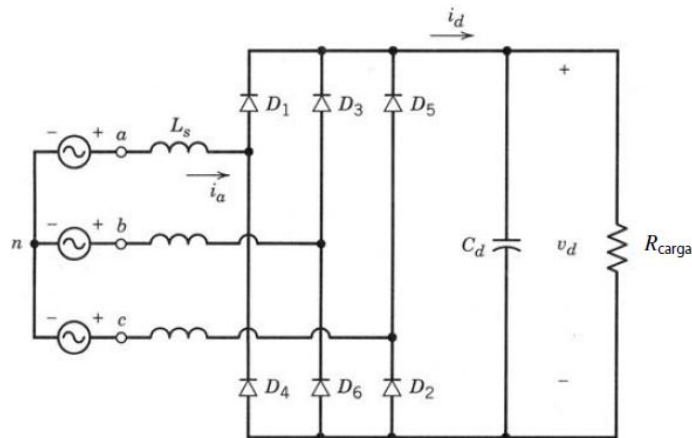


Figura 2.27 Rectificador trifásico, forma no controlada. [11]

### 2.8.2 CA-CD en forma controlada

En algunas aplicaciones, como los componentes con electrónica sensible, es fundamental que el voltaje de CD sea controlable. Esta rectificación controlada se logra con convertidores controlados por fases y frecuencia de línea, por medio de tiristores, los cuales pueden ser: Tiristor apagado por compuerta (*GTOs* por sus siglas en inglés), transistores bipolares de puerta aislada (*IGBTs* por sus siglas en inglés), tiristor controlado por compuerta (*IGBTs* por sus siglas en inglés), entre

otros. En la figura 2.28 se muestra un circuito de un convertidor trifásico de forma controlada.

Debido a la alta demanda y disponibilidad de interruptores de mejor control para altos voltajes y corrientes, este tipo de rectificadores por tiristores son utilizados en aplicaciones trifásicas de alta potencia donde es necesario o deseable tener el control del flujo de potencia en ambos sentidos entre CA y CD.

En estos rectificadores el instante en el cual un tiristor empieza o deja de conducir dependerá de las formas de onda del voltaje de AC (entrada) de la línea de frecuencia y de las entradas del control, además la conmutación de corriente de un dispositivo a otro ocurre en forma natural debido a los voltajes de CA (entrada).

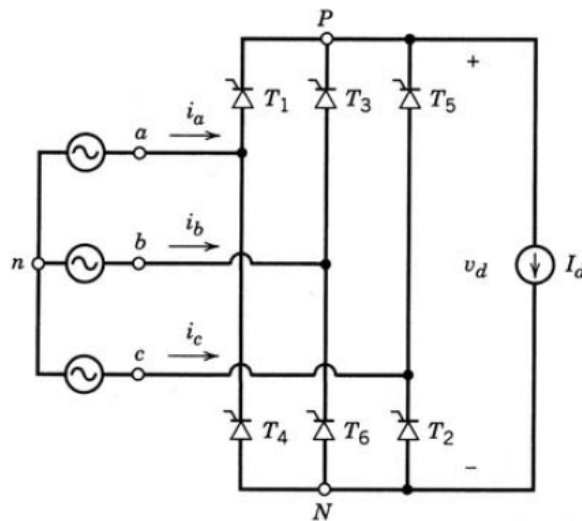


Figura 2.28 Convertidor trifásico de tiristores, forma controlada. [11]

## 2.9 Convertidor CD-CD

Estos convertidores son utilizados extensamente en sistemas de energía de CD regulados por conmutación y en aplicaciones de accionamientos motrices, la entrada de estos convertidores es generalmente un voltaje de CD no regulado que es obtenido mediante la rectificación del voltaje de línea, por lo cual tiene fluctuaciones en consecuencia a los cambios de la magnitud del voltaje de línea.

Son utilizados principalmente para convertir la entrada de CD no regulada en una salida de DC controlada a un voltaje deseado.

Los convertidores de CD-CD se encuentran clasificados como se muestra:

- Convertidor reductor (*Buck* por sus siglas en inglés)
- Convertidor elevador (*Boost* por sus siglas en inglés)
- Convertidor elevador/reductor (*Buck-Boost* por sus siglas en inglés)
- Convertidor *Cúk*
- Convertidor de puente completo

### 2.9.1 Convertidor *Buck*

Es un convertidor reductor con el cual se obtiene un voltaje medio de salida más bajo que el voltaje de entrada de CD, donde su principal aplicación es en fuentes de energía de CD regulada y en el control de velocidad de motores, el voltaje medio de salida es calculado por la fórmula 2.3.

$$V_0 = \frac{1}{T_s} \int_0^T v_0(t) dt = \frac{1}{T_s} \left[ \int_0^{t_{enc}} V_d dt + \int_0^{T_s} 0 dt \right] = \frac{t_{enc}}{T_s} V_d = DV_d \quad (2.3)$$

El circuito básico está constituido con un convertidor reductor para una carga puramente resistiva, suponiendo un interruptor ideal y un voltaje de entrada instantáneo constante ( $V_d$ ). Además de la carga puramente resistiva se obtiene la forma de onda que se muestran en la figura 2.29.

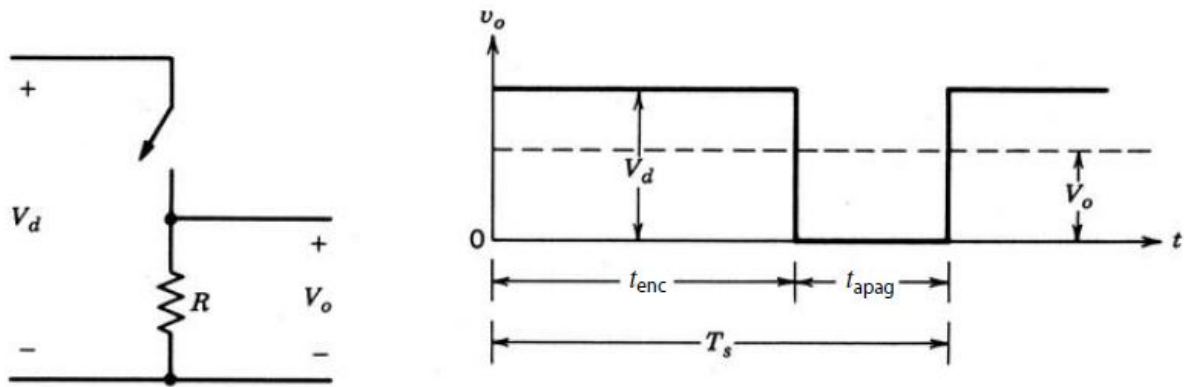


Figura 2.29 Convertidor reductor *Buck*. [11]

### 2.9.2 Convertidor *Boost*

Es un convertidor elevador, el cual su principal aplicación es en fuentes de CD reguladas y en el frenado regenerativo de motores de CD. Su característica principal es la obtención de un voltaje de salida mayor al voltaje de entrada.

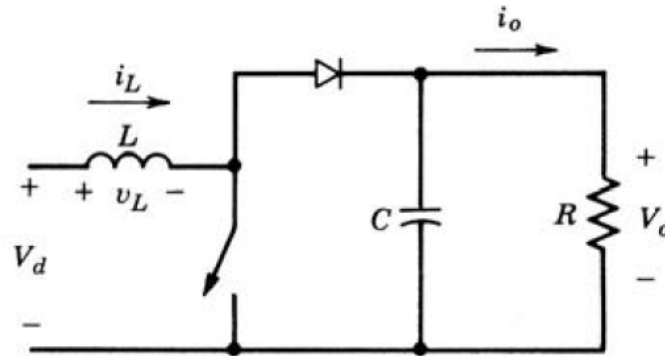


Figura 2.30 Convertidor elevador *Boost*. [11]

El funcionamiento del convertidor *Boost* de la figura 2.29 es el siguiente: cuando el interruptor está encendido, el diodo se polariza inversamente, lo que hace que la etapa de salida se aíse, la entrada suministra energía al inductor, cuando el interruptor está apagado la etapa de salida recibe energía tanto del inductor como de la entrada. En este análisis se está presentando el condensador de filtrado de salida muy grande con el fin de asegurar que el voltaje de salida sea constante.

### 2.9.3 Convertidor *Buck-Boost*

Su uso principal es en fuentes de energía de CD donde se pueda tener una salida de polaridad negativa respecto del punto común y donde el voltaje de salida pueda ser mayor o menor que el voltaje de entrada, como su nombre lo indica se compone de un convertidor “*Buck*” y un convertidor “*Boost*” que se encuentran conectados cascada.

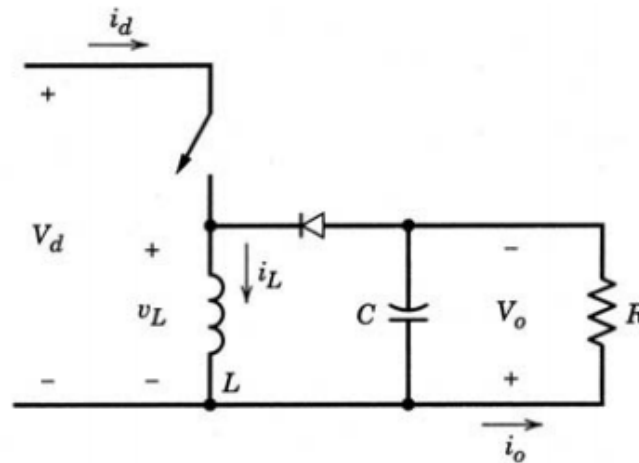


Figura 2.31 Convertidor reductor-elevador *Buck-Boost*. [11]

En la ecuación 2.4 representa un estado permanente en la relación de conversión del voltaje de salida al voltaje de entrada el cual es el producto de las relaciones de conversión de los dos convertidores conectados en cascada, permitiendo que el voltaje de salida sea mayor o menor que el voltaje de entrada con base en la relación de trabajo ( $D$ ).

$$\frac{V_o}{V_d} = D \frac{1}{1 - D} \quad (2.4)$$

En la figura 2.31 se muestra la conexión de los convertidores reductor y elevador, cuando el interruptor se encuentra cerrado el voltaje de entrada alimenta al inductor y el diodo se encuentra polarizado inversamente, cuando el interruptor se encuentra abierto, la energía acumulada en el inductor pasa a la salida en el cual

durante este intervalo el inductor no suministrara energía, teniendo en cuenta que el análisis de estado permanente su pone un condensador de salida muy grande lo que nos da un voltaje de salida constante.

#### 2.9.4 Convertidor Cúk

Es nombrado de esta manera en relación a su inventor, este convertidor es obtenido por medio del principio de dualidad aplicado a un circuito “*Buck-Boost*” mostrado en la figura 2.32, proporciona a la salida un voltaje regulado por polaridad negativa con respecto a la terminal común, donde el condensador  $C_1$  tiene la función principal de almacenar y transferir energía de la entrada a la salida, en un estado permanente los voltajes medios del inductor  $V_{L1}$  y  $V_{L2}$  son igual a cero, por lo tanto se determina la ecuación 2.5.

$$V_{C1} = V_d + V_0 \quad (2.5)$$

Donde  $V_{C1}$  es más grande que  $V_d$  y  $V_0$ . Esto si  $C_1$  es grande en estado permanente se puede suponer que la variación en  $v_{C1}$  de su valor medio  $V_{C1}$  es muy chico, aún teniendo en cuenta que acumula y transfiere energía de la entrada a la salida.

Cuando el interruptor se encuentra apagado las corrientes del inductor  $i_{L1}$  e  $i_{L2}$  pasan a través del diodo, el condensador  $C_1$  se carga por medio del diodo por energía de la entrada como del inductor  $L_1$ , la corriente  $i_{L1}$  disminuye porque  $V_{C1}$  es más grande que  $V_d$ . La energía acumulada en  $L_2$  alimenta la salida por lo cual  $i_{L2}$  también disminuye. Cuando el interruptor se encuentra encendido,  $V_{C1}$  hace que el diodo se polarice inversamente. Las corrientes de los inductores  $i_{L1}$  y  $i_{L2}$  pasan a través del interruptor, como  $V_{C1} > V_0$ ,  $C_1$  se descarga a través del interruptor, pasando energía a la salida y  $L_2$ . Por consecuente  $i_{L2}$  aumenta, la entrada alimenta de energía a  $L_1$  lo que hace que  $i_{L1}$  aumente.

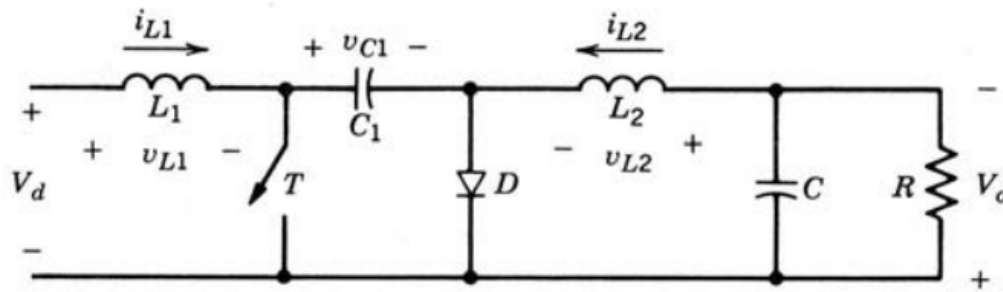


Figura 2.32 Convertidor Cúk. [11]

### 2.9.5 Convertidor de puente completo u onda completa

Las principales aplicaciones son: Accionamientos motrices de CD, conversión de CD a CA en fuentes de energía de CA no interrumpibles monofásicas, conversión de CD a CA en fuentes de potencia de CD en modo de conmutación con aislamiento por transformador.

En la figura 2.33 se observa el convertidor de puente completo el cual puede operar en los cuatro cuadrantes del plano  $i_o$  y  $-v_o$ , donde la entrada es un voltaje de CD con magnitud fija  $V_d$ , la salida es un voltaje de CD ( $V_o$ ) que es controlada en magnitud y polaridad, de igual manera se controlan las magnitud y el sentido de la corriente de salida  $i_o$  por eso este convertidor puede operar en los cuatro cuadrantes siendo así el flujo de potencia en ambos sentidos.

En esta configuración, en la cual los diodos están conectados en anti-paralelo con los interruptores, se tiene que realizar una distinción entre el estado activo contra el estado de conducción de un interruptor, siendo que cuando se enciende un interruptor podrá o no conducir una corriente según el sentido de la corriente de salida  $i_o$ .

El convertidor consta de dos patas A y B, cada pata consta de dos interruptores y sus diodos anti-paralelos, los dos interruptores en cada pata se conmutan de manera que cuando un interruptor esta encendido el otro se encuentra apagado, por lo cual los dos interruptores nunca estarán encendidos simultáneamente, si los interruptores de cada pata son conmutados de manera que

ambos interruptores en una pata no estén apagados simultáneamente la corriente de salida  $i_o$  pasará de forma continua, por lo cual el voltaje de salida solo será determinado por el estado de los interruptores.

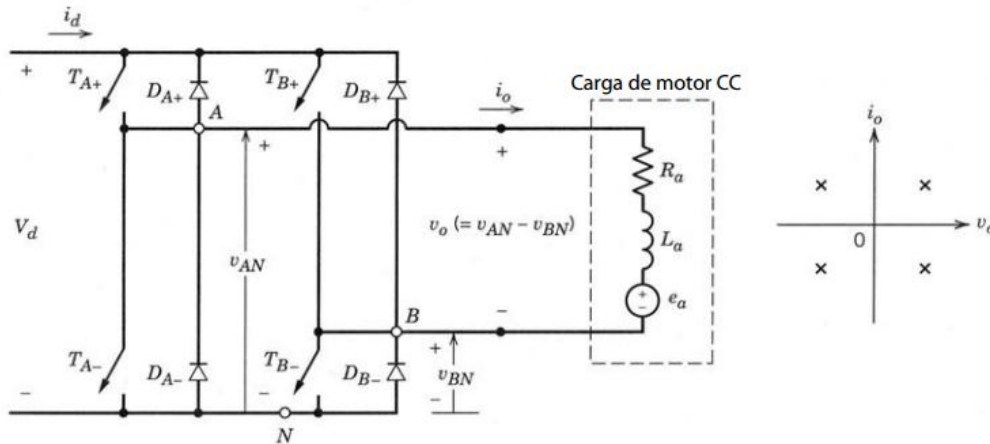


Figura 2.33 Convertidor de puente completo u onda completa. [11]

## 2.10 Inversor CD-CA

Los inversores de CD-CA en modo conmutado se usan ampliamente en motores de CA y en fuentes de alimentación interrumpibles, donde la finalidad es producir una señal sinusoidal de CA donde su magnitud y frecuencia sean controlables.

En la figura 2.34 se muestra un inversor de modo conmutado, en el cual el voltaje de CD es obtenido mediante la rectificación y filtrado del voltaje de línea, si la carga del motor es de CA es preferible que el voltaje en las terminales sea sinusoidal y ajustable en magnitud y frecuencia, en este inversor el flujo de potencia es reversible, sin embargo la mayor parte del tiempo el flujo de potencia va desde el lado de CD hacia el lado CA del motor lo que requiere un modo de operación de inversor, por lo cual generalmente son llamados inversores de modo conmutado.

Para desacelerar el motor de CA donde la energía cinética asociada con la inercia del motor y su carga se recupera y el motor de CA actúa como generador, durante el frenado del motor la potencia fluye desde el lado de CA hacia el lado de



CD trabajando así en modo rectificador, la potencia recuperada durante el frenado es disipada en el reóstato el cual puede ser conmutado en paralelo con el condensador del bus de CD-CD.

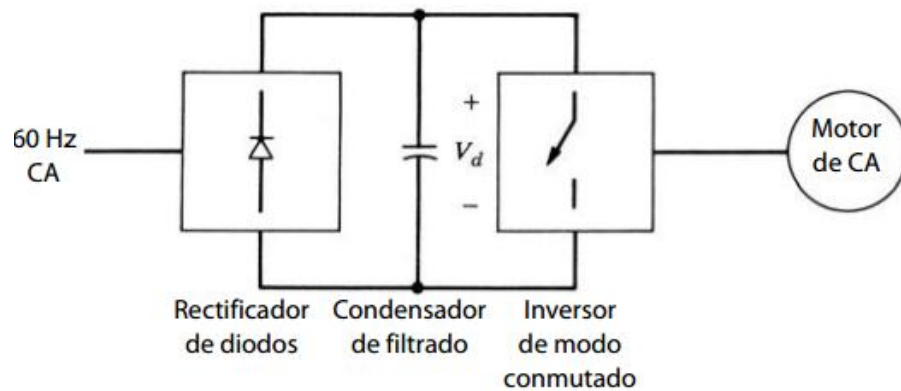


Figura 2.34 Inversor de modo conmutado sin frenado regenerativo. [11]

En la figura 2.35 se muestra un inversor de modo conmutado con frenado regenerativo, el cual es utilizado donde el frenado es realizado con frecuencia, donde la potencia recuperada de la inercia de la carga del motor se realimenta a la red del sistema de electricidad, esto requiere que el convertidor conectado al motor a la red sea un convertidor de dos cuadrantes con una corriente de CD reversible la cual opere de modo rectificador durante el funcionamiento del motor y como inversor durante el frenado del motor.

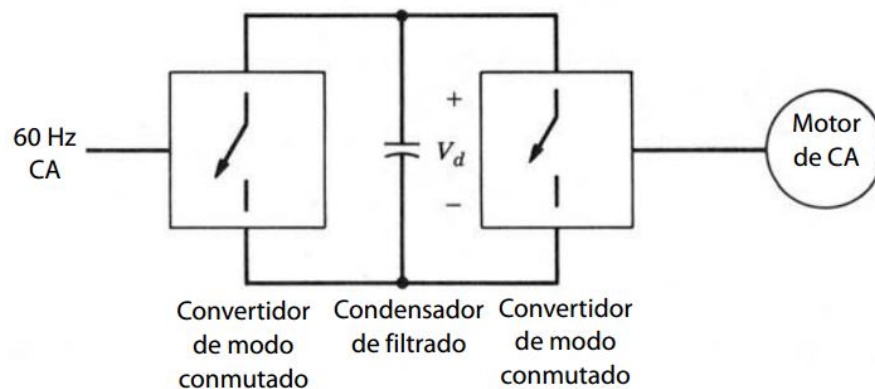


Figura 2.35 Inversor de modo conmutado con frenado regenerativo. [11]

## 2.11 Convertidores Trifásicos

### 2.11.1 Convertidor de voltaje tradicional

En la figura 2.36 se puede observar un convertidor de voltaje tradicional en el cual una fuente de voltaje continúa soportada por un capacitor con un valor relativamente grande alimenta al circuito convertidor principal y al puente trifásico.

Esta fuente de voltaje puede ser: una batería, un conjunto de baterías, un diodo rectificador o capacitores. Se usan seis interruptores son usados en el circuito principal, cada uno de estos interruptores son principalmente transistores de potencia, también se utiliza un diodo anti-paralelo para proveer un flujo de corriente bidireccional y voltaje unidireccional para capacidad de bloqueo, sus limitaciones son:

El voltaje de salida de CA está limitado a estar debajo del voltaje de CD o el voltaje de CD debe ser mayor que el voltaje de entrada de AC, por lo tanto, el inversor de fuente de voltaje es un inversor *buck* (reductor) para la conversión de CD a CA y el convertidor de fuente de voltaje es un convertidor *Buck- Boost* (elevador) para AC a CD.

Los componentes superiores e inferiores de cada etapa no pueden ser controlados simultáneamente con el propósito de evitar ruidos en el voltaje de salida, por lo cual se requiere de un filtro LC en la salida para proveer una fuente sinusoidal de voltaje, en comparación con el inversor de fuente de corriente, que causa una pérdida de potencia adicional y la etapa de control tiene que ser más compleja.

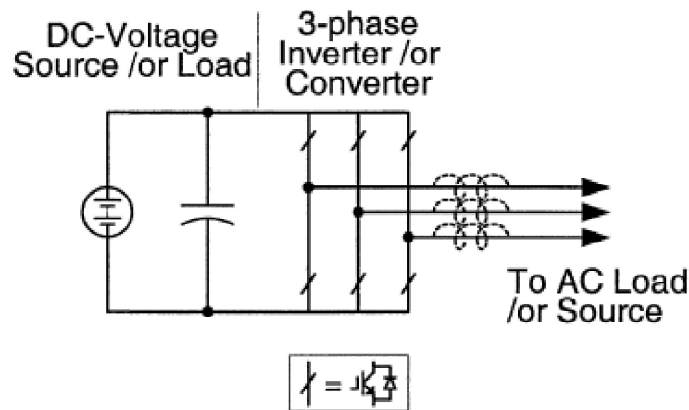


Figura 2.36 Convertidor de voltaje trifásico tradicional. [12]

### 2.11.2 Convertidor de corriente tradicional

Una fuente de corriente continua alimenta al circuito convertidor principal y al puente trifásico, la fuente de corriente continua puede ser un inductor de CD relativamente grande alimentado por una fuente de voltaje como una batería, un conjunto de baterías, un diodo rectificador o capacitores, el cual se encuentra representado en la figura 2.37.

Seis interruptores son utilizados en el circuito principal, cada uno de estos interruptores son principalmente transistores de potencia con capacidad de bloqueo inverso (GTO), también se utiliza un diodo anti-paralelo para proveer un flujo de corriente bidireccional y voltaje unidireccional para capacidad de bloqueo. Sus limitaciones son:

El voltaje de salida de CA debe ser mayor que el voltaje de CD que alimenta el inductor de CD o el voltaje de CD debe ser menor que el voltaje de entrada de CA.

Al menos unos de los dispositivos superiores e inferiores deben estar activados y mantenerse así en cualquier momento, de lo contrario se produciría un circuito abierto en el inductor de CD y dañaría los dispositivos.

Los interruptores principales del convertidor tienen que bloquear el voltaje inverso, por esto se requiere el uso de un diodo en serie en combinación con los transistores de potencia de alta velocidad y rendimiento, como *IGBT's*.

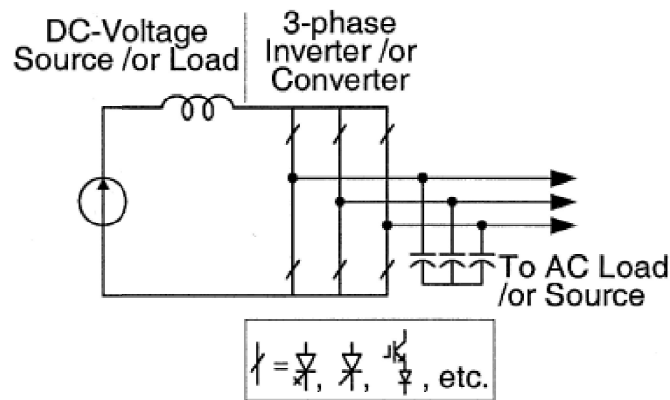


Figura 2.37 Convertidor de corriente trifásico tradicional. [12]

### 2.11.3 Convertidor *Z-Source*

Se le llama convertidor *Z-Source* a aquellas topologías de convertidores que integran un circuito basado en una red LC para acoplar y estabilizar el enlace entre dos tipos de convertidores electrónicos de potencia para la conversión de las formas de onda de voltaje y corriente.

EL convertidor *Z-Source* emplea una red de impedancia para acoplar el circuito del convertidor principal a la fuente de poder, esto da características únicas que no se pueden obtener en un convertidor tradicional, ya sea de voltaje o corriente, donde capacitores e inductancias son utilizados. Este convertidor supera las barreras conceptuales y teóricas, como también las limitaciones de los convertidores de voltaje y corriente tradicionales. Este concepto de convertidor puede ser aplicado a las siguientes conversiones de potencia: CD-CA, CA-CD, CA-CA y CD-CD.

Actualmente esta red LC es utilizada en diversas aplicaciones, mejorando el desempeño de los convertidores en los que es aplicada, comparándola con las

aplicaciones que utilizan métodos convencionales para estabilizar a las topologías de convertidores electrónicos de potencia con técnicas convencionales.

Para evitar los problemas de los tradicionales convertidores de voltaje o corriente, se desarrolló el convertidor *Z-Source* y su método de control. Este convertidor consiste en dos capacitores y dos inductores conectados en X, esto se hace para emplear una fuente de impedancia que acopla el convertidor a la fuente de CD, carga o a otro convertidor.

La fuente de CD o la carga puede ser tanto de voltaje como de corriente, por lo tanto, la fuente puede ser una batería, un diodo rectificador, un convertidor con tiristores, un banco de baterías, un inductor, un capacitor o la combinación de estos últimos dos, donde los interruptores utilizados en el convertidor pueden ser una combinación de dispositivos de conmutación y diodos ya sea en combinación anti paralela o serie, representados en las figuras 2.38 y 2.39.

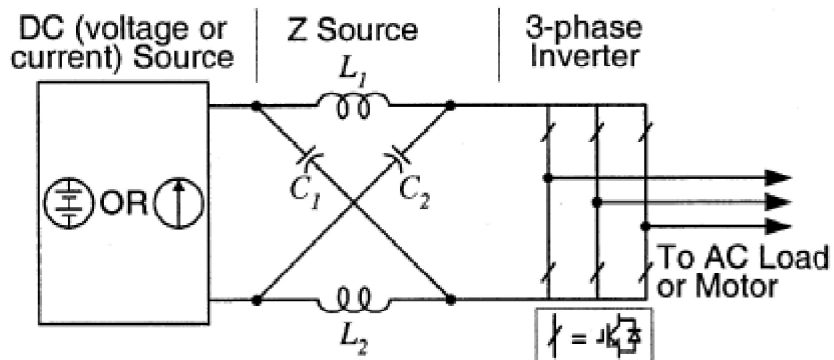


Figura 2.38 Convertidor *Z-Source*, utilizando una combinación anti paralela con dispositivos de conmutación y diodos. [12]

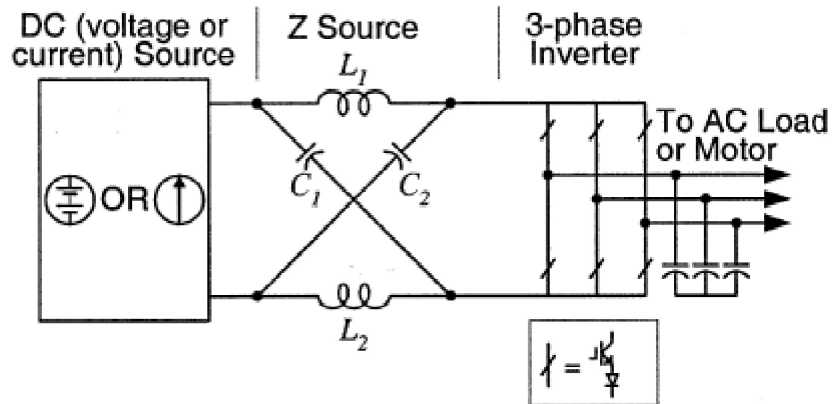


Figura 2.39 Convertidor *Z-Source*, utilizando una estructura de combinación en serie de dispositivos conmutación y diodos. [12]

Las figuras 2.38 y 2.39 muestran dos configuraciones trifásicas inversoras *Z-Source*, donde las inductancias  $L_1$  y  $L_2$  pueden ser proveídas a través de un inductor dividido o dos inductores separados.

La figura 2.40 muestra un inversor *Z-Source* para la aplicación de celdas de combustible, que pueden producir directamente voltaje CA mayor y menor que las celdas de combustible, el diodo es usualmente necesitado para prevenir el flujo de la corriente en reversa.

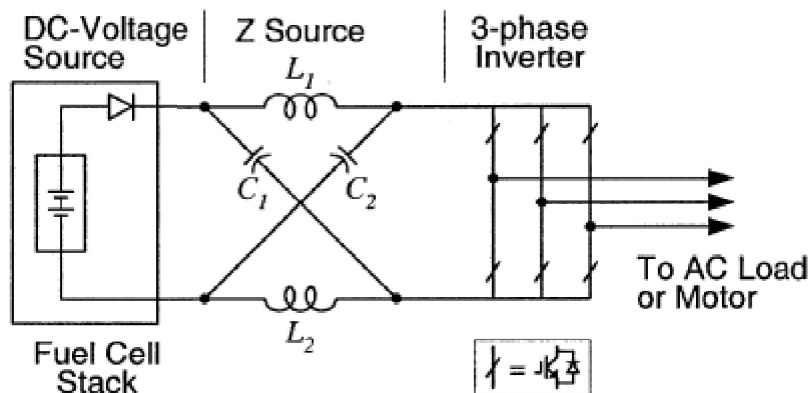


Figura 2.40 Inversor *Z-Source*, para aplicaciones con celdas de combustible. [12]

## 2.11.4 Principales topologías del convertidor *Z-Source*

### 2.11.4.1 Inversor *Z-Source* de flujo bidireccional (*BZSI*)

El inversor *Z-Source* estándar puede ser cambiado a bidireccional reemplazando el diodo por un componente de conmutación bidireccional, que operará durante un modo de regeneración del mismo modo que el diodo en el modo de inversor y donde la señal de la puerta es completamente la señal de la conmutación "ST". El circuito se encuentra representado en la figura 2.41, es capaz de convertir la energía CA a CD almacenada en ambas direcciones. No se requieren sensores adicionales o circuitos de control extras, como también es capaz de evitar la operación indeseable cuando el *Z-Source* está operando bajo una inductancia pequeña o con bajo factor de potencia de carga.

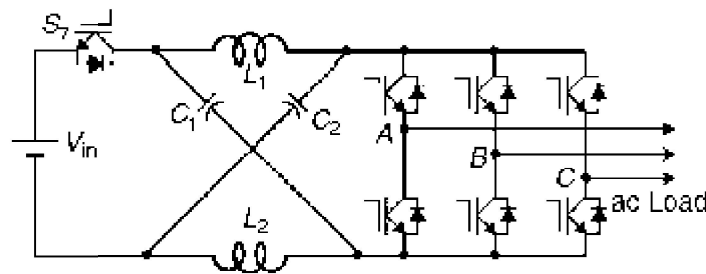


Figura 2.41 Inversor *Z-Source* potencial de flujo bidireccional. [13]

### 2.11.4.2 Inversor *Z-Source* de alto rendimiento (*HP-ZSI*)

Esta topología puede operar en un amplio rango de carga con una pequeña inductancia, también elimina la posibilidad de la caída de voltaje del enlace de CD y simplifica el diseño de las impedancias del *Z-Source* y el sistema de control. Su circuito se encuentra representado en la figura 2.42, esta topología deriva del *Z-Source* original añadiendo un capacitor adicional y un componente de conmutación bidireccional.

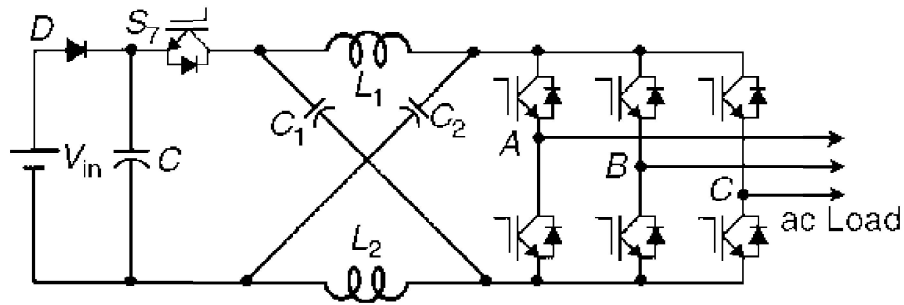


Figura 2.42 Inversor Z-Source de alto rendimiento. [14]

### 2.11.4.3 Inversor Z-Source de corriente de energización baja (IZS)

En este inversor se cambian las posiciones del puente inversor y el diodo de entrada e invirtiendo su conexión en direcciones, los elementos utilizados son los mismos que en el Z-Source original, aunque esta topología produce el mismo aumento en el voltaje de salida, el estrés que sufre el capacitor se puede reducir en gran medida, además cuenta con la capacidad de limitar la corriente de energización porque no existe un camino de corriente inicial, su circuito se encuentra representado en la figura 2.43.

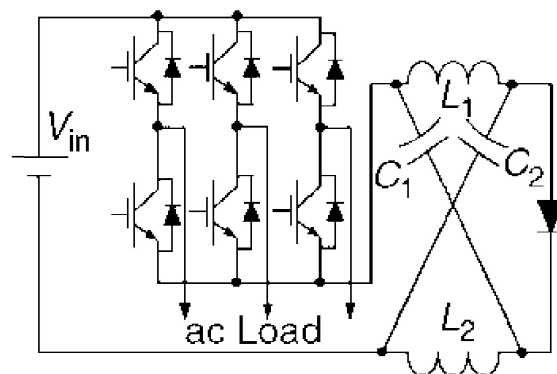


Figura 2.43 Inversor Z-Source de corriente de energización baja. [15]



#### 2.11.4.4 Inversor *Z-Source* de alto rendimiento con corriente de energización baja (*HP-IZSI*)

En la figura 2.44 se puede observar el inversor *HP-IZSI* el cual puede ser combinado con el inversor *HP-ZSI*, para producir un alto rendimiento, este inversor cuenta con dos méritos, uno es el bajo voltaje de estrés que se refleja en la red de capacitores, y el otro es la limitación de la corriente de energización y el voltaje de arranque.

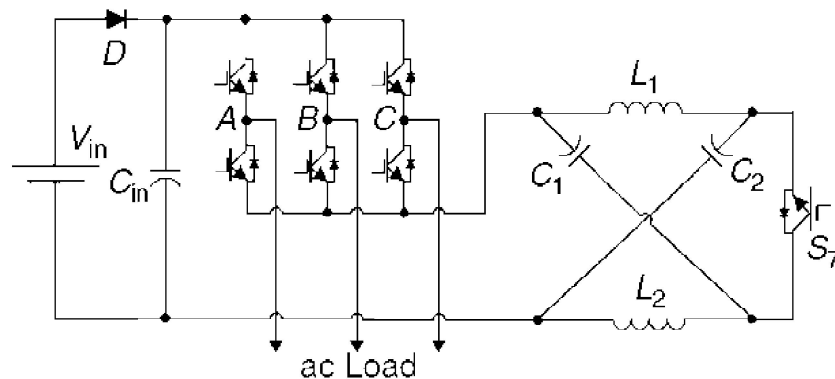


Figura 2.44 Inversor *Z-Source* de alto rendimiento con corriente de energización baja. [16]

#### 2.11.4.5 Inversor *Z-Source* conexión serie (*SZSI*)

Este Inversor está formado por la conexión del *Z-Source* original en serie entre la fuente de CD y el puente inversor, el cual se encuentra representado en la figura 2.45, en el cual se obtiene un bajo voltaje de estrés en el capacitor, por lo que también cuenta con una baja corriente de energización porque no se tiene un cambio de arranque.

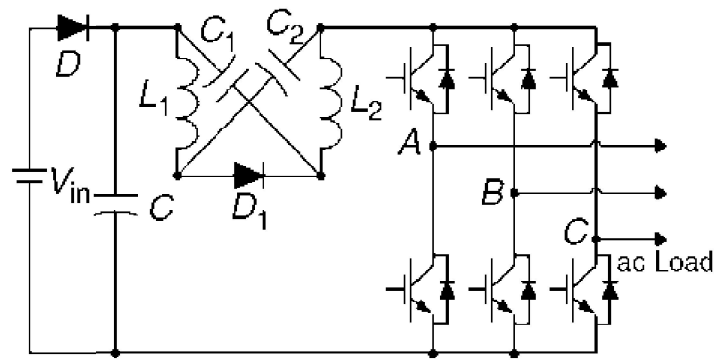


Figura 2.45 Inversor Z-Source conexión serie. [17]

#### 2.11.4.6 Inversor Z-Source conmutación suave cuasi-resonante (QRSSZSI)

Este Inversor se forma añadiendo una red Cuasi-Resonante con un solo dispositivo de conmutación para lograr la suave conmutación, de todos los dispositivos en el puente del inversor que están encendidos y se apagarán cuando se tenga una condición de cambio de voltaje a cero, su circuito se encuentra representado en la figura 2.46. Este Inversor tiene un incremento del 10% en eficiencia comparado con la conmutación común.

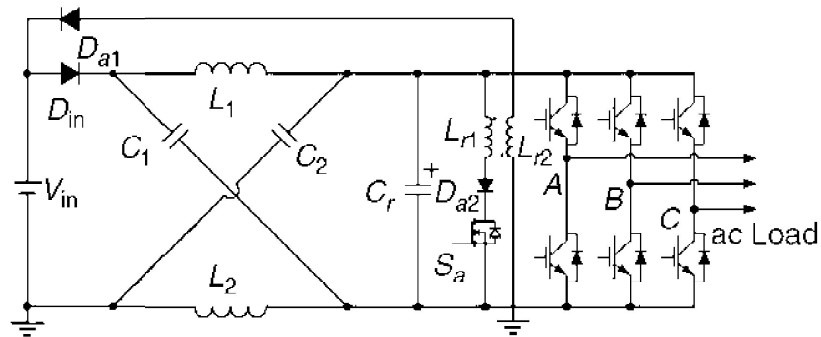


Figura 2.46 Inversor Z-Source con conmutacion suave cuasi-resonante. [18]

#### 2.11.4.7 Inversores Z-Source con punto neutro

(FWZSI) Inversor con cuatro hilos fue propuesto en base a la topología del inversor de alto rendimiento (HP-ZSI por sus siglas en inglés), añadiendo un

interruptor de conmutación bidireccional en el camino de la posición negativa de la corriente y separando la entrada de DC del capacitor para la obtención, (figura 2.47a).

(*FLZSI*) Inversor con 8 inversores, dos por rama del circuito para la obtención de un enlace virtual de DC en un punto cero, (figura 2.47b).

(*DuZSI*) Este Inversor consiste en dos módulos de transistores trifásicos que trabajan en una carga común con una sola fuente de DC, este inversor mejora la calidad del voltaje de salida y reduce el estrés de la corriente en los inductores esto debido a la distribución de la corriente entre los dos puentes inversores, (figura 2.47c).

(*NPZSI*) En este inversor las dos redes Z de capacitores se divide en dos series de capacitores y una conexión de dos inductancias conectadas a cada capacitor y las otras dos inductancias se encuentran conectadas entre ellas para la obtención del punto neutro, (figura 2.47d).

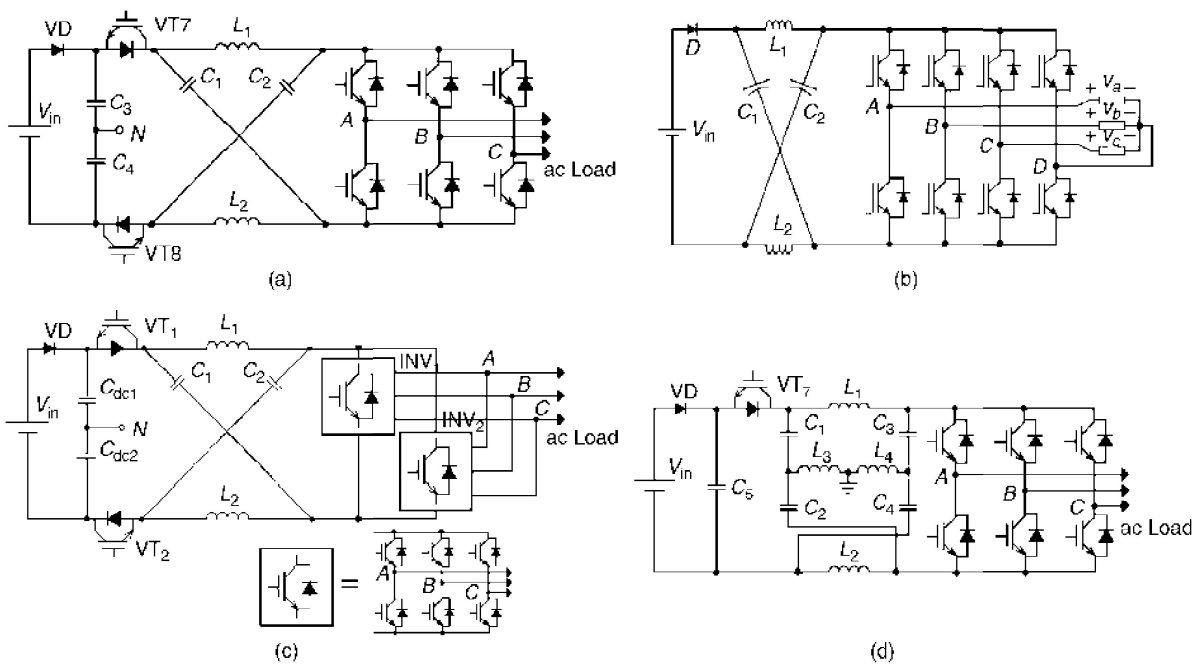


Figura 2.47 Inversores con punto neutro. [19]

### 2.11.4.8 Inversor *Z-Source* con el punto neutral anclado

Este Inversor utiliza dos redes de impedancia de inductancias y capacitancias conectadas en forma de X, que se encuentran conectadas entre dos fuentes de alimentación de CD aisladas y un circuito inversor para la elevación del voltaje de salida de AC, su circuito se encuentra representado en la figura 2.48.

Mediante el diseño de la modulación de ancho de pulsos correcto, las dos redes de impedancia pueden cortocircuitarse secuencialmente para implementar el principio de modulación *nearest-three-vector* con una distorsión armónica minimizada y conmutación de los dispositivos por medio ciclo de la onda portadora mientras es realizado el aumento de voltaje de salida.

Con una sola modificación en la modulación de ancho de pulsos del inversor y realizando un cortocircuito en las dos redes de impedancia simultáneamente, el inversor de punto neutral anclado (*NPC por sus siglas en inglés*) puede ser operado sin necesidad de retraso en el tiempo muerto, también puede ser operado eliminando el modo de voltaje común.

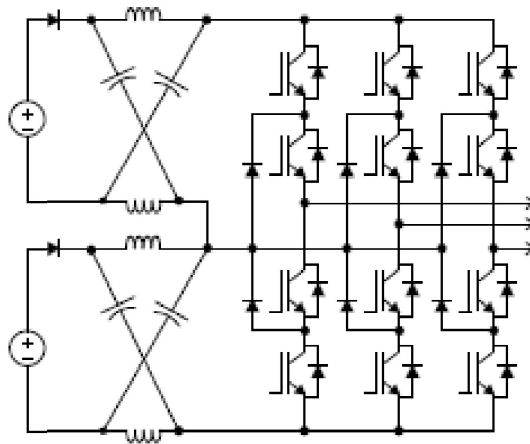


Figura 2.48 Inversor *Z-Source* NPC. [20]

#### 2.11.4.9 Inversor *EZ-Source* (fuente embebida *EZSI*)

Este inversor representa la misma configuración que el *Z-Source* original solo con la diferencia de la implementación de dos fuentes de DC donde se conectan cada una a los inductores en serie, la función de filtro de los inductores suaviza la fuente de corriente y se asegura una operación unidireccional continua que hace su uso más estable, su circuito se encuentra representado en la figura 2.49.

En más detalle, la principal característica de esta configuración es el producir la misma ganancia que la configuración *Z-Source* estándar, pero con la obtención de una corriente y un voltaje más suave y pequeño, mantenido a través de la fuente de entrada de CD, estas características se logran sin utilizar ningún filtro pasivo adicional lo que es una ventaja por la reducción de costo en el sistema.

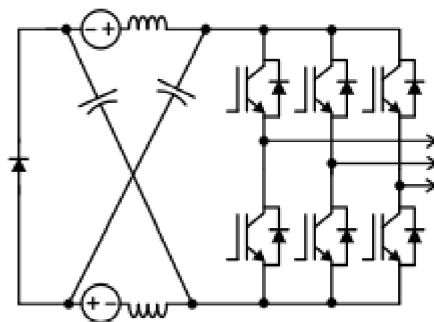


Figura 2.49 Inversor *EZ-Source*, integrado de dos niveles. [21]

#### 2.11.4.10 Inversor *Z-Source* dual

Este inversor se puede utilizar con una fuente de CD o con dos fuentes de CD aisladas, este inversor permite un aumento en la potencia (*Buck-Boost por sus siglas en inglés*), obteniendo un amplio rango de modulación con la generación de ondas de salida de tres niveles, su circuito se encuentra representado en la figura 2.50.

Si se conecta un transformador a la salida de CA del inversor permitirá que todas las cargas conectadas en estrella o en delta con configuraciones de tres o cuatro hilos sean suministradas por el inversor, donde la modulación de este inversor puede ser controlada por medio de la modulación de ancho de pulsos,

cuidadosamente diseñado para que siempre asegure un aumento de voltaje equilibrado y donde al mismo se logre una conmutación en modo común, debido a las demoras del tiempo muerto en el esquema del modulador de ancho de pulsos (*PWM por sus siglas en inglés*) la conmutación del voltaje en la etapa común puede ser completamente eliminada a diferencia de los inversores tradicionales donde todavía se presentan picos en el modo común.

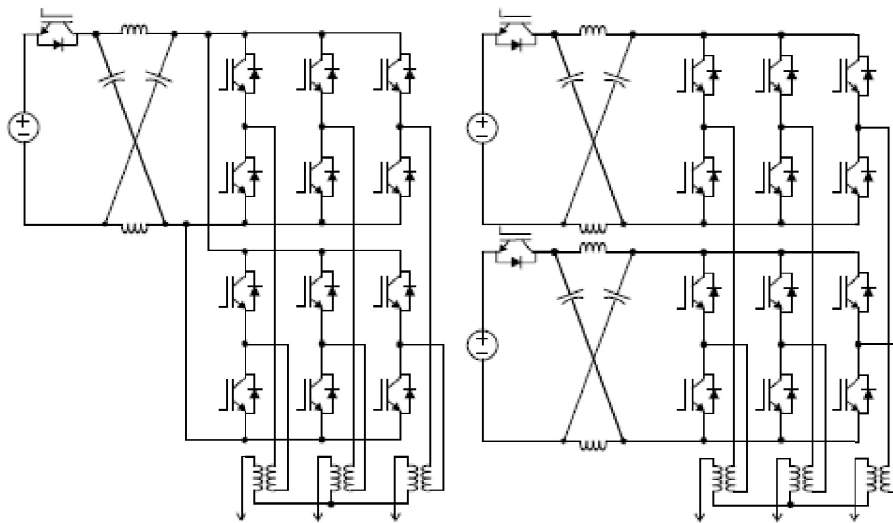


Figura 2.50 Inversor *Z-Source* dual. [22]

#### 2.11.4.11 Inversor *Z-Source* de cinco niveles con sujeción de diodos

Este Inversor está diseñado con dos redes *Z-Source* intermedias conectadas entre las fuentes de entrada de CD y los circuitos del inversor posterior, se encuentra representado en la figura 2.51.

Al acortar parcialmente las redes del *Z-Source* se introducen nuevos estados operativos (no utilizados en el inversor *Z-Source* de dos niveles), y son introducidos aquí para operar el inversor de cinco niveles resultando la elevación del voltaje de salida y la habilidad de la conmutación de voltaje de fase de cinco niveles.

Estas características aseguran siempre que a la salida del inversor se adopte un esquema de modulación donde siempre se inyecten dos disparos de estado cero (*shoot through por sus siglas en inglés*) por medio de la media onda de ciclo para un funcionamiento suave y equilibrado.

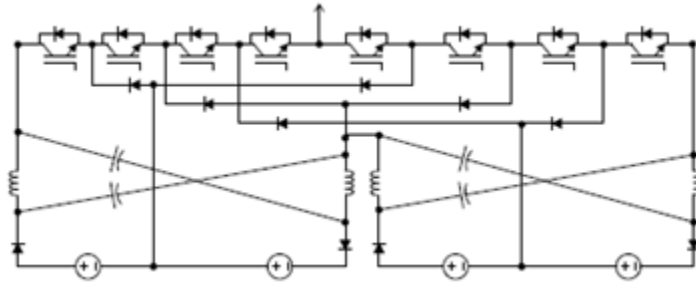


Figura 2.51 Inversor Z-Source de Cinco Niveles. [22]

#### 2.11.4.12 Inversor Z-Source con inductores en serie

En este inversor se reemplazan las dos inductancias originales del Z-Source con dos celdas de terminales de inductores en serie, el rango de voltaje de salida de este inversor es ampliado en gran medida, su circuito se encuentra representado en la figura 2.52.

Esto representa una mayor ganancia la cual en principio puede ser ajustada variando la relación de vueltas de los inductores y la duración de los disparos de estado cero (*shoot through por sus siglas en inglés*), la utilización de los disparos de estado cero se usa continuamente para obtener el incremento del voltaje de salida, en vez de la variación de la relación de vueltas de los inductores, ya que cuando utilizamos estos disparos obtenemos una mejor calidad en la onda de salida.

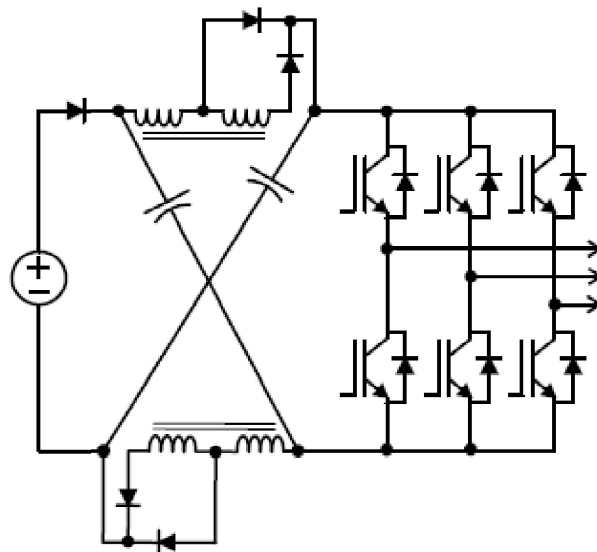


Figura 2.52 Inversor *Z-Source* con inductores en serie. [23]

#### 2.11.4.13 Inversor *Z-Source-Quasi (QZSI)*

Este inversor es capaz de realizar la elevación del voltaje de salida como el inversor *Z-Source* tradicional esto en una sola etapa con mayor fiabilidad, cuenta con las ventajas de utilización de componentes de baja clasificación como también mantener la corriente continua de la fuente, su circuito se encuentra representado en la figura 2.53.

Presenta un rango amplio de ganancia de voltaje que es adecuado para aplicaciones de sistemas fotovoltaicos debido a que la salida de la celda varía ampliamente con la temperatura y la irradiación solar, cuenta con dos modos de operación los cuales son:

**Ningún disparo de estados cero.-** En este modo el inversor opera en uno de los seis estados activos y en los dos estados ceros tradicionales.

**Disparo de estados cero.-** Este modo hace que el inversor entre en cortocircuito en una fase, en la combinación de dos fases o en las tres fases.



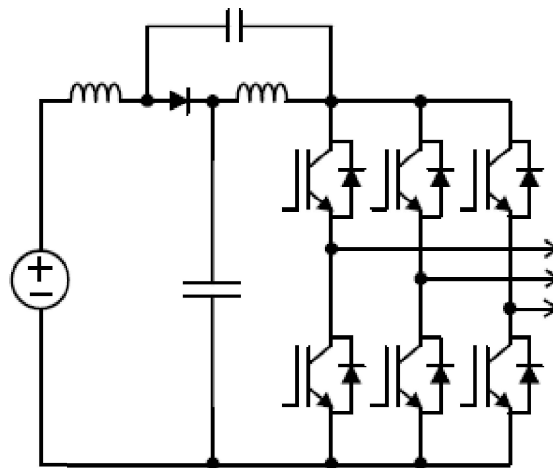


Figura 2.53 Inversor *Z-Source-Quasi*. [24]

En esta tesis se está utilizando la configuración *Z-Source* original conectado a un generador asíncrono doblemente alimentado, en el cual el control es realizado por un control vectorial para el rotor y el estator (o red), esto para la comprobación del funcionamiento de la red de impedancias que nos provee las capacitancias e inductancias de la configuración *Z-Source*, dando resultado un incremento considerable del voltaje de salida.

#### 2.11.5 *Z-Source* principio de operación y control

La característica única del inversor *Z-Source*, es que el voltaje CA de salida puede tomar cualquier valor entre cero e infinito independientemente del voltaje de las celdas de combustible.

El inversor *Z-Source* es un inversor tipo *Buck-Boost* que cuenta con un amplio rango de voltaje obtenible, (Los inversores tradicionales de voltaje o corriente no pueden proveer esta característica). Este inversor se encuentra representado en la figura 2.54. Para describir el modo de operación y control se analiza el diagrama, donde se observa que el puente inversor trifásico *Z-Source* cuenta con nueve estados de conmutación permitidos (vectores) a diferencia del inversor trifásico tradicional con una fuente de voltaje que cuenta con ocho estados.

El inversor trifásico tradicional con fuente de voltaje cuenta con seis vectores activos cuando el voltaje de CD es aplicado a través de la carga y dos vectores de valor cero, cuando las terminales de la carga son cortocircuitadas a través de los 3 dispositivos inferiores o superiores respectivamente.

Sin embargo, el puente inversor trifásico *Z-Source* cuenta con un estado de conmutación cero. Esto es cuando las terminales de carga se encuentran en corto circuito a través de los dispositivos superior e inferior de cualquier rama (Ambos dispositivos se encuentran activados), dos de las ramas o también de todas las ramas, cuando este estado es establecido el voltaje aplicado a la carga es cero.

Este estado de conmutación, se encuentra prohibido en los inversores tradicionales de voltaje ya que pondría en cortocircuito la fuente de entrada y provocaría que se quemara, en el inversor *Z-Source* se puede realizar este estado ya que la red de impedancia de entrada evitaría el cortocircuito de la fuente de entrada, este tercer estado de conmutación puede ser generado de siete maneras diferentes: disparar a través de cualquier etapa, combinaciones de cualquier fase o de dos ramas como también todas las ramas trifásicas.

La estructura *Z-Source* hace posible que se pueda realizar el disparo de estado de conmutación cero, este disparo provee una característica única *Buck-Boost* al inversor.

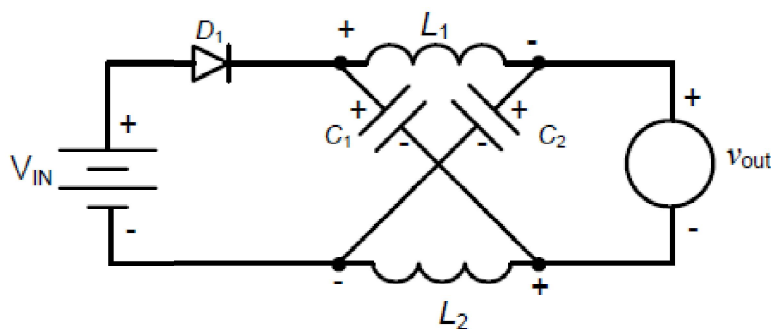


Figura 2.54 Circuito equivalente del inversor *Z-Source*. [12]

En la figura 2.55 se muestran dos posibles estados de conmutación, donde dependen del inversor trifásico de salida, uno de estos estados corresponde a uno de los ocho posibles estados del inversor de salida en que no se establece el estado de cortocircuito en alguna de sus ramas.

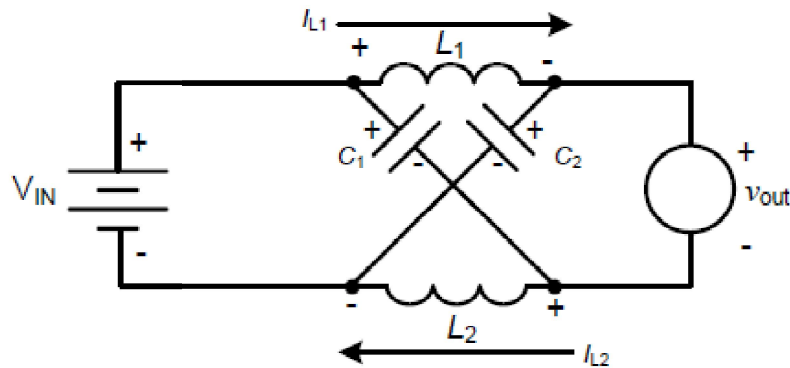


Figura 2.55 Circuito equivalente del inversor *Z-Source*, en uno de los ocho estados. [12]

En la figura 2.56 se muestra el circuito equivalente del inversor sin el estado de cortocircuito, donde durante los estados diferentes al estado cero, el diodo se cierra y se considera como un simple conductor, por lo cual el voltaje de salida de la red y la impedancia de entrada son igualados a la suma de los voltajes de los dos capacitores menos el voltaje de entrada.

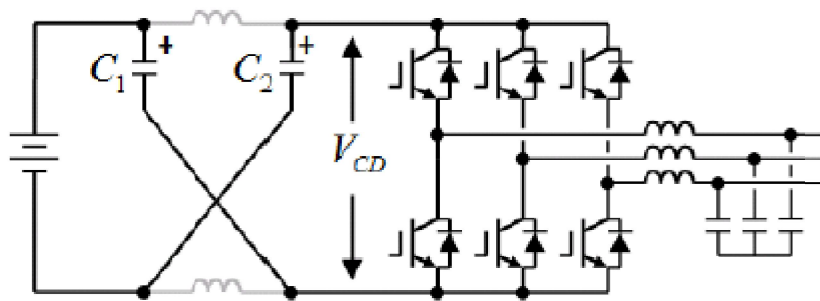


Figura 2.56 Circuito equivalente del inversor *Z-Source* durante los estados diferentes al de corto circuito. [12]

El segundo estado del inversor corresponde al estado de conmutación cero, correspondiente al estado de corto circuito del inversor de salida, el corto se establece mediante el cortocircuito de cualquiera de las tres ramas del inversor o por todas ellas.

Como se observa en la figura 2.57 durante el estado de corto, los capacitores  $C_1$  y  $C_2$  quedan conectados en serie y polarizan de forma inversa al diodo por lo que este no conduce, durante este estado de cortocircuito el voltaje visto a la salida de impedancia es cero y la relación de entrada-salida del inversor *Z-Source* se realiza base en el balance de energía en el inductor.

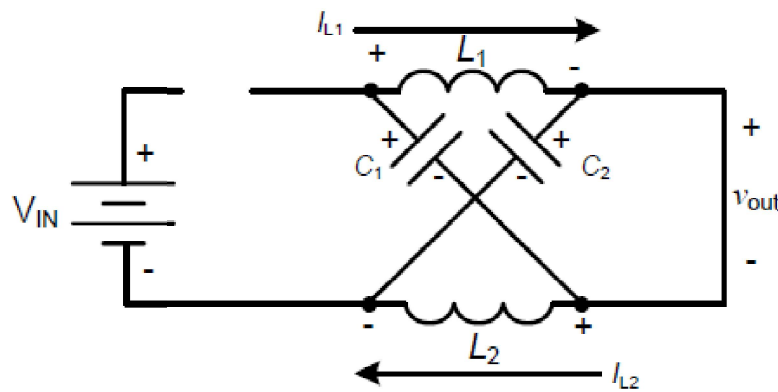


Figura 2.57 Circuito equivalente del inversor *Z-Source* en el estado de cortocircuito. [12]

## 2.12 Convertidor CA-CD-CA (*Back-to-Back*) utilizado

Se utilizo un convertidor que cuenta con las siguientes etapas:

- Etapa de conversión CA a CD de onda completa, se utilizan transistores bipolares de puerta aislada (*IGBTs por sus siglas en inglés*), para un rectificador trifásico de onda completa que controlan las fases y la frecuencia de línea, su función principal es rectificar la salida del generador, donde la corriente rectificadas o continua es obtenida tomando determinados trozos de la onda de cada fase de entrada y teniendo como resultado una onda de salida con una sola polaridad variable.

Este convertidor es capaz de producir una tensión de salida continua con un mínimo de cantidad de armónicos, pero no debe de distorsionar las corrientes de entrada, y debe de ser capaz de mantenerlas en forma sinusoidal si es posible, esto para no afectar a la otra etapa del control, también no debe desfasar la tensión y la corriente de entrada.

El propósito principal de los rectificadores de onda completa es el generar una tensión o una corriente continua, en el cual los rectificadores de onda completa presentan ventajas que son fundamentales sobre los rectificadores de media onda, las cuales son:

- La corriente media del generador de alterna es nula en el rectificador, por lo que se evitan problemas asociados a las corrientes medias del generador distintas de cero, aplicando especialmente para los transformadores.
  - Se presenta una disminución en el rizo de la onda.
- Etapa de conversión CD a CD, en esta etapa intermedia se utiliza un convertidor *Z-Source*, este convertidor emplea una red de impedancias para acoplar el circuito de la etapa CA a CD con la etapa de CD a CA, este tipo de convertidor nos brinda características únicas que no podríamos obtener con convertidores tradicionales (*Buck, Boos, Cuk, y Buck-Boost*), ya sean de voltaje o corriente donde capacitores e inductancias son utilizados.

Consiste en dos capacitores y dos inductancias conectados en X, esto es lo que realiza la fuente de impedancias que acopla el convertidor a la fuente de CD, carga o a otro convertidor, la fuente de CD puede ser tanto de voltaje como de corriente, por lo tanto, la fuente puede ser una batería, un diodo rectificador, un convertidor con tiristores, un inductor, un capacitor o la combinación de estos dos últimos.

- Etapa de conversión CD a CA, se utilizaron transistores bipolares de puerta aislada (*IGBTs* por sus siglas en ingles), como en la etapa de rectificación, en esta etapa el inversor se conecta directamente al transformador de la turbina eólica, donde el voltaje de salida y el voltaje de entrada nos determina la ganancia del inversor, en esta etapa la onda de salida debe de contener un mínimo de armónicos que se deben de haber reducido por las conversiones de las etapas anteriores por las diversas conmutaciones de los circuitos electrónicos de potencia.

Si el voltaje de entrada permanece constante en el inversor se puede terminar como un inversor alimentado por voltaje (*VFI Voltage Fed Inverter*), y si la corriente de entrada se mantiene constante se puede nombrar inversor alimentado por corriente (*CFI Current Fed Inverter*), y un convertidor enlazado con CD variable si el voltaje de entrada es controlable.

## **2.13 Problemas presentados**

### **2.13.1 Generación de alta cantidad de armónicos por los generadores doblemente alimentados y suministrados a los transformadores de las turbinas eólicas**

Esto sucede por la retroalimentación utilizada para mantener una frecuencia de salida constante de 60Hz a velocidades de viento variables, introduce una fuente de corriente no lineal y esta corriente no lineal pasa a través del transformador de la turbina eólica. Las pérdidas de corrientes parasitas asociadas con la corriente no lineal provocan calentamientos en el transformador, este calentamiento puede causar daños en el aislamiento de los devanados prematuramente y pueden llegar a suceder dos cosas: que el transformador sea cambiado constantemente o que llegue a fallar por completo hasta el punto de quemarse, causando pérdidas monetarias.

El circuito de retroalimentación realizado para la reducción de armónicos consiste en un convertidor de CA a CD conectado a la inversa con un inversor CD a CA que alimenta al rotor de tal forma que la frecuencia eléctrica del estator coincide

con la red de distribución. Este ciclo de retroalimentación se modela como un sistema rectificador simple que genera una potencia constante del 30% de la potencia del estator. Los armónicos generados fueron analizados.

Dependiendo de las impedancias particulares del transformador, la distorsión armónica total actual puede oscilar entre el 19.1% y el 32.0%. Para mitigar el sobrecalentamiento del transformador, se debe reducir la potencia del transformador o se debe instalar un sistema de filtrado [9].

### **2.13.2 Captura pobre de energía en turbinas eólicas de velocidad variable**

Teniendo en cuenta la no linealidad del viento, la captura de energía es variante. Si no se cuenta con un control adecuado, la captura de la energía del viento es muy pobre o de mala calidad. Para resolver este problema se utiliza una técnica de control lineal para maximizar la energía eólica capturada por la turbina de eje horizontal, la estrategia se basa en técnicas de control proporcional integral generalizado, soportadas bajo el enfoque del rechazo activo de perturbaciones, que permiten seguir de forma asintótica una trayectoria de referencia óptima de la velocidad del rotor sin el consentimiento exacto del modelo de la turbina eólica.

La maximización de la captura de energía se centra en mantener la velocidad específica de la turbina en su valor óptimo, por medio del control de la velocidad del rotor sobre una trayectoria óptima, en el cual el coeficiente de potencia es máximo [10].

## CAPÍTULO 3 CONTROL DEL GENERADOR EÓLICO

### 3.1 Simulación Z-Source (MatLab-Simulink)

Se realizó la simulación del convertidor *Z Source* acoplado al inversor de CD a CA el cual está integrado por transistores bipolares de compuerta aislada (*IGBT por sus siglas en inglés*), en el cual los disparos de conmutación se controlan por un control *SPWM*, siendo este el que determina los tiempos de conmutación y los *Shoot-Through Zero States*. La utilización de estos disparos de estado cero nos ayudan a aumentar el voltaje de salida considerablemente.

#### 3.1.1 Generador de modulación de ancho de pulso sinusoidal

Se utilizó esta técnica de modulación usando una señal triangular, la cual es considerada como la señal portadora (proporciona la frecuencia del *SPWM*) y comparándola con una señal de referencia (señal trifásica de salida del modelo de control vectorial), la cual es considerada como la señal moduladora. La comparación de las dos señales crea una salida de voltaje acorde a la ley mostrada abajo.

Para tener una mayor simplicidad en la modulación del convertidor con respecto a los valores de modulación se han eliminado los subíndices referidos al lado de la red o al lado del rotor ( $S_A, S_B, y S_C$ ), siendo esto que la ley pueda ser aplicada, tanto para el lado del rotor, como a lado de la red.

$S$  = Pulso Sinusoidal

$v$  = Voltaje

$j = a, b, c$  (Subíndice para cada fase)

$v_a^*, v_b^*, v_c^*$  = Voltaje de Referencia de cada Fase

$v_{tri}$  = Señal Triangular

Donde la Ley es representada como:

$$S_j = 1 \quad \text{sí} \quad v_j^* > v_{tri}$$



La relación entre las frecuencias y las amplitudes requiere de los siguientes términos:

➤ Índice de modulación de frecuencia ( $m_f$ )

La relación entre la frecuencia de la señal triangular y la señal de referencia es expresada como se muestra:

$$m_f = \frac{f_{tri}}{f_{ref}} \quad (3.1)$$

Para crear una buena calidad de voltaje de salida  $m_f$  debe ser un número alto, pero como la frecuencia de la señal triangular ( $f_{tri}$ ) determina la frecuencia de conmutación de los transistores bipolares de compuerta aislada (*IGBT por sus siglas en inglés*) la frecuencia no debe de ser demasiado alta para no sobre calentar o producir grandes cantidades de pérdidas de conmutación en ellos, por ello cuando se determinó el valor de  $m_f$  se revisó la relación entre calidad del voltaje de salida y las pérdidas de los transistores bipolares de compuerta aislada.

➤ Índice de modulación de amplitud ( $m_a$ )

La relación entre la amplitud de la señal de referencia y la señal triangular es expresada como se muestra:

$$m_a = \frac{|v^*|}{|v_{tri}|} \quad (3.2)$$

En condiciones ideales la relación entre la amplitud de la componente fundamental del voltaje de salida alcanzado y el voltaje del bus de CD, está dado por el índice de modulación de amplitud como se muestra:

$$\langle v_{an} \rangle_1 = (m_a) * \left( \frac{v_{bus}}{2} \right) \quad \text{if } m_a \leq 1 \quad (3.3)$$

### 3.1.2 Simulación control SPWM

Se diseñó un control en base a la forma de onda elemental (sinusoidal), el cual se muestra en la figura 3.1, para la realización de la conmutación de los transistores bipolares de compuerta aislada (*IGBT por sus siglas en inglés*), en el cual se utilizan tres ondas sinusoidales y una onda triangular donde las ondas sinusoidales se encuentran desfasadas 120° una de otra y son comparadas con la onda triangular que nos sirve como señal de referencia.

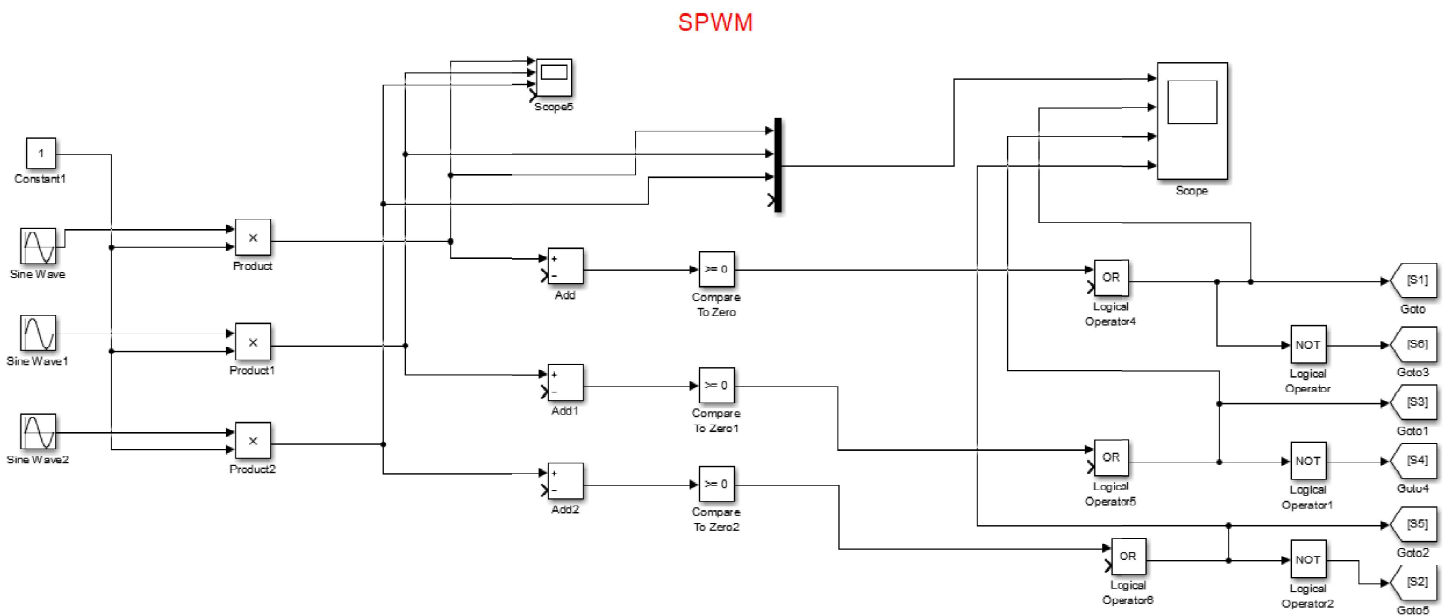


Figura 3.1 Control SPWM.

En la figura 3.2 se muestran las ondas de salida del control SPWM, sin la integración de la inyección de los estados de conmutación cero, (*Shoot-Through Zero States por su nombre en inglés*).

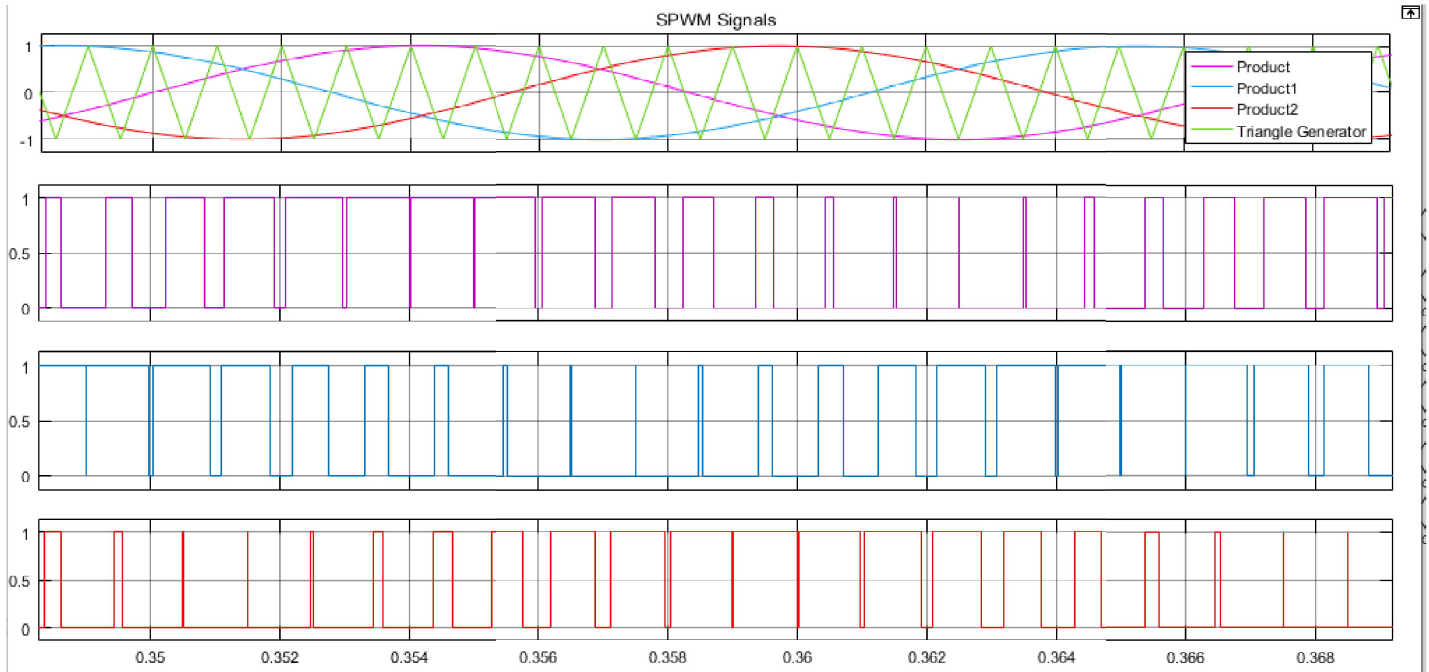


Figura 3.2 Formas de onda control SPWM.

### 3.1.3 Implementación de los *Shoot-Through Zero States*

El convertidor *Z-Source* ayuda a incrementar el voltaje de salida de CA con la inyección de los estados de conmutación cero (*Shoot-Through Zero States*) con los cuales se dan las características únicas *del Buck-Boost Inverter* por medio de la configuración de las capacitancias e inductancias y su circuito se muestra en la figura 3.3.

Con la aplicación de las fórmulas mostradas a continuación en el generador de modulación de ancho de pulso sinusoidal se obtiene el incremento en el voltaje de salida del Inversor.

$B$  = Factor de Incremento

$M$  = Índice de Modulación

$\hat{V}_g$  = Voltaje Pico de Salida hacia la Red

$\frac{T_0}{T}$  = Ciclo de Trabajo de los Disparos, (*Shoot Through Duty Cycle*)

$$B = \frac{1}{1 - 2\frac{T_0}{T}} \quad (3.4)$$

$$\hat{V}_g = (M) * (B) * \left(\frac{V_s}{2}\right) \quad (3.5)$$

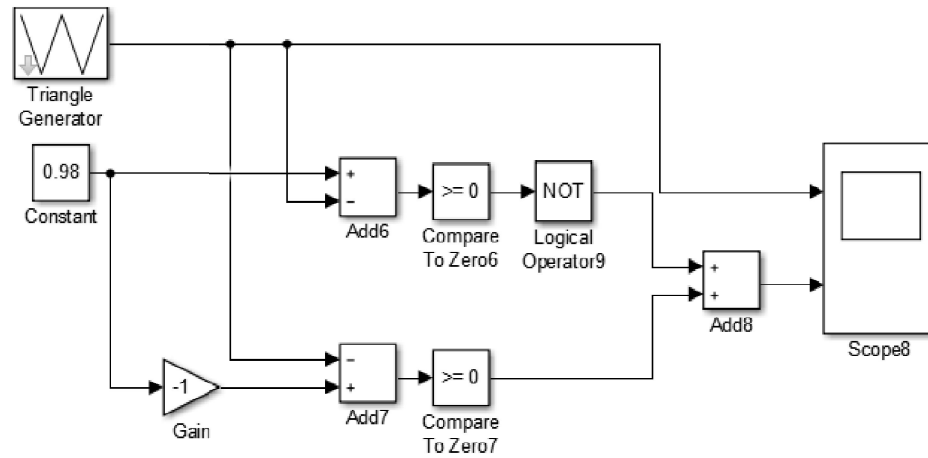


Figura 3.3 Circuito de implementación de los *Shoot-Through Zero States*.

En la figura 3.4 se muestran las ondas de salida del control *SPWM*, con la integración de la inyección de los estados de conmutación cero, (*Shoot-Through Zero States por su nombre en inglés*), los cuales ayudan a la realización del incremento en el voltaje de salida.

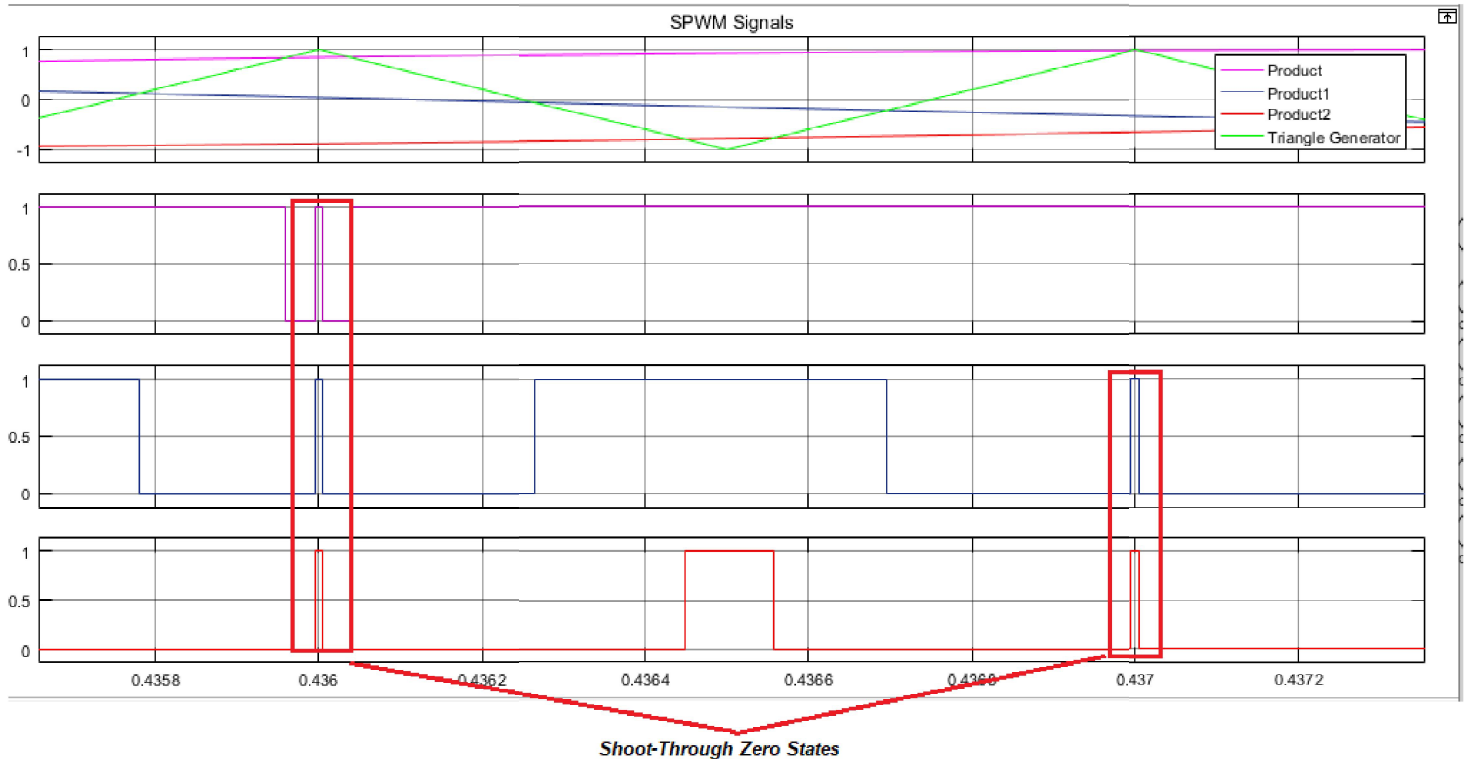


Figura 3.4 *Shoot-Through Zero States*.

En la figuras 3.5, 3.6 y 3.7 se muestra el circuito implementado con la configuración *Z-Source* y una carga puramente resistiva, el cual se utilizó para determinar el funcionamiento del *Z-Source*.

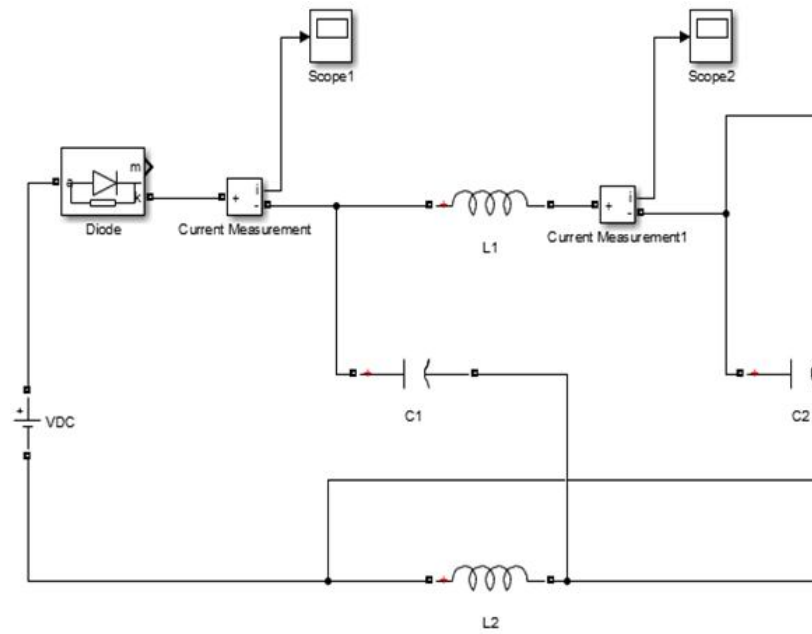


Figura 3.5 Fuente y configuración Z-Source.

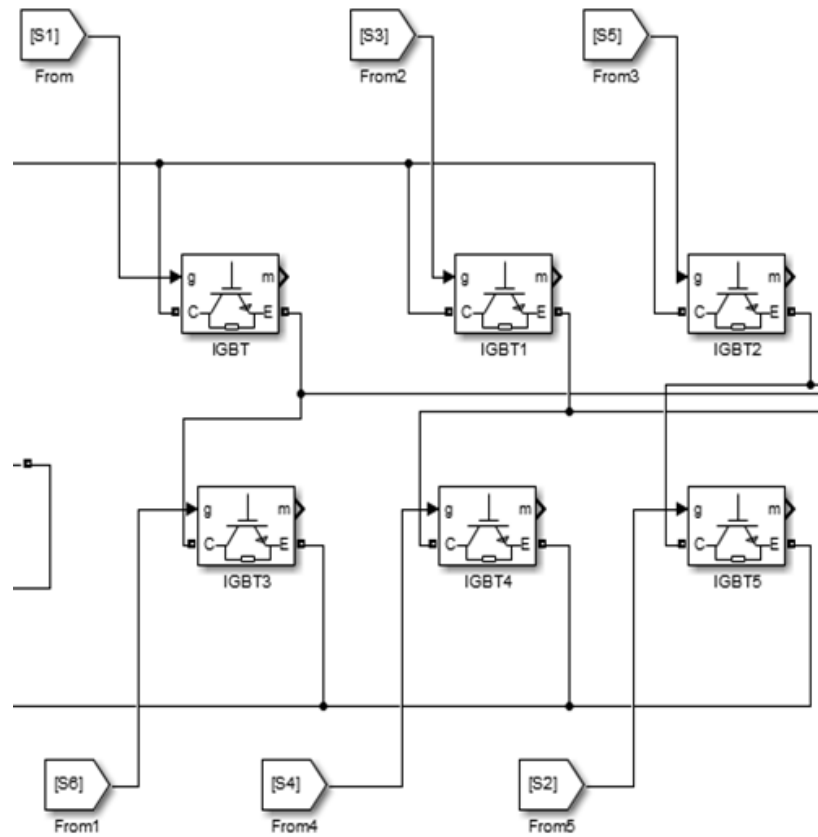


Figura 3.6 Configuración de IGBTs.

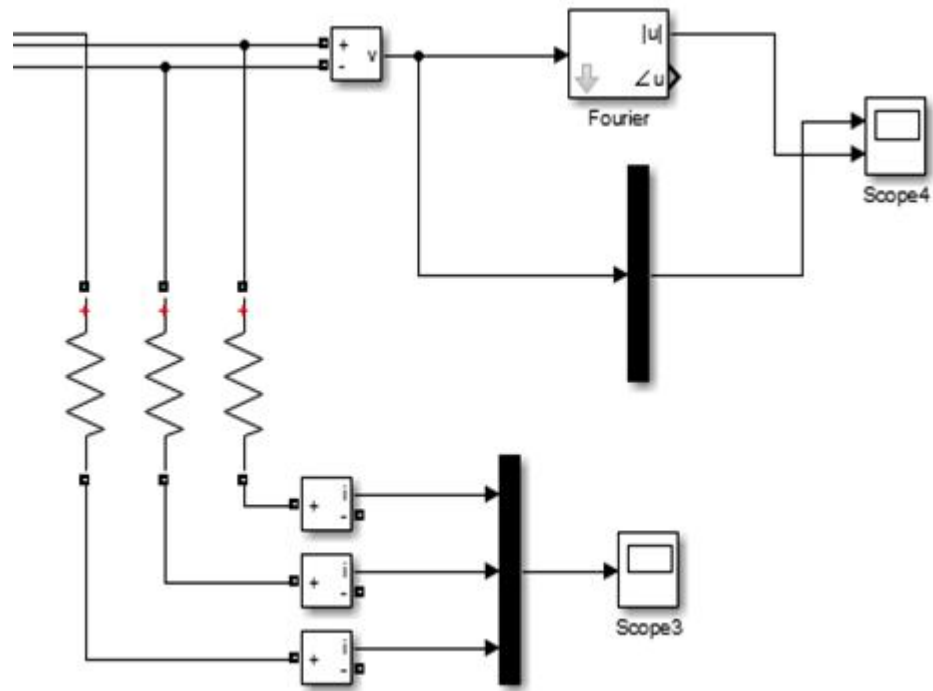


Figura 3.7 Carga puramente resistiva.

Haciendo uso de las formulas de la sección 3.1.3 se obtuvieron los siguientes resultados:

*Voltaje de la Fuente*

$$V_0 = 690v$$

*Ciclo de Trabajo*

$$\frac{T_0}{T} = 0.358$$

*Frecuencia de Conmutación*

$$10kHz$$

*Factor de Elevacion*

$$B = \frac{1}{1 - 2(0.358)} = 3.5$$

*Índice de Modulaci3n*

$$M = 0.98$$

*Voltaje de Salida*

$$\hat{V}_g = (0.98) * (3.5) * \left(\frac{690V}{2}\right) = 1183.35 \text{ Voltaje Pico de Fase}$$

$$\hat{V}_g = (1183.35)(\sqrt{3}) = 2049.62 \text{ Voltaje Pico trifásico}$$

$$\hat{V}_g = \frac{(2049.62)}{(\sqrt{2})} = 1449.3 \text{ Voltaje RMS trifásico}$$

Los resultados de la simulación del *SPWM* con la inyección de los estados de conmutación cero (*Shoot-Through Zero States*), se muestran en las figuras 3.8 y 3.9 en las cuales se observa que aplicando 690V se obtiene un incremento del voltaje hasta 1371V.

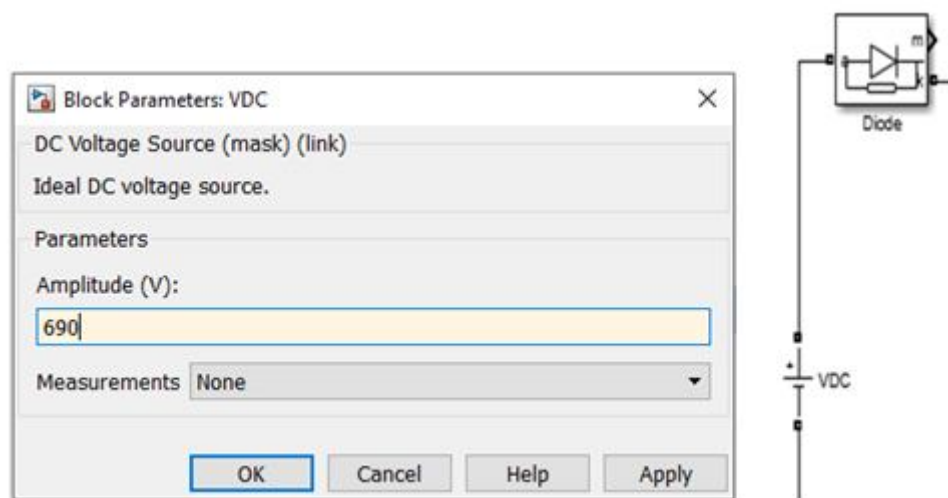


Figura 3.8 Fuente de voltaje.



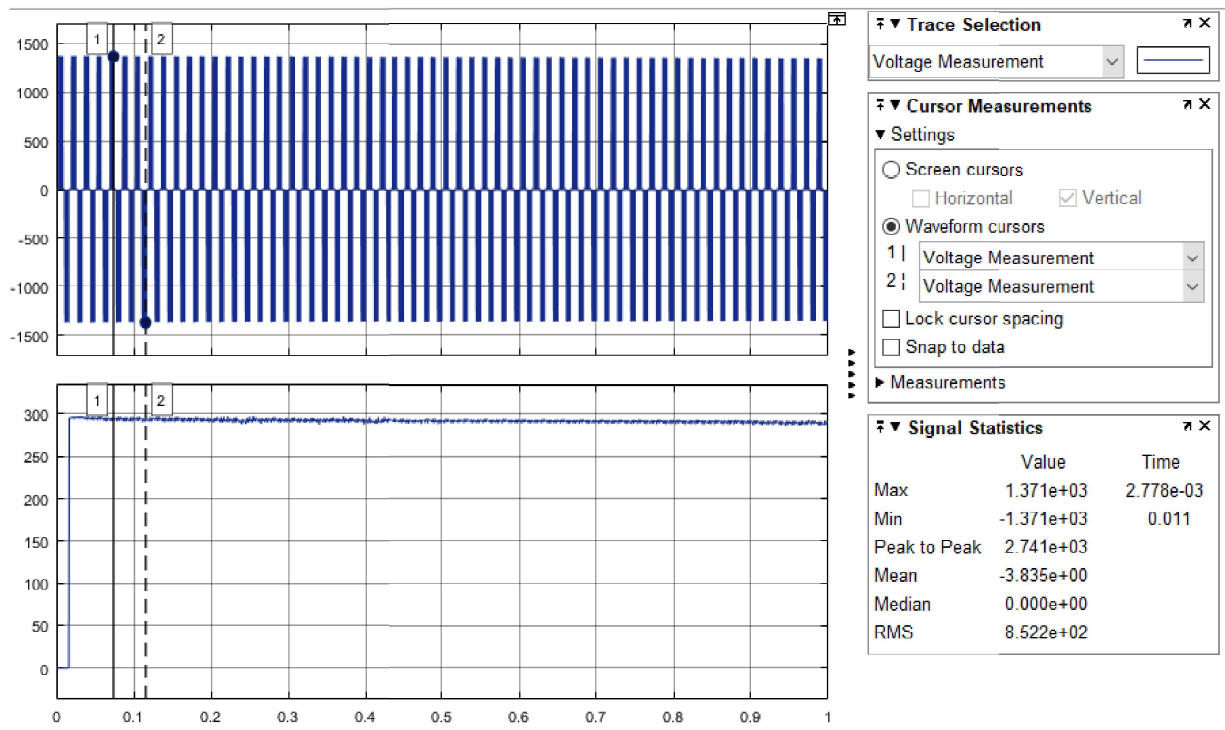


Figura 3.9 Grafica de salida de voltaje al doble.

## CAPÍTULO 4. MODELO DE CONTROL DEL GENERADOR EÓLICO

La técnica de control vectorial o control de campo orientado, es muy similar al control vectorial clásico, donde la máquina es controlada en un marco de referencia " $dq$ " el cual gira sincrónicamente con el eje " $d$ " orientado a lo largo de la posición del vector del flujo del rotor, por lo tanto, la corriente continua es proporcional al flujo del rotor mientras que la corriente en cuadratura es proporcional al par electromagnético.

Al controlar independientemente las dos componentes de corriente, se obtiene un control desacoplando el par del motor y la corriente de excitación del rotor, este método de control es definido también como un control de accionamiento de frecuencia variable (*VFD por sus siglas en inglés*) donde se calculan las componentes actuales a partir de la referencia del flujo electromagnético y el par dados por el control de velocidad del variador, donde los reguladores proporcionales e integrales (*PI*) son utilizados para mantener las componentes de corriente dentro de sus valores de referencia.

La modulación de ancho de pulsos define la conmutación de los transistores bipolares de compuerta aislada (*IGBT por sus siglas en inglés*) de acuerdo a las referencias de voltaje del estator que son las salidas de los reguladores PI.

### 4.1 Fuente de voltaje trifásica y generador asíncrono

Se utilizó una fuente de voltaje para la realización de la conexión trifásica de la red con el estator, donde se indican tres parámetros básicos los cuales son:

1.  $f$  = Frecuencia (Hz)
2.  $V_s$  = Voltaje Nominal del Estator (V)
3. Ángulo de Defasamiento de las componentes del Voltaje

Por otro lado, se utilizó una máquina asíncrona de rotor devanado, la cual se está haciendo trabajar como un generador asíncrono, donde contamos con diversas entradas y salidas, tales como:

$T_m$  = Torque Mecánico (N \* m)

A, B, C = Voltaje Trifásico, Entrada de la Red (V)

m = Inductancia de Magnetización

a, b, c = Voltaje Trifásico Salida al Control del Rotor (V)

Como parámetros nominales del generador se utilizan los siguientes:

$P_s$  = Potencia Nominal del Estator (W)

$V_s$  = Voltaje Nominal del Estator (V)

f = Frecuencia(Hz)

$L_m$  = Inductancia de Magnetización (H)

J = Inercia

D = Amortiguamiento

p = Número de Polos

Parámetros del estator y rotor:

$R_s$  = Resistencia del Estator ( $\Omega$ )

$R_r$  = Resistencia del Rotor ( $\Omega$ )

$L_{si}$  = Inductancia de Fuga (H)

## 4.2 Modelo de la turbina eólica

El modelo aéreo dinámico de la turbina representa el poder de extracción del rotor, calculando el torque mecánico en función del flujo del aire en las aspas y tomando la velocidad del viento como una velocidad promedio que incide en el área de las aspas con el objetivo de evaluar el torque promedio en el eje bajo de velocidad, donde el modelo es determinado por las fórmulas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4.

$\lambda$  = Velocidad Específica

Radio = Radio de las Aspas

$\rho$  = Densidad del Aire

$\Omega_t$  = Velocidad Angular de la Turbina

$T_t$  = Torque

$V_v$  = Velocidad del Viento

$\beta$  = Ángulo de Paso (Pitch)

$C_p$  = Coeficiente de Poder

$C_t$  = Coeficiente de Torque

$$T_t = \frac{1}{2} * (\rho) * (\pi) * (\text{Radio}^3) * (V_v^2) * (C_t) \quad (4.1)$$

$$C_p = k_1 \left[ \left( \frac{k_2}{\lambda_i} \right) - (k_3) * (\beta) - (k_4) * (\beta^{k_5}) - (k_6) \right] * (e^{k_7/\lambda_i}) \quad (4.2)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + k_8} \quad (4.3)$$

$$\lambda = \frac{(\text{Radio}) * (\Omega_t)}{V_v} \quad (4.4)$$

### 4.3 Modelo del control vectorial orientado al rotor

Se utiliza un modelo de control vectorial que también se le conoce como control de campo orientado, haciendo uso de la transformada y anti-transformada de Clarke como también de la transformada y anti-transformada de Park, estas transformaciones permiten convertir las componentes vectoriales de voltaje del sistema trifásico ( $abc$ ) en dos componentes vectoriales de un marco estacionario ortogonal ( $\alpha\beta$ ) que a su vez permite convertir estas últimas coordenadas ( $\alpha\beta$ ) en las componentes vectoriales de un marco rotatorio ortogonal ( $dq$ ). En la figura 4.1 se muestra los tres principales marcos de referencia rotativos utilizados típicamente para desarrollar modelos basados en espacios vectoriales.

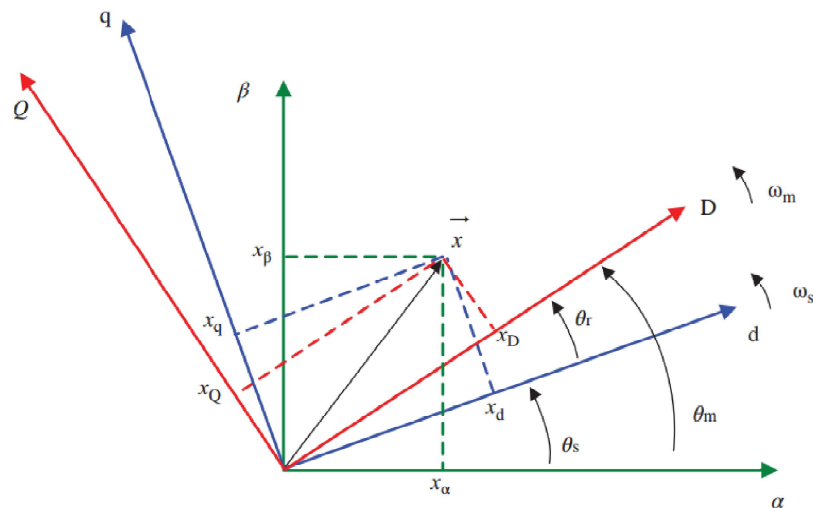


Figura 4.1 Espacio Vectorial con distintos tipos de Vectores que representan los marcos de las maquinas doblemente alimentadas (*DFIG*). [25]

De esa forma es posible modelar al motor trifásico de CA como un motor de CD, siendo más fácil implementar un esquema de control para el motor trifásico, manejándolo como si fuera un motor de CD al controlar de forma independiente la magnetización de la máquina y el torque desarrollado, en el cual este tipo de modelo de transformación vectorial es utilizado en gran medida para controlar máquinas de corriente alterna trifásicas, generando una representación del flujo magnético, del voltaje y de las magnitudes de las corrientes.

Por igual, es utilizado en el control de inversores de frecuencia variable lo cual permite de forma indirecta establecer el desacoplo del par y del flujo magnético en un motor trifásico de CA, los cuales producen las componentes de la corriente.

Utilizando este modelo de transformación como un esquema de control se obtienen diferentes ecuaciones las cuales representan el comportamiento de una manera simple y más fácil de manejar en comparación con la representación trifásica clásica.

La figura 4.2 muestra el sistema trifásico equilibrado en un plano como espacio vectorial  $\vec{x}$ , que gira a una velocidad angular ( $\omega$ ) a través del origen de los tres ejes  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$ ,  $\vec{c}$  donde se encuentran desfasados  $120^\circ$  entre ellos, donde las magnitudes trifásicas pueden ser representadas por el mismo espacio vectorial pero por dos magnitudes de fase ( $X_\alpha$  y  $X_\beta$ ) en el plano complejo imaginario real. En este caso las proyecciones del espacio vectorial giratorio en los ejes "a y b" proporcionan las dos magnitudes  $X_\alpha$  y  $X_\beta$ .

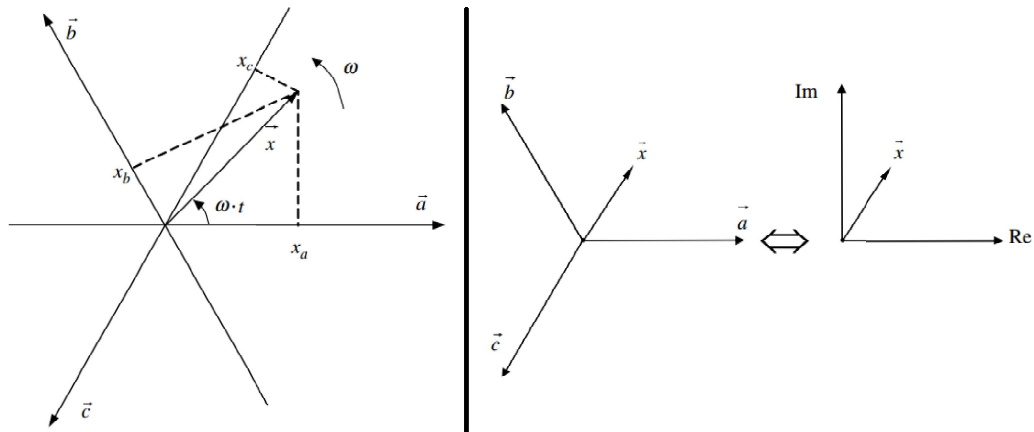


Figura 4.2 Representación de los ejes  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$ ,  $\vec{c}$  y ejes estacionarios  $\alpha\beta$  en el Espacio Vectorial. [26]

Este modelo de transformaciones vectoriales se implementa en *Matlab-Simulink* para las comparaciones entre un control estándar de lazo cerrado y un

control de lazo cerrado con la implementación del *Z-Source*. En la figura 4.3 se representa el diagrama de bloques del control vectorial a implementar.

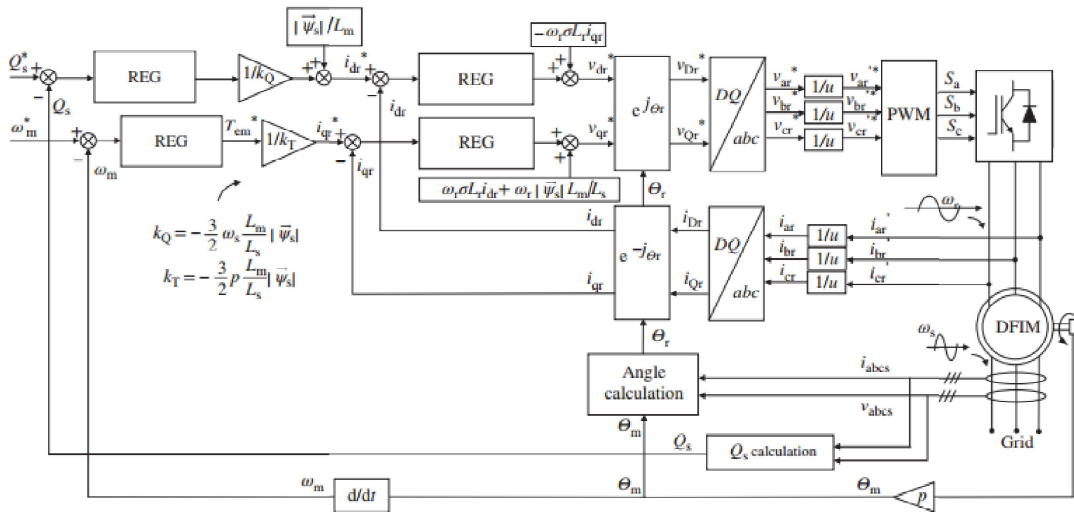


Figura 4.3 Control vectorial para *DFIG* referido al rotor. [25]

Las magnitudes trifásicas del sistema con la constante (frecuencia neperiana  $\omega = 2\pi f$ ) angular  $\omega$ , la amplitud  $\hat{X}$ , y el cambio de fase  $\phi$ , se encuentran representadas en las fórmulas 4.5, 4.6 y 4.7.

$$X_a = \hat{X} \cos(\omega t + \phi) \tag{4.5}$$

$$X_b = \hat{X} \cos\left(\omega t + \phi - \frac{2\pi}{3}\right) \tag{4.6}$$

$$X_c = \hat{X} \cos\left(\omega t + \phi + \frac{2\pi}{3}\right) \tag{4.7}$$

El sistema trifásico balanceado será representado en un plano como vector  $\vec{x}$ , el cual rotará a una velocidad angular  $\omega$  sobre el origen de los tres ejes  $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$

desfasados entre ellos  $120^\circ$ , como se representa en la figura 4.2, haciendo la representación de los ejes mostrados en las fórmulas 4.8, 4.9 y 4.10.

$$\bar{a} = 1 \quad (4.8)$$

$$\bar{b} = e^{j\left(\frac{2\pi}{3}\right)} \quad (4.9)$$

$$\bar{c} = e^{j\left(\frac{4\pi}{3}\right)} \quad (4.10)$$

El espacio vectorial será representado  $\bar{x} = |\bar{x}|e^{j(\omega t + \phi)}$  con una amplitud del espacio vectorial igual a la amplitud de las magnitudes trifásicas  $|\bar{x}| = \hat{X}$ .

Las magnitudes de las tres fases serán representadas alternativamente por el mismo espacio vectorial rotacional por dos fases de magnitudes  $X_\alpha$  y  $X_\beta$  en el plano imaginario, en este caso las proyecciones del espacio vectorial rotacional en los ejes  $\alpha\beta$  proporcionan las dos magnitudes de fase  $X_\alpha$  y  $X_\beta$ . Este hecho es representado matemáticamente por la fórmula 4.11.

$$\bar{x} = X_\alpha + jX_\beta = \frac{2}{3}(X_a + aX_b + a^2X_c) \quad (4.11)$$

La constante  $\frac{2}{3}$  de la formula 4.11 representa la escala de los vectores en el espacio de acuerdo al pico de la amplitud de las magnitudes de las tres fases.



#### 4.4 Lazos de control de corriente del rotor

##### 4.4.1 Estimación del ángulo $\phi$ de referencia

Para simplificar el control se realizó la estimación del ángulo  $\phi$  con la función *atan2*. La estimación inició con los voltajes trifásicos del estator (*abc*) y con el ángulo  $\phi$  del mismo, realizando la transformación de dichos voltajes a magnitudes  $\alpha\beta$  con la aplicación de la anti-transformada de Clarke, representada en la fórmula 4.12.

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -1/2 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

La salida obtenida es  $\alpha\beta$ , después se aplica el bloque *atan2* que realiza la división  $\frac{\beta}{\alpha}$ , restando  $90^\circ$  para la obtención del ángulo del estator.

De igual manera se resta el ángulo del estator que se encuentra en radianes mecánicos, pero antes se multiplicó por el número de polos del generador para realizar la conversión a radianes eléctricos.

##### 4.4.2 Transformación de las corrientes del rotor

La transformación se realizó aplicando la transformada de Clarke representada en la fórmula 4.13, para la obtención de los parámetros *D/Q*, los cuales se encuentran definidos en el marco de referencia del rotor, donde rotan a la velocidad angular del rotor determinada en radianes eléctricos.

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} * \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Una vez obtenidos los parámetros  $D/Q$  se realiza la Anti-Transformación Rotacional, representada en la fórmula 4.14, para la obtención de las coordenadas  $d/q$  que representan el marco de referencia síncrono las cuales rotan a la velocidad angular del estator.

$$\begin{bmatrix} X_D \\ X_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_m & \sin \phi_m \\ -\sin \phi_m & \cos \phi_m \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Con los cuales obtendremos las corrientes de referencia reactivas y activas del rotor.

#### 4.4.3 Transformación de las corrientes del estator

Una vez obtenido el ángulo de referencia se realiza la transformación rotacional para la obtención de las coordenadas  $D/Q$ , mostrada en la fórmula 4.15.

$$\begin{bmatrix} X_D \\ X_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_m & -\sin \phi_m \\ \sin \phi_m & \cos \phi_m \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Después de la obtención de las coordenadas  $D/Q$  se realiza la Anti-Transformada de Clarke, para la obtención de los parámetros  $abc$ , representada en la fórmula 4.16.

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Con la cual se obtienen los voltajes trifásicos de referencia ( $abc$ ), estos son conectados al generador de pulsos el cual está constituido por transistores bipolares de puerta aislada (*IGBT por sus siglas en inglés*).

Los voltajes obtenidos tienen que ser normalizados porque el generador de pulsos utiliza una función triangular que normaliza la señal a uno, por lo cual se añade un bloque de ganancia el cual está constituido por la inversa del  $V_{bus}$  (Bus de Voltaje Referido al Estator) entre dos, y de igual manera la salida se divide entre la relación de las vueltas que existe entre Estator y Rotor, obteniendo la salida normaliza la cual se conecta al generador de pulsos.

#### 4.4.4 Implementación de reguladores proporcionales e integrales (PI)

En la figura 4.4 se muestra el diagrama de bloques de los reguladores proporcionales e integrales (*PI*) con la misma configuración para cada uno de los bucles, empleando la compensación de los términos cruzados, además ayudan a dejar de lado el efecto de la fuente de voltaje del convertidor como también posibles retrasos en los cálculos y las mediciones.

El equivalente de los sistemas de lazo cerrado de los dos lazos de corriente ( $i_{dr}$  y  $i_{qr}$ ) son iguales a un sistema de segundo orden con dos polos y un cero que pueden ser relacionados con la teoría de control clásica la cual determina las ganancias apropiadas para los reguladores *PI*.

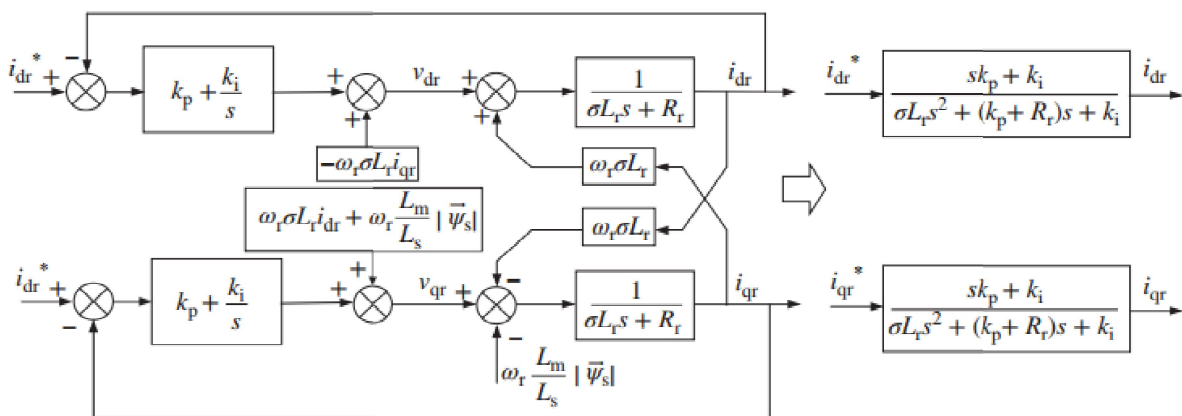


Figura 4.4 Sistema de lazo cerrado de segundo orden con reguladores PI. [25]

Si se desprecian las resistencias del estator el modelo se simplifica significativamente, realizando esto, el voltaje es alineado respecto al eje "q", por lo que la componente "d" se convierte en cero. Por otro lado, el modelo considera al eje "d" alineado con el flujo, por lo que el flujo a lo largo del eje "q" es nulo.

Las ganancias proporcionales e integrales para el control del Rotor son calculadas por las fórmulas 4.12 a la 4.20.

$L_r$  = Inductancia del Rotor (H)

$R_r$  = Resistencia del Rotor Referida al Estator ( $\Omega$ )

$L_m$  = Inductancia de Magnetización (H)

$L_s$  = Inductancia del Estator (H)

$L_r$  = Inductancia del Rotor (H)

J = Inercia

P = Número de Polos

$$\sigma = 1 - (L_m^2)/(L_s * L_r) \quad (4.17)$$

$$T_i = \frac{\sigma * L_r}{R_r} \quad (4.18)$$

$$T_n = 0.05/4 \quad (4.19)$$

$$W_{ni} = 100 * \frac{1}{T_i} \quad (4.20)$$

$$W_{nn} = \frac{1}{T_n} \quad (4.21)$$

$$kp_{id} = [(2) * (W_{ni}) * (\sigma) * (L_r)] - R_r \quad (4.22)$$

$$kp_{iq} = kp_{id} \quad (4.23)$$

$$ki_{id} = (W_{ni}^2) * (L_r) * (\sigma) \quad (4.24)$$

$$ki_{iq} = ki_{id} \quad (4.25)$$

Además, se utilizó una función integradora con la condición inicial en cero, con el tiempo de muestreo como el inverso de la frecuencia de conmutación y se añade un bloque de saturación referenciado al bus de CD del estator.

#### 4.4.5 Cancelación de los términos de acoplamiento

Con este modelo de control, las componentes de voltaje del vector se pueden observar oscilando debido al acoplamiento de los términos entre el voltaje del estator y las componentes del vector "dq" de las corrientes del estator, que se pasan a los acoplamientos entre el voltaje del estator y las componentes "dq" de las corrientes del rotor.

Para determinar las componentes del vector "dq", se implementó la cancelación de los reguladores PI, por lo cual, si no se realiza la cancelación de dichos términos se pueden presentar errores en el control del torque y errores en la estimación del flujo magnético.

Con la aplicación de las fórmulas 4.26 y 4.27:

$$i_d = \text{Corriente Potencia Reactiva (Amp)}$$

$$i_q = \text{Corriente Potencia Activa (Amp)}$$

$$\omega_r = \text{Velocidad Electrica del Rotor (Radianes Mecánicos)}$$

$$i_{qr} = \text{Corriente de Referencia Potencia Activa (Amp)}$$

$$i_{dr} = \text{Corriente de Referencia Potencia Reactiva (Amp)}$$

$$\Psi_s = \text{Flujo del estator (Wb)}$$

$$V_{dr\_ref} = i_d - \omega_r * (\sigma) * (L_r) * (i_{qr}) \quad (4.26)$$

$$V_{qr\_ref} = i_q + [\omega_r * (\sigma) * (L_r) * (i_{dr})] + \left[ \omega_r * \left( \frac{L_m}{L_s} \right) * (\Psi_s) \right] \quad (4.27)$$

#### 4.5 Lazos de control de velocidad

Para la determinación de los lazos de velocidad se implementaron dos controles, uno donde está presente un regulador proporcional integral (*PI*) y otro con la adaptación de un bloque para seguimiento del punto máximo de potencia (*MPPT por sus siglas en Inglés*), los dos controles nos sirven para compensar los retrasos en los cálculos y mediciones, esto se hizo para hacer comparaciones entre los dos diferentes modos de control.

El seguimiento del punto máximo de potencia opera en la zona número 2, la cual es una de las 4 zonas de la estrategia de control de una turbina eólica. Las 4 zonas de operación se encuentran representadas en la figura 4.5. El objetivo de este control de velocidad es seguir el camino de la máxima extracción de potencia de la turbina eólica, sus fórmulas están definidas en la sección 4.5.1.

Para regulador proporcional integral (*PI*), se implementaron las siguientes fórmulas 4.28 y 4.29 las cuales representan la ganancia del regulador.

$$k_{p_n} = \frac{(2 * W_{nn} * J)}{p} \quad (4.28)$$

$$k_{i_n} = \frac{(W_{nn}^2 * J)}{p} \quad (4.29)$$

El control vectorial también emplea un lazo de potencia el cual en esta simulación se omitió para simplificar un poco el diseño del control.

##### 4.5.1 Regiones de control de velocidad de la turbina eólica

Las estrategias más utilizadas para el control de una Turbina eólica se derivan en 4 zonas de operación.

1. Límite de velocidad mínima de operación.
  2. Seguimiento de la curva de extracción de potencia máxima de la operación de velocidad variable con carga parcial.
  3. Límite de velocidad máxima en operación de carga parcial.
  4. Límite de velocidad máxima de funcionamiento a la potencia nominal.
- 
- **Zona 1.-** El límite de velocidad mínima se alcanza cuando la turbina gira a velocidades con una frecuencia de resonancia aproximadamente 0.5Hz o también cuando se cuenta con una velocidad de rotación demasiado pequeña, la cual puede llegar excitar el generador doblemente alimentado (*DFIG por sus siglas en Inglés*)
  
  - **Zona 2.-** Es la zona en la cual el punto máximo de potencia, (*MPPT por sus siglas en inglés*) opera. La zona de operación óptima es cuando el viento se vuelve más importante porque se alcanza el máximo rendimiento aerodinámico.
  
  - **Zona 3.-** En esta zona es donde se alcanza la velocidad máxima de rotación de la turbina a medida que se va incrementando la velocidad del viento. Cuando se obtienen valores mayores al punto máximo de rotación la turbina debe regularse a valores nominales para que no se llegue a presentar algún daño.
  
  - **Zona 4.-** Corresponde a la operación de la turbina a plena carga, donde la potencia mecánica puede ser limitada con la variación del control del ángulo de inclinación o del par. Además, en esta zona es donde se realizan los ajustes en el ángulo de inclinación para mantener el par electromagnético a un valor nominal y una velocidad máxima de operación.

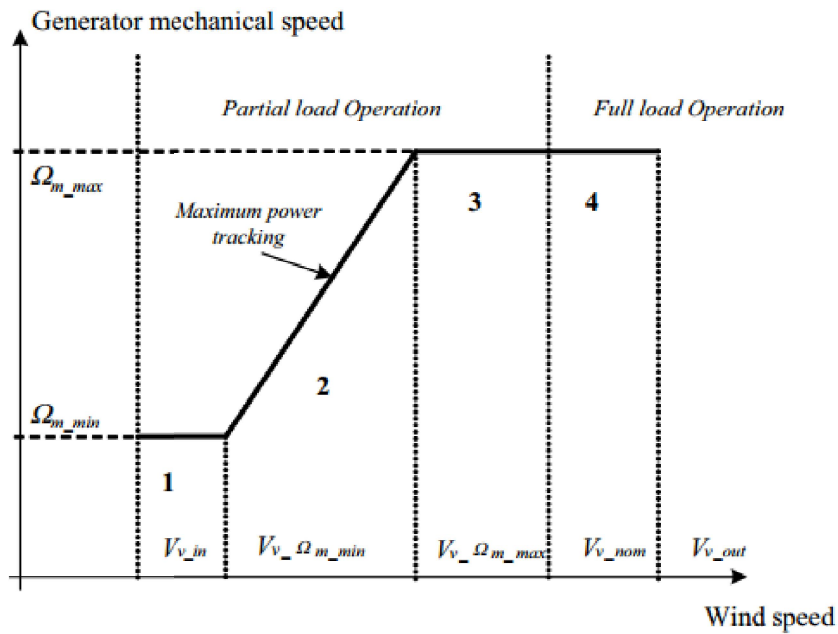


Figura 4.5 Zonas del control de velocidad de la turbina eólica. [26]

Por lo tanto, la zona de mayor importancia es la zona 2, en la cual actúa el punto máximo de potencia (*MPPT por sus siglas en inglés*). Esto es porque en la zona 2 se presentan las mayores variaciones de viento de las cuales se puede tomar ventaja. Para esto se requiere la implementación de un diagrama de bloques del control de velocidad indirecto para las distintas velocidades del viento, el cual se encuentra representando en la figura 4.6.



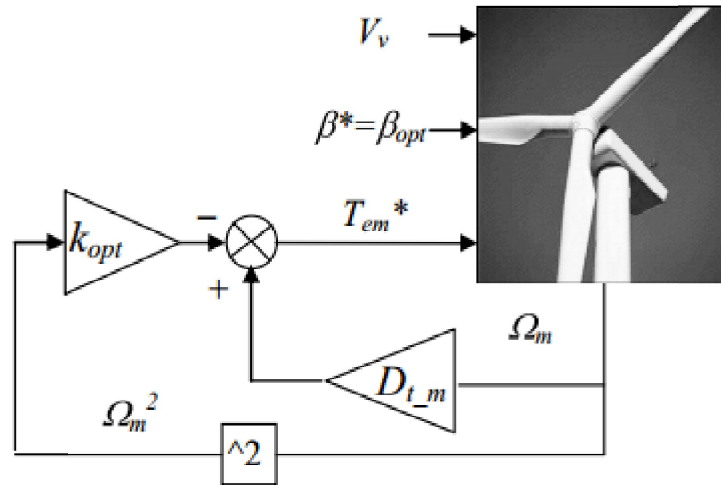


Figura 4.6 Control de velocidad indirect. [26]

Para la determinación del punto máximo de potencia, se aplicaron las fórmulas 4.30 y 4.31.

$C_{p\_Max}$  = Coeficiente de Potencia Máxima

$$k_{opt_t} = \frac{1}{2} * (\rho) * (\pi) * \left( \frac{Radio^5}{\lambda_{opt}^3} \right) * (C_{pMax}) \quad (4.30)$$

Donde el resultado es dividido entre una ganancia representada por la fórmula 4.26.

$k_T$  = Expresión de Torque en el marco dq

$$k_T = -\frac{3}{2} * \left( \frac{L_m}{L_s} \right) * (\Psi_s) \quad (4.31)$$

#### 4.6 Convertidor CA-CD-CA

Se utilizó un convertidor trifásico CA-CD-CA (*Back-to-Back por sus siglas en inglés*), basado en transistores bipolares de compuerta aislada (*IGBT por sus siglas en Inglés*), conocido también como como convertidor reversible o bidireccional, que consiste en doce *IGBTs*, seis para el modo de rectificación (CA-CD) y seis para el modo inversor (CD-AC), cada uno con un diodo en anti-paralelo para permitir el flujo de corriente en ambas direcciones y a su vez conectado cada uno (Rectificador e Inversor) en configuración de puente y alimentados por un generador de modulación de ancho de pulso senoidal (*SPWM por sus siglas en Inglés*), independiente uno del otro.

En el convertidor de CA-CD-CA se implementaron los componentes del circuito *Z-Source*, basado en dos capacitores y dos inductores, conectándolos después de la rectificación, siendo una de sus funciones incrementar el voltaje de salida del bus de CD, ya que es una de las características particulares del *Z-Source*.

Se realizó la conexión en un arreglo de dos capacitancias y dos inductancias conectadas en forma de Z como se encuentra representado en la figura 4.7 (de ahí su nombre).

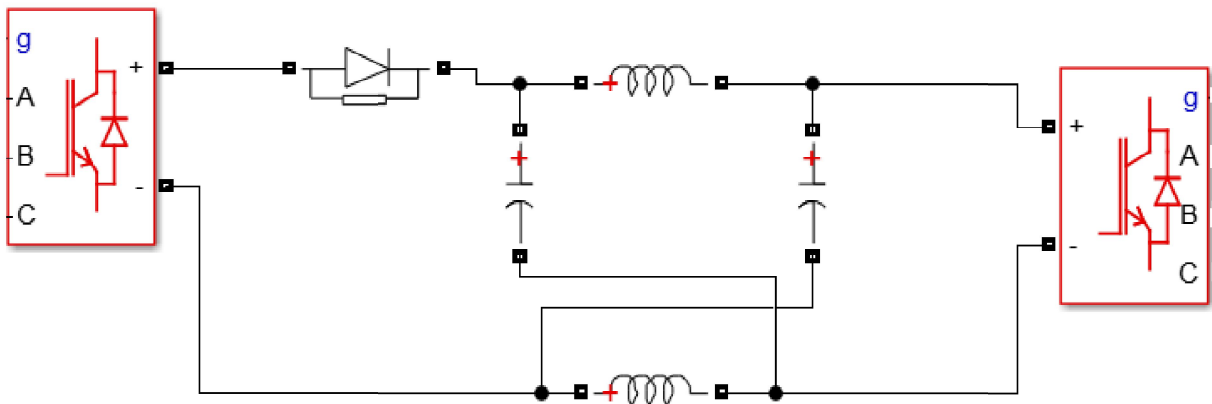


Figura 4.7 Convertidor CA-CD-CA.

#### 4.7 Filtro trifásico conexión estator-red y transformador de relación

Se utilizó un filtro del lado de la red conectado al estator para cerrar el ciclo de alimentación y eliminar posibles perturbaciones que puedan venir del lado de la red, el filtro está compuesto por capacitancias e inductancias.

De igual manera se realizó la implementación de un transformador en conexión serie entre el rotor y el convertidor, porque el modelo está referido al estator, para poder hacer la correcta relación de voltaje entre el estator y el rotor se requiere la implementación del transformador.

#### 4.8 Modelo de control vectorial orientado a la red o estator

Si no se tiene un modelo de control para el lado de la red o estator algunas magnitudes de esta parte no funcionarían correctamente, la base de este modelo de control es igual a la base del modelo de control para el rotor por medio del control de espacios vectoriales, el cual se encuentra representado en la figura 4.8.

##### 4.8.1 Estimación del ángulo $\phi$ de referencia

De igual manera como se realizó en los lazos de corriente del rotor se simplifica el control realizando la estimación del ángulo  $\phi$  con la función *atan2*.

La estimación inicia con los voltajes trifásicos del estator (*abc*) y con el ángulo  $\phi$  del mismo, realizando la transformación de dichos voltajes a magnitudes  $\alpha\beta$  con la aplicación de la fórmula 4.12, (anti-transformada de Clarke).

Siendo así la salida obtenida en  $\alpha\beta$ , después se aplica el bloque *atan2* que realiza la división  $\frac{\beta}{\alpha}$ , restando  $90^\circ$  para la obtención del ángulo del estator.

##### 4.8.2 Transformación de las corrientes de la red o estator

La transformación se realizó aplicando la fórmula 4.13, (transformada de Clarke), para la obtención de los parámetros  $\alpha\beta$ .

Una vez obtenidos los parámetros  $\alpha\beta$  se realiza la anti-transformación Rotacional aplicando la fórmula 4.14 para la obtención de las coordenadas *d/q*, las

cuales se representan en el marco de referencia síncrono que rotan a la velocidad angular del estator.

Obteniendo las corrientes de referencia reactivas y activas del lado de la red o del estator.

#### 4.8.3 Implementación de reguladores proporcionales e integrales (PI)

Se implementó el mismo modelo de reguladores proporcionales integrales (PI), que se utilizó en el control del rotor, en el cual estos reguladores compensan y dejan de lado el efecto de la fuente de voltaje del convertidor como también posibles retrasos en los cálculos y las mediciones.

El equivalente de los sistemas de lazo cerrado de los dos lazos de corriente ( $i_{dg}$  y  $i_{qg}$ ) son iguales a un sistema de segundo orden con dos polos y un cero que pueden ser relacionados con la teoría de control clásica la cual determina las ganancias apropiadas para los reguladores PI.

Las ganancias proporcionales e integrales para el control del estator o control de la red son calculadas con las fórmulas 4.32 a la 4.37.

$L_g$  = Inductancia del Filtro Referida a la Red (H)

$R_g$  = Resistencia del Filtro Referido a la Red ( $\Omega$ )

$$T_{ig} = \frac{L_g}{R_g} \quad (4.32)$$

$$W_{nig} = 60 * 2 * \pi \quad (4.33)$$

$$kp_{idg} = [(2) * (W_{nig}) * (L_g)] - R_g \quad (4.34)$$

$$kp_{iqg} = kp_{idg} \quad (4.35)$$

$$ki_{idg} = (W_{nig}^2) * (L_g) \quad (4.36)$$

$$ki_{iqg} = ki_{idg} \quad (4.37)$$

De igual manera, se utilizó una función integradora con la condición inicial en cero, con el tiempo de muestreo como el inverso de la frecuencia de conmutación y se añade un bloque de saturación referenciado al bus de CD del estator.

#### **4.8.4 Transformación del voltaje de corriente directa referido al estator ( $V_{bus}$ ) y de la potencia reactiva de referencia**

Para la transformación del voltaje de CD referido al estator se implemento un regulador proporcional integral (*PI*), que cuenta con las mismas características que los reguladores *PI* utilizados.

Solo con el cambio de las siguientes variables:

$$k_{p_v} = -1000$$

$$k_{i_v} = -300000$$

Se utilizó una función integradora con la condición inicial en cero y el tiempo de muestreo como el inverso de la frecuencia de conmutación añadiendo un bloque de saturación realizando la multiplicación de la potencia nominal del estator por el deslizamiento máximo.

Se realiza la implementación de ganancias a la salida, las cuales están determinadas por las fórmulas 4.38 y 4.39.

$$k_{pg} = \frac{1}{1.5 * V_s * \sqrt{2/3}} \quad (4.38)$$

$$k_{qg} = -k_{pg} \quad (4.39)$$

#### **4.8.5 Cancelación de términos de acoplamiento**

De igual manera con este modelo de control, las componentes de voltaje del vector se pueden observar oscilando debido al acoplamiento de los términos entre el

voltaje del estator y las componentes del vector "dq" de las corrientes de la red, que se pasan a los acoplamientos entre el voltaje del estator y las componentes "dq" de las corrientes de la red.

Para determinar las componentes del vector "dq", se implementó la cancelación de los reguladores *PI*, por lo cual si no se realiza la cancelación de dichos términos se pueden presentar errores en el control del torque y errores en la estimación del flujo magnético.

Con la aplicación de las fórmulas 4.40 y 4.41.

$i_d$  = Corriente Potencia Reactiva (Amp)

$i_q$  = Corriente Potencia Activa (Amp)

$i_{qg}$  = Corriente de Referencia Potencia Activa (Amp)

$i_{dg}$  = Corriente de Referencia Potencia Reactiva (Amp)

$L_g$  = Inductancia del Filtro Referida a la Red (H)

$f$  = Frecuencia(Hz)

$$V_{dg\_ref} = i_d - i_{qg} * (L_g) * (2 * \pi * f) \quad (4.40)$$

$$V_{qg\_ref} = i_q + i_{dg} * (L_g) * (2 * \pi * f) \quad (4.41)$$

#### **4.8.6 Transformación de las corrientes del estator**

Una vez obtenido el ángulo de referencia se realizó la transformación rotacional, con la utilización de la fórmula 4.15 para la obtención de las coordenadas  $\alpha\beta$ . Después de la obtención de las coordenadas  $\alpha\beta$  se realizó la anti-transformada de Clarke, la utilización de la fórmula 4.16, para la obtención de los parámetros abc.

Con la cual se obtienen los voltajes trifásicos de referencia (abc), los cuales serán conectados al generador de pulsos el cual está constituido por transistores bipolares de puerta aislada (*IGBT por sus siglas en inglés*).

Los voltajes obtenidos tienen que ser normalizados porque el generador de pulsos utiliza una función triangular que normaliza la señal a uno, por lo cual se añade un bloque de ganancia el cual está constituido por la inversa del  $V_{bus}$  (*Bus de Voltaje Referido al Estator*) entre dos.

De igual manera a la salida de la transformación de la corriente se le suma el voltaje  $V_s$  que es la compensación del voltaje de la red, obteniendo la salida normaliza la cual se conecta al generador de pulsos le lado de la red.

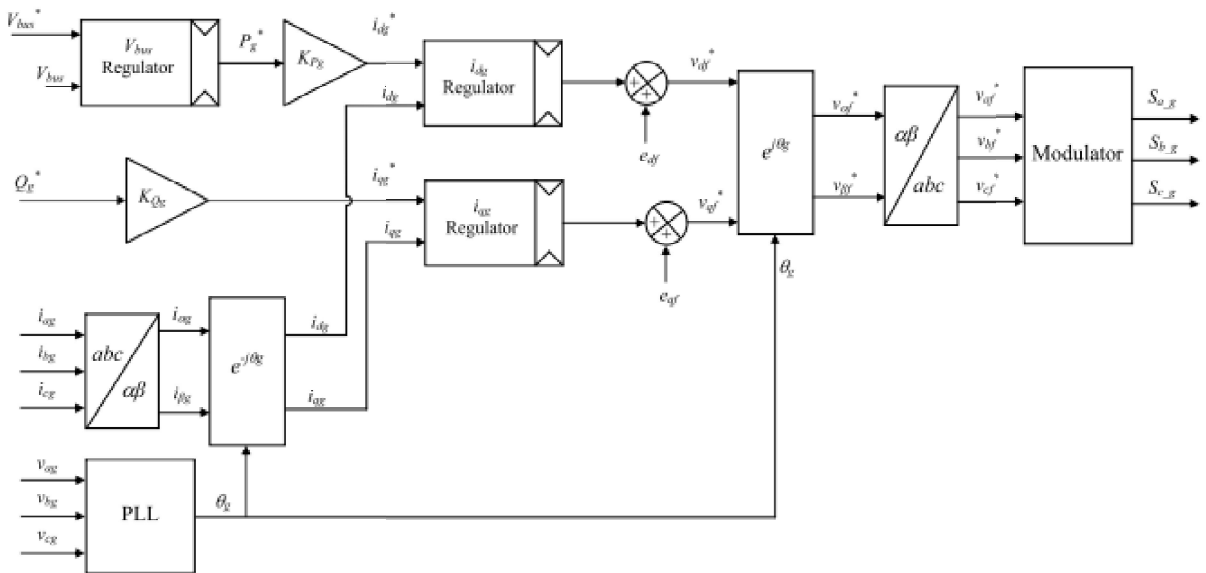


Figura 4.8 Control vectorial para DFIG referido a la red o estator. [26]

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La simulación se realizó, con la recopilación de la información que es proporcionada en los folletos de los principales aerogeneradores como son: *GE 2.5*, *Nordex N80*, *Mitsubishi MWTT 92*, *Repower MM82*, *Vestas V80*, *Acciona AW 3000*.

Tomando en cuenta que la información en los folletos no es muy detallada, además se realizó el análisis además de libros de referencia en el área y con la aportación de los datos de los fabricantes mencionados se llegó a la realización del modelado del aerogenerador determinando el comportamiento de la turbina, su estructura mecánica y su estructura eléctrica, llegando así a la obtención de valores cercanos a los reales del modelo de un aerogenerador de 2 MW, los cuales se muestran en las tablas 5.1 a la 5.3.

### 5.1 Datos de la simulación para el control de un generador doblemente alimentado para la aplicación en un aerogenerador

Tabla 5.1.1 Datos del generador

<b>Características principales del generador</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidad</b>
Potencia Nominal del Estator	$2 \times 10^6$	$P_S$	<i>MW</i>
Torque Nominal	12732	$T_{em}$	<i>N * m</i>
Voltaje Nominal del Estator	690	$V_S$	<i>V</i>
Velocidad Nominal Rotacional	1500	$n$	<i>Rev/Min</i>
Número de Polos	2	$p$	— — —
Frecuencia del Estator	60	$f$	$H_z$
Corriente Nominal del Estator	1760	$I$	<i>Amp</i>
Voltaje Nominal del Rotor	2070	$V_r$	<i>V</i>
Inercia	127	$J$	<i>kg * m<sup>2</sup></i>



Amortiguamiento	$1 \times 10^{-3}$	$J$	$Nm * s/rad$
-----------------	--------------------	-----	--------------

<b>Parámetros del generador</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidad</b>
Resistencia del Estator	$2.6 \times 10^{-3}$	$R_s$	$\Omega$
Inductancia de Fuga (Estator y Rotor)	$0.087 \times 10^{-3}$	$L_{si}$	$H$
Inductancia de Magnetización	$2.5 \times 10^{-3}$	$L_m$	$H$
Resistencia del Rotor	$2.9 \times 10^{-3}$	$R_r$	$\Omega$
Relación de Vueltas Estator y Rotor	$1/3$	$u$	---
Deslizamiento Máximo	$1/3$	$s_{max}$	---

Tabla 5.1.2 Datos turbina

<b>Parámetros de la turbina</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidad</b>
Radio	42	$Radio$	$m$
Relación de Caja de Engranés	100	$N$	---
Velocidad Especifica	7.2	$\lambda_{opt}$	---
Máximo Coeficiente de Poder	0.44	$C_{p\_max}$	---
Densidad del Aire	1.1225	$\rho$	$kg/m^3$

Tabla 5.1.3 Datos SPWM y puente de IGBTs

<b>Parámetros del SPWM y puente de IGBTs</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidad</b>
Frecuencia de Conmutación	$4 \times 10^3$	$f_{sw}$	$Hz$

Resistencia de Amortiguamiento	$1 \times 10^5$	$R_s$	$\Omega$
Capacitancia de Amortiguamiento**	$\infty$	$C_s$	$F$
Resistencia Interna	$1 \times 10^{-3}$	$R_{on}$	$\Omega$
Inductancia Interna	0	$L_{on}$	$H$
Tensión Directa	0	$V_f$	$V$
Tensión Directa Diodo	0	$V_{fd}$	$V$

\*\*Colocando cero como parámetro elimina el amortiguamiento y cuando se coloca infinito se convierte en un amortiguador puramente resistivo.

### 5.2 Bloque 1 fuente de voltaje trifásica

Se utilizó un bloque de una fuente trifásica de CA con los siguientes parámetros: 690V como valor de entrada (el cual representa el voltaje nominal del estator), una frecuencia de 60Hz y un desfase en los ángulos de los voltajes de 120° entre ellos, además conectando el punto neutro de la fuente a tierra por si sucede algún desbalanceo en las fases, como se puede observar en la figura 5.1.

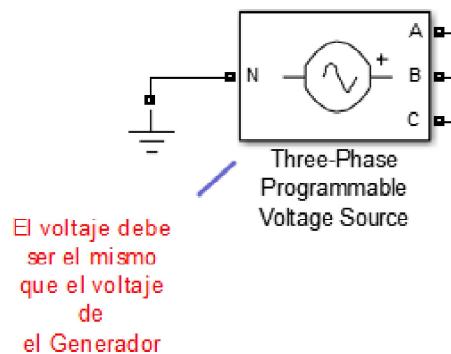


Figura 5.1 Fuente trifásica.

### 5.3 Bloque 2 modelo de la turbina

Se realizó el modelo la turbina eólica, representado en la figura 5.2 tomando como valores de entrada la velocidad del viento y la velocidad de rotación ( $\omega_m$ ).

Aplicando la fórmula 4.4, se obtiene lambda ( $\lambda$ ) pero como el modelo se encuentra referido al eje de menor velocidad se tiene que considerar la relación de la caja de engranes dividiendo a la velocidad de rotación ( $\omega_m$ ), entre la relación de la caja de engranes.

$$\lambda = \frac{(42) * (\omega_m) * \frac{1}{100}}{3}$$

Donde;  $\omega_m$  es un valor cambiante del generador

Una vez determinada lambda ( $\lambda$ ), se termina el coeficiente de potencia- ( $C_p$ ), aplicando la fórmula 4.2 para la obtención del coeficiente del par torsional ( $C_t$ ), la cual se determinó con el siguiente programa en MatLab:

```
Beta=0; Representa el ángulo de inclinación  
Ind2=1; Constante  
for lambda= 0.1:0.01:11.8  
    lambdai (ind2) = (1./((1./lambda-0.02.*beta)+(0.003./(beta^3+1))));  
    Cp (ind2) = 0.73.* (151./lambdai(ind2)-0.58.*beta-0.002.*beta^2.14-  
13.2).*(exp(-18.4./lambdai(ind2)));  
    Ct (ind2) = Cp(ind2)/lambda;  
    Ind2=ind2+1;  
end  
tab_lambda=[0.1:0.01:11.8];
```

Una vez determinado el coeficiente del par torsional, se hace uso de la fórmula 4.1 para la obtención del par torsional de la turbina.

$$T_t = \frac{1}{2} * (1.1225) * (\pi) * (42^3) * (3^3) * (C_t)$$

Donde;  $C_t$  es el resultado de la tabla de datos del programa presentado.

Por último se realiza la división de  $T_t$  entre  $-\frac{1}{100}$  para obtener el par torsional al eje de mayor velocidad y el signo negativo es por que opera como generador y se obtiene el par torsional producido por la turbina modelada.

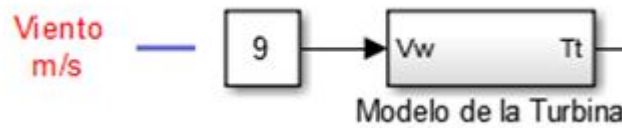


Figura 5.2 Modelo de la turbina.

#### 5.4 Bloque 3 generador doblemente alimentado

Para la representación del generador doblemente alimentado se está utilizando un bloque de una máquina asíncrona doblemente alimentada, representado en la figura 5.3, en el cual como parámetros de entrada se establecen los voltajes de la fuente trifásica (mencionada en el sección 5.2 los cuales se determinan como los voltajes del estator), además el torque producido por el modelo de la turbina determinado en la sección 5.3.

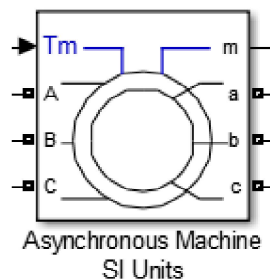


Figura 5.3 Generador asíncrono doblemente alimentado.

Donde los circuitos equivalentes de los ejes "q y d" se representan como se muestran en las figuras 5.4 y 5.5.

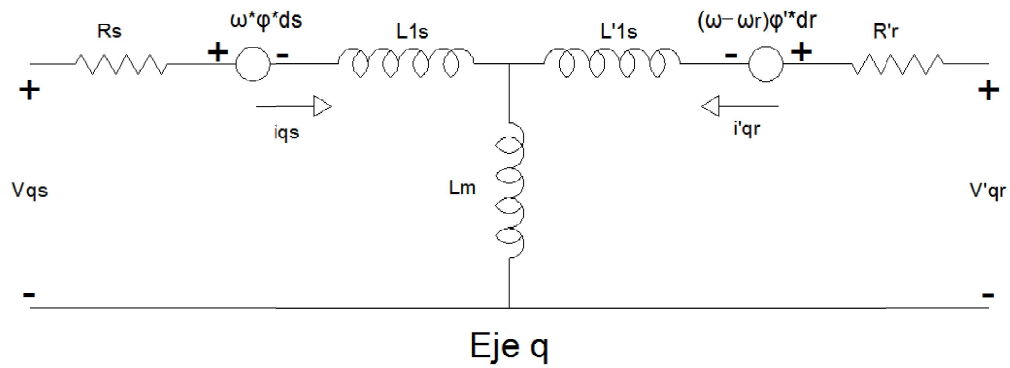


Figura 5.4 Circuito equivalente del eje q.

Fórmulas del circuito equivalente del eje q:

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega \phi_d$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega \phi_{qs}$$

$$V'_{qr} = R'_{r} i'_{qr} + \frac{d\phi'_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_r) \phi'_{dr}$$

$$V'_{dr} = R'_{r} i'_{dr} + \frac{d\phi'_{dr}}{dt} - (\omega - \omega_r) \phi'_{qr}$$

$$T_e = 1.5p(\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds})$$

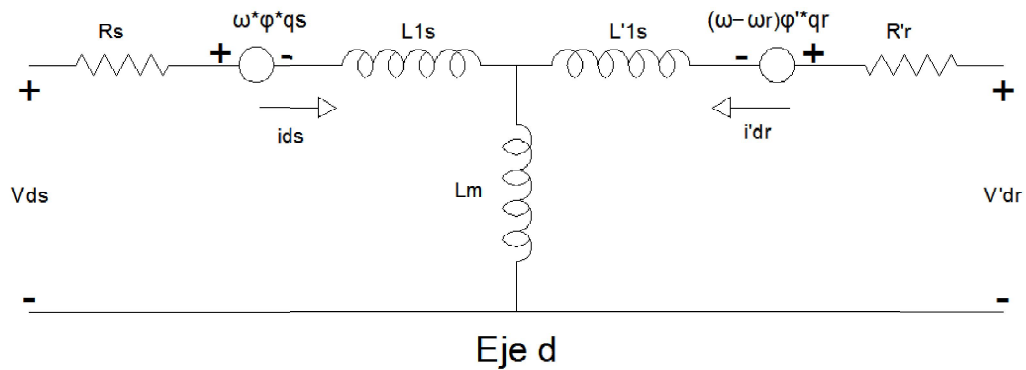


Figura 5.5 Circuito equivalente del eje d.

Fórmulas del circuito equivalente del eje d:

$$\phi_{qs} = L_{s1} i_{qs} + L_m i'_{qr}$$

$$\phi_{ds} = L_{s1} i_{ds} + L_m i'_{dr}$$

$$\phi'_{qr} = L'_{r1} i'_{qr} + L_m i_{qs}$$

$$\phi'_{dr} = L'_{r1} i'_{dr} + L_m i_{ds}$$

$$L_s = L_{s1} + L_m$$

$$L'_r = L'_{r1} + L_m$$

$\omega$  = Referencia del marco de la velocidad angular

$\omega_r$  = Velocidad angular eléctrica

A la salida del generador doblemente alimentado se obtiene los siguientes parámetros; corrientes del rotor ( $I_r$ ), voltajes del rotor ( $v_r$ ), ángulo del rotor ( $\theta$ ), velocidad eléctrica del rotor ( $\omega_m$ ) y torque electromagnético ( $T_{em}$ ). Los cuales ayudan a realizar el control vectorial de los circuitos de las figuras 5.11 y 5.12.

### 5.5 Bloque 4 control vectorial del rotor

Para el control vectorial del rotor se implementó el modelo de la figura 5.6 el cual se encuentra explicado en la sección 4.3, donde se habla de la descomposición del voltaje trifásico de entrada (abc) en dos componentes vectoriales de un marco estacionario ortogonal ( $\alpha\beta$ ), en el cual se aplican las transformadas y anti-transformadas de Clarke y Park.

Como valores de entrada del bloque se presentan;

- Un valor de velocidad de referencia, el cual permite realizar una comparación entre una velocidad constante contra la velocidad obtenida del generador.
- Una corriente de referencia, el cual permite comparar la corriente de la potencia reactiva ( $i_d$ ), y también permite visualizar mejor las perturbaciones que se presentan en el sistema.
- Corriente del rotor, ayuda al cálculo de la transformación de las corrientes del rotor.
- Voltaje del estator, es el voltaje trifásico (abc) el cual es utilizado para determinar las componentes vectoriales del marco ortogonal ( $\alpha\beta$ ).
- Ángulo del rotor, ayuda a determinar el ángulo de las transformadas de *Clarke* y *Park* para determinar las componentes del marco ortogonal ( $\alpha\beta$ ).
- Velocidad eléctrica del rotor, de igual manera la velocidad del rotor ( $\omega_m$ ) ayuda a determinar los ángulos de las transformadas de Clarke y Park.

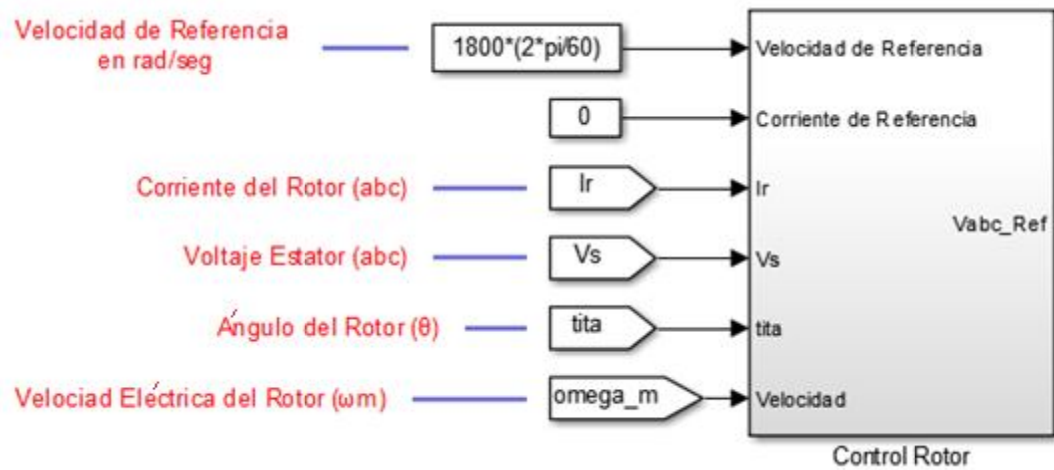


Figura 5.6 Bloque del control vectorial del rotor.

### 5.6 Bloque 5 generador de ancho de pulsos sinusoidal

Para la generación de los anchos de pulsos se implementó el modelo de la figura 5.7, el cual cuenta con una configuración de transistores bipolares de compuerta aislada (*IGBT por sus siglas en inglés*), se utilizan dos tipos de bloques diferentes los cuales son:

1. Generador de pulsos estándar, es un generador de ancho de pulsos común que se utilizó en el circuito de control sin la configuración del *Z-Source*. Específicamente no cuenta la inyección de los estados de conmutación cero.
2. Generador de ancho de pulsos con la inyección de los estados de conmutación cero, está siendo utilizado en el circuito de control con la configuración del *Z-Source*.

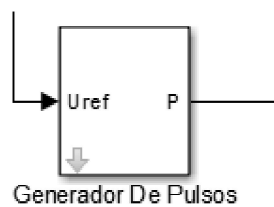


Figura 5.7 Bloque de generador de pulsos.



### 5.7 Bloque 6 convertidor trifásico CA-CD-CA

Para la conversión de la corriente se utilizan dos variantes: El Primero sin la configuración *Z-Source* representado en la figura 5.8, el cual no cuenta con la red de impedancias características del *Z-Source*.

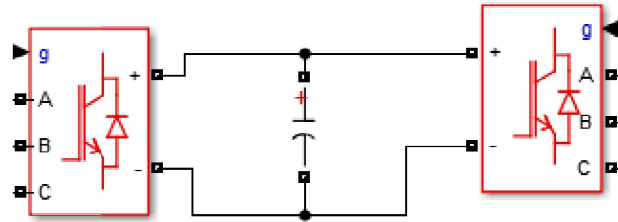


Figura 5.8 Convertidor *Back-to-Back*.

El segundo con la configuración *Z-Source* que cuenta con la red de impedancias las cuales constan de un arreglo de dos capacitores y dos inductancias conectadas en forma de Z, como se muestra en la figura 5.9.

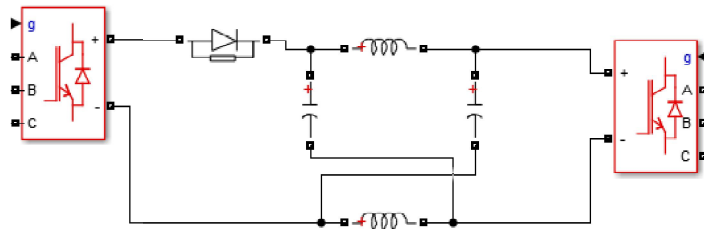


Figura 5.9 Convertidor *Back-to-Back* con la red de impedancias *Z-Source*.

### 5.8 Bloque 7 control vectorial orientado a la red o estator

Para el control vectorial orientado a la red o estator se implementó el modelo de la figura 5.10, el cual se encuentra explicado en la sección 4.8, donde se habla de la descomposición del voltaje trifásico de entrada (abc) en dos componentes vectoriales de un marco estacionario ortogonal ( $\alpha\beta$ ), en el cual se aplican las transformadas y anti-transformadas de *Clarke* y *Park*.

Los valores de entrada del bloque son:

- Un valor de voltaje de referencia, ( $V_{bus}$ ) el cual permite realizar una comparación entre una voltaje constante contra el voltaje obtenido del puente de CD.
- Un valor de potencia reactiva de referencia, el cual permite ver la generación de la potencia reactiva, y poder realizar comparaciones con las corrientes ( $I_g$ ) y voltajes ( $V_g$ ) de salida.
- El valor del voltaje del puente de CD para realizar la comparación con el voltaje de CD de referencia ( $V_{bus}$ ).
- Corriente trifásica de la red, la cual ayuda a calcular las dos componentes vectoriales del marco estacionario ortogonal ( $\alpha\beta$ ).
- Voltaje del estator, es el voltaje trifásico (abc), es utilizado para determinar las componentes vectoriales del marco ortogonal ( $\alpha\beta$ ).

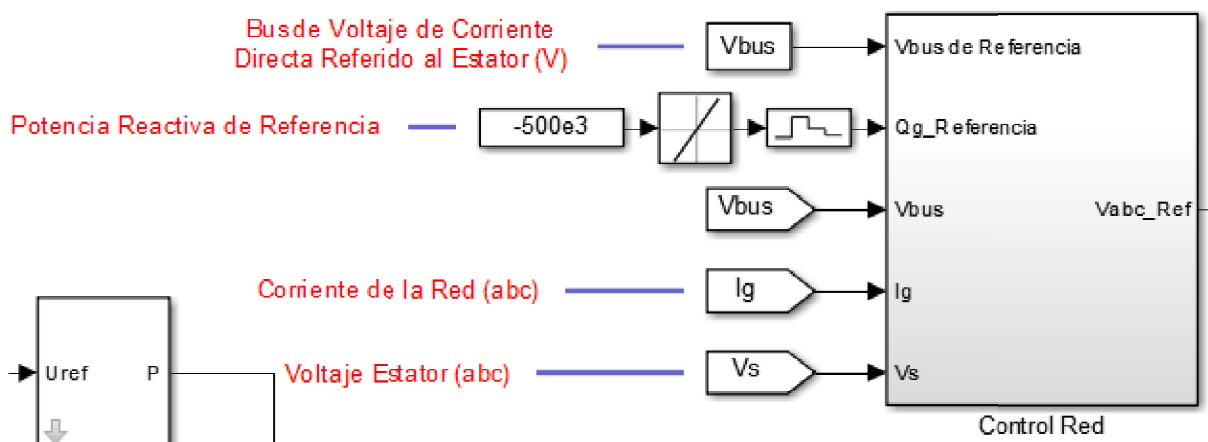


Figura 5.10 Convertidor *Back-to-Back*.

### 5.9 Análisis de los resultados

Se realizó la simulación con la aplicación de los mismos parámetros para dos circuitos de control diferentes los cuales son: un circuito de control, el cual no se encuentra presente la configuración *Z-Source* representado en la figura 5.11 y otro donde se encuentra presente la configuración *Z-Source* representado en la figura 5.12.

El experimento consistió en la simulación de tres diferentes velocidades de viento las cuales fueron  $3 \text{ m/s}$ ,  $9 \text{ m/s}$  y  $13 \text{ m/s}$  (donde la velocidad de  $13 \text{ m/s}$  es la velocidad máxima de viento que soporta el modelo sin que el generador se desboque), esto en los dos diferentes circuitos, con un tiempo de simulación de 15 segundos, donde se utilizó  $5 \text{ m/s}$  para la velocidad de viento, esto para poder realizar una comparación más cercana a la realidad.

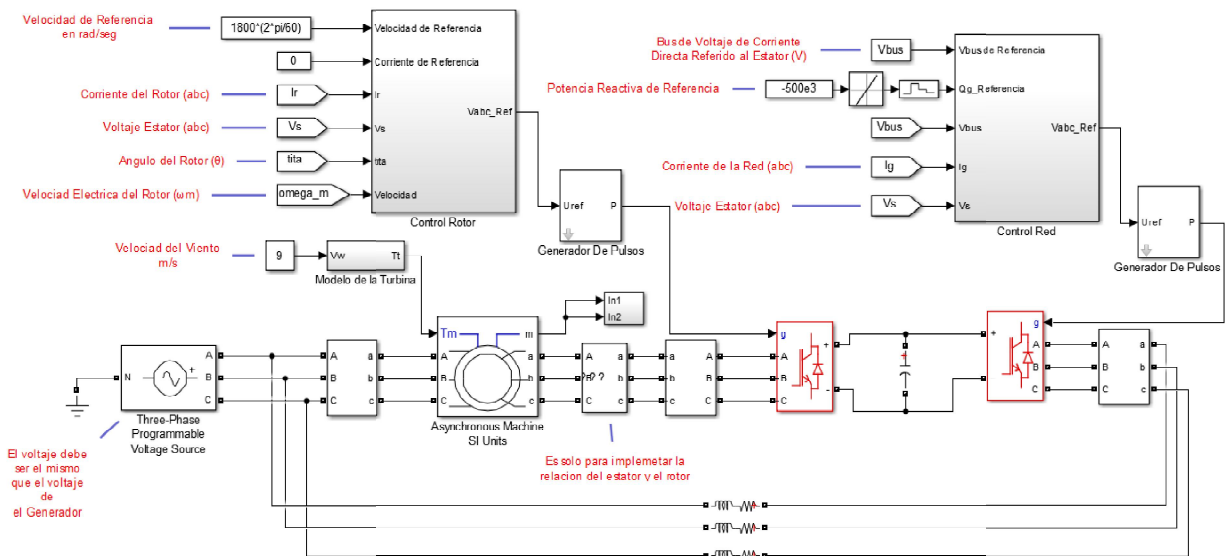


Figura 5.11 Circuito de control in *Z-Source*.

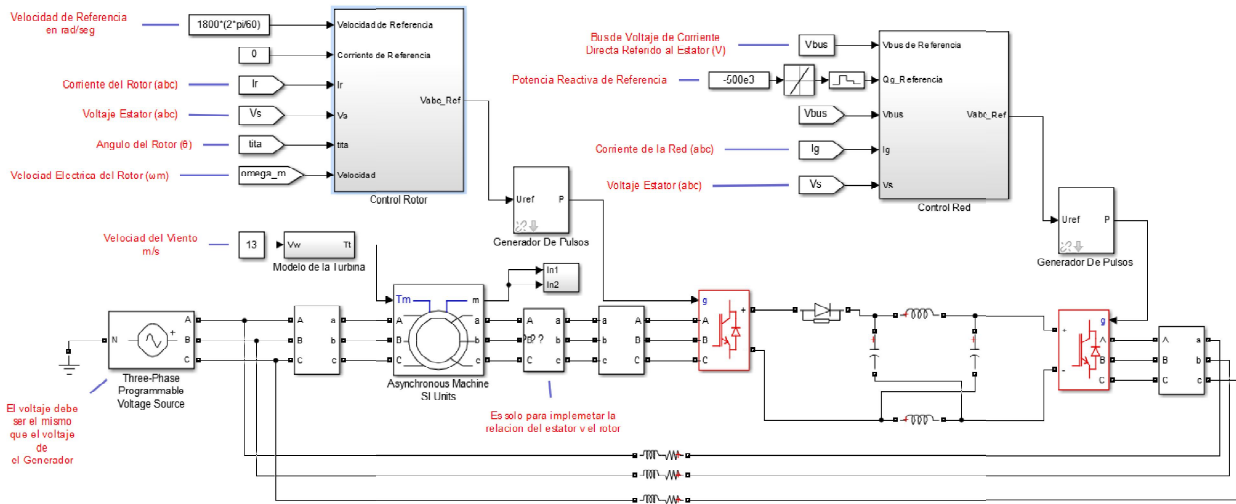


Figura 5.12 Circuito de control con Z-Source.

Realizando el análisis de las gráficas del control del rotor representadas en la figura 5.13, del circuito sin la integración de la red de impedancias Z-Source, se observa que cuando se tiene un aumento de velocidad del viento, el par rotacional cae proporcionalmente o torque y de igual manera el voltaje de la potencia reactiva ( $V_q$ ), esto significa que en el rotor se obtiene mayor corriente de potencia activa ( $I_q$ ), obteniendo un incremento en la potencia del generador.

A una velocidad de viento de  $3 \text{ m/s}$  se observa que se presentan perturbaciones en los siguientes términos: voltaje de la potencia activa ( $v_{dr}$ ), corriente de la potencia activa ( $I_q$ ), voltaje de la potencia reactiva ( $v_q$ ), corriente de la potencia reactiva ( $i_d$ ) y en par rotacional o torque. Esto es porque a velocidades bajas de viento el generador todavía no alcanza su estado estable. También se puede observar que en las corrientes del rotor ( $I_s$ ) y estator ( $I_r$ ), se presentan picos altos de corriente.

A una velocidad de viento de  $9 \text{ m/s}$  se observa notoriamente una disminución en las perturbaciones de los términos mencionados. Esto se debe a que el generador está llegando a su estado estable, como puede ser observado en las gráficas de la corriente del rotor ( $I_s$ ), y la corriente del estator ( $I_r$ ).

Aumentando la velocidad del viento a  $13 \text{ m/s}$  se observa que el generador llega a su estado estable, por lo cual se presentan todavía en menor cantidad las perturbaciones que a una velocidad de viento de  $9 \text{ m/s}$ , teniendo en cuenta que los aerogeneradores mencionados al principio del capítulo tienen como velocidad máxima entre  $13 \text{ m/s}$  y  $14 \text{ m/s}$ , sí al aerogenerador llega viento con una velocidad mayor a  $13 \text{ m/s}$  y  $14 \text{ m/s}$  dura un tiempo limitado en funcionamiento y después se apaga por protección.

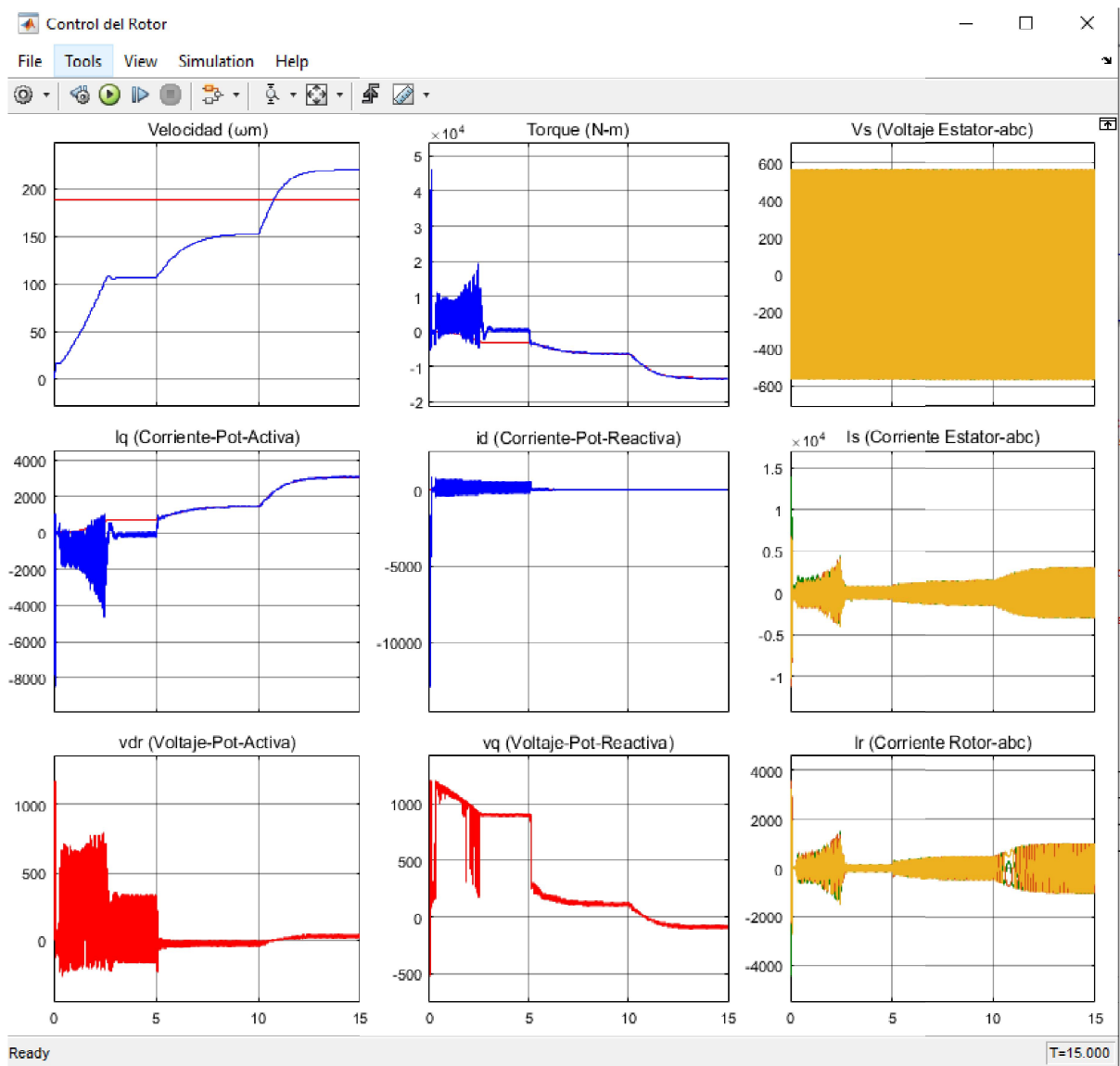


Figura 5.13 Graficas del control del rotor sin Z-Source.

Analizando las gráficas del control del estator a la red representadas en la figura 5.14, de igual manera, a una velocidad de viento de  $3\text{ m/s}$  se observan perturbaciones, pero en menor magnitud, en los siguientes términos: en el bus de CD ( $V_{bus}$ ), corriente de la potencia activa, voltaje de la potencia activa, corriente de la potencia reactiva, voltaje de la potencia reactiva. Esto sucede porque a velocidades bajas de viento el generador todavía no alcanza su estado estable.

A una velocidad de viento de  $9\text{ m/s}$  se observa que, igual que en la figura 5.13, el generador empieza a llegar a su estado estable, por lo cual se presentan menores perturbaciones en los términos mencionados.

Aumentando la velocidad del viento a  $13\text{ m/s}$  se observa que el generador llega a su estado estable, por lo cual, igual que en la figura 5.13, se presentan menor cantidad de perturbaciones.

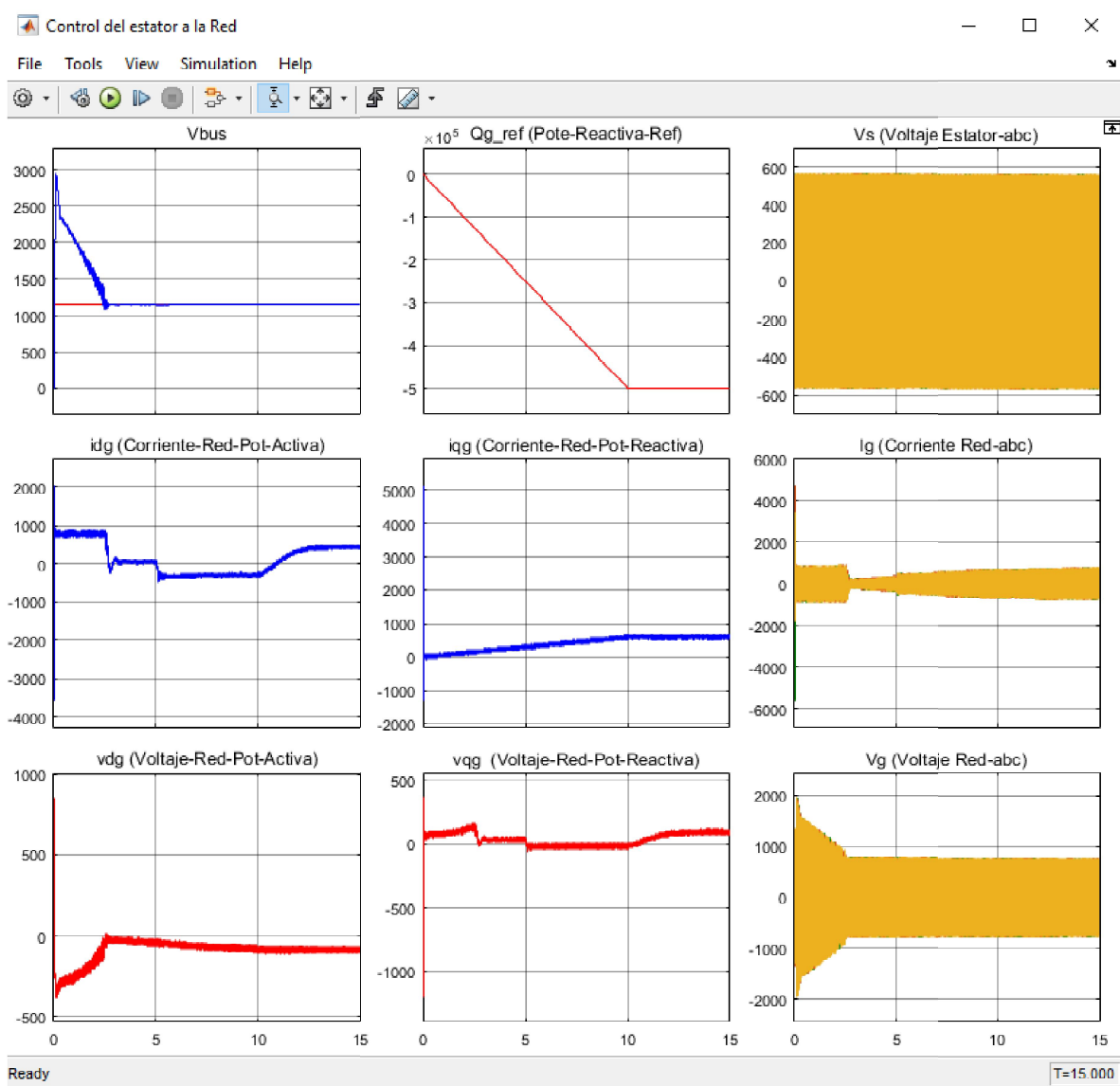


Figura 5.14 Graficas del control del estator a la red sin *Z-Source*.

Realizando el análisis de las gráficas del control del rotor del circuito con la integración de la red de impedancias *Z-Source*, representadas en la figura 5.15, se observa que a una velocidad de viento de  $3 \text{ m/s}$  se presentan perturbaciones en los siguientes términos: voltaje de la potencia activa ( $v_{dr}$ ), corriente de la potencia activa ( $I_q$ ), voltaje de la potencia reactiva ( $v_q$ ), corriente de la potencia reactiva ( $i_d$ ) y en par rotacional o torque, pero en mayor magnitud que en la figura 15.13, debido a

que velocidades bajas de viento el generador no ha alcanzado su estado estable, y al agregar los componentes de la red de impedancia del *Z-Source* se presentan estas perturbaciones, pero se obtiene un incremento en la potencia del generador.

A una velocidad de viento de  $9\text{ m/s}$  se pueden observar todavía perturbaciones en los términos mencionados, al inicio del cambio de la velocidad del viento, debido a la integración de la red de impedancias del *Z-Source*.

Aumentando la velocidad del viento a  $13\text{ m/s}$  se observa que el generador llega a su estado estable y la magnitud de las perturbaciones decrece drásticamente.

Las principales diferencias presentadas en las gráficas de la figura 5.15 en comparación con las gráficas de la figura 5.13 son:

- Se observa un incremento en la corriente de energización (*corriente de inrush*).
- Se observa una disminución de perturbaciones a una velocidad de viento de  $3\text{ m/s}$  en los siguientes términos: corriente de potencia activa ( $I_q$ ) y voltaje de la potencia reactiva ( $V_q$ ).
- También observa menor tiempo de estabilización de la corriente del rotor ( $I_r$ ) y en la corriente del estator ( $I_s$ ).
- Se puede observar un pequeño incremento en el Torque.
- Se observa un incremento, por un determinado tiempo, a una velocidad de viento de  $9\text{ m/s}$  en el voltaje de la potencia activa ( $V_{dr}$ ).
- En el voltaje de la potencia reactiva ( $V_q$ ) se observa mayor estabilización en las tres velocidades del viento propuestas.



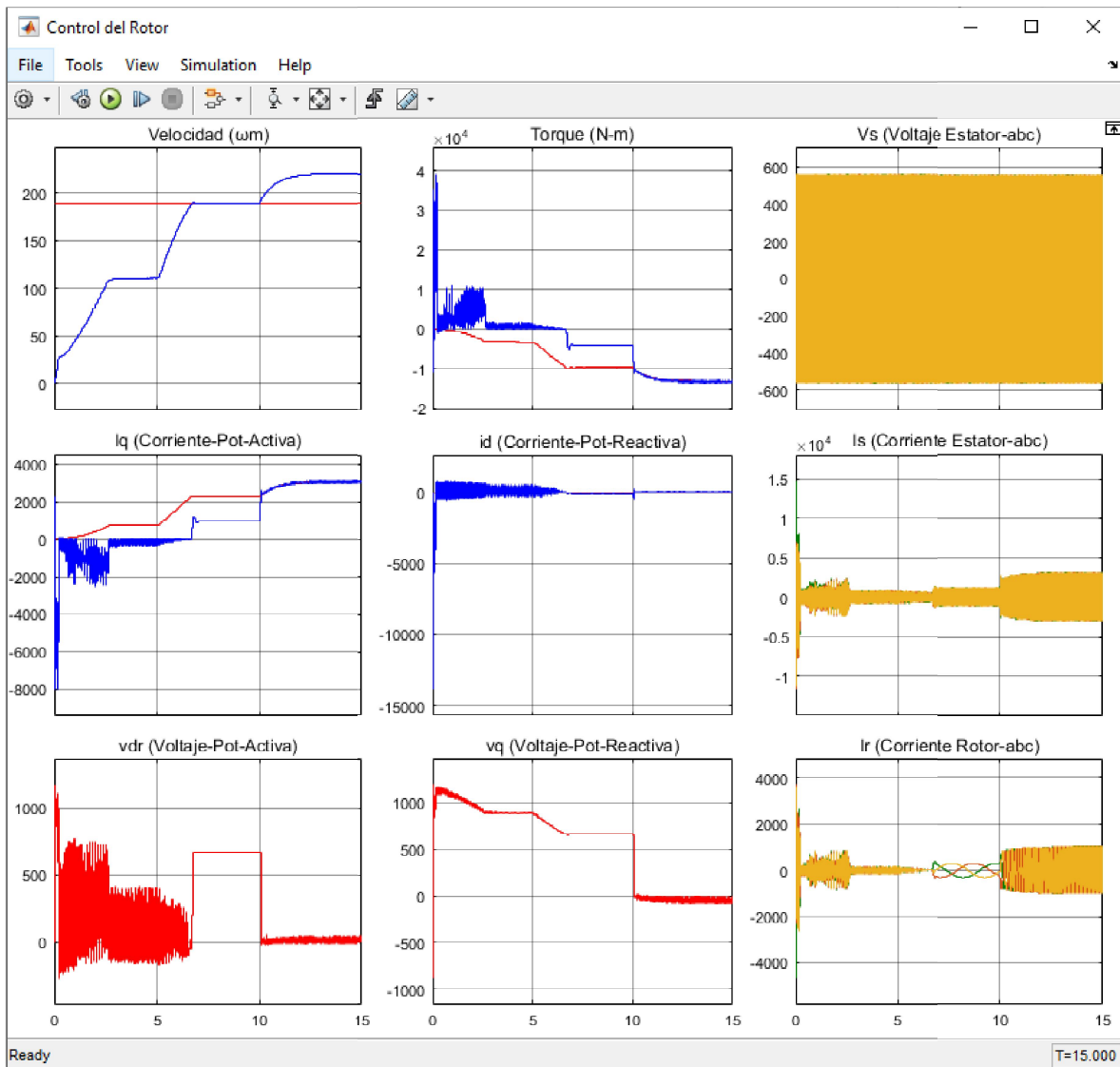


Figura 5.15 Graficas del control del rotor *Z-Source*.

Analizando las gráficas del control del estator a la red representadas en la figura 5.16, se puede observar que a una velocidad de viento de  $3 \text{ m/s}$  se presentan perturbaciones con magnitudes, menores que las presentadas en la figura 5.15, en los términos: bus de CD ( $V_{bus}$ ), corriente de la potencia activa ( $i_{dg}$ ), voltaje de la potencia activa ( $V_{dg}$ ), corriente de la potencia reactiva ( $i_{qg}$ ) y en el voltaje de la

potencia reactiva ( $V_{qg}$ ), esto por la implementación de la red de impedancias del circuito *Z-Source*, y debido también a que el generador no está en su estado estable.

A una velocidad de viento de  $9 \text{ m/s}$  se observa que se presenta un incremento en las perturbaciones en los parámetros mencionados anteriormente, debido al tiempo de carga de los capacitores que se encuentran en la red de impedancias del *Z-source*, las cuales pueden ser mitigadas con la integración de filtros activos.

Aumentando la velocidad del viento a  $13 \text{ m/s}$ , se observa que el generador llega a su estado estable, por lo que las perturbaciones disminuyen. Como punto principal se observa un incremento considerable en el voltaje de salida ( $V_g$ ).

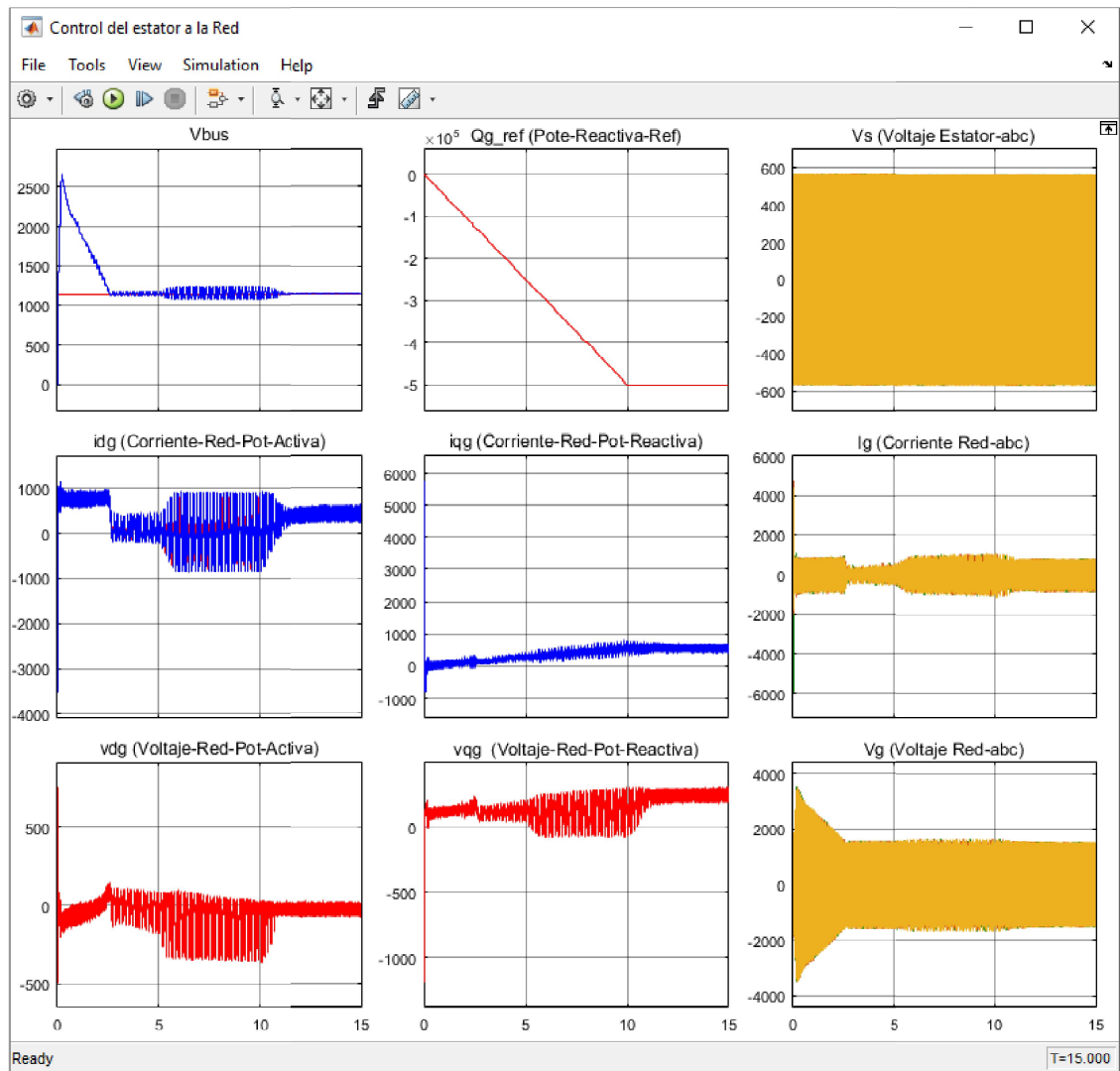


Figura 5.16 Graficas del control del estator a la red Z-Source.

Analizando más de cerca las salidas del voltaje de la red ( $V_g$ ) de las figuras 5.14 y 5.16, y representadas en la figura 5.17, se determina que la salida del voltaje  $V_g$  de la figura 5.14 de  $\pm 500$  Volts y la salida del voltaje  $V_g$  de la figura 5.16 es de  $\pm 1500$  Volts por lo cual se determina que con la implementación de la red de impedancias *Z-Source* actuando como una red elevadora (*Buck-Boost*) y la implementación de los disparos de conmutación de estados cero se obtiene un incremento en el voltaje de salida ( $V_g$ ) de un 300%.

Se determina que con una velocidad baja de viento y realizando la implementación del circuito de la red de impedancia *Z-Source*, como del circuito generador de los disparos de conmutación de estados cero se obtiene un incremento en el voltaje para una demanda de energía establecida sin tener la presencia de velocidades altas de viento.

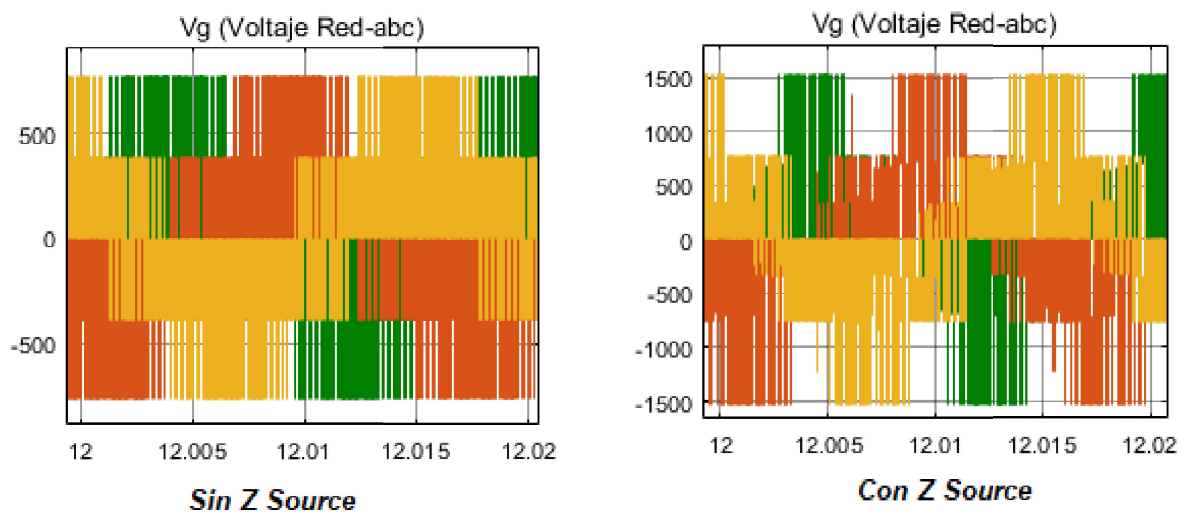


Figura 5.17 Comparación voltaje de salida de la red.

### 5.3 Conclusión

Con la recopilación de la información de los principales fabricantes de aerogeneradores, se obtuvieron los datos de mayor relevancia del aerogenerador con rango de operación de 1.5 a 2 MW, y con ello realizó el modelo de una turbina y un generador doblemente alimentado apegado lo más posible a la realidad.

Para el control del generador doblemente alimentado se utilizó el método de control vectorial o control de accionamiento de frecuencia variable (*VFD por sus siglas en inglés*), este es uno de los métodos usados más frecuentemente en la actualidad, consiste en el control independientemente las dos componentes de corriente, obteniendo así un control desacoplando el par del motor y la corriente de excitación del rotor.

Se utilizó un bloque de transistores bipolares de compuerta aislada (*IGBT por sus siglas en inglés*), para la generación de los anchos de pulsos, este bloque determina el tiempo de conmutación. Se desarrollaron de dos diferentes circuitos back to back con las siguientes variantes:

Convertidor trifásico CA-CD-CA sin la red de impedancias *Z-Source*.

Convertidor trifásico CA-CD-CA con la red de impedancias *Z-Source*.

La red de impedancias *Z-Source* de los convertidores cuenta con el arreglo de dos capacitores y dos inductancias conectadas en forma de Z, siendo este el elemento más importante del control de aerogenerador, el cual permite incrementar el voltaje de salida considerablemente con la ayuda de los disparos de estado cero (*Shoot-Through Zero States*) brindándonos las características de únicas del *Buck-Boost* por medio de las inductancias y capacitancias.

Realizando a su vez la aplicación de filtros activos a la salida de la red, se puede mantener un flujo de energía estable, lo cual ayuda en gran medida a tener una mejor conexión con el transformador de pedestal al cual está conectado a la salida del aerogenerador.

Se realizó una simulación de tres velocidades del viento diferentes ( $3 \text{ m/s}$ ,  $9 \text{ m/s}$  y  $13 \text{ m/s}$ ) en los dos diferentes circuitos, el circuito de control sin la red de impedancias *Z-Source* (figura 5.11) y el circuito de control con la red de impedancias *Z-Source* (figura 5.12) ambos implementados en el mismo generador doblemente alimentado.

Un vez realizada la simulación se procedió a comparar los resultados obtenidos en ambos circuitos, se determinó que con la implementación de la red de impedancias *Z-Source* se obtiene un voltaje de salida considerable para una demanda de carga establecida con velocidades bajas de viento, lo cual puede ser de gran utilidad para la instalación de aerogeneradores en zonas geográficas con incidencias de viento entre  $3 \text{ m/s}$  y  $9 \text{ m/s}$ , las cuales no se encuentran consideradas como velocidades máximas de viento.

Teniendo en cuenta los resultados de la simulación en los diferentes circuitos observamos que la mayor ventaja de la utilización del arreglo *Z-Source* en el control se define en que los aerogeneradores pueden ser instalados en aéreas que no cuenten con altas velocidades de viento, donde el uso de un control convencional no permite obtener un voltaje de salida deseado. Con el arreglo *Z-Source* se obtiene el voltaje deseado a bajas velocidades de viento y a su vez se tiene un mejor control en el voltaje de salida, teniendo un impacto de costo considerable por la reducción en la altura del aerogenerador, donde las velocidades del viento son menores.

## REFERENCIAS

- [1] Fuente: Libro Wind Turbines, 2da Edición, Erich Hau.
- [2] Fuente: Libro Wind Energy Generation, 1er Edición, Olimpo Anaya-Lara
- [3] Fuente: <http://energiaeolicaparatodoslospublicos.blogspot.com>
- [4] Fuente: [http://opex-energy.com/eolica/tipos\\_aerogeneradores.html](http://opex-energy.com/eolica/tipos_aerogeneradores.html)
- [5] Fuente: <http://gal-jones.com/tarifa/>
- [6] Fuente: <http://www.weidmuller.es/es/industrias/energia/e-lica/customer-specific-assembly>
- [7] Fuente: Artículo Académico "Sistema de Control para Aerogeneradores Empleando Lógica Difusa"
- [8] Fuente: Libro Ingeniería de la Energía Eólica
- [9] Fuente: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/20070/48734>
- [10] Fuente: Wind Power Integration, Connection and System Operational aspects
- [11] Fuente: Electrónica de Potencia, Convertidores, Aplicaciones y Diseño
- [12] Fuente: Fang Zheng Peng, Senior Member of IEEE, Z-Source Inverter, 2003
- [13] Fuente: J. Rabkowski, "The bidirectional Z-source inverter as an energy storage/grid interface", 2007
- [14] Fuente: X. Ding, "A high-performance Z-source inverter operating with small inductor at wide-range load", 2007
- [15] Fuente: Y. Tang, "Improved Z-source inverter with reduced Z-source capacitor voltage stress and soft-start capability," 2009

- [16] Fuente: Y. Tang, "A high-performance Z-source inverter with low capacitor voltage stress and small inductance," 2014
- [17] Fuente: J. Wei, "Grid-connected PV system based on the series Z-source inverter," 2010
- [18] Fuente: Y. Zhu, "A novel quasi-resonant soft-switching Z-source inverter," 2010
- [19] Fuente: E. C. dos Santos A. S. Khlebnikov, P. A. Bachurin "Dc-ac three-phase four wire Z-source converter with hybrid PWM strategy," 2010
- [20] Fuente: P. C. Loh, "Pulsewidth-modulated z-source neutral-point-clamped invertir", 2007
- [21] Fuente: P. C. Loh, "Embedded ez-source inverter"s, 2010
- [22] Fuente: F. Gao, "Dual z-source inverter with three-level reduced common-mode switching", 2007
- [22] Fuente: F. Gao, P. Loh, ""Five-level z-source diode-clamped inverter", 2010
- [23] Fuente: M. Zhu, "Tapped-inductor z-source inverters with enhanced voltage boost inversion abilities", 2010
- [24] Fuente: J. Anderson and F. Peng, "A class of quasi-z-source inverters", 2008
- [25] Fuente: Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications
- [26] Fuente: Doubly Fed Induction Machine, Modeling and Control for Wind Energy Generation



## BIBLOGRAFÍA

[1] Vishal Vaman Mehtre, Department of Electrical Engineering, Bharati Vidyapeeth Deemed University, College of Engineering Pune, India, **Analysis of a Doubly Fed induction generator based wind farm, 2016.**

[2] Vishal Vaman Mehtre, Department of Electrical Engineering, Bharati Vidyapeeth Deemed University, College of Engineering Pune, India, **Harmonic analysis and mitigation in wind power plants, 2016**

[3] Alex Reis, University of Brasilia, Brasilia, Brazil, **Physical Concepts Related to Harmonics Produced by Wind Turbines Operation, 2016.**

[4] Alex Reis, University of Brasilia, Brasilia, Brazil, **Mitigation of harmonic current produced by wind turbine throughout converter switching control, 2016.**

[5] Georgy Jose, Dept of Electrical and Electronics Amal Jyothi College of Engineering Kanjirappilly, Kerala, India, **A Review on Wind Turbine Transformers, 2014.**

[6] Andrés Arturo Romero-Quete, Instituto de Energía Eléctrica, Universidad Nacional de San Juan, Argentina, **Time-varying harmonic analysis of electric power systems with wind farms, 2015.**

[7] Fang Zheng Peng, Senior Member of IEEE, **Z-Source Inverter, 2003**

[8] Dongyuan Qiu, Bo Zhang, School of Electric Power South China University of Technology Guangzhou, China, **Study on the construction method of Z-source DC-DC converters, 2016.**

[9] Abdulhakim Nasr, **Harmonics analysis of a wind energy conversion system with a permanent magnet synchronous generator.**

[10] Mukund R. Patel, Ed, CRC Press, **Wind and Solar Power Systems.**

[11] J.F. Man Well, J.G. MCGowan, A.L. Rogers, Ed, CRC Press. **Wind Energy explained.**

[12] Erich Hau, Ed, Springer, **Wind Turbines.**

[13] Haitham Abu-Rub, Mariusz Malinowski, Kamal Al-Haddad, **Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications.**

[14] Gonzalo Abad, Jesus Lopez, Miguel A. Rodriguez, Luis Marroyo, Grzegorz Iwanski, **Doubly Fed Induction Machine Modeling and Control for Wind Energy Generation.**

[15] Sudipta Chakraborty, Marcelo G. Simões, William E. Kramer Editors, **Power electronics for renewable and distributed energy systems.**

[16] Muhammad H. Rashid, **Electrónica de potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones**

[17] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, **Electrónica de potencia, convertidores aplicaciones y diseño.**

[18] Daniel W. Hart, **Electrónica de potencia**