



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**TOPOLOGÍA ÓPTIMA EN SOFTWARE
Y HARDWARE PARA LA
INTERCONEXIÓN DE TURBINAS
EÓLICAS EN BAJA ESCALA**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Eléctrico Electrónico

P R E S E N T A

Emilio de Jesús Rojas Hernández

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Juan Ramón Rodríguez Rodríguez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

Agradecimientos

Agradezco a mis padres, Manuel e Iris por su apoyo incondicional, su amor y sus consejos.

A mi tutor, el Dr. Juan Ramón, por su paciencia, asesoría y apoyo ante las circunstancias adversas.

A He Wu Hui que me apoyo en este proceso de investigación y me ha dado una verdadera amistad.

A mis hermanos y amigos, por su comprensión y su apoyo cuando más lo necesitaba.

A la Universidad, por darme acceso a una educación de calidad, profesores que me apoyaron y los recursos necesarios para poder desarrollarme profesionalmente.

Resumen

En esta investigación se expone una topología óptima en software y hardware para la interconexión de turbinas eólicas de baja escala. En otras palabras, la combinación expuesta tiene la capacidad de reducir el número de interruptores en el proceso de interconexión, reducir el número de sensores necesarios para la máxima extracción de potencia del Generador Síncrono de Imanes Permanentes, (PMSG, por sus siglas en inglés) y eliminación de transformadores, reduciendo así el peso, volumen y costos del dispositivo.

Dicha estrategia se fundamenta en la combinación de las mejores características de dos convertidores, por un lado, el convertidor PFC-Boost Multinivel, tiene la capacidad de rectificar el voltaje de CA obtenido de la maquina PMSG con factor de potencia unitario y máxima extracción de potencia, para posteriormente elevar dicha tensión a un nivel adecuado de interconexión, para redes de baja y media tensión, mientras que por otra parte el convertidor VSC tiene la capacidad de operar como inversor trifásico sincronizado a una red de CA, operando con distintitos niveles de potencia activa y reactiva sin hacer uso de sensores de corriente de CA.

A diferencia de las estrategias típicas de interconexión de turbinas eólicas de baja escala, se logra demostrar que la estrategia aquí propuesta reduce ampliamente los costos de interconexión. Un análisis del estado del arte y una comparación cualitativa respecto a otras estrategias de interconexión de turbinas eólicas demuestra la viabilidad técnica y económica de esta propuesta.

Abstract

This research presents an optimal software and hardware topology for the interconnection of low-scale wind turbines. In other words, the exposed combination could reduce the number of switches in the interconnection process, reduce the number of sensors needed for maximum power extraction from the Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) and eliminate transformers, thus reducing the weight, volume, and costs of the device.

This strategy is based on the combination of the best characteristics of two converters, in one hand, the PFC-Boost Multilevel converter, has the ability to rectify the AC voltage obtained from the PMSG machine with unity power factor and maximum power extraction, to subsequently increase the voltage to an adequate level of interconnection, for low and medium voltage networks, while on the other hand the VSC converter has the ability to operate as a three-phase inverter synchronized to an AC network, operating with different levels of active and reactive power without making use of AC current sensors.

Unlike typical low-scale wind turbine interconnection strategies, it can be demonstrated that the strategy proposed here greatly reduces interconnection costs. An analysis of the state of the art and a qualitative comparison with respect to other wind turbine interconnection strategies demonstrates the technical and economic feasibility of this proposal.

Índice general

Índice de figuras.....	vii
Índice de tablas.....	ix
Acrónimos y simbología.....	x
I. Introducción.....	1
I.1 Concepto General de un Sistema Eólico	1
I.2 Planteamiento del problema.....	2
I.3 Hipótesis	2
I.4 Propuesta de investigación	3
I.5 Objetivos.....	3
I.6 Justificación	4
I.7 Organización y metodología	4
I.8 Contribución.....	5
II. Estado del arte	7
II.1 Electrónica de Potencia y Energías Renovables	7
II.2 Tipos de Turbinas de Viento	9
II.2.a Sistemas DFIG.....	11
II.2.b Sistemas PMSG	12
II.3 Convertidor Boost PFC	15
II.4 Convertidor CD/CD Boost Multinivel	18
II.5 Convertidor VSC Trifásico.....	22
II.5.a Convertidores VSC de dos niveles.	22
II.5.b Convertidores con tres niveles de conmutación.....	23

II.5.c	Modulación SPWM.....	23
II.6	Análisis de topologías en el estado del arte	23
III.	Modelos matemáticos por etapas.....	25
III.1	Unidad de Generación.....	25
III.1.a	Máquina PMSG	25
III.1.a.i	Eficiencia del PMSG.....	26
III.2	Turbina de Viento.....	27
III.2.a	Perfil mecánico de las aspas	27
III.2.a.i	Eficiencia de la turbina de viento.....	28
III.3	Topologías Empleadas.....	28
III.3.a	Convertidor CD/CD Boost Multinivel. [6].....	28
III.3.b	Convertidor Boost multinivel PFC.....	31
III.3.c	VSC PFC trifásico [8]	32
III.4	Control aplicado [9].....	33
III.5	Conclusiones del capítulo.....	34
IV.	Simulación	36
IV.1	Especificaciones de los bloques en MATLAB.....	36
IV.1.a	Wind Turbine.....	36
IV.1.b	Permanent Magnet Synchronous Machine	38
IV.2	Rectificador, puente de diodos.....	40
IV.3	Convertidor Boost de Potencia Multinivel.....	42
IV.4	Fuente convertidora de tensión (VSC)	43
IV.5	Interconexión a la red.....	45
IV.6	Seguimiento del punto de máxima potencia de la turbina (MPPT).....	46
IV.6.a	Análisis de variables del MPPT.....	46

IV.7	Carga máxima del sistema.....	48
IV.7.a	Esquema de conexión de la simulación.....	48
IV.7.a.i	Análisis de resultados.....	48
IV.8	Ciclo de trabajo óptimo	50
IV.8.a	Esquema de conexión de la simulación.....	50
IV.8.a.i	Análisis de resultados.....	51
IV.9	Control aplicado a las variables eléctricas.....	53
IV.10	Respuesta del PI a cambios de viento con ciclo de trabajo óptimo.....	54
IV.10.a	Esquema de conexión de la simulación.....	54
IV.10.a.i	Análisis de resultados	54
IV.11	Conclusiones del capítulo.....	56
V.	Discusión, trabajos futuros y conclusiones.....	57
V.1	Discusión.....	57
V.2	Trabajos futuros.....	57
V.2.a	Resonancia del conjunto	57
V.2.b	Operación del conjunto como regulador de potencia reactiva	58
V.2.c	Evaluación del sistema ante fallas.....	59
V.3	Conclusiones.....	59
V.4	Aportaciones a la comunidad.....	62
VI.	Bibliografía.....	63
VII.	Anexos.....	65
VII.1	Respuesta del PMSG con cambio del torque mecánico de entrada.....	65

Índice de figuras

Figura 1. - Modelo general de la topología empleada.....	3
Figura 2.- Configuración de control y potencia de un parque eólico.....	7
Figura 3.- Curva de potencia ideal de un aerogenerador [3].....	8
Figura 4.- Clasificación por tipo de estructura a) Savonius b) Darrieus c) Híbridos [3].	10
Figura 5.- Clasificación por dirección del viento a) Barlovento b) Sotavento [3]	10
Figura 6.- Esquema de funcionamiento de una máquina DFIG.....	11
Figura 7.- Vista transversal de los tipos de rotores acorde a su geometría de imanes a) imanes superficiales, b) imanes interiores, c) imanes incrustados. [4].....	14
Figura 8.- Factor de potencia unitario, tensión de entrada y corriente de salida en fase.	16
Figura 9.- PFC activo.....	16
Figura 10.- Topología del Boost Multinivel.	18
Figura 11.- Funcionamiento del Boost Multinivel.	21
Figura 12.- Modulación PWM.	23
Figura 13.- Esquema de conexión del PMSG y el rectificador de onda completa.	25
Figura 14.- Perfil mecánico de las aspas de viento de un aerogenerador. [3]	27
Figura 15.- Topología interna del convertidor Boost multinivel.	29
Figura 16.- Esquema del VSC PFC trifásico.....	32
Figura 17.- Esquemas de control aplicado a) Usado comúnmente b) Nueva estrategia.	34
Figura 18.- Bloque utilizado en el software de simulación SIMULINK para la turbina de viento.	36
Figura 19.- Diagrama de conexión de la turbina de viento.	37
Figura 20.- Características de la turbina de viento.....	38
Figura 21.- Diagrama de conexión del PMSG.....	38
Figura 22.- Modelo y características del PMSG (Pestaña configuración).	39
Figura 23.- Modelo y características del PMSG (Pestaña parámetros).....	40
Figura 24.- Esquema de conexión del puente de diodos.....	41
Figura 25.- Esquema de conexión del convertidor Boost multinivel.	42
Figura 26.- Esquema de conexión del VSC.....	44
Figura 27.- Parámetros del bloque VSC.	44

Figura 28.- Esquema de conexión del nodo de red y la VSC.	45
Figura 29.- Parámetros del nodo de interconexión a la red.....	46
Figura 30.- MPPT del conjunto turbina-generador, considerando un cambio de velocidad del viento.....	47
Figura 31.- Esquema de conexión del ejercicio, carga máxima.	48
Figura 32.- Eficiencia del PMSG, con condiciones de carga máxima en $[\Omega]$	49
Figura 33.- Respuesta gráfica del PMSG al cambio de carga.....	50
Figura 34.- Diagrama de conexión de la red, VSC y salida del subsistema de la Figura 34.....	51
Figura 35.- Subsistema de conexión turbina de viento, PMSG y PBC multinivel.....	51
Figura 36.- Eficiencia del PMSG, con condiciones de ciclo de trabajo.	52
Figura 37.- Esquema de control detallado.....	53
Figura 38.- Comportamiento de las variables eléctricas (Tensión en CA y CD y Potencia entregada).....	54
Figura 39.- Comportamiento de la tensión eléctrica en CA con cambios en viento y ciclo de trabajo.....	55
Figura 40.- Oscilaciones de la potencia activa a un ciclo de trabajo superior al establecido en la Tabla 8.....	58
Figura 41.- Comportamiento del PMSG, potencia activa y reactiva.....	58
Figura 42.- Potencia eléctrica con un cambio de torque mecánico aplicado al PMSG.....	66

Índice de tablas

Tabla 1 Comparativo empírico del material magnético	13
Tabla 2 Comparativo técnico de los tipos de excitación del rotor [5].....	15
Tabla 3 Parámetros de simulación de la turbina de viento.....	37
Tabla 4 Parámetros de simulación del generador síncrono.	40
Tabla 5 Caracterización de los elementos del puente de diodos.	41
Tabla 6 Descripción de los elementos que conforman el PBC multinivel.....	43
Tabla 7 Estudio de carga aplicada para la máxima extracción de potencia de la turbina.....	49
Tabla 8 Ciclo de trabajo óptimo para la máxima extracción de potencia del PMSG.....	52

Acrónimos y simbología

m. – Metro.

CA. – Corriente Alterna

CD. – Corriente Directa

MW. – Mega Watt

GW. – Giga Watt

MVA. – Mega Volt Ampere

PMSG. – Generador Síncrono de Imanes Permanentes, por sus siglas en inglés.

HVDC. – Corriente Directa en Alta Tensión, por sus siglas en inglés.

VAWT. – Aerogeneradores de eje vertical, por sus siglas en inglés.

HAWT. – Aerogeneradores de eje horizontal, por sus siglas en inglés.

DFIG. – Generador de Inducción Doblemente Alimentado, por sus siglas en inglés.

B2B. – Convertidor Back-to-Back.

VSC. – Fuentes Convertidoras de Tensión, por sus siglas en inglés

PFC. – Corrección del Factor de Potencia, por sus siglas en inglés.

FET. – Transistor de Efecto de Campo, por sus siglas en inglés.

MOSFET. – Transistor de Efecto de Campo Metal-Óxido-Semiconductor, por sus siglas en inglés.

CrCM. – Modo de Conducción Crítica, por sus siglas en inglés.

CCM. – Modo de Conducción Continua, por sus siglas en inglés.

DCM. – Modo de Conducción Discontinua, por sus siglas en inglés.

PWM. – Modulación por Ancho de Pulso, por sus siglas en inglés.

PBC. – Convertidor Boost de potencia, por sus siglas en inglés.

dq. – Marco de referencia directo, cuadratura para la máquina eléctrica.

LT. – Línea de transmisión.

MPPT. – Seguidor de punto de máxima potencia.

I. Introducción

I.1 Concepto General de un Sistema Eólico

Los sistemas eólicos para la generación de energía eléctrica son aquellos que aprovechan la energía cinética provocada por el movimiento del aire en ráfagas de viento y que, a través de aspas o algún medio mecánico que interactúe con este, convierten la energía cinética en energía mecánica haciendo rotar un mecanismo permitiendo a un generador síncrono o asíncrono aprovechar este movimiento generando energía eléctrica como resultado de los fenómenos electromagnéticos de los que hace uso.

Estos sistemas, por las características de construcción del generador, manejan niveles de media o baja tensión por lo que a necesidad de interconectarse a la red es necesario aumentarlo por los métodos más adecuados que existan en el momento. Estas conversiones de energía deben cumplir con las cualidades de eficiencia, confiabilidad, seguridad, continuidad y calidad que se manejen en el sistema a conectar.

Para esta tarea suelen usarse transformadores elevadores que por su construcción son elementos que aumentan el coste de la instalación significativamente, siendo esta un área de oportunidad para los desarrollos en la electrónica de potencia más novedosos y así poder reemplazarle haciendo de estas tecnologías una manera accesible, segura y confiable para acceder a las energías renovables permitiéndoles una mayor permeabilidad en los sistemas.

Debido al interés que se ha tenido últimamente en las energías renovables es que estas fuentes necesitan un impulso tecnológico para implementarse no solamente en grandes parques eólicos, sino que también los usuarios de baja demanda. Es con esto que los sistemas de baja escala son cada vez más una realidad a la que pueden acceder estos usuarios, conllevando la necesidad de aportar nuevas tecnologías permitiendo la popularización de los sistemas energéticos.

I.2 Planteamiento del problema

Actualmente, la generación de energía eólica a nivel residencial, comercial e industrial ha aumentado rápidamente y se espera una tasa de crecimiento aún mayor. Esto se debe a los planes gubernamentales para reducir los efectos ambientales de la generación de energía a partir de combustibles fósiles.

La continua reducción de los costes de los equipos eólicos, así como la continua mejora en la eficiencia de los generadores usados en estas tecnologías impulsan esta transformación. En este contexto, las aplicaciones eólicas instaladas representan hoy cerca del 5% de la generación global total.

Esta tendencia actual pasa por la producción masiva de inversores, optimizando el uso de recursos de software y hardware. En cuanto al hardware, el objetivo es desarrollar convertidores de potencia electrónicos de bajo costo, alta eficiencia, alta densidad de potencia, número reducido de sensores y niveles bajos de distorsión armónica en el lado de CA. En esta perspectiva, las técnicas de aumento de voltaje e interconexión sin transformador, junto con técnicas de conversión multinivel representan una opción atractiva para cumplir con estos requisitos.

En lo que respecta al software, se pretende simplificar los algoritmos de control, haciéndolos eficientes y fáciles de aplicar. Esta reducción en la demanda de recursos computacionales en etapas complejas como filtros digitales, observadores o sistemas de reconstrucción de variables puede reducir el costo del dispositivo programable donde se implementa el controlador.

I.3 Hipótesis

Esta tesis de ingeniería presenta la topología de un convertidor multinivel, sin transformador, a partir de tres topologías básicas modificadas para obtener una estructura de siete niveles de aumento de CD-CA usando una sola fuente de CD y nueve interruptores de potencia, donde en la salida se obtiene un voltaje de CA trifásico. Dado que la configuración propuesta no precisa de un transformador, lo cual es una ventaja, se obtiene una alta densidad de potencia, alta eficiencia y reduce la distorsión armónica a la salida.

I.4 Propuesta de investigación

En esta tesis se propone una nueva topología de convertidor multinivel a partir de tres configuraciones modificadas, un rectificador con puente de diodos PFC, un convertidor Boost PFC y un VSC; que finalmente se conecta a la red eléctrica con mejores características de tensión a comparación de si se conectará directamente a la red con el uso de un transformador convencional a 60 Hz¹. Esta topología se puede apreciar en la Figura 1.

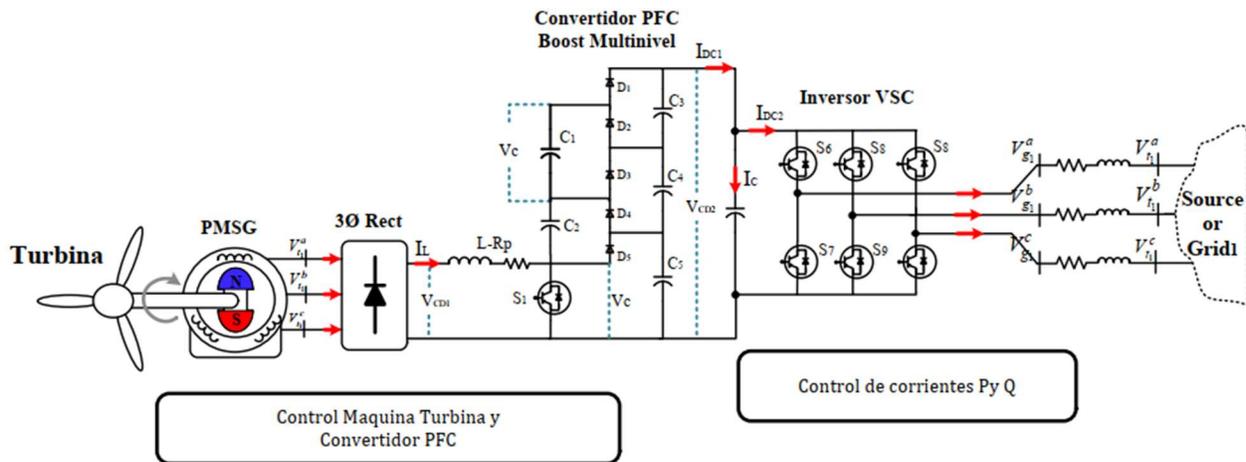


Figura 1. - Modelo general de la topología empleada.

Todo esto a partir de una fuente de energía renovable de CA que será un aerogenerador con máquina PMSG en este caso obteniendo un voltaje de CA a su salida.

I.5 Objetivos

➤ Objetivos generales

- 1) Estudiar el funcionamiento y puesta en marcha óptimo de la máquina PMSG.
- 2) Estudiar el funcionamiento y puesta en marcha óptimo del PFC-Boost multinivel.
- 3) Estudiar el funcionamiento y puesta en marcha óptimo de la fuente VSC.

¹ 60 Hz es la frecuencia de trabajo en los sistemas eléctricos de CA en México.

4) Demostrar que la estrategia implementada conlleva beneficios por sobre las topologías empleadas al momento del desarrollo de este trabajo.

➤ **Objetivos técnicos**

1) Reducir la complejidad de los cálculos matemáticos en el control.

2) Reducir el número de sensores necesarios para la máxima extracción de potencia de la maquina PMSG

3) Eliminar el uso de transformadores de interconexión, reduciendo el peso, volumen y costos del dispositivo.

I.6 Justificación

Actualmente las propuestas que hay sobre los convertidores CD/CA son una combinación de componentes, en el mejor de los casos, de un número elevado de capacitores, donde el monitoreo del voltaje y corriente en estos es imprescindible. Por otro lado, el uso de un transformador, dado su acoplamiento magnético, genera distorsión armónica que impacta directamente en la forma de onda resultante.

Esta tesis es un refinamiento de tres topologías que serán modificadas, donde uno de los logros más relevantes es que no se usa ningún transformador gracias a la electrónica de potencia. Se implementará el uso de un convertidor Boost multinivel donde se usará una sola fuente de energía y capacitores que funjan como fuentes adicionales y no se implementará ningún control de tensión en ellos, este elemento será capaz de aumentar una tensión de entrada. Posteriormente con el manejo de una señal PWM y una fuente VSC, esta energía en CD será transformada a CA aprovechando la conmutación de tiristores MOSFET.

I.7 Organización y metodología

- Estado del arte

Se realizará una investigación del estado actual de las energías renovables y su penetración en los sistemas de generación viendo las problemáticas que se tienen de estas al momento de ofrecerse como una alternativa, así mismo se dará cuenta de los tipos más usados en los aerogeneradores dando una pequeña clasificación de estos por modelos, tipos de aspas, cantidad de esas, etc. Así mismo se investigará el

funcionamiento de los convertidores CA/CD/CA y el uso de tecnologías PFC para mejorar las cualidades de conversión de estos elementos.

- Modelos matemáticos por etapas

Se analizará por separado cada una de las etapas y se presentará el modelo matemático de cada una de estas. De la misma manera se dará a entender el uso y manejo de la modulación PWM para el aprovechamiento de los tiristores en el control del VSC. Finalmente, con un pequeño control a la salida se regulará la tensión de la señal deseando siempre permanecer entre los niveles permitidos de la red.

- Simulación

Con el uso de software especializado se hará la simulación individual de cada una de las partes para posteriormente verificado su funcionamiento juntarlos y observar si esta topología cumple con los parámetros previamente establecidos al estar desconectado o conectado a la red.

- Análisis de datos obtenidos

Con las observaciones y resultados de la etapa anterior se pretende derivar un comparativo revisando las características clasificándolos en; operación segura, operación adecuada, operación no adecuada, así como conseguir que se mantengan los niveles mínimos en materia de confiabilidad, calidad y seguridad de la energía producida.

I.8 Contribución

Esta tesis presenta un modelo de convertidor multinivel que no contiene componentes de acoplamiento magnético pudiendo así obtener poca distorsión armónica, además esta topología reduce el tamaño y complejidad de la implementación, así como un menor número de componentes.

Mediante el uso de MATLAB® - Simulink™ y las librerías especializadas en sistemas eléctricos de potencia que estos poseen, se simuló el modelo de propuesta presentado. Se construyó mediante el uso de un módulo que representa un

aerogenerador, el cual funge como fuente de alimentación para la topología de convertidores empleada. Siendo la señal rectificada por un arreglo de puente de diodos se pasa a un convertidor Boost multinivel que no requiere más que una sola fuente de señal de control y un solo interruptor de potencia IGBT, dicho voltaje de CD finalmente a una fuente VSC que consta de 6 MOSFET que generarán de nuevo una señal sinusoidal trifásica en CA.

La propuesta presentada en esta tesis tiene la ventaja, sobre otros micro inversores, de que no es necesaria más que una sola fuente de alimentación, es decir, no requiere de monitoreo de voltaje en la parte del convertidor Boost multinivel gracias a la configuración de capacitores y diodos; el control de la conmutación de los interruptores IGBT gracias a la señal moduladora variable es capaz de prescindir de cualquier tipo de sensor.

Lo antes mencionado disminuye notablemente la complejidad y el tamaño del convertidor, lo que al momento de buscar implementarlo disminuiría, sobre otras propuestas, el costo de fabricación.

II. Estado del arte

II.1 Electrónica de Potencia y Energías Renovables

La inclusión de energía eólica en los sistemas eléctricos de potencia ha ido en auge en las últimas décadas, según los pronósticos se estima que para los próximos 30 años se instalarán de manera global más de 1,400 GW usando este tipo de tecnología. Esta adopción se ha dado gracias a que ha demostrado ser sumamente aprovechable, los modelos de turbinas más recientes han podido generar más energía que un parque eólico entero de hace algunos años. [1]

A mediados del año 2012, la generación de energía eólica con plantas instaladas fuera de tierra a nivel global era de 4,620 MW, representando alrededor del 2% de la capacidad total instalada con propulsión eólica. Actualmente se estimaba que en un panorama ambiciosos este tipo de generación de energía en específico podría ser de cerca de los 80 GW de capacidad instalada. [2]

Las instalaciones de parques eólicos extraterritoriales (*offshore*) se encuentran en costas con una profundidad no mayor de 30 m, estas a comparación de las que se encuentran instaladas en tierra son mucho más complicadas de mantener a pesar de que su construcción y topología es básicamente igual, un ejemplo de estas instalaciones se puede apreciar en la Figura 2

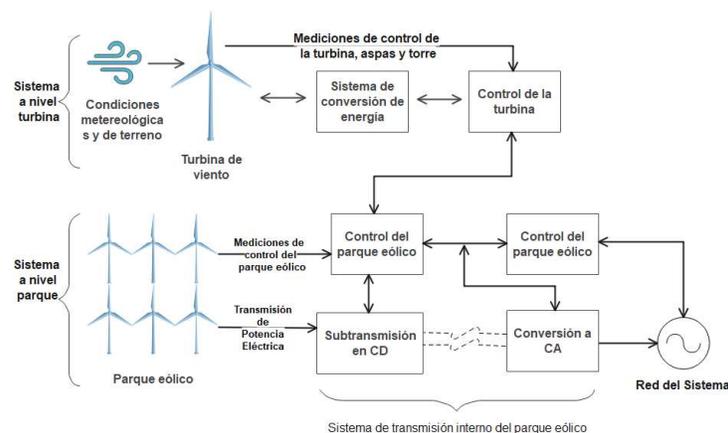


Figura 2.- Configuración de control y potencia de un parque eólico

Un generador eólico puede ser aproximado en cuanto a la potencia de salida que se dispondrá. por el área que abarcan sus palas y el viento que es capaz de aprovechar por sus perfiles que pasa a través de estas, sin embargo, estas mediciones consideran una potencia ideal. El límite de Beltz indica que, de esta idealización, solo se puede extraer el 59.3 % como máximo siendo en la práctica entre el 25 al 45 %.

La potencia de salida se encuentra descrita en las curvas de potencia, estas describen la salida de potencia en función de la velocidad del viento a la altura del centro del rotor. En la Figura 3 se observan curvas que describen distintos tipos de aerogeneradores, dependiendo su diseño.

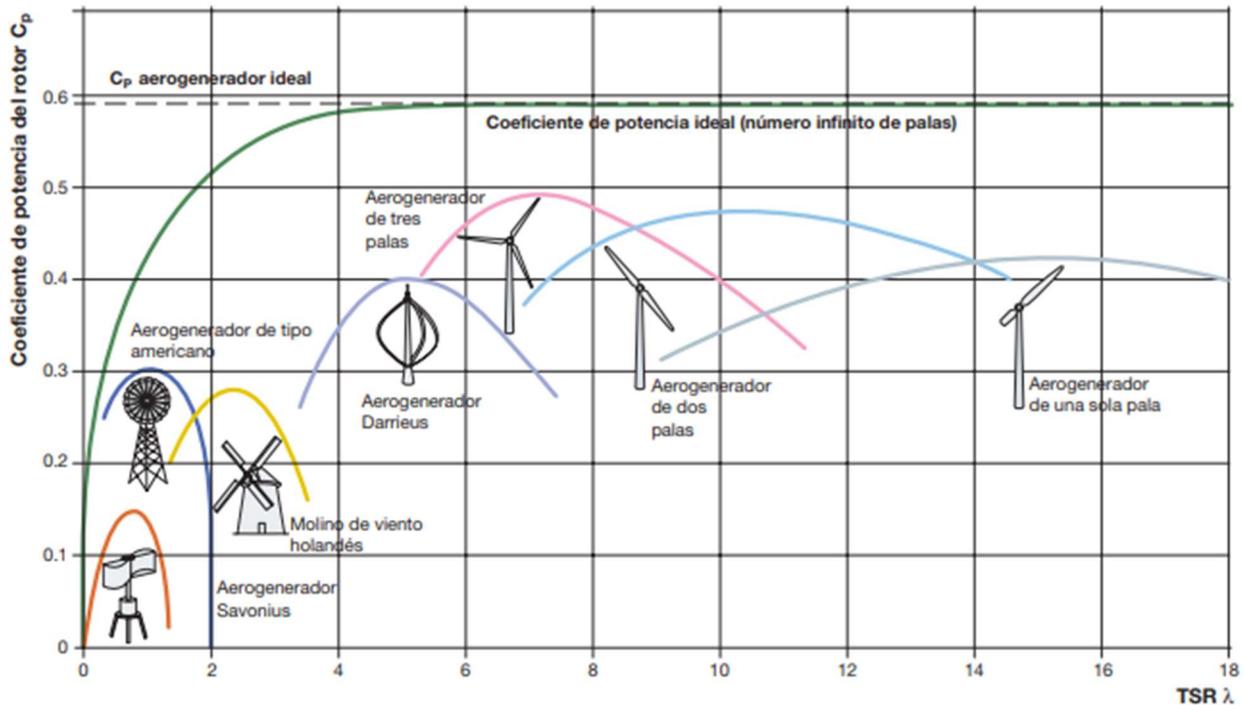


Figura 3.- Curva de potencia ideal de un aerogenerador [3]

Estas curvas tienen puntos críticos que son referencias a la hora de definir el adecuado en una instalación. Entre estos se encuentran:

- Velocidad de interrupción del viento: Es la velocidad mínima del viento a la que la máquina entregará potencia.

- Velocidad nominal del viento: Es la velocidad del viento a la que se obtiene la potencia nominal.
- Velocidad de corte del viento: Es la velocidad máxima del viento a la que la turbina entrega potencia, normalmente limitada por las cargas mecánicas y las restricciones de seguridad.

II.2 Tipos de Turbinas de Viento

En la actualidad los aerogeneradores pueden dividirse en dos grandes familias según su construcción, dependiendo del eje de rotación de las palas del rotor:

- Turbina de viento de eje vertical (VAWT).
- Aerogeneradores de eje horizontal (HAWT).

A su vez, estas clasificaciones se subdividen en los siguientes grupos:

Para los aerogeneradores VAWT, se subdividen en:

- Aerogenerador tipo Savonius: Se denomina aerogenerador de resistencia, ya que el par motor sobre el eje está generado por la diferencia de resistencia (fricción) de las superficies verticales.
- Aerogenerador tipo Darrieus: Es un aerogenerador de sustentación, ya que las superficies expuestas al viento presentan un perfil de ala capaz de generar una distribución de la presión a lo largo de la pala y, por tanto, un par en el eje de rotación
- Aerogenerador híbrido Darrieus-Savonius: Es un aerogenerador híbrido, el par de arranque lo aporta el aerogenerador coaxial Savonius, situado en el interior del aerogenerador Darrieus.

Ejemplos de estos se muestran en la Figura 4.

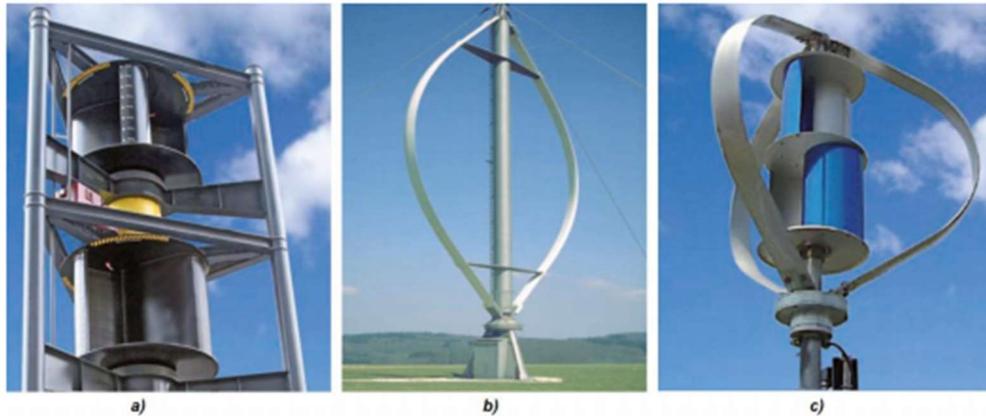


Figura 4.- Clasificación por tipo de estructura
a) Savonius b) Darrieus c) Híbridos [3]

Y los generadores de eje horizontal, se catalogan según la dirección del viento, ejemplos de estos se muestran en la Figura 5:

- Barlovento: El aerogenerador se ubica de cara al viento, obteniendo mayor eficiencia.
- Sotavento: El aerogenerador se ubica de espaldas al viento, teniendo menor eficiencia, además de no alinearse automáticamente con relación al viento, necesitando implementar un sistema de orientación.

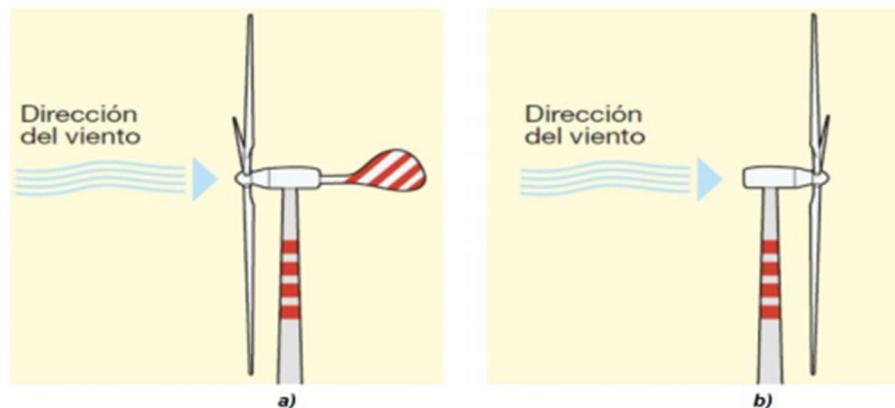


Figura 5.- Clasificación por dirección del viento
a) Barlovento b) Sotavento [3]

Asimismo, en el mundo la mayoría de los generadores eólicos están (en la actualidad) usando alguna clase de tecnología de velocidad variable, dado que esta tiene la capacidad de

mantener la capacidad de generación constante a pesar de las circunstancias del viento, obteniendo de este modo la capacidad de amortiguar las cargas mecánicas de ráfagas del viento intermitentes.

II.2.a Sistemas DFIG

En los sistemas que han aprovechado el viento como fuente de energía, la tecnología DFIG (Doubly Feed Induction Generator) ha sido usada por la ventaja de que tanto los devanados del estator como los devanados del rotor están conectados a la red de CA, convertidores Back-to-Back (B2B) permiten al generador tener un grado de control sobre el nivel de tensión a la salida, así como mantener la frecuencia del sistema en valores nominales.

El intercambio de potencia entre el convertidor B2B y la red de CA depende del punto de operación de la máquina y el control aplicado sobre la velocidad y la potencia reactiva del generador. Es decir, la frecuencia de generación del DFIG estará gobernada por la frecuencia de giro que tengan las aspas a su vez que de la alimentación suministrada por el convertidor B2B.

Ejemplo de la conexión de estos sistemas puede ser observado en la Figura 6.

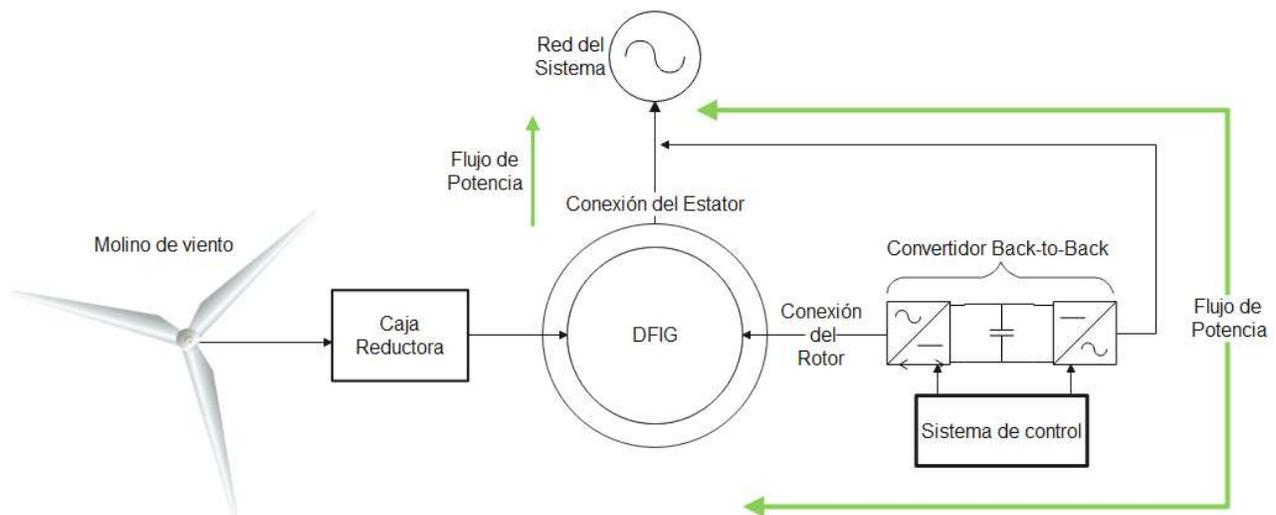


Figura 6.- Esquema de funcionamiento de una máquina DFIG.

En general, cuando se usan este tipo de tecnología se constituyen por los siguientes elementos:

1. Sistema de Aspas (Molino de Viento)

2. Caja Reductora

Es un componente que permite cambiar la velocidad de giro del rotor de baja velocidad a una más apropiada para las necesidades del generador llevando la más allá de la velocidad de sincronismo por medio del uso de engranajes

3. Generador de Inducción

Comúnmente del tipo rotor estriado con anillos deslizantes, la relación de los devanados del rotor y estator es ajustada para mantener una magnitud de corriente baja y ajustada a las necesidades del convertidor B2B.

4. Convertidor Back-to-Back

Este consiste en dos sistemas de conversión de energía de CA a CD pasando por un puente en DC para terminar en un convertidor de CD a CA. Entre sus cualidades tenemos que permite el flujo de potencia en ambas direcciones, por lo que puede ayudar a inyectar o absorber potencia dependiendo las condiciones en las que se encuentre el sistema.

5. Transformador de subtransmisión

Este transformador permite la transmisión de potencia dentro del parque eólico en niveles de media tensión.

6. Barra de Protección

Este se compone de diversos sistemas de protección mecánicos y eléctricos. [4]

II.2.b Sistemas PMSG

Un generador síncrono de imanes permanentes se caracteriza por tener el bobinado de excitación sustituido por un sistema formado por imanes permanentes suministran un campo de excitación constante., las características de los materiales de los cuales comúnmente están hechos se muestran en la Tabla1.

Tabla 1 Comparativo empírico del material magnético

MATERIAL DEL IMÁN PERMANENTE	MAGNETISMO REMANENTE (B_R)	EXCITACIÓN COERCITIVA (H_c)	DESEMPEÑO
ALNICO (ALNICO)	Alto	Bajo	Excelente resistencia mecánica
FERRITA	Bajo	Medio	Frágil
NEODIMIO (NDFEB)	Alto	Alto	Excelente rendimiento
TIERRAS RARAS (SAMARIO-COBALTO)	Alto	Alto	Coefficiente de temperatura bajo

De este tipo de generador se encuentran diversas geometrías de construcción y dependiendo de esta se puede tener una u otra característica que le permita adaptarse a diversas situaciones, entre estas tenemos la de imanes superficiales, insertados e interiores, como se muestran en la Figura 7.

- Rotores de imanes superficiales

En este tipo de configuración, los imanes se unen a la superficie del rotor. Su característica es un alto entrehierro magnético sea cual sea la fase de la fuerza magnetomotriz del estator. Esto ayuda a filtrar los armónicos altos, reduciendo pérdidas y vibraciones. El entrehierro es variable con la posición, si bien en la práctica es constante asumiendo una permeabilidad magnética de los imanes parecida a la del aire. [5]

- Rotores de imanes interiores

En este tipo de configuración, los imanes están alojados en huecos al interior del rotor. Esta geometría es de especial interés cuando la sujeción y/o protección de los imanes es un asunto importante, como en máquinas de alta velocidad. [5]

- Rotores de imanes insertados

En este caso los imanes se unen a la superficie del rotor, insertados en una ranura. De esta manera la variación de entrehierro magnético en distintas posiciones relativas al rotor supone la posibilidad de usar dicho efecto para incrementar el par de la máquina mediante la generación de un par de reluctancia. Dicho par de reluctancia suele incrementar el par electromagnético de la máquina entre un 10-15%. Las máquinas de imanes insertados son más resistentes a la desmagnetización por cortocircuito que las de imanes superficiales para una inductancia de dispersión además de presentar una baja corriente de cortocircuito. [5]

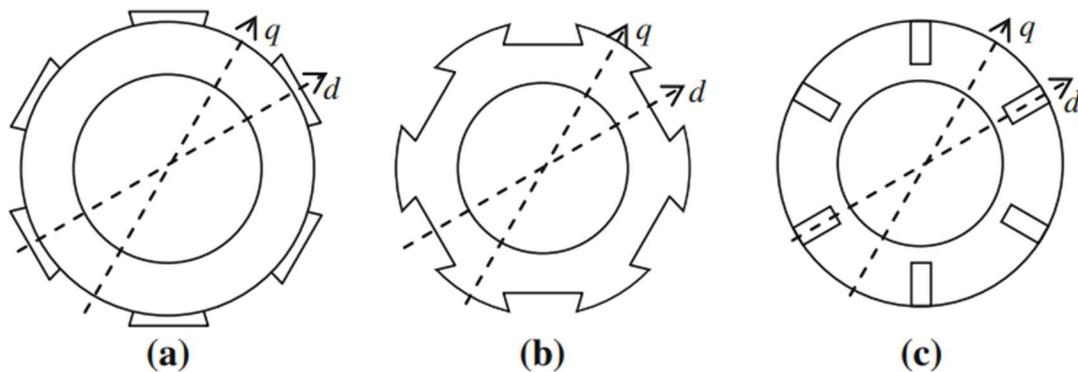


Figura 7.- Vista transversal de los tipos de rotores acorde a su geometría de imanes
a) imanes superficiales, b) imanes interiores, c) imanes incrustados. [4]

Entre las ventajas que los PMSG presentan por sobre los generadores de DC y los generadores asíncronos están:

- Mejor relación velocidad-par.
- Mejor respuesta dinámica.
- Mayor rango de velocidad.
- Menor mantenimiento.
- Mayor eficiencia.
- Mayor vida útil.
- Menor ruido.
- Menor peso.

Así mismo las ventajas por sobre un generador con excitación no permanente, es decir, con un bobinado de armadura se describen en la Tabla 2 Comparativo técnico de los tipos de excitación del rotor, que se muestra a continuación:

Tabla 2 Comparativo técnico de los tipos de excitación del rotor [5]

EXCITACIÓN ELÉCTRICA		EXCITACIÓN CON IMANES PERMANENTES	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
-Permite regular la tensión del generador mediante la excitación magnética del rotor.	<ul style="list-style-type: none"> -Perdidas eléctricas en los embobinados de campo. -Los pasos polares de baja escala no son admisibles sin tener que incrementar las pérdidas en el cobre del rotor. -El flujo disperso crece en caso de pasos polares pequeños 	<ul style="list-style-type: none"> -Incrementa la eficiencia al eliminar parte de las pérdidas eléctricas -Rotores ligeros, dependiendo económicamente del material magnético utilizado. -Permiten pasos polares pequeños. 	<ul style="list-style-type: none"> -La regulación de la tensión es limitada, se realiza desde el estator de la máquina. -Existe riesgo de desmagnetización -Se complican los procesos constructivos y de montaje de la máquina.

II.3 Convertidor Boost PFC

La penetración de sistemas de generación eléctrica con fuentes renovables ha ido en aumento, es por ello por lo que ha sido de interés el buscar maneras de interconectarlos de manera directa a los sistemas de distribución, sin embargo, para ello necesitan previamente aumentar sus niveles de tensión, cosa que hasta estos momentos se lleva a cabo con técnicas de conversión a CA y el uso de transformadores, sin embargo, esto conlleva problemas de intrusión de armónicos y problemas de factor de potencia.

Como su nombre lo indica el PFC es un circuito eléctrico capaz de mejorar el factor de potencia, reduciendo la carga armónica que se presenta en las líneas.

En la literatura se define como FP (Factor de Potencia) a “La relación existente entre la potencia real en Watts consumida por una carga por la potencia aparente medida en Volts-Amper (VA) que circula entre la fuente de alimentación y su carga” por esta definición podemos intuir que el voltaje y la corriente estarán en fase cuando su FP sea unitario, como se muestra en la Figura 8.

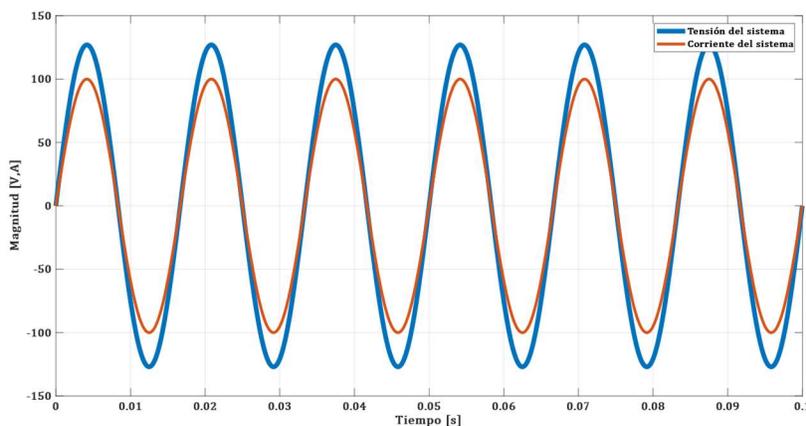


Figura 8.- Factor de potencia unitario, tensión de entrada y corriente de salida en fase.

De estos circuitos, la configuración del PFC activo hace uso de una etapa de convertidor de potencia completo, ofreciendo un rendimiento del factor de potencia superior a la técnica del PFC pasivo. Además, degrada de manera mínima la onda en un amplio espectro. Esta es la topología más común hoy en día para la corrección del factor de potencia debido a su simplicidad y su bajo costo cuando es usado un Boost Converter. Este consiste en agregar un FET o un MOSFET, un diodo, y un inductor al Boost Converter como se muestra en la Figura 9.

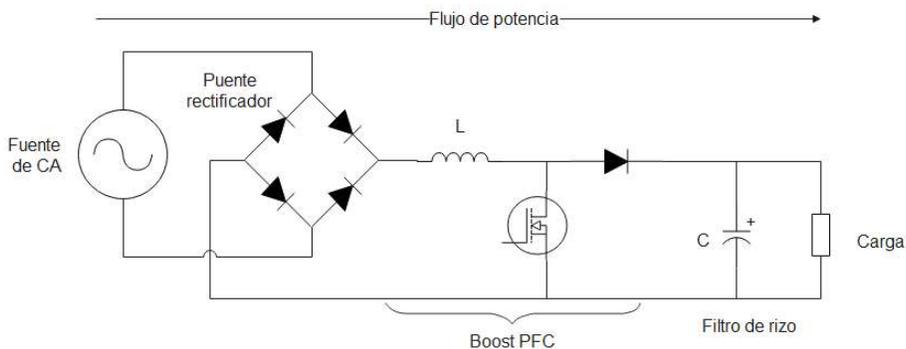


Figura 9.- PFC activo.

Debido a la posición en la que se encuentra el inductor no se experimentarían cambios en la corriente, por esta razón, la topología Boost Converter puede lograr una mayor eficiencia con una baja distorsión de la corriente a la entrada.

El principio de funcionamiento de un Boost PFC consta de dos ciclos que se repiten rápidamente; la primera etapa ocurre cuando el transistor está cerrado haciendo que la corriente fluya a través de él, siendo el inductor energizado por el circuito rectificador y, por lo tanto, la corriente que pasa por este es relativamente grande, en ese mismo momento, el diodo es polarizado de forma inversa por lo que se comporta como un circuito abierto siendo la carga alimentada únicamente por la carga remanente en el capacitor; en la segunda etapa el transistor está abierto haciendo que la corriente en el inductor disminuya debido a que este alimentara al capacitor.

Por lo que se concluye que la corriente que pasa por el inductor depende del ciclo de trabajo que tenga el transistor lográndose con un control en el Gate de este, al hacer cambios en este ciclo se puede obtener una mejora significativa en el factor de potencia, así como en la distorsión armónica total.

Existen tres modos de operación del PFC el modo de conducción continua (CCM); el modo de conducción discontinua (DCM) y el modo de conducción crítica (CrCM).

En nuestro caso el modo de operación óptimo para el buen funcionamiento será CrCM y CCM, debido a que se puede lograr un factor de potencia razonable con una menor cantidad de componentes para el de CrCM y a la simplicidad de control en ambos casos.

El CrCM puede considerarse un caso especial de CCM en el que el funcionamiento es controlado para permanecer en el límite entre CCM y DCM, este suele utilizar un control de tiempo de conexión constante. El mecanismo de control funciona generando un tiempo de encendido que es constante durante todo el ciclo.

Cuando el interruptor se apaga, el siguiente evento de encendido se inicia cuando la corriente del inductor llega a 0 A. Esto da como resultado un alto FP sin necesidad de circuitos de detección de corriente o de conformación de onda de tensión de línea, que son costosos y resultan en pérdidas.

A diferencia del CrCM el objetivo principal del CCM es elevar la cantidad de corriente media de entre un 20% a un 40% en el inductor a plena carga lo cual hace requerir un inductor de mayor tamaño al que se necesita para un CrCM. Una de las ventajas principales de este modo de operación es que la corriente pico será menor y las pérdidas por el cambio de estado serán menores. A partir de las características generales se puede llegar a concluir que el CrCM es eficaz para aplicaciones de baja potencia debido a la capacidad del ahorro de energía y una mejora en la densidad de potencia; cuando hablamos del uso en potencia media el modo CrCM presenta una baja capacidad de filtrado, como resultado la corriente pico aumenta, en este punto el CCM resulta ser más factible para las aplicaciones de potencia media y alta.

II.4 Convertidor CD/CD Boost Multinivel

El Boost multinivel es una combinación de lo que es el convertidor Boost y una serie de capacitores conectados en serie-paralelo con diodos, como se muestra en la Figura 10, observando a detalle se visualiza que esta topología del Boost multinivel internamente incluye un PFC.

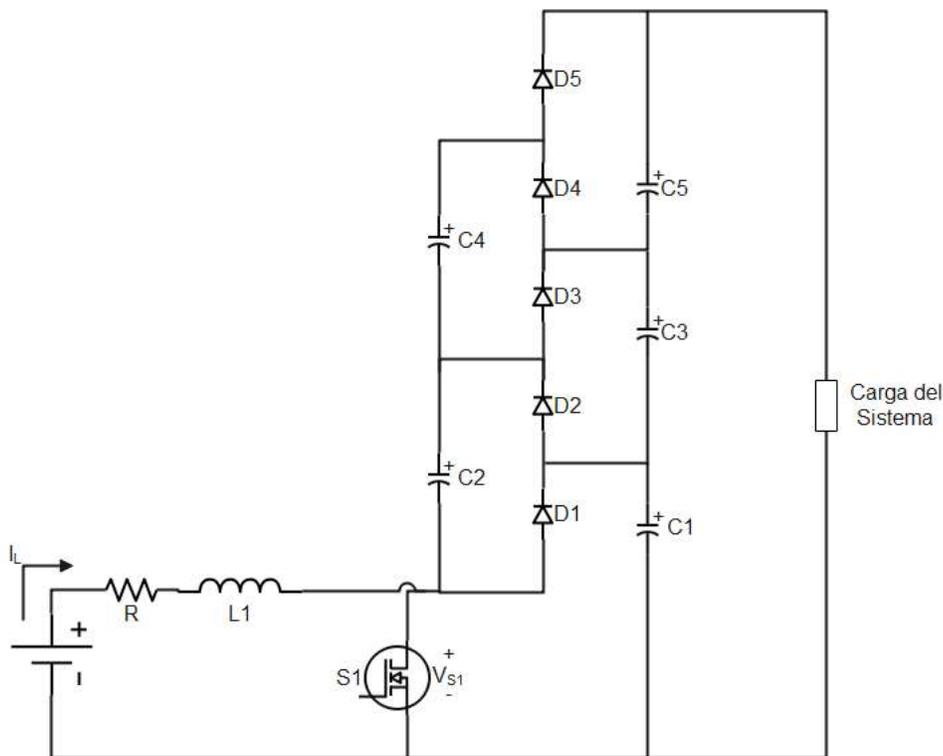


Figura 10.- Topología del Boost Multinivel.

Una de las ventajas de este dispositivo es que el número de niveles puede ampliarse con sólo añadir capacitores y diodos y no es necesario modificar el circuito principal, otras ventajas de esta topología son:

1. La corriente de entrada continua.
2. Gran relación de conversión con bajo ciclo de trabajo y sin transformador.
3. Capacidad de mejorar el factor de potencia debido al PFC presente en esta topología.

La modulación por ancho de pulso (PWM) es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica, ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga.

El ciclo de trabajo D de una señal periódica el ancho relativo de su parte positiva en relación con el periodo:

$$D = \frac{t_{on}}{\tau} \quad (1)$$

Donde:

D : Ciclo de trabajo

t_{on} : Tiempo en que la función es positiva (ancho de pulso)

τ : Periodo de la Función.

El convertidor Boost Multinivel tiene dos estados de funcionamiento:

- En el estado de interruptor encendido:
 - El inductor está conectado a la tensión V_{in} como se muestra en la Figura 11.a. Si la tensión de C6 es menor que la tensión de C7, entonces C7 sujeta la tensión de C6 a través de D6 y el interruptor S mostrado en la Figura 11.b. Al mismo tiempo, si la tensión a través de C4 y C6 es menor que el voltaje a través de C5 y C7, entonces estos sujetan el voltaje de C4 y C6 a través de D4 y S del modo que se muestra en la Figura 11.c. De manera similar, C3, C5 y C7 sujetan el voltaje a través de C2, C4 y C6 como se aprecia en la Figura 11.d.

- En el estado de interruptor apagado:
 - La corriente del inductor cierra con D7, conmutando todos los diodos. Durante el estado de apagado, la corriente inductora cierra D7 cargando C7 mostrado en la Figura 11.a. Cuando D7 se cierra, C6 y la tensión V_{in} más la tensión del inductor bloquean el voltaje a través de C5 y C7 a través de D5, Figura 11.b De manera similar, el voltaje a través del inductor más V_{in} , C4 y C6 bloquean el voltaje a través de C3, C5 y C7 a través de D3. Finalmente, el voltaje a través de C1, C3, C5 y C7 se sujeta por C2, C4, C6, V_{in} y el voltaje del inductor Figura 11.c.

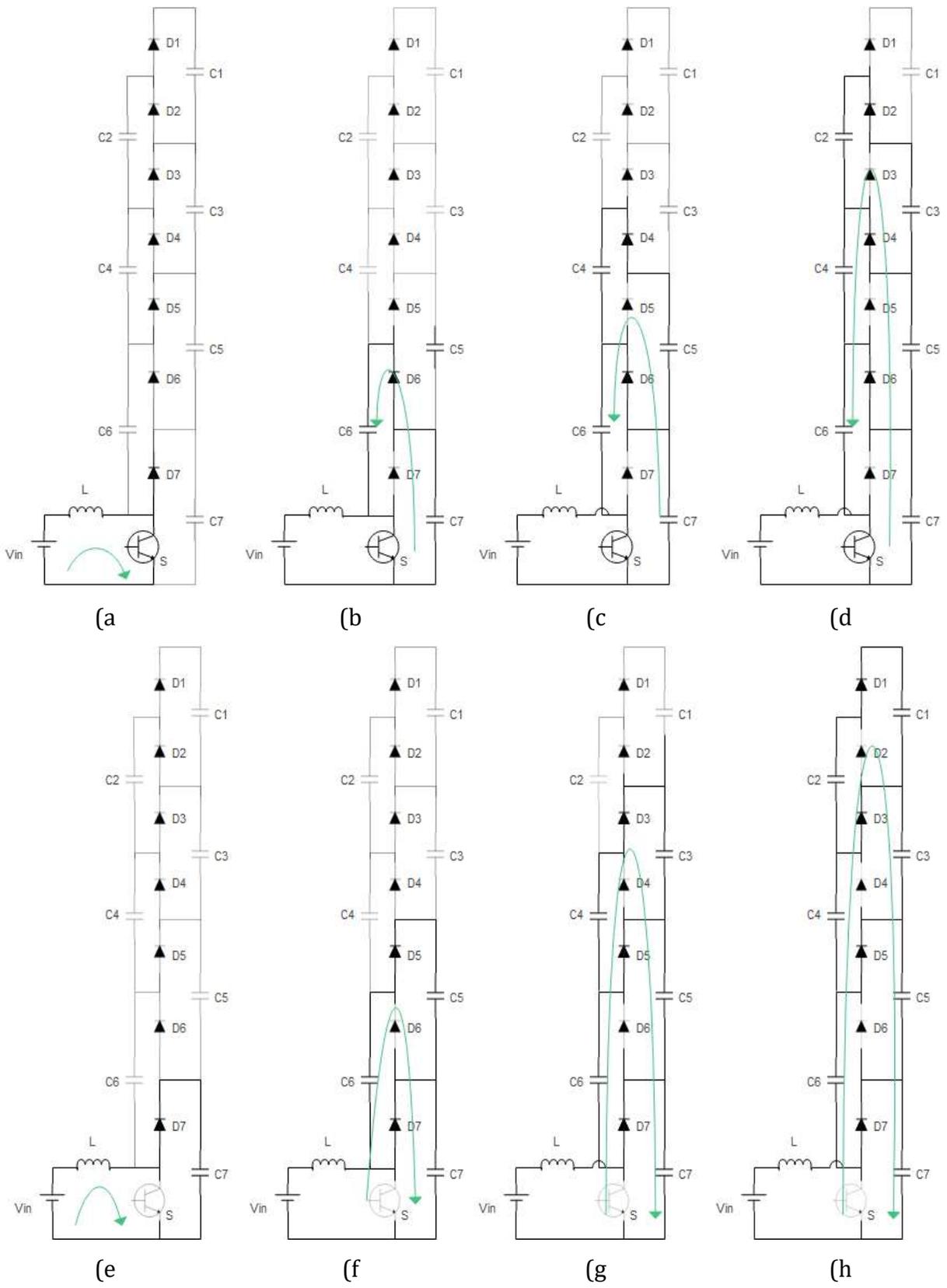


Figura 11.- Funcionamiento del Boost Multinivel.

II.5 Convertidor VSC Trifásico

Un convertidor de tensión genera un voltaje alterno a partir de una tensión continua. Estos convertidores suelen denominarse inversores, tienen la capacidad de transferir potencia en ambos sentidos. Con un convertidor de fuente de tensión se puede controlar la magnitud, el ángulo de fase y la frecuencia de la tensión de salida.

En estos convertidores, la tensión del lado de CD siempre tiene una polaridad, y la inversión de la potencia tiene lugar mediante la inversión de la polaridad de la corriente continua. En el lado de corriente continua, la tensión es soportada por un capacitor. Este capacitor es lo suficientemente grande como para soportar una corriente de carga/descarga sostenida que se acompaña a la secuencia de conmutación de los transistores del convertidor. Durante las perturbaciones en el sistema de CA, pueden producirse grandes oscilaciones de potencia entre el lado de CA y el de CD. Esto provocará oscilaciones en la tensión de CD y sobretensiones de CD que pueden someter a los transistores a esfuerzos.

El capacitor es el factor principal en donde se puede limitar el tiempo de uso de los convertidores, por lo tanto, entre mayor número de capacitores mayor tiempo de vida tendrá el convertidor. Por otro lado, una capacitancia pequeña provoca grandes fluctuaciones en la tensión del enlace de corriente continua y, en consecuencia, puede provocar la ruptura del interruptor semiconductor. En el extremo de los lados de corriente continua se encuentran dos capacitores del mismo tamaño. El objetivo principal de estos es mantener el equilibrio de la potencia durante las condiciones transitorias y reducir los armónicos en el lado de CC.

Existe dos configuraciones básicas de VSC para la transmisión de CC.

II.5.a Convertidores VSC de dos niveles.

Cada tramo de fase consta de dos interruptores que se conectan y desconectan para controlar la tensión de salida, esta se conecta al punto medio del punto de conexión de la fase. Los interruptores de los tramos de fase están formados por IGBT y diodos. Esta configuración la hace adecuada para el flujo de potencia bidireccional.

II.5.b Convertidores con tres niveles de conmutación

El convertidor VSC de tres niveles presenta un mejor rendimiento contra los armónicos generados además de contar con la capacidad de sintetizar tres niveles discretos de tensión en el terminal de CA de cada fase.

II.5.c Modulación SPWM

Estos sistemas se basan en la técnica PWM auto conmutada, como se observa en la Figura 12. Esta técnica hace uso de comparadores evaluando una señal triangular con una senoidal de referencia haciendo que el resultado de estos sean señales cuadradas de distinto ciclo de trabajo teniendo como resultado de la integración de estas señales cuadradas la señal sinusoidal completa.

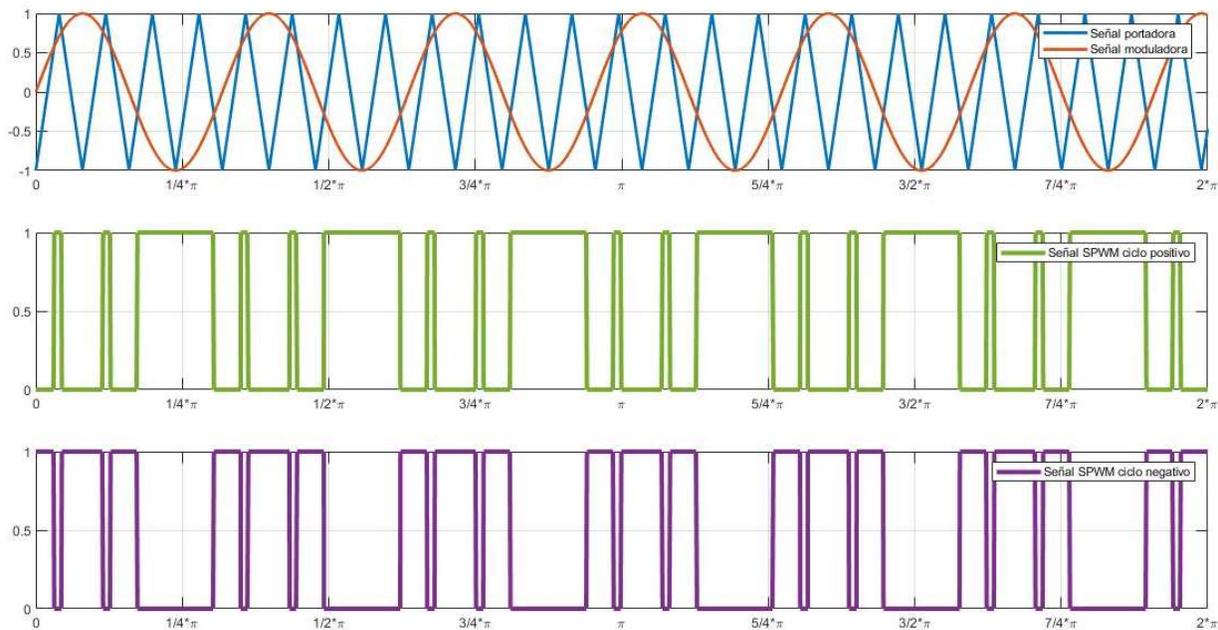


Figura 12.- Modulación PWM.

II.6 Análisis de topologías en el estado del arte

La topología empleada para este trabajo se basa en utilizar un Boost multinivel-PFC conectado a un VSC, permitiendo la máxima extracción de energía mediante la corrección de factor de potencia y posteriormente elevar la tensión a un nivel adecuado y mediante VSC esta energía en forma de CD es transformada nuevamente en CA para poder ser interconectado a la

red de media tensión. La ventaja de utilizar un VSC es la capacidad de operar como inversor trifásico que puede ser sincronizado a una red de CA.

En este trabajo se implementó el Boost multinivel que es una combinación de un convertidor Boost y una serie de capacitores y diodos conectados en serie-paralelo, teniendo el Boost multinivel internamente una etapa PFC.

Los VSC utilizan un control de encendido o apagado de los transistores (IGBT y GTO) de forma automática y ordenada y mediante la técnica de modulación de ancho de pulso (PWM) logran una alta frecuencia de conmutación permitiéndoles obtener una señal sinusoidal de manera más limpia.

A diferencia de las topologías clásicas, las interconexiones mediante transformadores a las redes eléctricas generan mayor pérdida de energía y un mayor costo de la interconexión por los interruptores. Finalmente, la combinación expuesta tiene la capacidad de reducir el número de interruptores en el proceso de interconexión, también con una reducción significativa de número de sensores para la extracción de máxima potencia las maquina síncronas y por supuesto eliminación de transformadores de interconexión, y así reducir el costo general de las instalaciones.

III. Modelos matemáticos por etapas

III.1 Unidad de Generación

III.1.a Máquina PMSG

El modelo de operación del generador PMSG es caracterizado por el signo del torque mecánico, es decir, positivo para su uso como motor y negativo para su uso como generador.

En la Figura 13 observamos como el PMSG será conectado para ser aprovechado como un generador siendo cada una de las fases rectificadas por un puente de diodos trifásico generando así la conversión de CA a CD.

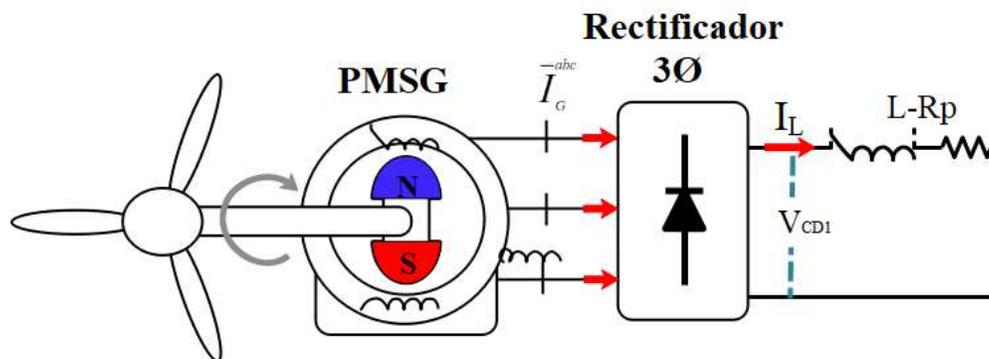


Figura 13.- Esquema de conexión del PMSG y el rectificador de onda completa.

Para el modelado del PMSG² se usó un modelo de segundo orden con el uso del marco de referencia dq (directo-cuadratura), como se muestra a continuación:

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} v_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \omega i_q \quad (2)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} v_q - \frac{R}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} p \omega_m i_q \quad (3)$$

$$T_e = 1.5p[\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (4)$$

² Ecuaciones características extraídas del modelo usado en el software MATLAB – SIMULINK.

Donde:

- L_q, L_d → Inductancias del eje de cuadratura y directo, respectivamente.
 R → Resistencia del devanado del estator.
 i_q, i_d → Corrientes del eje de cuadratura y directo, respectivamente.
 v_q, v_d → Tensiones del eje de cuadratura y directo, respectivamente.
 ω_m → Velocidad angular del rotor.
 λ → Amplitud del flujo inducido por los imanes permanentes en el rotor en las fases del estator.
 p → Número de pares de polos.
 T_e → Torque electromagnético.

Así mismo las inductancias L_q y L_d representan la relación entre las inductancias de fase y la posición del rotor debido a su saliencia. De este modo y a manera de ejemplo, la inductancia de las fases a y b (fase c abierta) se obtiene por:

$$L_{ab} = L_d + L_q + (L_q - L_d) \cos\left(2\theta_e + \frac{\pi}{3}\right) \quad (5)$$

Donde θ_e representa el ángulo eléctrico.

III.1.a.i Eficiencia del PMSG

La eficiencia (η) de una maquina es la relación existente de la potencia de salida (P_{salida}) con la potencia de entrada ($P_{entrada}$), en el caso de un generador esta relación será la potencia eléctrica sobre la potencia mecánica de entrada:

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \quad (6)$$

Donde la potencia de entrada en este caso, la potencia mecánica ($P_{mecánica}$) [W], se obtiene del producto del torque mecánico (τ_{ent}) [Nm] por la velocidad angular (ω_m) $\left[\frac{rad}{s}\right]$, como se muestra a continuación:

$$P_{mecanica} = \tau_{ent} * \omega_m \quad (7)$$

Y la potencia de salida ($P_{eléctrica}$) [W] se obtiene del producto de la tensión de fase (V_F) [V] por su corriente de línea (I_L) [A] por el f.p. dado por el coseno del ángulo existente entre estos, como se muestra a continuación:

$$P_{eléctrica} = V_F * I_L * \cos(\theta) = \sqrt{3} * V_L * I_L * \cos(\theta) \quad (8)$$

III.2 Turbina de Viento

III.2.a Perfil mecánico de las aspas

En las turbinas de viento, la generación eléctrica es gobernada por la cantidad de viento que pasa por medio de las aspas, éstas están diseñadas para que el viento les genere un esfuerzo rotacional, este movimiento siendo de baja velocidad para poder ser aprovechado por el generador previamente es aumentado con el uso de un sistema de engranajes acelerándolo hasta una velocidad adecuada [2]. Un ejemplo de estos perfiles se muestra en la Figura 14.

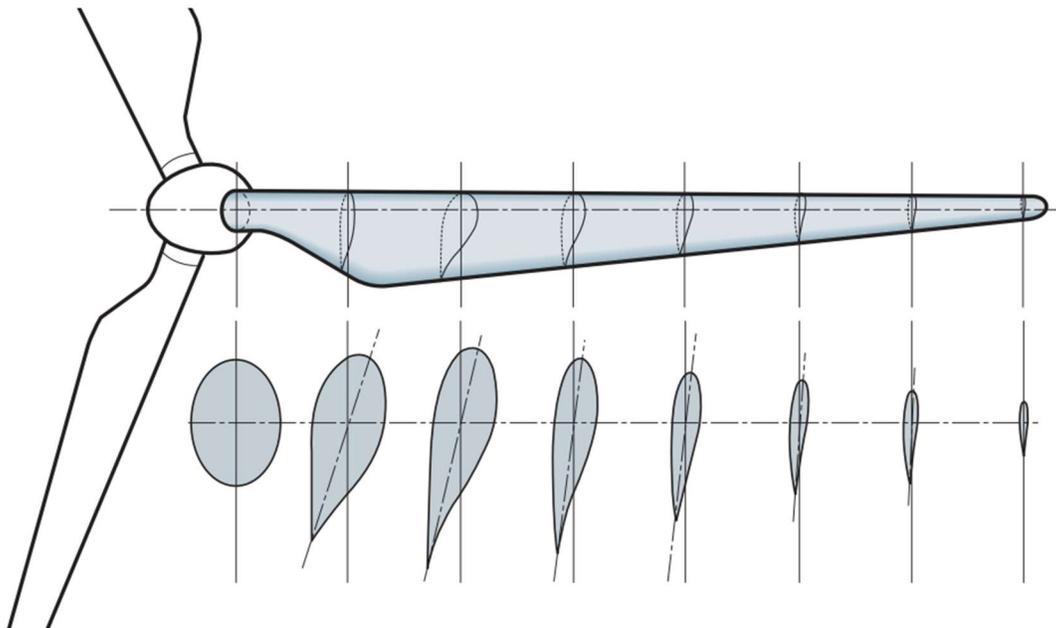


Figura 14.- Perfil mecánico de las aspas de viento de un aerogenerador. [3]

III.2.a.i Eficiencia de la turbina de viento

La energía cinética del viento que pasa por el área aprovechable que cubren las aspas se puede aproximar con el uso de la siguiente expresión:

$$P_{aire} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (9)$$

De la expresión anterior se tiene que la densidad del aire está dada por ρ , A es el área que cubren las aspas y se da en [m²] y v es la velocidad del viento en [m/s]. La potencia transferida al rotor de la turbina ($P_{turbina}$) se ve mermada por el coeficiente de potencia (C_T) de cada generador. En la práctica las turbinas tienen un C_T de entre el 25-45%.

$$P_{turbina} = C_T P_{aire} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_T \quad (10)$$

Sin embargo, la extracción de potencia se ve aún más limitada por el límite de Beltz, que declara que una turbina no podrá extraer más del 59.3% de la energía del viento.

III.3 Topologías Empleadas

III.3.a Convertidor CD/CD Boost Multinivel. [6]

La estructura de conexión del PBC multinivel es una combinación de las capacidades de varios convertidores Boost en una red de capacitores conmutada y la salida de tensión es obtenida de los capacitores conectados en serie como se muestra en la Figura 15. Este convertidor es controlado por una señal PWM teniendo a su vez la capacidad de equilibrar automáticamente su nivel de tensión.

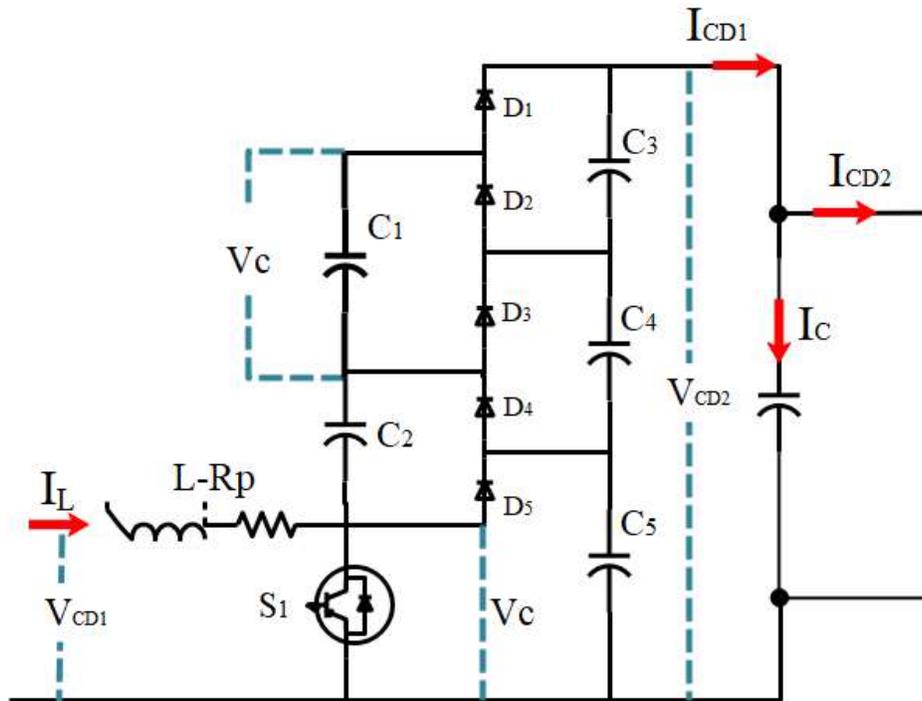


Figura 15.- Topología interna del convertidor Boost multinivel.

Como principales ventajas del uso del PBC multinivel se tienen:

1. Una gran relación salida/entrada con un bajo ciclo de trabajo.
2. No se requiere del uso de transformadores en la entrada del PBC multinivel.
3. Si se requiere de aumentar o disminuir el nivel de tensión a la salida solo basta con añadir o retirar diodos y capacitores manteniendo la estructura de escalera, de modo que es una topología modular.

La relación de salida/entrada del primer capacitor corresponde con la ecuación convencional de un PBC:

$$\frac{V_{CD2}}{V_{CD1}} = \frac{1}{1-D} \quad (11)$$

Donde:

- V_{CD2} → Tensión a la salida del PBC
 V_{CD1} → Tensión en CD a la entrada del PBC
 D → Ciclo de trabajo

Esta ecuación puede ser modificada para adaptarla al PBC multinivel, de modo que queda de la siguiente forma:

$$\frac{V_{CD2}}{V_{CD1}} = \frac{n}{1-D} \quad (12)$$

Lo anterior por la relación existente entre V_{CD2} y los niveles usados (n) que involucran la tensión individual de cada capacitor (V_C), definido por la ecuación siguiente:

$$n V_C = V_{CD2} \quad (13)$$

El incremento en la corriente de estado estacionario cuando el ciclo de trabajo es máximo ($D = 1$) se puede definir como:

$$\Delta I_L = \frac{1}{L} \int_0^{D \cdot T} V_{CD1} dt \quad (14)$$

De modo que, teniendo en cuenta las expresiones de la potencia de entrada (P_{in}) y la potencia de salida (P_{out}) como se observa en (15), es que podemos despejar la corriente de entrada (I_L) expresada en términos de la corriente de salida (I_{CD}) y la tensión en los puertos terminales de salida (V_{CD2}).

$$P_{in} = V_{CD1} I_L = P_{out} = V_{CD2} I_{CD1} \quad (15)$$

De modo que aplicando la relación (13) en (15), obtenemos (16).

$$P_{out} = V_{CD2} \frac{V_{CD2}}{R_{carga}} = n V_C \frac{n V_C}{R_{carga}} = \frac{n^2 V_C^2}{R_{carga}} \quad (16)$$

Despejando I_L de (15) y aplicando en (16), tenemos la siguiente relación que describe la corriente de entrada en para un PBC multinivel:

$$I_L = \frac{1}{V_{CD1}} \frac{n^2 V_C^2}{R_{Carga}} = \frac{n^2 V_C}{(1-D)R_{Carga}} \quad (17)$$

En la ecuación (17) observamos que I_L puede ser controlada por D en el PBC multinivel, la cual es una capacidad relevante para las variaciones de voltaje de entrada. De esta manera la función de transferencia queda definida como:

$$\frac{V_{CD2}}{V_{CD1}} = \frac{1}{\frac{1-D}{n} + \frac{nR}{(1-D)R_{Carga}}} \quad (18)$$

III.3.b Convertidor Boost multinivel PFC

En el punto II.3 de este trabajo se observaron sistemas pasivos y activos de mejorar el factor de potencia tras un proceso de conversión, en un sistema activo el inductor consigue que la señal contenga menos rizo por lo que permite tener una señal más limpia de la rectificación del puente de diodos. Así mismo el FET, permite oscilar a la corriente de entrada a una frecuencia elevada, teniendo como finalidad hacer que ésta esté lo más en fase con la tensión de entrada. [7]

De este sistema podemos decir que existen 2 estados:

1. Cuando el switch FET este encendido.

En este momento el FET dicta el camino a recorrer puesto que insta a que retorne la corriente en este punto en vez de seguir por el circuito cargando el inductor colocado, teniendo el capacitor entremedio de este y el PBC que alimentar el circuito de carga.

2. Cuando el switch FET esta apagado

En este estado, el inductor se descarga pues ahora está alimentando no solo al circuito, sino que también recarga el capacitor.

Estos 2 estados cambian rápidamente haciendo que el valor de tensión a la salida del capacitor permanezca en un intervalo constante por medio de la regulación en D , así como la corriente demandada I_{BUS} por el sistema de CA que es suministrada por el inductor.

III.3.c VSC PFC trifásico [8]

En la Figura 16 se presenta el esquema de conexión del VSC PFC trifásico, de este tenemos que V_g^{abc} representa la tensión trifásica de la red del sistema; L es la inductancia del rectificador; R_{eq} es la suma de resistencias parasitas y pérdidas por conducción e I_L^{abc} como la corriente fundamental de fases que fluye desde la red hacia el VSC.

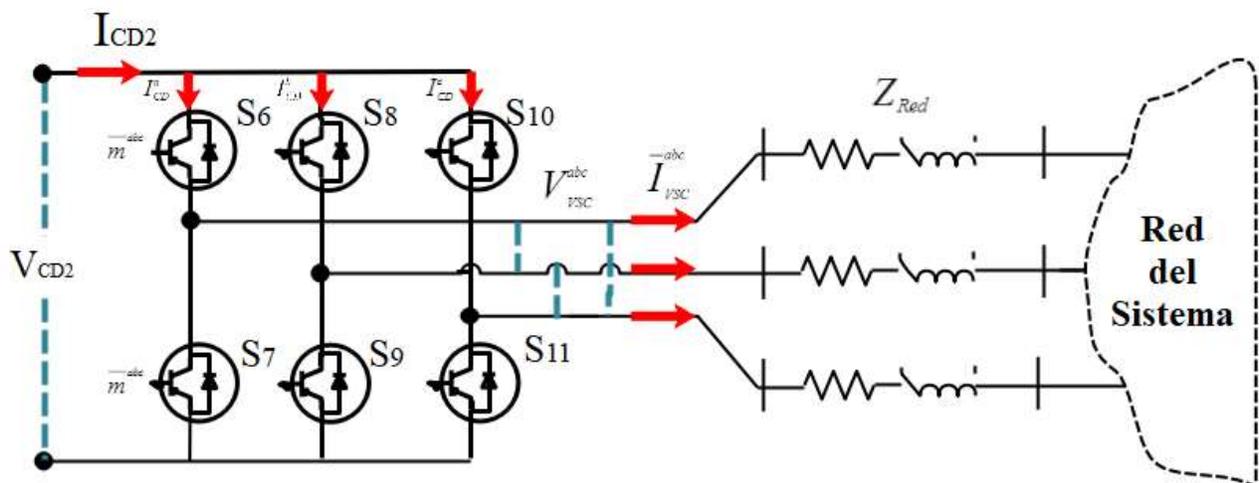


Figura 16.- Esquema del VSC PFC trifásico.

Una vez que empieza a fluir corriente por el VSC la corriente trifásica I_{abc} es transformada en corriente directa, y la suma de esas corrientes de DC representa la corriente de salida del VSC.

$$I_{CD2}(t) = I_{CD}^a(t) + I_{CD}^b(t) + I_{CD}^c(t) \quad (19)$$

Asumiendo una frecuencia de conmutación (f_{con}) al menos 10 veces mayor que la frecuencia de la línea ($f_{línea}$) el modelo promedio es válido fundamentado en el índice variable de modulación (m^{abc}) definido como una variable sinusoidal en el espacio continuo [-1,1].

Esto puede ser usado para representar la tensión y corriente promedio del VSC trifásico como:³

$$V_{VSC}^{abc}(t) = \frac{1}{2} m^{abc}(t) V_{CD2}(t) \quad (20)$$

$$I_{VSC}^{abc}(t) = \frac{1}{2} m^{abc}(t) I_{DC2}(t) \quad (21)$$

III.4 Control aplicado [9]

En la Figura 17 se presentan las diferencias que se tienen entre el control que se ha venido usando y la nueva estrategia que se plantea por lo que de manera breve se podrán observar las diferencias que estos implican.

En la Figura 17.a se observa lo que es hasta ahora la estructura de control usada, esta conlleva por sobre otras cosas:

- La necesidad de realizar mediciones de corriente para cada una de las fases.
- La necesidad de incluir más ganancias PI de control.
- Procesos matemáticos de conversión del marco de referencia a dq0.

Por otro lado, la Figura 17.b muestra la nueva estructura que se usará en este trabajo, esta conlleva los beneficios de:

- No requiere de mediciones de corriente.
- Una sola ganancia PI de control por fase.
- Menor poder de computo necesario ya que no se usan cambios en el marco de referencia.

³ Para una operación correcta del VSC es necesario que la tensión de salida del VSC sea mayor a la tensión entre líneas de la red ($V_{CD} > V_{LL}$).

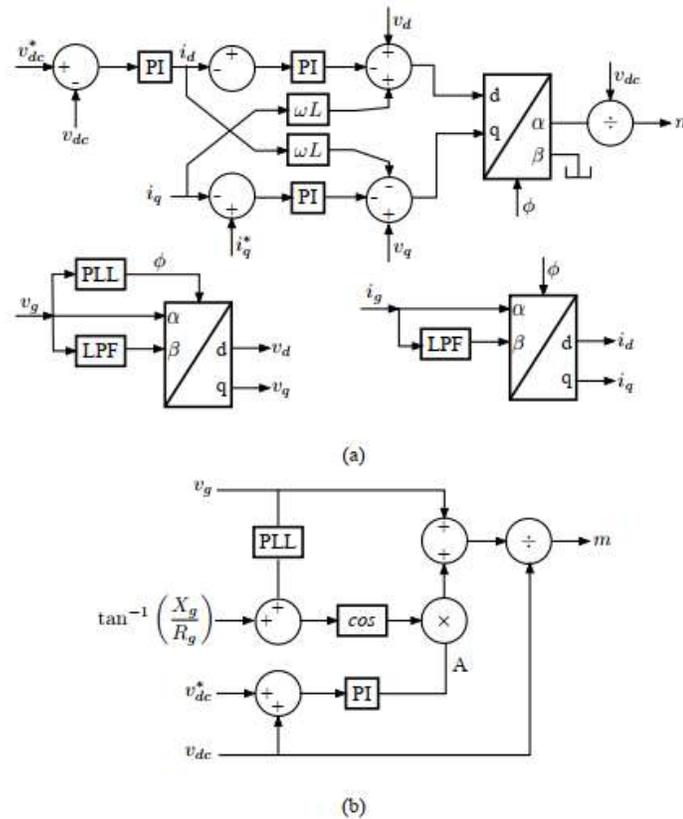


Figura 17.- Esquemas de control aplicado
 a) Usado comúnmente
 b) Nueva estrategia.

III.5 Conclusiones del capítulo

En este capítulo observamos de manera independiente las ecuaciones que caracterizan a cada uno de los elementos usados en este trabajo, se observó que:

- El aerogenerador se ve limitado por las características de construcción desde el número de aspas usadas, hasta el perfil que estas tengan, por lo que la extracción de energía del viento encuentra su primera limitante en estas además de la constante de Beltz.
- La máquina PMSG depende en gran medida del material magnético usado para la generación de su campo magnético de inducción, sin embargo, su análisis eléctrico se puede hacer de manera similar a como se hace con otro tipo de generadores eléctricos.

- El convertidor PBC multinivel al ser una topología modular, presenta la ventaja de que dependiendo la necesidad del nivel de tensión a su salida se pueden hacer las modificaciones ya sea en los niveles usados o en el ciclo de trabajo usado, esto sin presentar mayor cambio en las ecuaciones que lo describen.
- El uso del VSC es una tecnología bastante desarrollada, sin embargo, conlleva el requerimiento de entender cómo es que la onda sinusoidal es desarrollada, entender la modulación SPWM, el refinamiento de la señal y porque se necesita el uso de sistemas mejoradores del factor de potencia

IV. Simulación

Para efectos de comprobación de los resultados mostrados en esta sección, se dará detalle de cada una de las etapas (ganancias, sistemas de generación, conversión, así como de control, mecánicos y eléctricos) que se usaron en la implementación del sistema propuesto.

IV.1 Especificaciones de los bloques en MATLAB

Se dará muestra del bloque usado en la plataforma de diseño por bloques de MATLAB SIMULINK, así como un esquema de las conexiones y los valores usados en cada uno de los bloques.

IV.1.a Wind Turbine

En la Figura 18 se muestra en azul el bloque usado por el software para la simulación de la turbina de tiempo, en las entradas se encuentran:

- Generator speed [pu] (velocidad de giro del generador PMSG).
- Pitch angle [deg] (ángulo de inclinación de las aspas).
- Wind speed [m/s] (velocidad del viento).

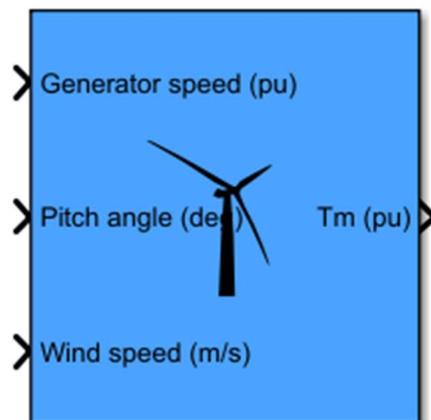


Figura 18.- Bloque utilizado en el software de simulación SIMULINK para la turbina de viento.

Mientras que del lado de las salidas tenemos el torque mecánico T_e generado por este en un sistema por unidad [pu].

En la Figura 19, tenemos el diagrama de conexión con el PMSG:

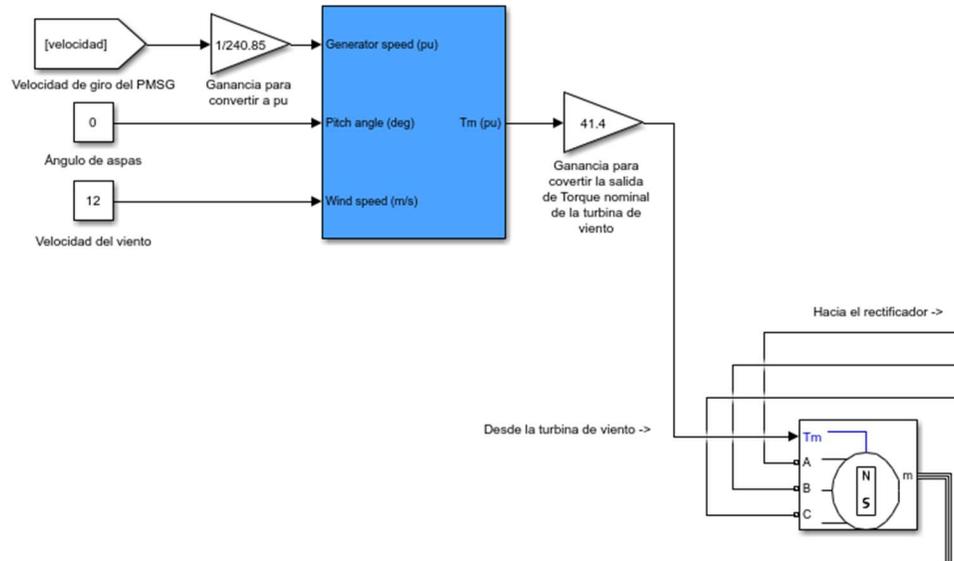


Figura 19.- Diagrama de conexión de la turbina de viento.

En la Tabla 3 tenemos los parámetros para definir el bloque *Wind Turbine*, como se puede apreciar, se ingresan los datos de la potencia mecánica nominal de salida; la potencia base del generador eléctrico; velocidad base del viento; potencia máxima a velocidad base del viento; velocidad rotacional base y el ángulo de inclinación de las aspas de la turbina eólica.

Tabla 3 Parámetros de simulación de la turbina de viento.

DETALLE	VALOR	UNIDADES	ACRÓNIMO
POTENCIA MECÁNICA NOMINAL DEL AEROGENERADOR	1.5×10^6	[W]	$P_{m_{wt}}$
POTENCIA ELÉCTRICA BASE DEL AEROGENERADOR	1.35×10^6	[VA]	$P_{e_{wt}}$
VELOCIDAD NOMINAL DE VIENTO	6	$\left[\frac{m}{s}\right]$	v_{viento}
POTENCIA MÁXIMA A VELOCIDAD DE VIENTO BASE	0.593	[pu]	
VELOCIDAD ROTACIONAL BASE	1	[pu]	
ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE LAS ASPAS DE LA TURBINA EÓLICA	0	[°]	

Y se insertan en el sistema del mismo orden, de la misma manera en que se muestra en la Figura 20.

Parameters	
Nominal mechanical output power (W):	1.5e6
Base power of the electrical generator (VA):	1.5e6*0.9
Base wind speed (m/s):	6
Maximum power at base wind speed (pu of nominal mechanical power):	0.593
Base rotational speed (p.u. of base generator speed):	1
Pitch angle beta to display wind-turbine power characteristics (beta >=0) (deg):	0

Figura 20.- Características de la turbina de viento.

IV.1.b Permanent Magnet Synchronous Machine

En la Figura 21 se muestra el PMSG con sus respectivas conexiones desde la turbina de viento. Como entrada se tiene el torque mecánico generado por la turbina de viento (T_m) y como salidas, hacia el puente de diodos, tenemos las señales trifásicas (A , B , C) para su conversión en CD.

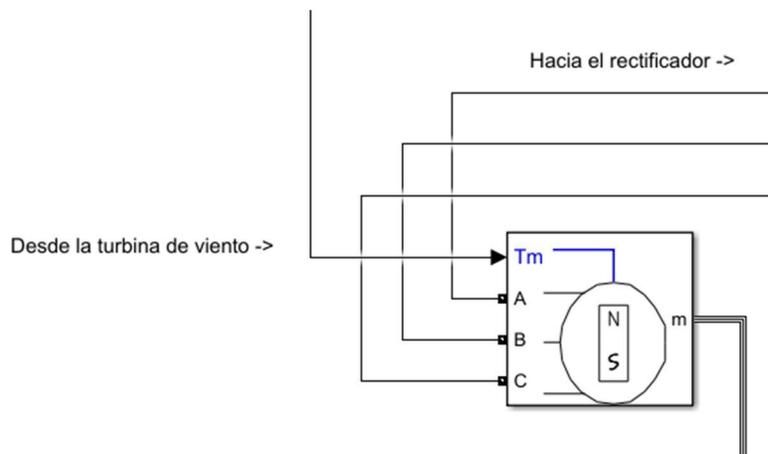


Figura 21.- Diagrama de conexión del PMSG.⁴

⁴ m es un bus de salida de señales del PMSG, donde se muestran variables de la máquina como velocidad, torque eléctrico, etc.

De este bloque tenemos los parámetros definidos por modelos, por lo que para esta implementación se usará el modelo 08⁵ como se muestra en la Figura 22, con las siguientes características:

- 2300 RPM, como la velocidad nominal de giro del rotor.
- 41.4 Nm, como entrada mecánica de torque en el rotor.

Permanent Magnet Synchronous Machine (mask) (link)

Implements a three-phase or a five-phase permanent magnet synchronous machine. The stator windings are connected in wye to an internal neutral point.

The three-phase machine can have sinusoidal or trapezoidal back EMF waveform. The rotor can be round or salient-pole for the sinusoidal machine, it is round when the machine is trapezoidal. Preset models are available for the Sinusoidal back EMF machine.

The five-phase machine has a sinusoidal back EMF waveform and round rotor.

Configuration Parameters Advanced

Number of phases:
3

Back EMF waveform:
Sinusoidal

Rotor type:
Round

Mechanical input:
Torque Tm

Preset model:
08: 24 Nm 300 Vdc 2300 RPM - 41.4 Nm

Figura 22.- Modelo y características del PMSG (Pestaña configuración).

En la Figura 23, se muestran las características del PMSG que se implementaron en la pestaña parámetros.

- $200 \frac{rad}{s}$, de velocidad inicial.
- 0° , del ángulo de desfase.
- 1 A, en la corriente i_a .
- 1 A, en la corriente i_b .

⁵ Modelo escogido sin ninguna preferencia. Para fines de recreación de los datos aquí mostrados es conveniente escoger el mismo modelo.

The three-phase machine can have sinusoidal or trapezoidal back EMF waveform. The rotor can be round or salient-pole for the sinusoidal machine, it is round when the machine is trapezoidal. Preset models are available for the Sinusoidal back EMF machine.

The five-phase machine has a sinusoidal back EMF waveform and round rotor.

Configuration Parameters Advanced

Machine parameters

Compute from standard manufacturer specifications.

Stator phase resistance Rs (Ohm): 0.0918

Armature inductance (H): 0.000975

Machine constant

Specify: Flux linkage established by magnets (V.s)

Flux linkage: 0.1688

Inertia, viscous damping, pole pairs, static friction [J(kg.m²) F(N.m.s) p() Tf(N.m)]: [0.003945 0.0004924 4 0]

Initial conditions [ω_m (rad/s) θ_{tam} (deg) i_a, i_b (A)]: [200,0, 1,1]

Rotor flux position when theta = 0:

90 degrees behind phase A axis (modified Park)

Figura 23.- Modelo y características del PMSG (Pestaña parámetros).

En la Tabla 4 se muestran los parámetros que se definirán y que no son definidos por el modelo definido previamente

Tabla 4 Parámetros de simulación del generador síncrono.

DETALLE	VALOR
PESTAÑA DE CONFIGURACIÓN (FIGURA 22)	
NÚMERO DE FASES	3
FORMA DE ONDA DE LA FUERZA ELECTROMOTRIZ EN CONTRA	Senoidal
TIPO DEL ROTOR	Liso o Redondo (Round)
ENTRADA MECÁNICA	Torque T_m
PESTAÑA PARÁMETROS (FIGURA 23)	
CONDICIONES INICIALES $\left(\omega_m \left(\frac{rad}{s} \right), \theta_{tam}(deg), i_a [A], i_b [A] \right)$	[200, 0, 1,1]

IV.2 Rectificador, puente de diodos

El proceso de rectificación de las señales trifásicas en CA a CD se dará con el uso de un puente de diodos para su posterior uso en el PBC. Este se muestra en la Figura 24.

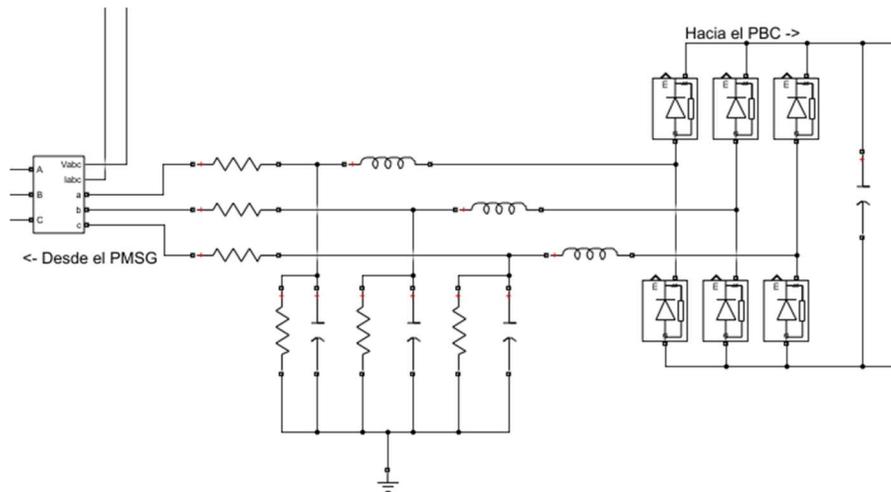


Figura 24.- Esquema de conexión del puente de diodos.

Los componentes añadidos a este tendrán valores acordes al modelo del PMSG, por lo que para este ejercicio se usaron los valores mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5 Caracterización de los elementos del puente de diodos.

ELEMENTO	VALOR	UNIDAD
ELEMENTOS EN SERIE (<i>Inductor y Resistor</i>)		
<i>L</i>	150×10^{-6}	H
<i>R</i>	0.01	Ω
ELEMENTOS EN PARALELO (<i>Capacitor y Resistor</i>)		
<i>C</i>	80×10^{-6}	F
<i>R</i>	100	Ω
VALORES DEL DIODO		
RESISTENCIA R_{on}	0.001	Ω
INDUCTANCIA L_{on}	0	H
VOLTAJE FRONTAL V_f	0.1	V
RESISTENCIA SNUBBER R_s	1×10^{-6}	Ω
CAPACITANCIA SNUBBER C_s	250×10^{-9}	F

IV.3 Convertidor Boost de Potencia Multinivel

El convertidor Boost multinivel es una topología que, a diferencia de los elementos previamente mencionados, no existe un modelo predefinido, por lo que este contará con más descripción de sus elementos.

De este podemos definir que, en las entradas, tendrá el suministro de CD (V_{CD_1}) del rectificador, y por parte de sus salidas una tensión de igual manera en CD V_{CD_2} , pero aumentada n veces, que en este caso son 5 niveles, en la Figura 25 se puede apreciar.

Todos los valores de los elementos estarán descritos en la Tabla 6, por lo que para comprobar los resultados aquí expuesto será necesario que se igualen los valores que se detallan en el elemento usado.

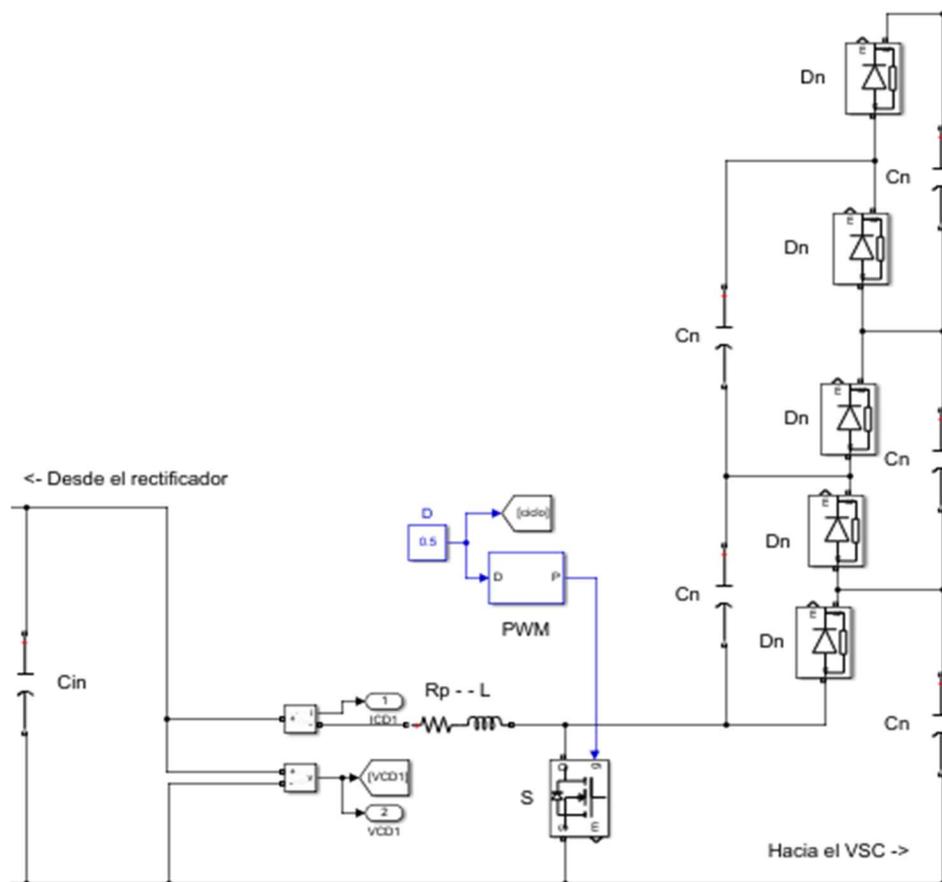


Figura 25.- Esquema de conexión del convertidor Boost multinivel.

Tabla 6 Descripción de los elementos que conforman el PBC multinivel.

ELEMENTO	VALOR	UNIDAD	ACRÓNIMO
CAPACITOR DE ENTRADA	5×10^{-3}	F	C_{in}
RESISTOR PFC	0.01	Ω	R_p
INDUCTOR PFC	1×10^{-3}	H	L
CAPACITOR DE SALIDA	500×10^{-6}	F	C_n
VALORES DEL MOSFET (S)			
RESISTENCIA DEL FET	1×10^{-3}	Ω	R_{on}
INDUCTANCIA INTERNA	0	H	L_{on}
RESISTENCIA INTERNA	1×10^{-3}	Ω	R_d
VOLTAJE INTERNO HACIA ADELANTE	0	V	V_f
RESISTENCIA SNUBBER	∞	Ω	R_s
CAPACITANCIA SNUBBER	∞	F	C_s
SEÑAL PWM			
FRECUENCIA DE CAMBIO	4×10^3	Hz	
TIEMPO DE MUESTREO	1×10^{-6}	s	$t_{muestreo}$
CICLO DE TRABAJO	0.5		D
VALORES DEL DIODO (D_n)			
RESISTENCIA	0.001	Ω	R_{on}
INDUCTANCIA	0	H	L_{on}
VOLTAJE FRONTAL	0.1	V	V_f
RESISTENCIA SNUBBER	1×10^{-6}	Ω	R_s
CAPACITANCIA SNUBBER	250×10^{-9}	F	C_s

IV.4 Fuente convertidora de tensión (VSC)

Para la fuente convertidora de tensión, se usará un modelo de bloque predefinido de Simulink, este se muestra centrado en la Figura 26. Los parámetros de este modelo estarán mostrados en la Figura 27.

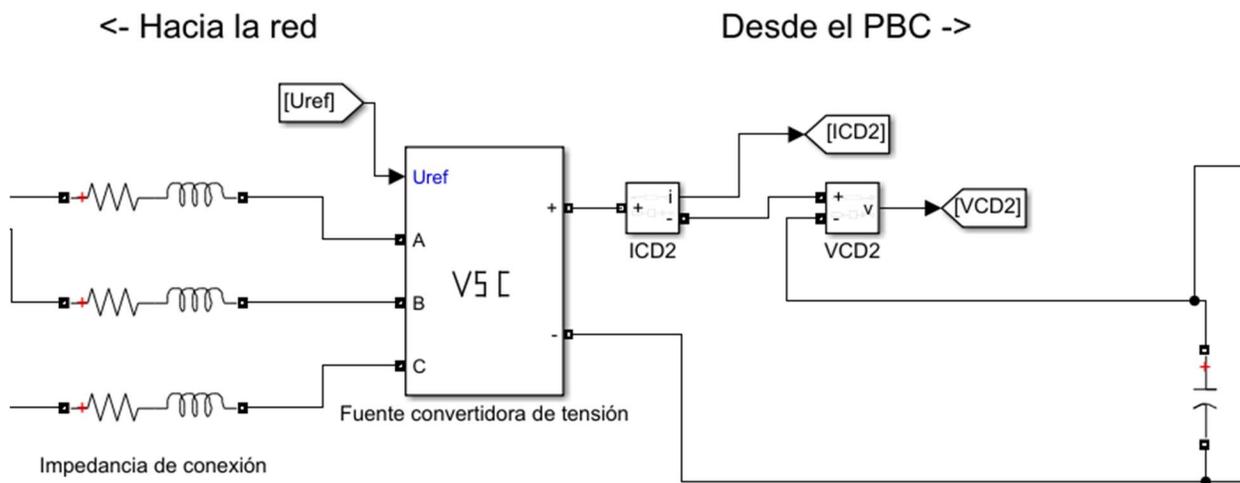


Figura 26.- Esquema de conexión del VSC.

Universal Bridge (mask) (link)

This block implement a bridge of selected power electronics devices. Series RC snubber circuits are connected in parallel with each switch device. Press Help for suggested snubber values when the model is discretized. For most applications the internal inductance L_{on} of diodes and thyristors should be set to zero

Parameters

Number of bridge arms: 3

Power Electronic device: Average-model based VSC

Measurements: None

Figura 27.- Parámetros del bloque VSC.

De este elemento podemos apreciar que:

- Del lado del PBC:
 - Se tiene la capacitancia de salida del PBC y será este el 6to nivel del PBC multinivel.

- Del lado de la interconexión a la red:
 - Se tiene una impedancia de interconexión característica de una LT pequeña, usada puesto que se espera una distancia no mayor a 80 km por la cual no se presentan elementos capacitivos.

IV.5 Interconexión a la red

Por último, la interconexión a la red será simulada con un bloque que imitará condiciones de un nodo *SLACK*, el modo de interconexión será conforme a lo mostrado en la Figura 28.

La impedancia de interconexión tendrá las siguientes características:

- *Resistencia* = 0.1Ω
- *Inductancia* = $10 \times 10^{-3} H$

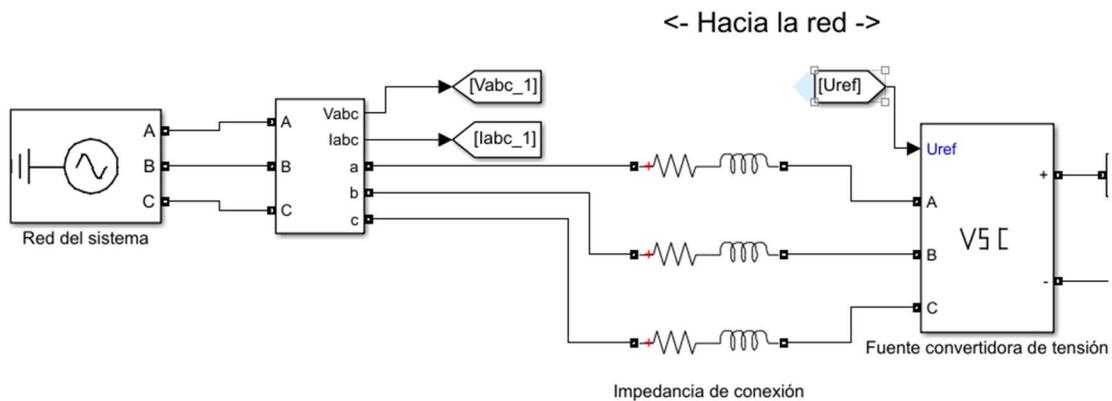


Figura 28.- Esquema de conexión del nodo de red y la VSC.

Los parámetros definidos para este bloque serán los mostrados en la Figura 29.

Three-Phase Source (mask) (link)
 Three-phase voltage source in series with RL branch.

Parameters Load Flow

Configuration: Yg

Source

Specify internal voltages for each phase

Phase-to-phase voltage (Vrms): 440

Phase angle of phase A (degrees): 0

Frequency (Hz): 60

Impedance

Internal Specify short-circuit level parameters

Source resistance (Ohms): 0

Source inductance (H): 0

Base voltage (Vrms ph-ph): 440

Figura 29.- Parámetros del nodo de interconexión a la red.

IV.6 Seguimiento del punto de máxima potencia de la turbina (MPPT)

IV.6.a Análisis de variables del MPPT

Para asegurar que, tanto la turbina de viento, como la máquina PMSG estuviesen entregando el máximo de la potencia disponible, se aseguró el cumplir con el seguimiento del punto de máxima potencia de la turbina (MPPT), como se muestra en la Figura 30, esta es una técnica usada ampliamente basada en las curvas de viento de los aerogeneradores que consiste en analizar la velocidad de giro del rotor y el torque mecánico extraído, permitiendo saber el punto óptimo de trabajo de ambas.⁶

⁶ Velocidades superiores a 12 [m/s] en el viento, rozan las capacidades mecánicas de los sistemas de generación eólica por lo que serán omitidas en su mayoría.

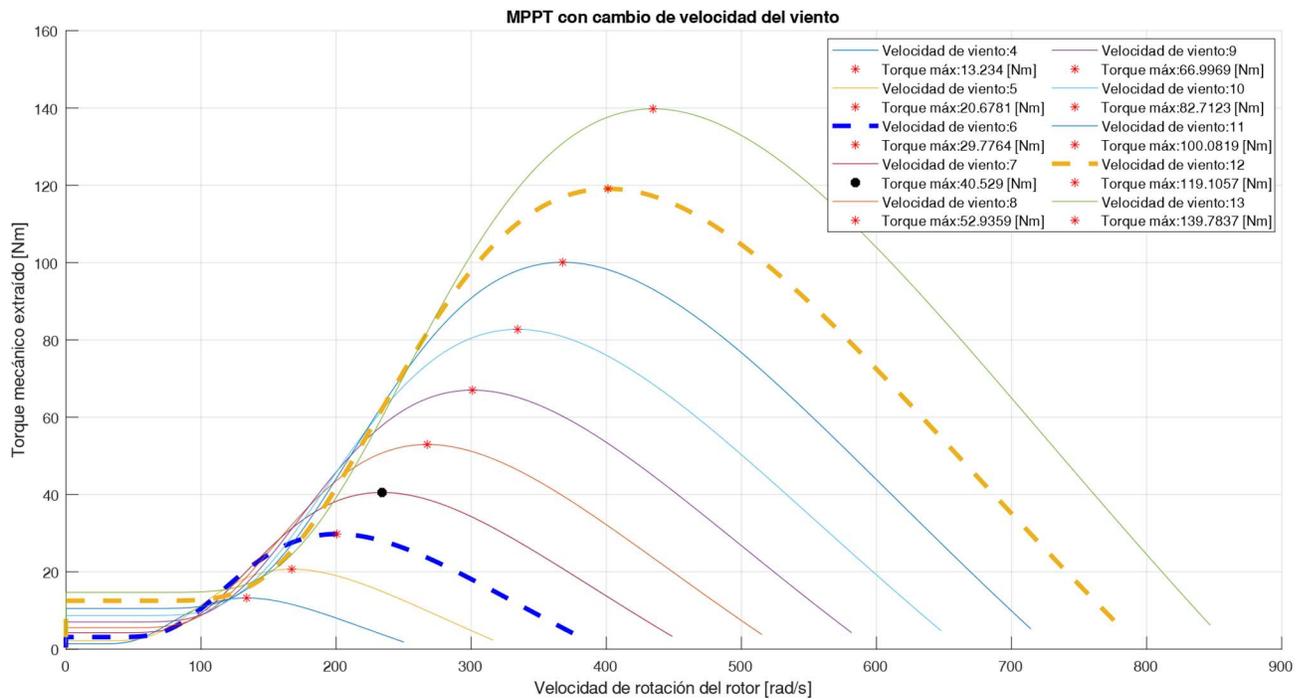


Figura 30.- MPPT del conjunto turbina-generator, considerando un cambio de velocidad del viento.

Para este punto se realizarán experimentos con la idea de asegurar el mantenimiento del MPPT, de estos se tendrán dependiendo del caso distintas variables de observación, entre las que estarán:

- Velocidad del viento [m/s].
- Torque mecánico aplicado al PMSG [Nm].
- Velocidad del rotor [rad/s].
- Potencia eléctrica extraída del PMSG [W].
- Nivel de tensión a la salida del PBC multinivel [V_{CD}].
- Ciclo de trabajo usado.
- Eficiencia.

IV.7 Carga máxima del sistema.

IV.7.a Esquema de conexión de la simulación

Para el ejercicio propuesto se tendrán como entradas velocidad de viento (de 4 a 13 [m/s]), carga puramente resistiva (variable [Ω]) y como salidas se analizarán velocidad del rotor [rad/s], torque mecánico [Nm], potencia eléctrica [W] y eficiencia total.

El diagrama de conexión es el mostrado en la Figura 31.

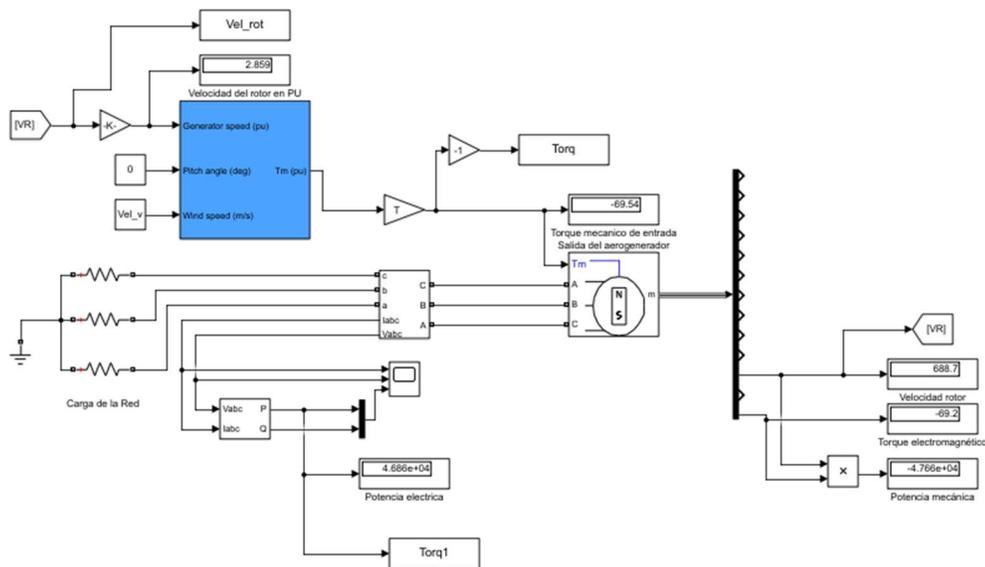


Figura 31.- Esquema de conexión del ejercicio, carga máxima.

IV.7.a.i Análisis de resultados

Otro análisis que se tomó en cuenta fue el de carga máxima, de manera iterativa se fue comprobando el rendimiento conjunto del PMSG y la turbina de viento hasta encontrar la carga crítica que permitiese suministrar un máximo de torque mecánico aplicado con lo que los resultados obtenidos fueron plasmados en la Tabla 7.

Tabla 7 Estudio de carga aplicada para la máxima extracción de potencia de la turbina.

VELOCIDAD DEL VIENTO	CARGA APLICADA $[\Omega]$	VELOCIDAD DE ROTOR $\left[\frac{rad}{s}\right]$	VELOCIDAD DE ROTOR $[PU]$	TORQUE MECÁNICO $[Nm]$	TORQUE MECÁNICO $[PU]$	POTENCIA ELÉCTRICA EXTRAÍDA $[W]$	EFICIENCIA $[\%]$
4	18	133.7	0.56	13.23	0.32	1,540.00	98.21
5	14.3	167.2	0.69	20.68	0.50	3,012.00	98.34
6	11.9	200.6	0.83	29.78	0.72	5,188.00	98.38
7	10.2	234	0.97	40.53	0.98	8,191.00	98.37
8	8.9	267.5	1.11	52.94	1.28	12,140.00	98.32
9	7.9	300.8	1.25	67.00	1.62	17,100.00	98.26
10	7.1	334.4	1.39	82.71	2.00	23,110.00	98.18
11	6.4	367.7	1.53	100.1	2.42	30,230.00	98.07
12	5.8	401.2	1.67	119.1	2.88	38,350.00	98.75
13	5.4	434.5	1.80	139.8	3.38	46,860.00	97.85

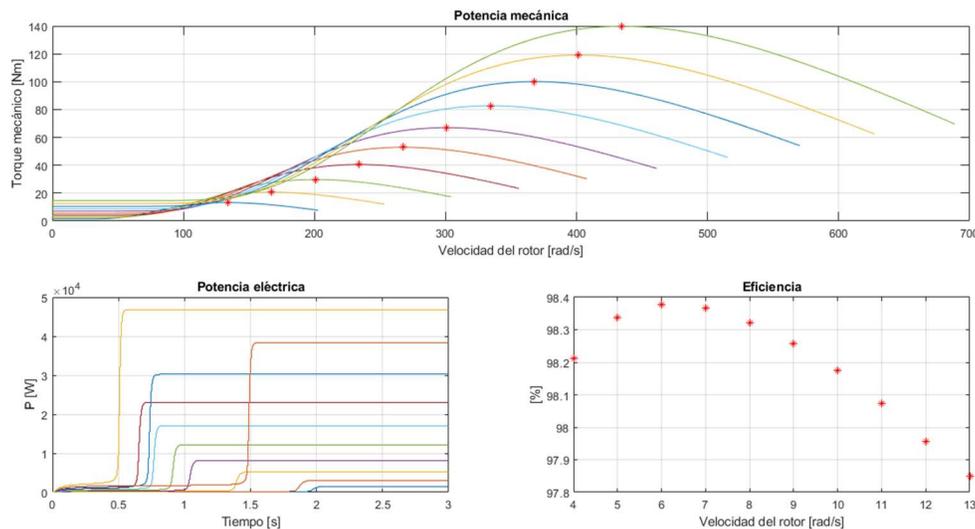


Figura 32.- Eficiencia del PMSG, con condiciones de carga máxima en $[\Omega]$.

Como puede apreciarse, conforme aumenta la velocidad del viento el sistema es capaz de soportar cargas mayores. Así mismo se es capaz de extraer más potencia eléctrica a costa de una eficiencia menor que concuerda con lo visto en el punto anterior.

En la Figura 33 se puede apreciar que una variación de tan solo $0.1 \text{ } [\Omega]$ altera la respuesta de la potencia de salida tanto en velocidad de la respuesta al cambio como en la potencia extraíble del PMSG.

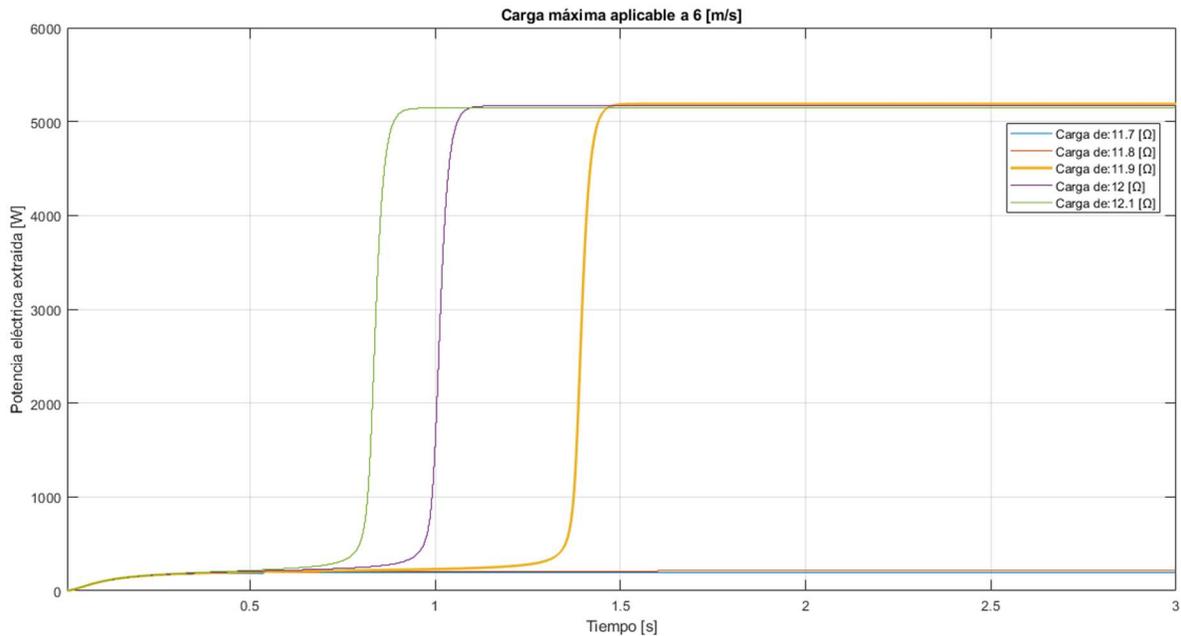


Figura 33.- Respuesta gráfica del PMSG al cambio de carga.

IV.8 Ciclo de trabajo óptimo

Debido a la naturaleza de los sistemas eléctricos el depender de que la carga sea un valor fijo es utópico, por lo que gracias al tipo de topología empleada es posible asimilar la respuesta estudiada en el punto anterior con el cambio al ciclo de trabajo (D) del PBC multinivel.

IV.8.a Esquema de conexión de la simulación

Las conexiones realizadas para este ejercicio conforman la interconexión de los esquemas mostrados en las Figuras Figura 19, Figura 21, Figura 24, Figura 25, Figura 26 y Figura 28, esta conexión es finalmente mostrada en la Figura 34 para el sistema de interconexión a la red y la Figura 35 para el sistema de conversión de energía y uso del PBC multinivel.

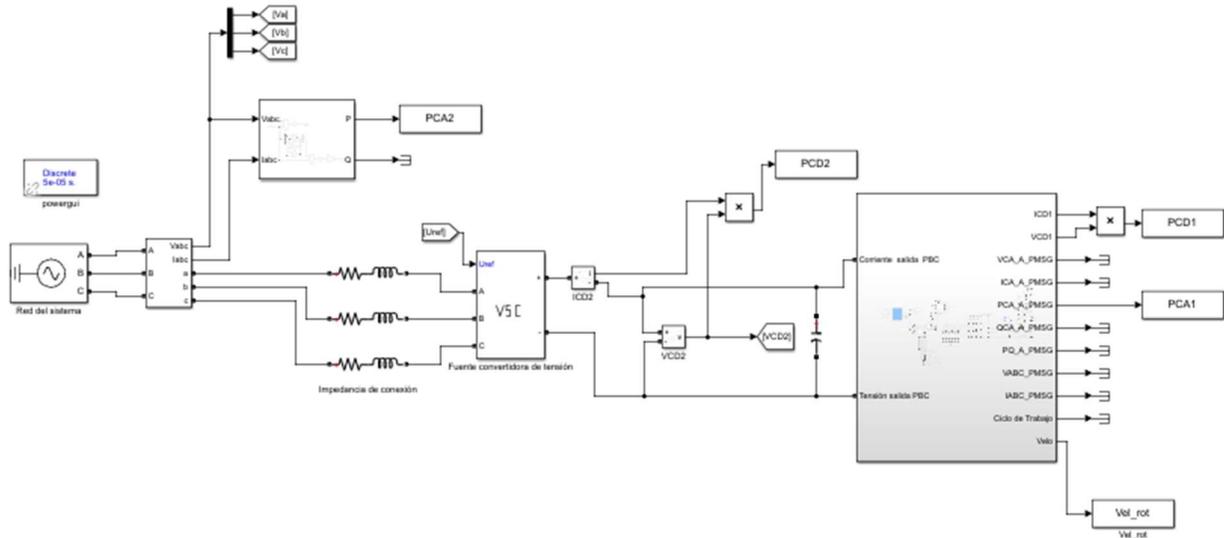


Figura 34.- Diagrama de conexión de la red, VSC y salida del subsistema de la Figura 35.

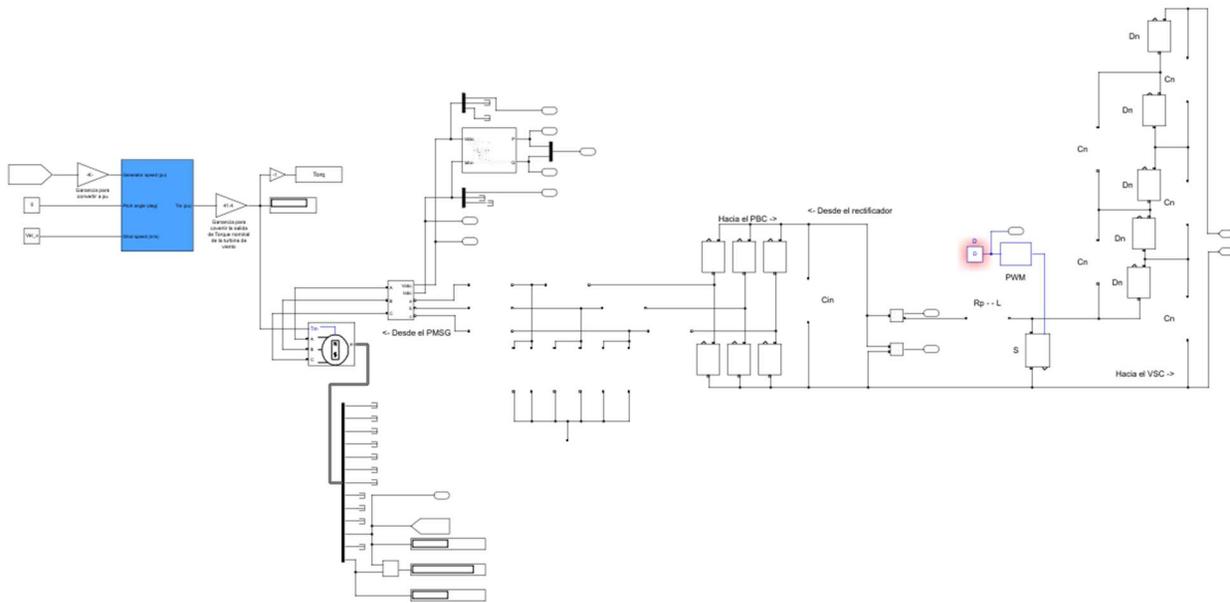


Figura 35.- Subsistema de conexión turbina de viento, PMSG y PBC multinivel.

IV.8.a.i Análisis de resultados

Aplicando un método iterativo a distintas velocidades de viento, se obtendrá la potencia eléctrica máxima extraíble plasmando los resultados en la Tabla 8.

Tabla 8 Ciclo de trabajo óptimo para la máxima extracción de potencia del PMSG.

VELOCIDAD DEL VIENTO [$\frac{m}{s}$]	CICLO DE TRABAJO D	VELOCIDAD DE TURBINA [$\frac{rad}{s}$]	TORQUE MECÁNICO [Nm]	POTENCIA MECÁNICA [W]	$P_{activaCA}$ [W]	EFICIENCIA [%]
4	[0.63,0.74]	133.7	13.23	1935.48	1668	86.18
5	[0.63,0.74]	167.4	20.68	3196.11	3020	94.49
6	[0.51,0.62]	200.6	29.78	6364.13	5890	92.55
7	[0.51,0.62]	234.1	40.53	9080.81	8338	91.82
8	[0.38,0.49]	267.4	52.94	15204.55	13900	91.42
9	[0.38,0.49]	300.9	67.00	22207.52	20140	90.69
10	[0.38,0.49]	334.3	82.71	27389.16	25020	91.35
11	[0.38,0.49]	367.9	100.1	39458.67	35280	89.41
12	[0.38,0.49]	400.7	119.1	45921.52	40140	87.41
13	[0.38,0.49]	433.4	139.8	50565.04	43850	86.72

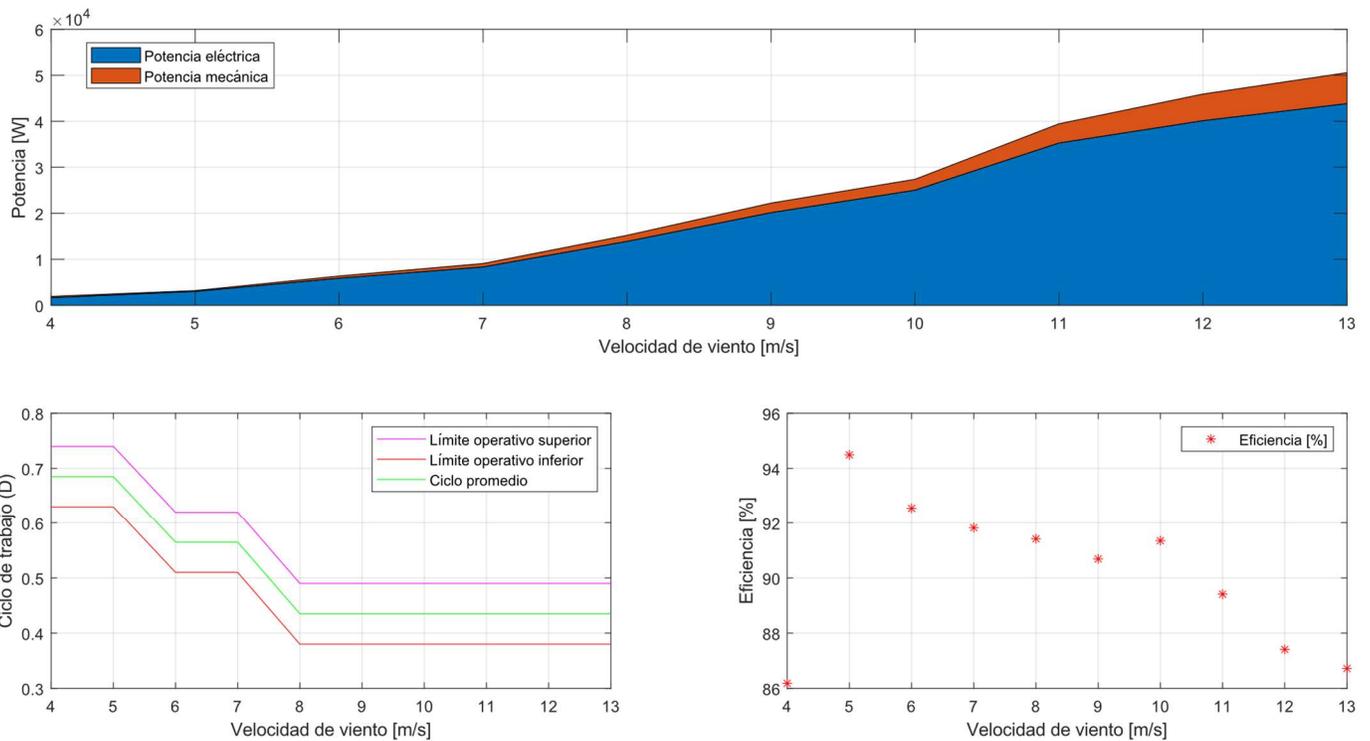


Figura 36.- Eficiencia del PMSG, con condiciones de ciclo de trabajo.

En la Tabla 8 se observa que el ciclo de trabajo puede abarcar un intervalo en el cual la respuesta del sistema es igual en términos de potencia extraíble como eficiencia. Este intervalo

permite manejar un ciclo promedio que es el mostrado en la Figura 36 en color verde, este ciclo al no chocar con los límites operativos permite manejarse un cambio de estas condiciones del viento.

Con respecto a la eficiencia, al igual que en un sistema con carga fija, decae por debajo del 90 % a velocidades de viento mayores por lo que deja de ser conveniente el trabajar el sistema en velocidades mayores a 10 [m/s]. Solo el caso de 4 [m/s] presenta una excepción a esta premisa sin embargo por la magnitud de la potencia es mínima la pérdida.

IV.9 Control aplicado a las variables eléctricas

En la Figura 37 se muestra el esquema de control detallando las secciones que lo componen.

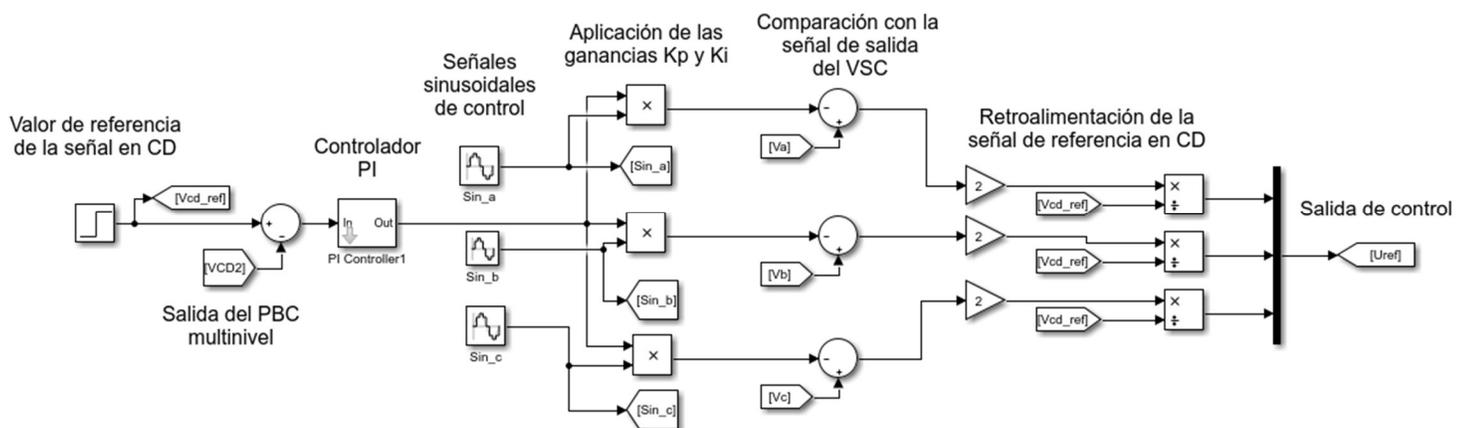


Figura 37.- Esquema de control detallado.

Vemos que como entradas tenemos:

1. Valor de referencia. ($V_{cd_{ref}}$)
2. Señal de CD del PBC multinivel. (V_{CD2})
3. Señales sinusoidales de referencia. (V_a, V_b, V_c)

Mientras que del lado de las salidas tenemos:

1. Valor de referencia (U_{ref})

IV.10 Respuesta del PI a cambios de viento con ciclo de trabajo óptimo

IV.10.a Esquema de conexión de la simulación

Para este ejercicio, se usarán los mismos diagramas mostrados en las Figuras Figura 34 y Figura 35 aplicando un cambio de velocidad de viento y el valor de la Tabla 8 del ciclo de trabajo.

IV.10.a.i Análisis de resultados

Se observará la respuesta en tiempo de la tensión en CD tras pasar el PBC multinivel, la tensión en CA en el punto de interconexión del VSC y la potencia entregada a la red

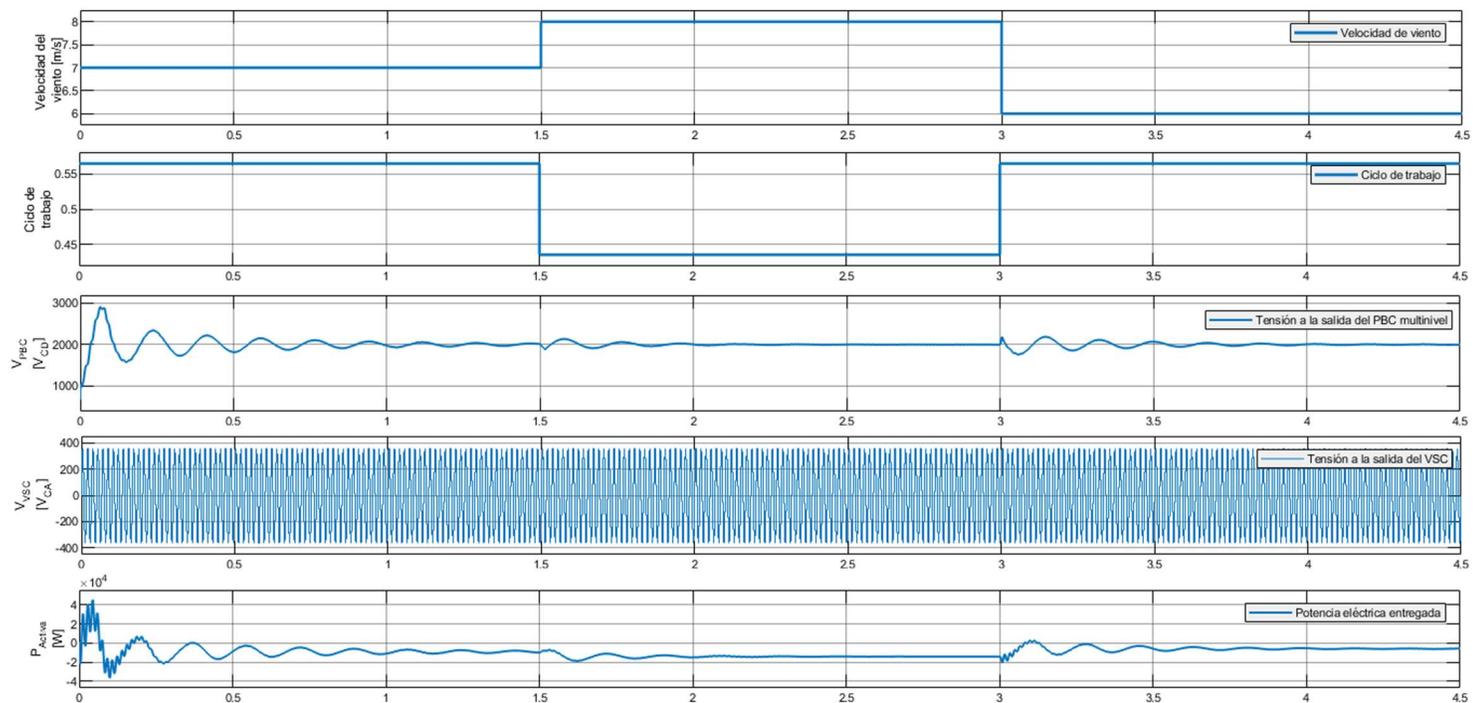


Figura 38.- Comportamiento de las variables eléctricas (Tensión en CA y CD y Potencia entregada).

De la Figura 38 se observa que ante los cambios de viento ocurridos cada 1.5 [s] en la simulación desde 7 a 8 y finalizando en 6 [m/s] la tensión en CD del PBC tiene perturbaciones en los instantes próximos al cambio del viento, siendo moderados dentro del tiempo de simulación con el control aplicado. Así mismo vemos que la tensión en CA se mantiene sin perturbaciones ante estos cambios, manteniendo la frecuencia y amplitud designada.

De parte de la potencia se observa que, a pesar de los cambios en viento, con la corrección del ciclo de trabajo se mantiene una posición de inyección de potencia activa al sistema.

Así mismo se observará como es que el control aplicado tiene efecto en la señal de la tensión de CA en el punto de interconexión.

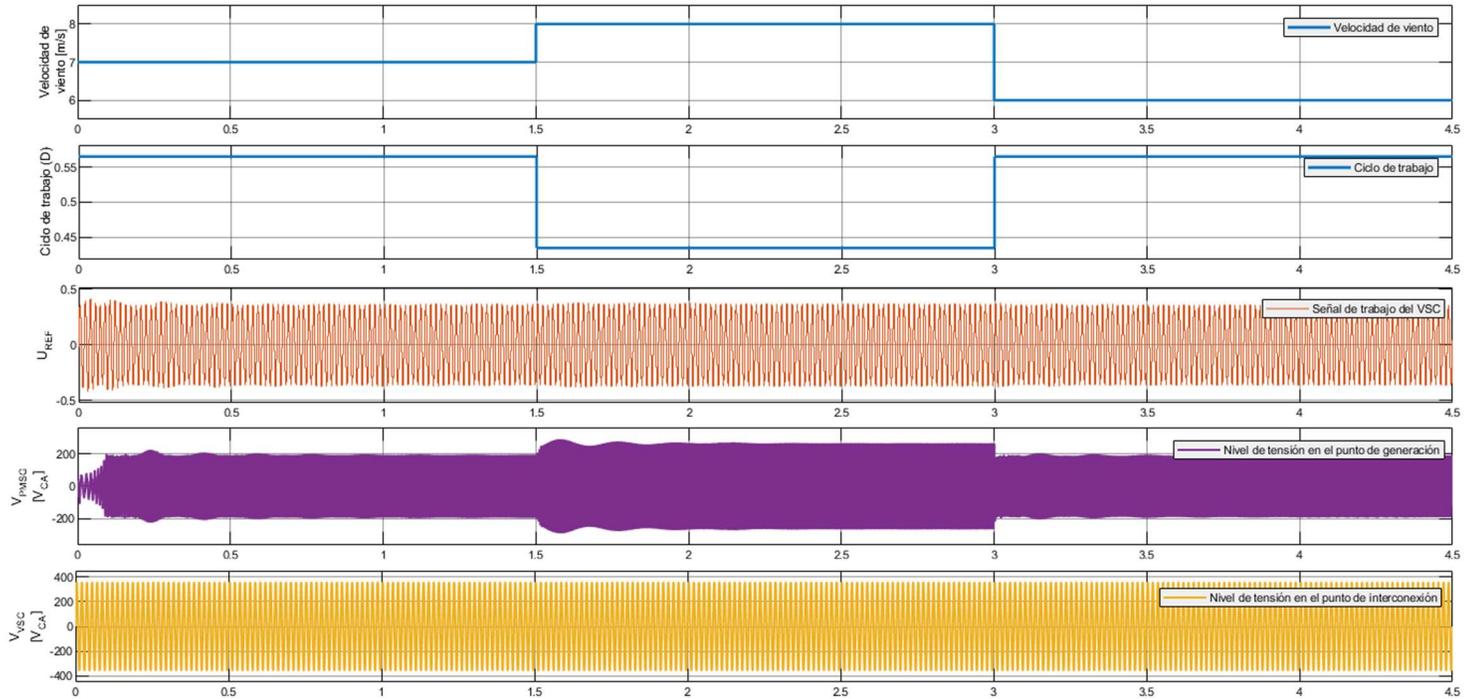


Figura 39.- Comportamiento de la tensión eléctrica en CA con cambios en viento y ciclo de trabajo.

En la Figura 39 se muestran cambios de velocidad de viento ocurridos cada 1.5 [s] en la simulación desde 7 a 8 y finalizando en 6 [m/s], teniendo entre estos un cambio en el ciclo de trabajo del PBC multinivel para mantener el MPPT, esto se observa en las tres últimas señales puesto que la señal de trabajo del VSC se mantiene sin perturbaciones ante los cambios del viento. Y a diferencia de la señal de tensión en CA en el punto de generación, en el punto de interconexión son imperceptibles los cambios efectuados en la velocidad de viento, teniendo una señal constante en amplitud y frecuencia, siendo estos valores importantes en términos de calidad de la energía.

IV.11 Conclusiones del capítulo

En este capítulo observamos como fue la interconexión de cada uno de los subsistemas vistos en el Capítulo III. Modelos matemáticos por etapas, destacando cada uno de sus parámetros y valores aplicados a los elementos que los conforman.

Se observó al sistema completo funcionando desde el punto de generación con el PMSG hasta el punto de interconexión con el VSC, así mismo se obtuvo la respuesta de algunas señales de interés como la potencia obtenida del aerogenerador, la tensión en los puntos de generación e interconexión así mismo la potencia eléctrica entregada a la red.

En las simulaciones se hicieron variaciones en la entrada del sistema, con cambios en la velocidad del viento simulado rondando valores óptimos para la simulación, aunque no reales, se observó que la salida de tensión presenta mejoría en términos de amplitud constante e invariaciones en la frecuencia siendo perceptible únicamente las variaciones del viento en la cantidad de potencia eléctrica entregada.

En términos de eficiencia se tuvieron resultados satisfactorios puesto que rondan en valores desde 94.5 hasta 86 %, que comparados con las máquinas DFIG que tienen una eficiencia un poco menor a 95% [10] , esta topología sí presenta una reducción en el uso de transformadores e interruptores de interconexión sin perder eficiencia.

V. Discusión, trabajos futuros y conclusiones.

V.1 Discusión

La información de este documento resulta de una compilación de distintos trabajos en materia de sistemas de generación eólica y sistemas de electrónica de potencia, abarcando las características mecánicas de los tipos de turbinas de viento hasta las características eléctricas de la máquina generadora y los sistemas de electrónica de potencia. Debido a la novedosa inclusión de la topología PBC multinivel es que encontrar referencias del uso de este ha sido un limitante por lo que se propondrá en la sección de trabajos futuros más estudios de este con la finalidad de verificar la validez y utilidad de este. Por otro lado, el manejo de las máquinas PMSG ha venido reemplazando el uso de la tecnología DFIG por lo que quedaría vigente este estudio por algunos años más hasta que se encuentre otra tecnología que lo venga a reemplazar.

Por otro lado, se observó que a diferencia de las técnicas usadas hasta el momento con respecto al uso de sistemas VSC para la generación es más que evidente, ya que en el caso de la Figura 39 si se usase un sistema de transformador elevador para la señal de salida del PMSG afectaría las características de calidad buscadas en los sistemas de potencia modernos. Si bien esta cualidad se asocia al control implementado, es observable que la implementación de estos sistemas promete ser una simplificación de los procesos necesarios para su implementación y uso, al no necesitar un sistema elevador tan voluminoso y costoso como un transformador, permitiría simplificar la construcción de los aerogeneradores como disminuir su costo notablemente permitiendo una permeabilidad mayor en el uso a baja escala.

V.2 Trabajos futuros

A continuación, se detallarán de manera breve algunos trabajos futuros que podrían desarrollarse para comprender mejor el comportamiento de esta topología en lo que comprende las redes eléctricas de potencia.

V.2.a Resonancia del conjunto

Debido a la naturaleza de las redes eléctricas su comportamiento inductivo podría llegar a presentar resonancia con el gran conjunto de capacitores usados en el PBC multinivel. Esto se cuestiona ya que en el desarrollo de este trabajo se encontraron zonas donde el sistema

a distintos ciclos de trabajo por más mínimos los cambios por una centésima por encima o por debajo de los límites definidos en la Figura 36 así como en la Tabla 8, hacían que se presentaran oscilaciones en la potencia y en la tensión, sin presentar variaciones en la velocidad de la turbina de viento o en la velocidad de operación del PMSG, siendo entonces fenómenos atribuibles a las características eléctricas de los elementos.

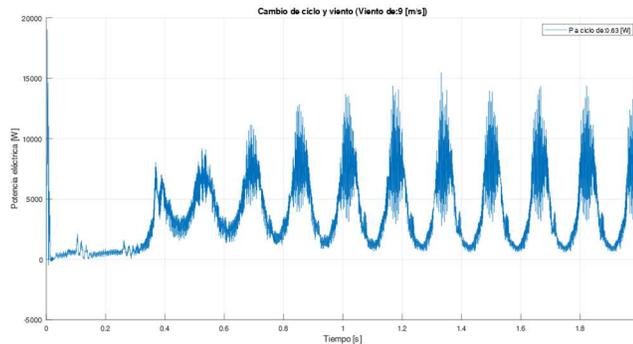


Figura 40.- Oscilaciones de la potencia activa a un ciclo de trabajo superior al establecido en la Tabla 8.

V.2.b Operación del conjunto como regulador de potencia reactiva

Así mismo se observó que la potencia reactiva en el punto de generación tenía un flujo hacía el PMSG, mientras que se seguía inyectando potencia activa a la red, ya sea por la cantidad de capacitores usados que estuviesen funcionando como capacitores de arranque o de marcha o por el comportamiento que este sistema tiene, puede llegar a suponer una técnica de control y mejora del FP ya que en el punto de interconexión se vio en una mínima medida inyección de potencia reactiva a la red.

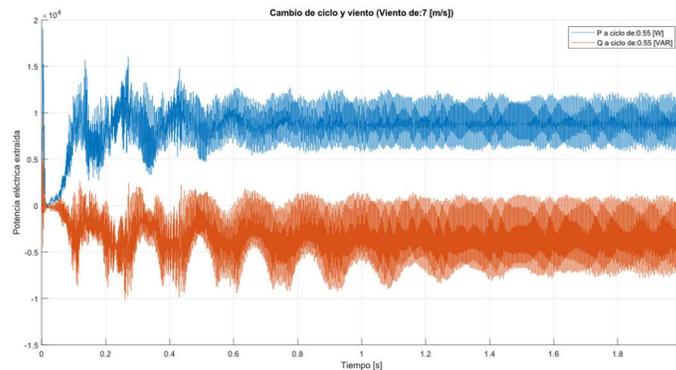


Figura 41.- Comportamiento del PMSG, potencia activa y reactiva.

V.2.c Evaluación del sistema ante fallas

Para la inclusión de novedosos sistemas en las redes eléctricas, es de gran importancia realizar todas las evaluaciones y estudios necesarios para garantizar la seguridad tanto de los usuarios como de los operadores de las redes, y tratándose este trabajo de un sistema de esas cualidades no es la excepción para ellos, dados los límites propuestos para este trabajo quedan pendientes el estudio de fallas como el de corto circuito, sobretensiones, entre otros.

V.3 Conclusiones

En esta tesis se implementó una topología de electrónica de potencia permitiendo la interconexión entre un sistema de generación eólica a la red eléctrica. En el primer capítulo se indagó sobre la situación actual de los sistemas de generación con el uso de aerogeneradores, sus principales características y sus tipos, demostrando que esta técnica sigue vigente y en auge, especialmente en dos rubros, la generación extraterritorial y la generación distribuida.

A lo largo del capítulo cuarto se desarrollaron simulaciones que conformaron esta tesis siendo posible desarrollarlas gracias a las paqueterías de software especializadas, el sistema fue sometido a diversos perfiles de viento modificando la dinámica del sistema de distintas formas, siendo estas las bases de las simulaciones.

- ❖ En la primera simulación, la operación del sistema turbina de viento con la máquina PMSG, se obtuvo el punto de operación óptimo con el uso de las curvas de viento usando aproximaciones físicas con el límite de Beltz y la eficiencia promedio del PMSG.
 - De este se obtuvieron las condiciones óptimas de trabajo, teniendo además una comprensión del comportamiento de las turbinas de viento y el uso de las curvas de viento que son usadas en el estudio de los sistemas de generación eólica.
- ❖ La segunda simulación conllevó una asimilación física del ciclo de trabajo usado en el PBC multinivel con una carga fija, esto para saber los límites mecánicos de la turbina de viento en cuestión de Torque mecánico extraído (T_m) y la velocidad de giro del rotor.

- En este ejercicio se pudo observar que, a mayor velocidad del viento, era posible extraer más potencia mecánica lo que provocaba que la potencia eléctrica pudiese suministrar cargas más grandes, y dada la configuración en paralelo de los sistemas de distribución este valor era cada vez menor.
 - Esta relación entre la potencia mecánica y la carga es por otro lado, totalmente contraria a la eficiencia, mientras más aumenta la velocidad del viento, disminuye la eficiencia, cosa que se debería apreciar en un sistema con carga simulada como lo es la topología empleada.
- ❖ La tercera simulación involucró los resultados del ejercicio previo al tratar de recrear las condiciones de trabajo mecánicas obtenidas relacionándolas a valores de ciclo de trabajo a distintas velocidades de viento.
- Se observó que a diferencia de una carga fija que al menor cambio de su valor provocaba una respuesta totalmente distinta, esta topología al usar un ciclo de trabajo, permitía manejar un intervalo en el cuál la respuesta del sistema era igual en la extracción de potencia eléctrica y en su eficiencia.
 - También se observó que la eficiencia decaía en un rango de aproximadamente 8.3% para esta topología siendo la máxima 94.5% y la mínima 86.18%, mientras que para una carga fija esta tenía un rango de 0.53% desde 98.38% hasta 97.85%.
- ❖ La cuarta simulación conllevó la prueba del sistema de control en materia de asegurar que el VSC mantuviera ante perturbaciones de viento, los niveles de tensión en los valores predefinidos.
- Se observó que ante aumentos en la velocidad del viento la señal en CA a la salida del PMSG tenía cambios en magnitud de alrededor de un 10 % por cada 1 [m/s]. Mientras que a cambios que reduzcan la velocidad, no se mostraba mayor cambio que un retorno a la tensión nominal del equipo.
 - Se registró en la Figura 38 que la señal en CD ante disturbios de viento registraba cambios inmediatos (gráfica 3 de 5, arriba abajo), siendo estos controlados en los próximos 0.5 [s] al evento. Sin embargo, estos cambios no

presentaron fluctuaciones en la señal de salida del VSC (gráfica 4 de 5, de arriba abajo).

- En la Figura 39 podemos percatar que la señal de control (U_{ref}) varía con los cambios en viento en mínimas proporciones, manteniéndose por debajo de 0.5, indicando que cambios de más de 2 [m/s] tienen cabida en los parámetros de trabajo del VSC y su control asociado.
- Por otro lado, hablando de la frecuencia manejada, se observa que a la salida del PMSG, la frecuencia varía con cada cambio de parámetros, en contraparte, a la salida del VSC se mantiene en valores nominales a pesar de las circunstancias de trabajo.

En términos generales se puede afirmar que las condiciones de las redes eléctricas de potencia pueden asegurarse ya que en materia de:

- Eficiencia
 - En cuanto a la eficiencia los valores obtenidos en este trabajo, la eficiencia se mantuvo siempre por encima de 86%, por lo que a diferencia de los equipos usados hasta el momento que usan transformadores elevadores con eficiencias mayores al 95%, es cierto que hay una gran diferencia que puede ser discutida en su punto de aplicación.
- Confiabilidad
 - Es sabido que las tecnologías renovables son poco confiables, sin embargo, observamos que, a velocidades bajas del viento, que son las predominantes en el ambiente, el sistema continúa entregando potencia por lo que se mantiene como otro punto a discusión.
- Seguridad
 - Como se explicaba en la sección de trabajos futuros, es necesario realizar pruebas del sistema ante fallas.
- Continuidad
 - En el trabajo presentado quedo evidente que el sistema puede sobrepasar cambios en las condiciones de trabajo con una respuesta aceptable en términos de calidad de la energía.

- Calidad
 - Se mantuvieron valores nominales de tensión y frecuencia, además el factor de potencia es cercano a la unidad tras pasar el sistema ya que no inyecta potencia reactiva y la inclusión de armónicos es mínima.

V.4 Aportaciones a la comunidad

Tras los análisis presentados en este trabajo, es factible el deducir que esta topología puede presentar una oportunidad para todos aquellos usuarios que quieran acceder a su derecho del uso de fuentes de energía eléctrica limpias y renovables, ya que esta topología al no necesitar de un transformador o mecanismos de interconexión permite disminuir severamente el volumen del equipo en su totalidad.

Además, gracias a los avances en los procesos de fabricación de los dispositivos electrónicos usados en esta topología puede significar un ahorro en los procesos de fabricación de las instalaciones planteadas en este trabajo haciendo asequible que poblaciones remotas con necesidades eléctricas que no sean factibles técnica o económicamente para las compañías eléctricas, puedan acceder a estos y satisfacer o complementar las necesidades energéticas que éstas requiriesen.

Así mismo, quedaría pendiente saber a ciencia cierta todas las capacidades que se le puedan dar a este equipo ya que no debe quedarse solo con la idea de que, al ser una idea tratada hasta ahora para equipos de baja potencia, no pueda implementarse a sistemas de generación a gran escala. También es posible que las tendencias energéticas cambien y este pueda cumplir un rol de apoyo a otras tecnologías en desarrollo como el hidrógeno verde.

VI. Bibliografía

- [1] Global Wind Energy Council, «Global Offshore Wind Report,» GWEC, Bruselas, 2020.
- [2] D. C.-G. E. M.-G. G. A. Olimpio Anaya-Lara, *Offshore Wind Energy Generation, Control, Protection and Integration to Electrical Systems*, Wiley, 2014.
- [3] ABB, Cuaderno de aplicaciones técnicas nº12 Plantas Eólicas, Barcelona: ABB, 2012.
- [4] S. Chakraborty, M. G. Simoes y W. E. Kramer, *Power Electronics for Renewable and Distributed Energy Systems*, Londres: Springer, 2013, p. 610.
- [5] M. P. Martín, *SISTEMA DE CONVERSIÓN ELECTROMECAÁNICA DE ALTA POTENCIA ESPECÍFICA PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA DE ORIGEN RENOVABLE*, Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2011.
- [6] E. L. M.-G. V. V. R. L. E. U. a. N. M. S.-H. Juan Ramón Rodríguez, «Step-up Transformerless Seven-level DC-AC Hybrid Topology for Interconnection of Renewable-based DC Sources to Microgrids,» 2014.
- [7] ALL ABOUT CIRCUITS, «How the Boost PFC Converter Circuit Improves Power Quality,» 16 Diciembre 2016. [En línea]. Available: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/how-the-boost-pfc-converter-circuit-improves-power-quality/>. [Último acceso: 25 Marzo 2021].
- [8] J. R. R.-R. , E. L. M.-G. V. V.-R. y. N. S.-H. Mario A. Santoyo-Anaya, «Current-Sensorless VSC-PFC Rectifier Control With Enhance Response to Dynamic and Sag Conditions Using a Single PI Loop,» *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, vol. 33, nº 7, pp. 6403-6415, 2018.

- [9] J. R. Rodriguez Rodriguez, G. E. Mejía Ruiz, M. R. Arrieta Paternina, S. H. Nadia Maria , M. A. Santoyo Anaya y A. Zamora Mendez, «A Single-Loop and Current-Sensorless Control for On-Grid Seven-Level Microinverter,» IEEE, Ciudad de México, 2022.
- [10] M. Kamal Elshaer y S. Karem Saeed, «Increasing Wind Turbine Efficiency Ussing Doubly-Fed Induction Generator,» IJTEEE, CAiro, 2015.
- [11] P. G. J. Correa-Henao, «DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN CONTROL PARA UN AEROGENERADOR SINCRÓNICO DE IMANES PERMANENTES (PMSG),» n° 22, pp. 11-22, 2014.
- [12] M. E. Zarei, Model Predictive Control (MPC) for the Power Converters for Renewable Energy Generation Systems with Switch Fault Tolerance Capability, Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2019, p. 247.
- [13] I. K. Geoff Klempner, Handbook of Large Turbo-Generator Operation and Maintenance, Hoboken, New Jersey: IEEE, 2008, p. 829.
- [14] E. Rodríguez S., Obtención de la curva de potencia de un aerogenerador de 2MW, mediante un modelo CFD, para el pronostico de generación, Cuernavaca: Universidad Autónoma del Estado de Morelos, 2019.
- [15] Infineon, «PFC boost converter design guide,» Infineon, 2016.

VII. Anexos

VII.1 Respuesta del PMSG con cambio del torque mecánico de entrada.

De la Figura 30 observamos que a la velocidad nominal de la turbina de viento (6[m/s]), no se alcanza el torque mecánico de salida nominal al que trabaja el PMSG (41.4 [Nm]), es hasta los 7[m/s] que se roza este punto, por lo que es deseable trabajar en velocidades en al menos 1 [m/s] superiores a la nominal para una condición de trabajo cercana a la óptima. También se observa una relación entre el aumento de la velocidad del viento con un aumento en el torque mecánico de salida.

La potencia mecánica extraíble a una velocidad de viento nominal equivale a:

$$P_{extraíble} = T_m v_{giro} = 29.7764 [Nm] \left(200.6 \left[\frac{rad}{s} \right] \right) = 5,973.146 [W] \quad (22)$$

A una velocidad de 7 [m/s] que es cuando se tiene el torque nominal, la potencia mecánica extraíble es:

$$P_{extraíble} = T_m v_{giro} = 40.53 [Nm] \left(234 \left[\frac{rad}{s} \right] \right) = 9,484.02 [W] \quad (23)$$

Mientras que a una velocidad de viento de 12 [m/s] la máxima potencia mecánica equivale a:

$$P_{extraíble} = T_m v_{giro} = 119.1 [Nm] \left(401.1 \left[\frac{rad}{s} \right] \right) = 47,771.01 [W] \quad (24)$$

Como se mostrará en la Figura 42 un aumento en la potencia mecánica aplicada al PMSG no representa un cambio en cuanto a la potencia eléctrica que se pueda extraer sino todo lo contrario, puede significar una baja de la eficiencia de la máquina.

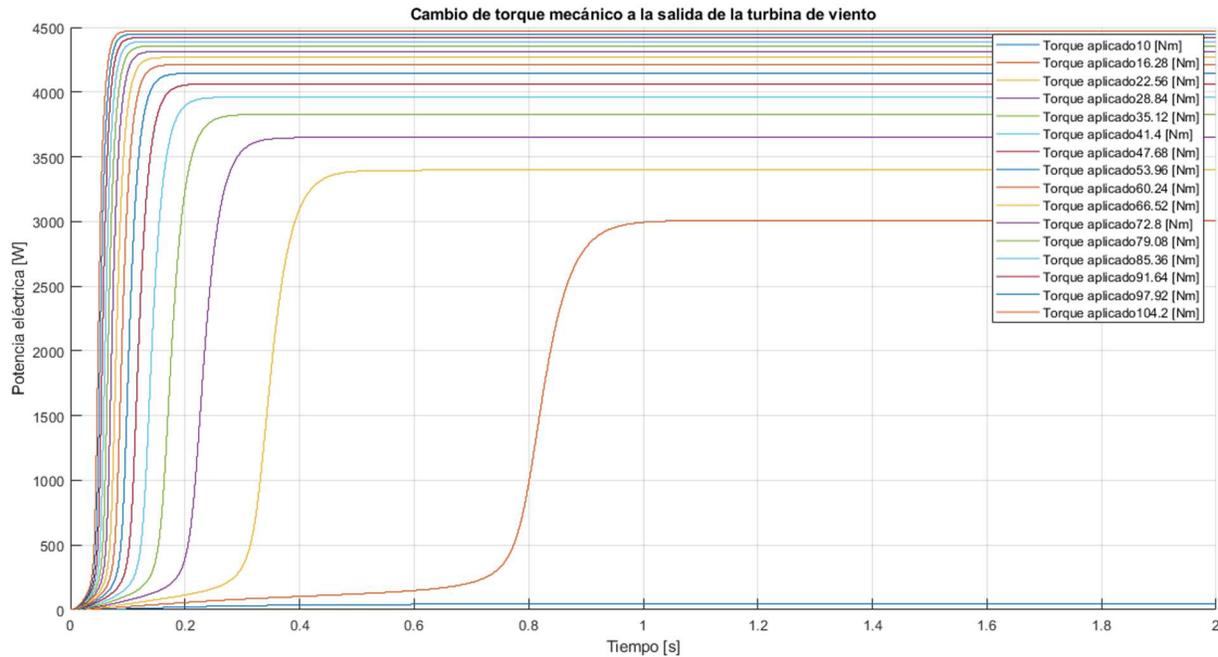


Figura 42.- Potencia eléctrica con un cambio de torque mecánico aplicado al PMSG.⁷

⁷ Este gráfico se hizo con una carga (30 [Ω]) y velocidad de viento fija ($7 \left[\frac{m}{s} \right]$), variando únicamente el torque aplicado al PMSG, comprobando que no importa la potencia mecánica aplicada, la potencia eléctrica de salida está limitada por la máquina usada.