



**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 (N)**

Emilio de Jesús Rojas Hernández

He Wu Hui

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Juan Ramón Rodríguez Rodríguez



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



## 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*

## 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 de interconexión, 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.

# Índice de contenidos

---

Índice de figuras.....	vi
Índice de tablas.....	viii
Acrónimos y simbología.....	ix
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
I. Estado del arte.....	7
I.1) Electrónica de Potencia y Energías Renovables.....	7
I.2) Tipos de Turbinas de Viento.....	10
Sistemas DFIG.....	12
Sistemas PMSG.....	14
I.3) Convertidor Boost PFC.....	17
I.4) Convertidor CD/CD Boost Multinivel.....	20
I.5) Convertidor VSC Trifásico.....	24
I.6) Análisis de topologías en el estado del arte.....	26
II. Modelos matemáticos por etapas.....	27
II.1) Unidad de Generación.....	27

Máquina PMSG.....	27
Eficiencia del PMSG.....	28
II.2) Turbina de Viento.....	29
Perfil mecánico de las aspas.....	29
Eficiencia de la turbina de viento.....	29
II.3) Topologías Empleadas.....	30
Convertidor CD/CD Boost Multinivel. [6].....	30
Convertidor Boost multinivel PFC.....	33
VSC PFC trifásico [8].....	34
III. Simulación.....	36
III.1) Especificaciones de los bloques en MATLAB.....	36
III.2) Seguimiento del punto de máxima potencia de la turbina (MPPT).....	46
Análisis de variables del MPPT.....	46
Carga máxima del sistema.....	48
Ciclo de trabajo óptimo.....	50
III.3) Control aplicado a las variables eléctricas (Tensión en CD y en CA y Potencia entregada).....	53
Respuesta del PI a cambios de viento con ciclo de trabajo óptimo.....	54
IV. Conclusiones y trabajos futuros.....	57
IV.1) Discusión.....	57
IV.2) Trabajos futuros.....	57
Resonancia del conjunto.....	57
Operación del conjunto como regulador de potencia reactiva.....	58
Evaluación del sistema ante fallas.....	58
IV.3) Conclusiones.....	59

Bibliografía.....	62
Anexos.....	64
Respuesta del PMSG con cambio del torque mecánico de entrada.....	64

# Índice de figuras

Figura 1 Modelo general de la topología empleada .....	3
Figura 2 Configuración de control y potencia de un parque eólico .....	8
Figura 3 Curva de potencia ideal de un aerogenerador [3] .....	9
Figura 4 Curva de potencia genérica de los aerogeneradores [3] .....	10
Figura 5 Clasificación por tipo de estructura a) Savonius b) Darrieus c) Híbridos [3].....	11
Figura 6 Clasificación por dirección del viento a) Barlovento b) Sotavento [3] .....	11
Figura 7 Sistema general de una turbina de viento.....	12
Figura 8 Esquema de funcionamiento de una máquina DFIG.....	13
Figura 9 Vista transversal de los tipos de rotores acorde a su geometría de imanes a) imanes superficiales, b) imanes interiores, c) imanes incrustados. [4].....	16
Figura 10 Factor de potencia unitario, tensión de entrada y corriente de salida en fase .....	18
Figura 11 PFC activo.....	19
Figura 12 Topología del Boost Multinivel.....	21
Figura 13 Funcionamiento del Boost Multinivel.....	23
Figura 14 Tipos de Convertidores de Fuente Variable (VSC).....	25
Figura 15 Modulación PWM .....	25
Figura 16 Esquema de conexión del PMSG y el rectificador de onda completa.....	27
Figura 17 Perfil mecánico de las aspas de viento de un aerogenerador. [3] .....	29
Figura 18 Topología interna del convertidor Boost multinivel.....	31
Figura 19 Esquema del VSC PFC trifásico. ....	34
Figura 20 Bloque utilizado en el software de simulación SIMULINK para la turbina de viento. ....	36
Figura 21 Diagrama de conexión de la turbina de viento.....	37
Figura 22 Características de la turbina de viento.....	38
Figura 23 Diagrama de conexión del PMSG.....	39
Figura 24 Modelo y características del PMSG (Pestaña configuración).....	39
Figura 25 Modelo y características del PMSG (Pestaña parámetros) .....	40
Figura 26 Esquema de conexión del puente de diodos.....	41
Figura 27 Esquema de conexión del convertidor Boost multinivel.....	42

Figura 28 Esquema de conexión del VSC.....	44
Figura 29 Parámetros del bloque VSC.....	44
Figura 30 Esquema de conexión del nodo de red y la VSC.....	45
Figura 31 Parámetros del nodo de interconexión a la red.....	46
Figura 32 MPPT del conjunto turbina-generator, considerando un cambio de velocidad del viento.....	47
Figura 33 Esquema de conexión del experimento, carga máxima.....	48
Figura 34 Eficiencia del PMSG, con condiciones de carga máxima en $[\Omega]$ .....	49
Figura 35 Respuesta gráfica del PMSG al cambio de carga.....	50
Figura 36 Diagrama de conexión de la red, VSC y salida del subsistema de la Figura 37.....	51
Figura 37 Subsistema de conexión turbina de viento, PMSG y PBC.....	51
Figura 38 Eficiencia del PMSG, con condiciones de ciclo de trabajo.....	52
Figura 39 Esquema de control detallado.....	53
Figura 40 Comportamiento de las variables eléctricas (Tensión en CA y CD y Potencia entregada).....	54
Figura 41 Comportamiento de la tensión eléctrica en CA con cambios en viento y ciclo de trabajo.....	55
Figura 42 Oscilaciones de la potencia activa a un ciclo de trabajo superior al establecido en la Tabla 8.....	58
Figura 43 Comportamiento del PMSG, potencia activa y reactiva.....	58
Figura 44 Potencia eléctrica con un cambio de torque mecánico aplicado al PMSG.....	65

# Índice de tablas

Tabla 1 Comparativo empírico del material magnético .....	14
Tabla 2 Comparativo técnico de los tipos de excitación del rotor [5].....	17
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 Hz<sup>1</sup>.

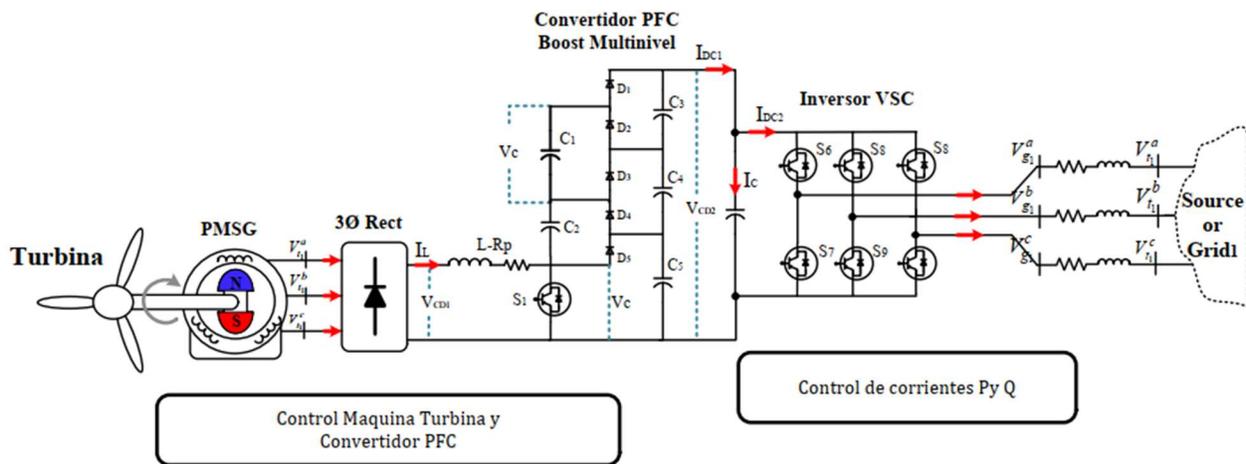


Figura 1 Modelo general de la topología empleada.

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

c

##### ➤ Objetivos generales

- 1) Estudiar el funcionamiento y puesta en marcha óptimo de la máquina PMSG.

<sup>1</sup> 60 Hz es la frecuencia de trabajo en los sistemas eléctricos de CA en México.

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

➤ **Objetivos técnicos**

- 1) Reducir el número de interruptores en el proceso de interconexión.
- 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 voltaje en ellos, este elemento será capaz de aumentar un voltaje de entrada. Posteriormente con el manejo de una señal PWM y un VCS 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.

- Experimentación

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.

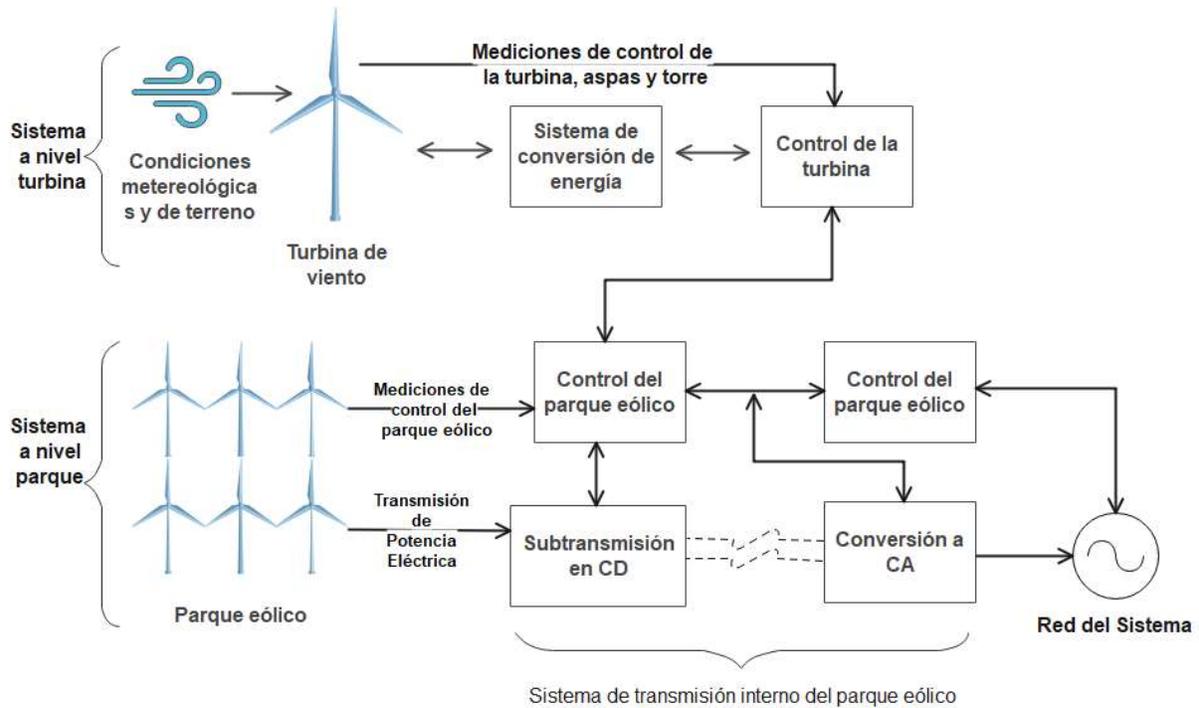
# I. Estado del arte

## I.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 Curva de potencia ideal de un aerogenerador se observan curvas que describen distintos tipos de aerogeneradores, dependiendo su diseño.

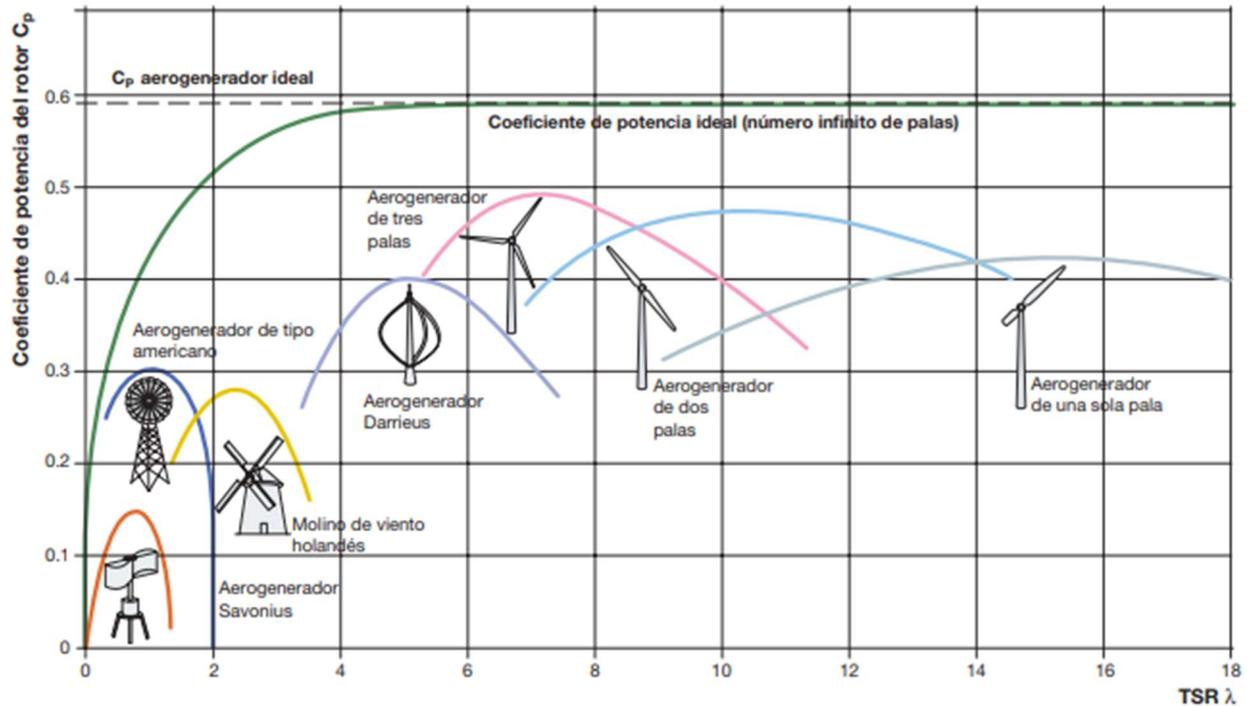


Figura 3 Curva de potencia ideal de un aerogenerador [3]

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 de ingeniería y las restricciones de seguridad.

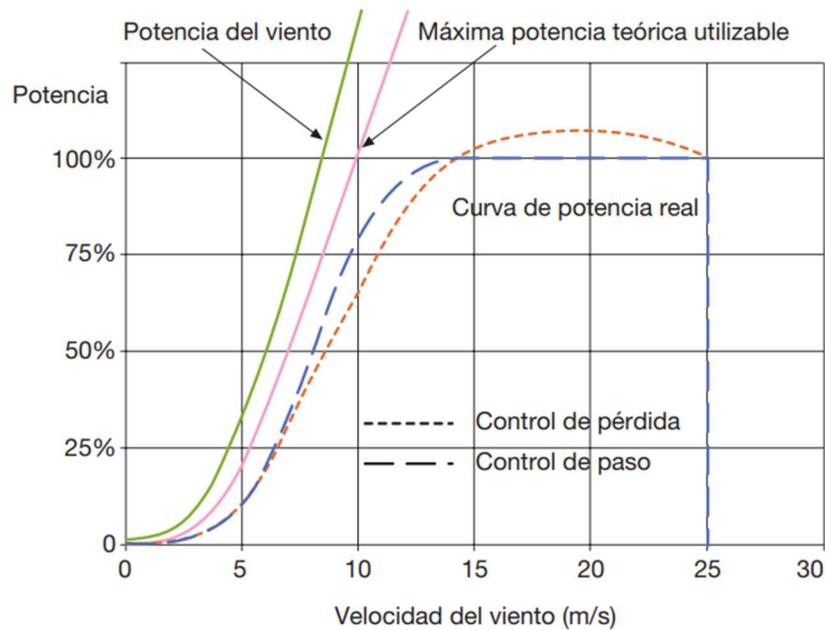


Figura 4 Curva de potencia genérica de los aerogeneradores [3]

## I.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:

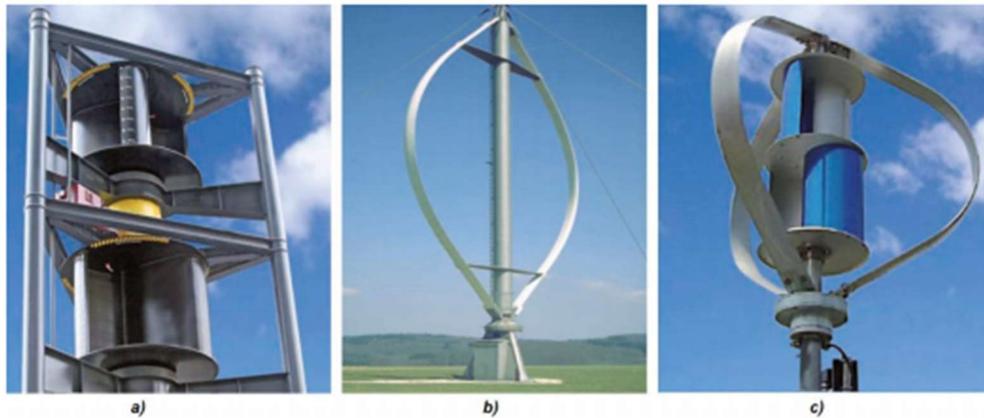
- Turbina de viento de eje vertical (VAWT).
- Aerogeneradores de eje horizontal (HAWT).

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.

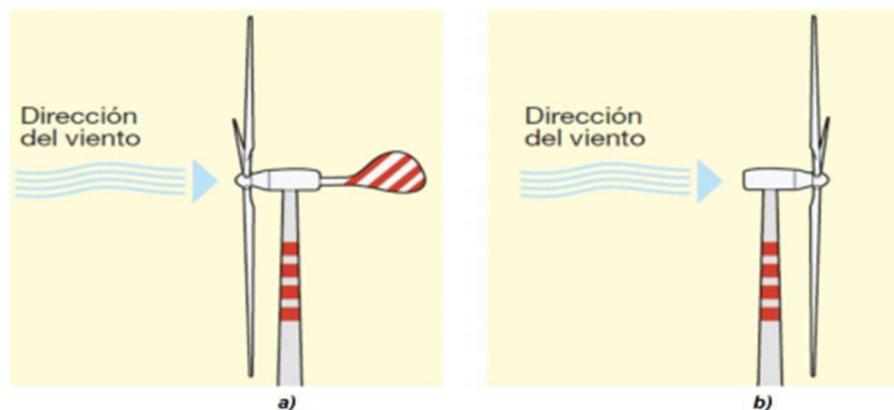


*Figura 5 Clasificación por tipo de estructura*

*a) Savonius b) Darrieus c) Híbridos [3]*

Y los generadores de eje horizontal, se catalogan según la dirección del viento:

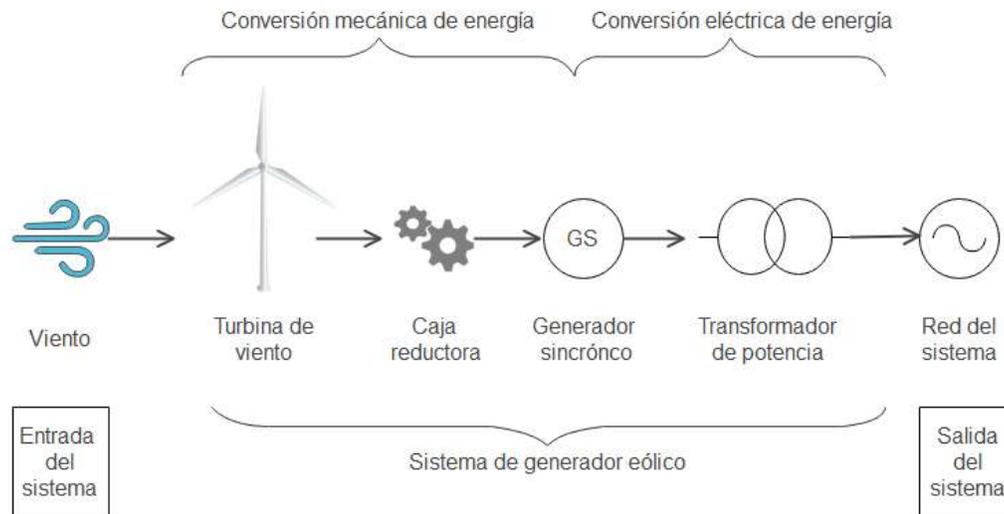
- Barlovento: El aerogenerador se ubica de cara al viento, obteniendo mayor eficiencia.
- Sotavento: El aerogenerador se ubica de espalda al viento, teniendo menor eficiencia, además de no alinearse automáticamente con relación al viento, necesitando implementar un sistema de orientación.



*Figura 6 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.



*Figura 7 Sistema general de una turbina de viento*

### Sistemas DFIG

- En los sistemas de generación eléctrica a base del aprovechamiento del viento, 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.

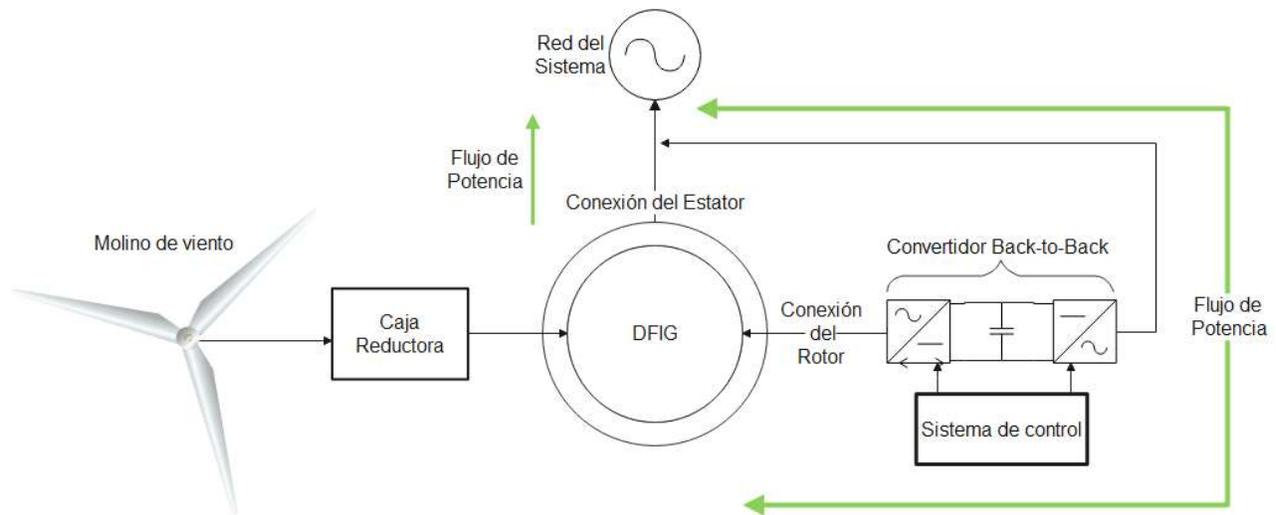


Figura 8 Esquema de funcionamiento de una máquina DFIG

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]

### Sistemas PMSG

Un generador síncrono de imanes permanentes se caracteriza por tener el bobinado de excitación sustituido por un sistema formado por imanes permanentes que suministran un campo de excitación constante. Estos se diseñan normalmente para girar a una velocidad de entre 1000 a 1700 rpm, con lo que se consigue un funcionamiento adecuado y una eficiencia razonable.

*Tabla 1 Comparativo empírico del material magnético*

<b>MATERIAL DEL IMÁN PERMANENTE</b>	<b>MAGNETISMO REMANENTE (B<sub>R</sub>)</b>	<b>EXCITACIÓN COERCITIVA (H<sub>C</sub>)</b>	<b>DESEMPEÑO</b>
<b>ALNICO (ALNICO)</b>	Alto	Bajo	Excelente resistencia mecánica
<b>FERRITA</b>	Bajo	Medio	Frágil
<b>NEODIMIO (NDFEB)</b>	Alto	Alto	Excelente rendimiento
<b>TIERRAS RARAS (SAMARIO- COBALTO)</b>	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.

- 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]

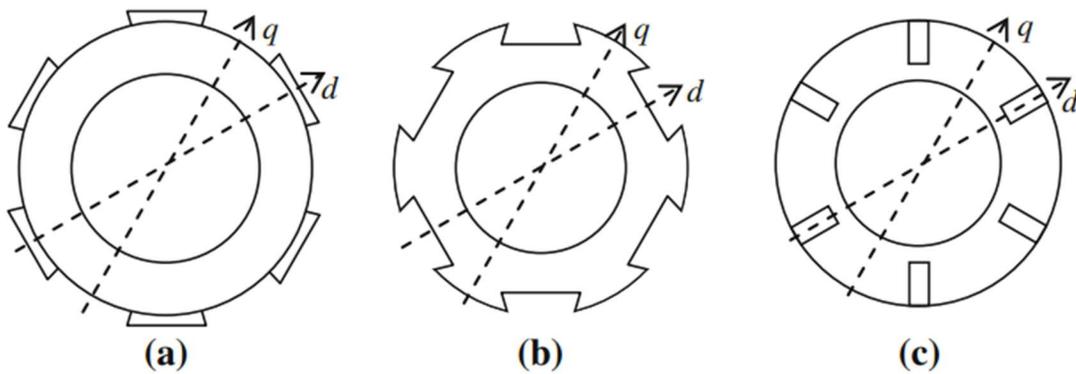


Figura 9 Vista transversal de los tipos de rotores acorde a su geometría de imanes  
a) imanes superficiales, b) imanes interiores, c) imanes incrustados. [4]

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.	-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	-Incrementa la eficiencia al eliminar parte de las pérdidas eléctricas -Rotores ligeros, dependiendo económicamente del material magnético utilizado. -Permiten pasos polares pequeños.	-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.

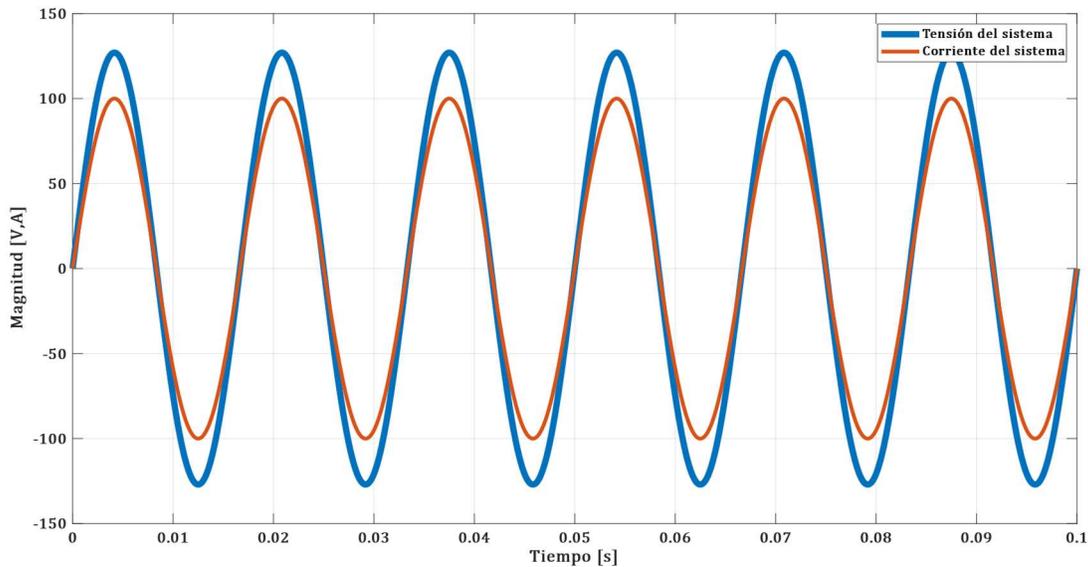
### I.3) Convertidor Boost PFC

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 la unidad, como se muestra en la Figura 10.



*Figura 10 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 11.

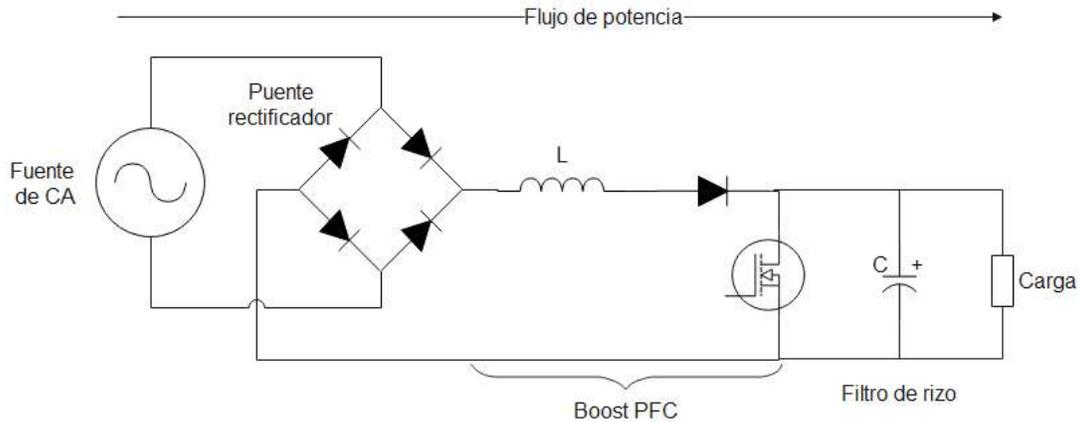


Figura 11 PFC activo

Debido a la posición en la que se encuentra el inductor no se experimentaran 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.

Existe 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.

#### I.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 12, observando a detalle se visualiza que esta topología del Boost multinivel internamente incluye un PFC.

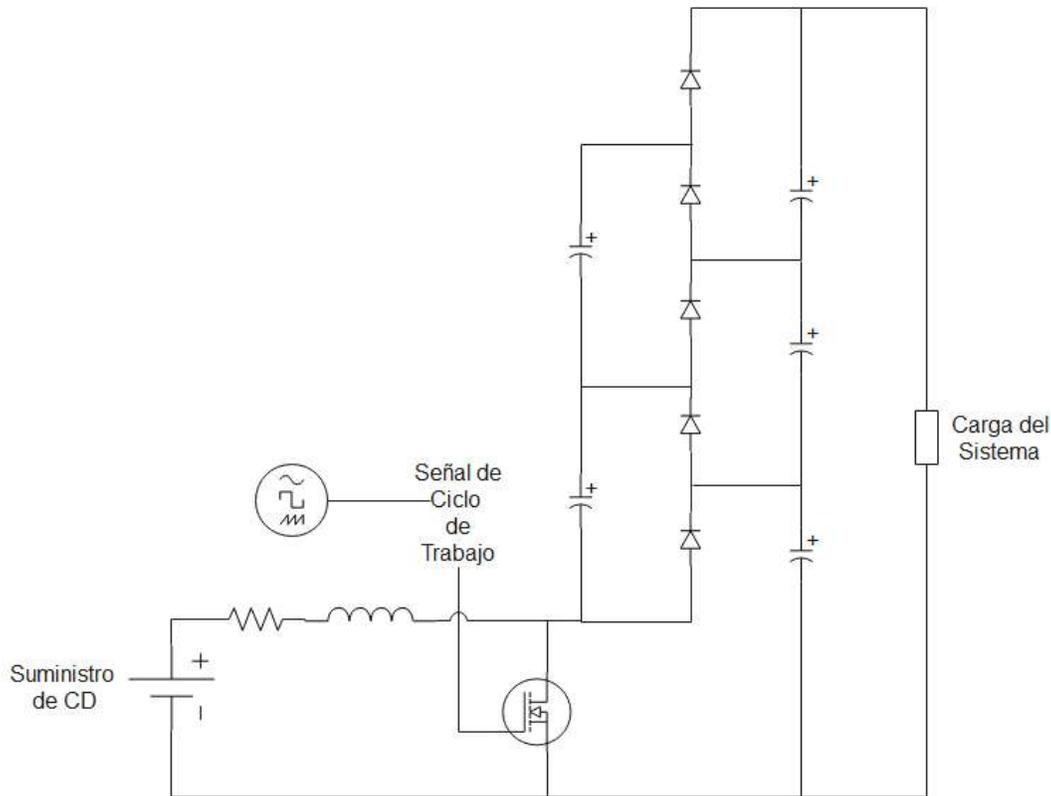


Figura 12 Topología del Boost Multinivel

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)

$\tau$ : 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 13.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 13.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 13.c. De manera similar, C3, C5 y C7 sujetan el voltaje a través de C2, C4 y C6 como se aprecia en la Figura 13.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 13.a. Cuando D7 se cierra, C6 y el voltaje e  $V_{in}$  más el voltaje del inductor bloquean el voltaje a través de C5 y C7 a través de D5, Figura 13.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 13.c.

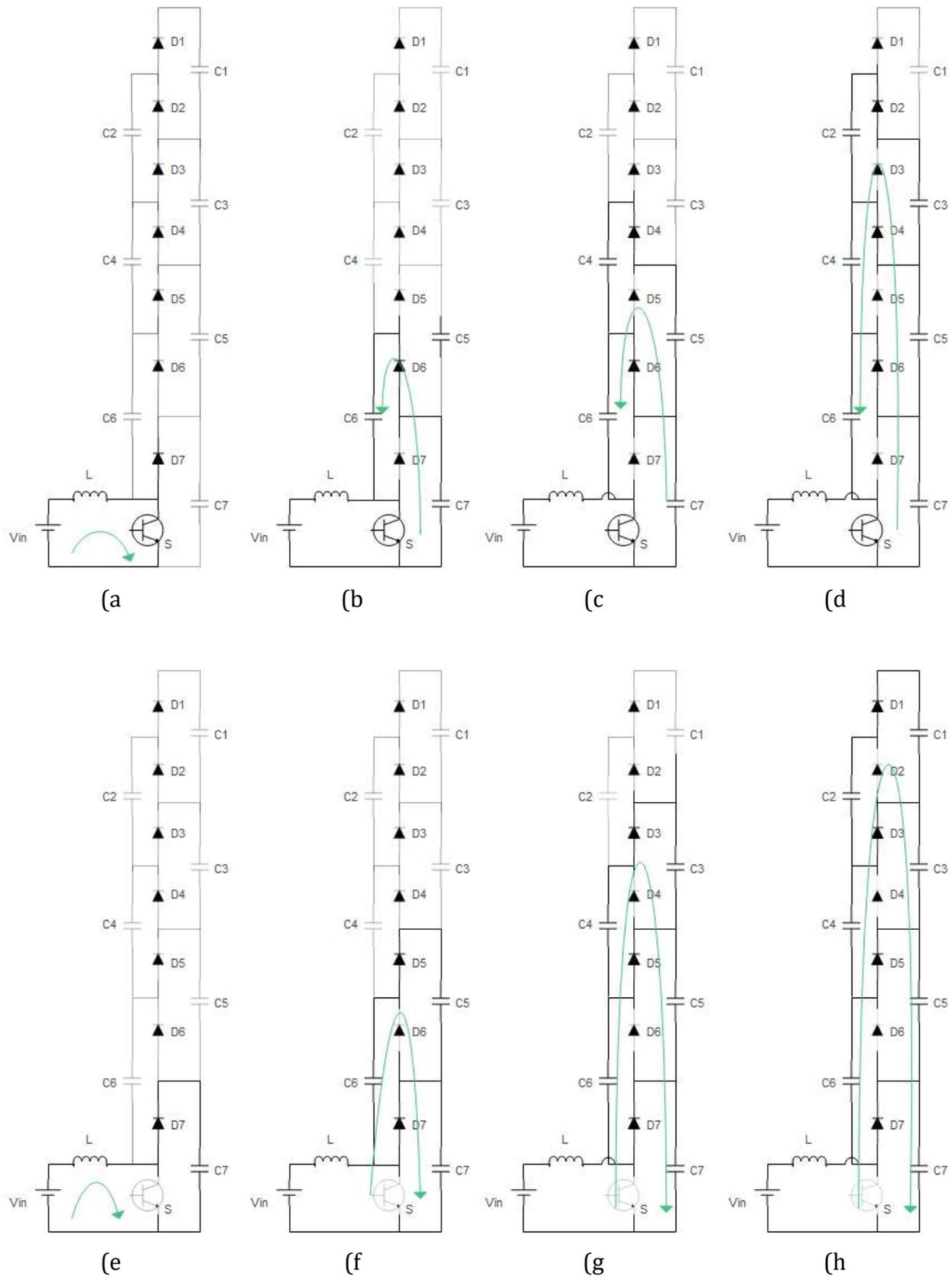


Figura 13 Funcionamiento del Boost Multinivel

### I.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 utilizados hoy en día para la transmisión de CC, los convertidores VSC de dos niveles, en la Figura 14.a, y los convertidores con tres niveles de conmutación, se muestra en la Figura 14.b.

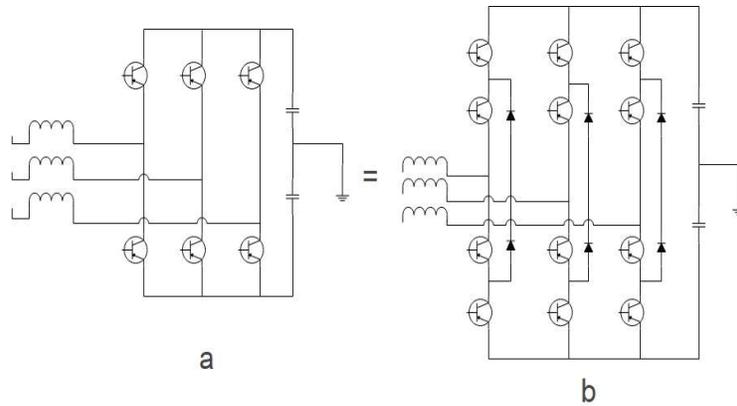


Figura 14 Tipos de Convertidores de Fuente Variable (VSC)

El primer VSC modelado es un convertidor de fuente de tensión de dos niveles. Cada tramo de fase consta de dos interruptores que se conectan y desconectan para controlar la tensión de salida. La salida se conecta al punto medio de la pata de 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.

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.

El sistema VSC se basa en la técnica PWM auto conmutada, como se observa en la Figura 15.

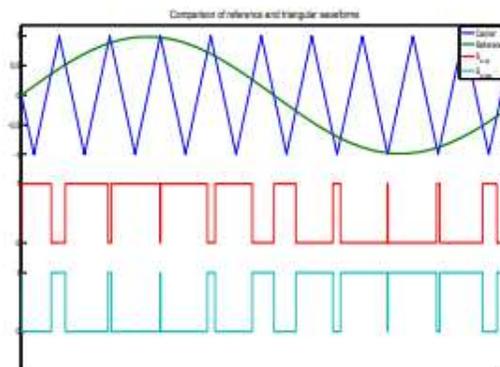


Figura 15 Modulación PWM

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.

#### 1.6) 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 VS, 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.

## II. Modelos matemáticos por etapas

### II.1) Unidad de Generación

#### Máquina PMSG

El modo 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.

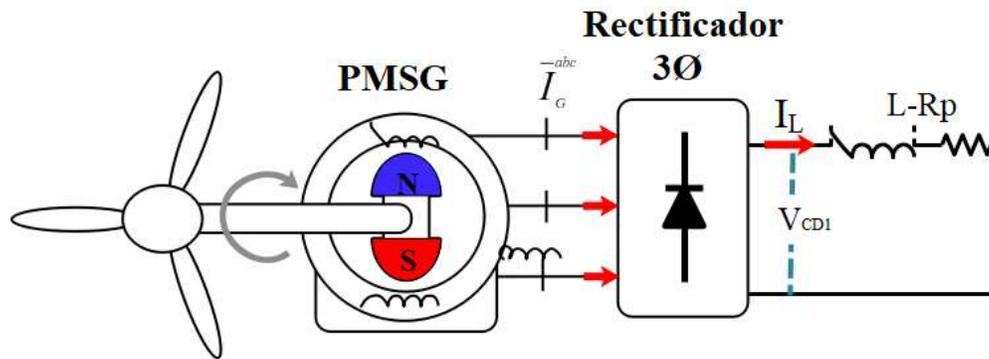


Figura 16 Esquema de conexión del PMSG y el rectificador de onda completa.

Para el modelado del PMSG<sup>2</sup> se usó un modelo de segundo orden con el uso del marco de referencia dq (directo-cuadratura), como se muestra a continuación:

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

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

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

Donde:

$L_q, L_d$  → Inductancias del eje de cuadratura y directo, respectivamente.

<sup>2</sup> Ecuaciones características extraídas del modelo usado en el software MATLAB – SIMULINK.

- $R$  → 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.  
 $\omega_m$  → Velocidad angular del rotor.  
 $\lambda$  → 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  $\theta_e$  representa el ángulo eléctrico.

### Eficiencia del PMSG

La eficiencia ( $\eta$ ) 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 ( $\tau_{ent}$ ) [Nm] por la velocidad angular ( $\omega_m$ )  $\left[\frac{rad}{s}\right]$ , como se muestra a continuación:

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

Y la potencia de salida ( $P_{el\acute{e}ctrica}$ ) [W] se obtiene del producto de la tensi3n de fase ( $V_F$ ) [V] por su corriente de l3nea ( $I_L$ ) [A] por el f.p. dado por el coseno del 3ngulo existente entre estos, como se muestra a continuaci3n:

$$P_{el\acute{e}ctrica} = V_F * I_L * \cos(\theta) = \sqrt{3} * V_L * I_L * \cos(\theta) \quad (8)$$

## II.2) Turbina de Viento

### Perfil mec3nico de las aspas

En las turbinas de viento, la generaci3n el3ctrica es gobernada por la cantidad de viento que pasa por medio de las aspas, 3stas est3n dise1adas 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 aceler3ndolo hasta una velocidad adecuada. [2]

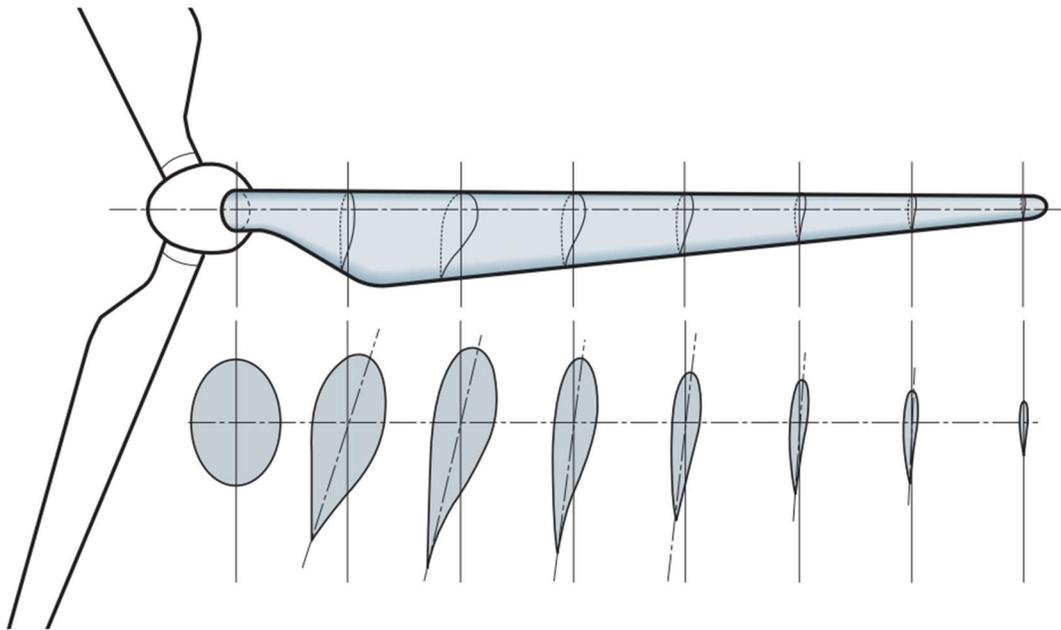


Figura 17 Perfil mec3nico de las aspas de viento de un aerogenerador. [3]

### Eficiencia de la turbina de viento

La energ3a cin3tica del viento que pasa por el 3rea aprovechable que cubren las aspas se puede aproximar con el uso de la siguiente expresi3n:

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

De la expresión anterior se tiene que la densidad del aire está dada por  $\rho$ ,  $A$  es el área que cubren las aspas y se da en  $[m^2]$  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.

### II.3) Topologías Empleadas

#### 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 18. Este convertidor es controlado por una señal PWM teniendo a su vez la capacidad de equilibrar automáticamente su nivel de tensión.

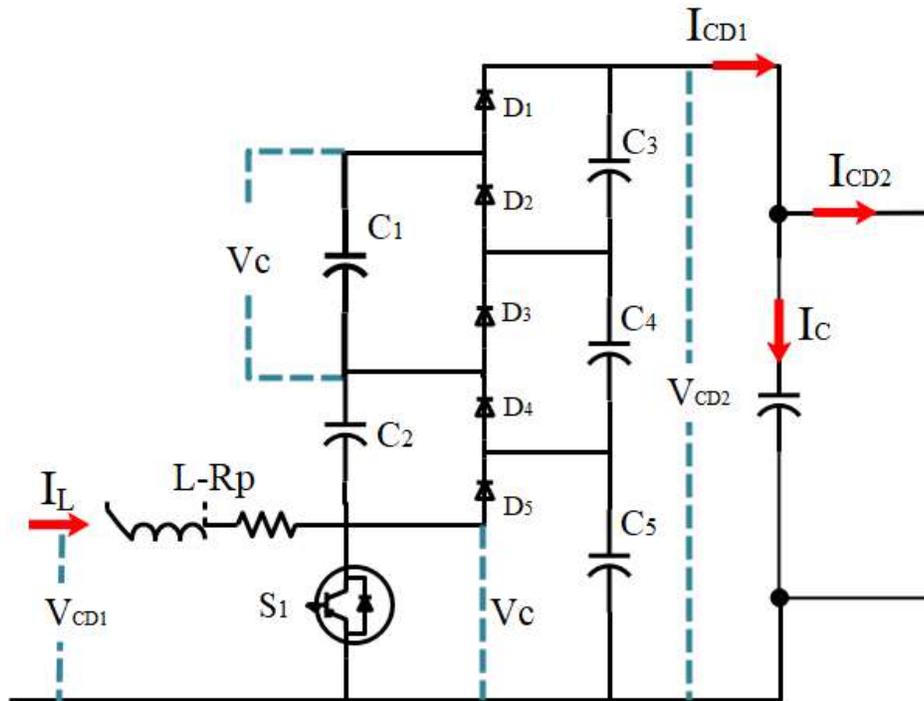


Figura 18 Topología interna del convertidor Boost multinivel.

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 ( $I_{CD1}$ ) 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:

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

### Convertidor Boost multinivel PFC

En el punto I.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.

### VSC PFC trifásico [8]

En la Figura 19 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.

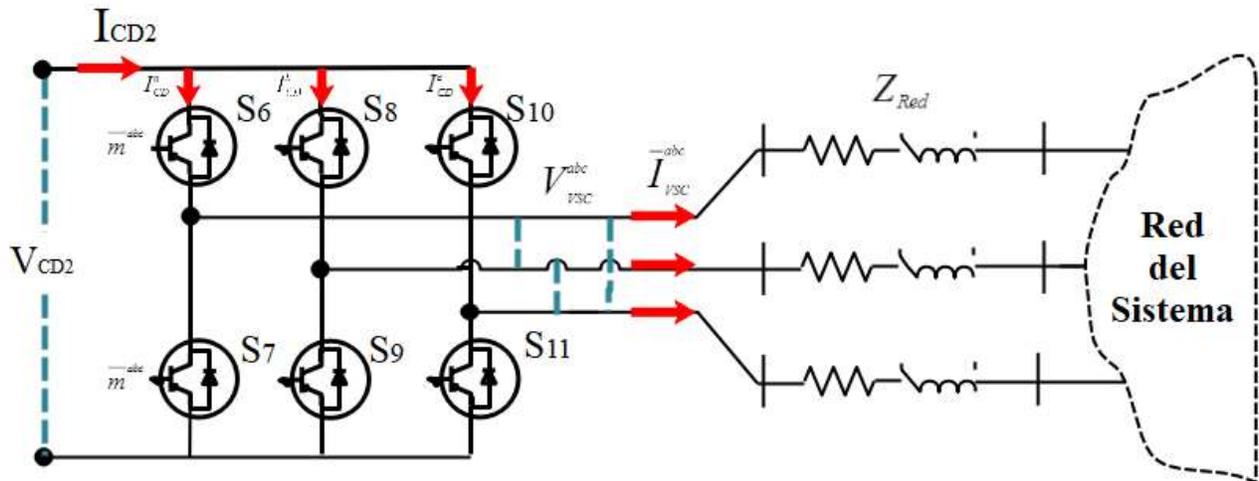


Figura 19 Esquema del VSC PFC trifásico.

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:<sup>3</sup>

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

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

---

<sup>3</sup> 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 ( $V_{CD} > V_{LL}$ ).

## III. 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.

### III.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.

#### *Wind Turbine*

En la Figura 20 se muestra en azul el bloque usado por el software para la simulación de la turbina de viento, 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).

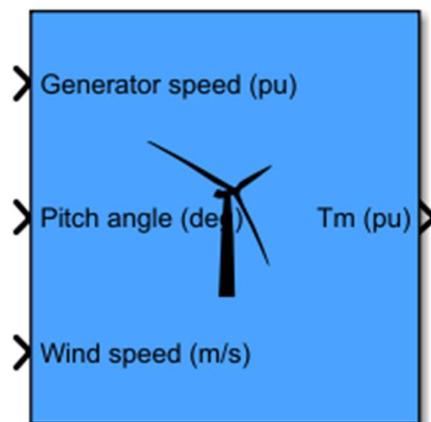


Figura 20 Bloque utilizado en el software de simulación SIMULINK para la turbina de viento.

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 21, tenemos el diagrama de conexión con el PMSG:

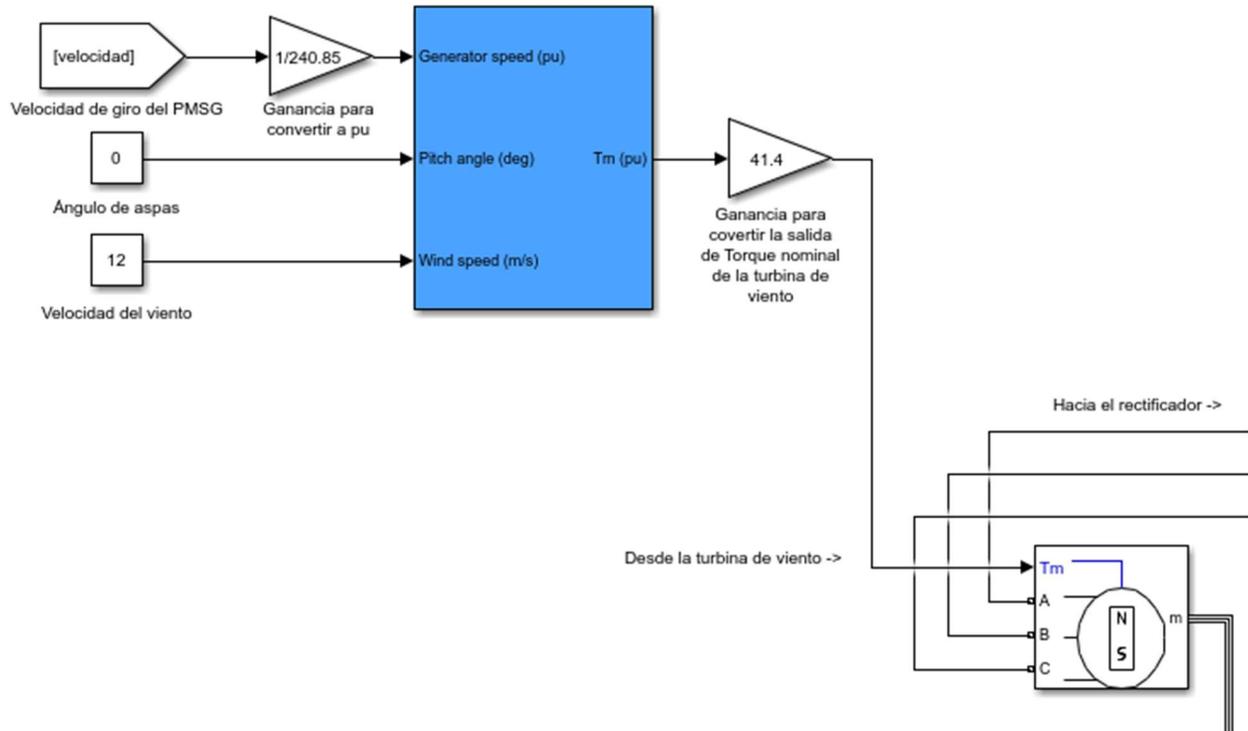


Figura 21 Diagrama de conexión de la turbina de viento.

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
<b>POTENCIA MECÁNICA NOMINAL DEL AEROGENERADOR</b>	$1.5 \times 10^6$	[W]	$P_{m_{wt}}$
<b>POTENCIA ELÉCTRICA BASE DEL AEROGENERADOR</b>	$1.35 \times 10^6$	[VA]	$P_{e_{wt}}$
<b>VELOCIDAD NOMINAL DE VIENTO</b>	6	$\left[\frac{m}{s}\right]$	$v_{viento}$
<b>POTENCIA MÁXIMA A VELOCIDAD DE VIENTO BASE</b>	0.593	[pu]	

<b>VELOCIDAD ROTACIONAL BASE</b>	1	[pu]
<b>ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE LAS ASPAS DE LA TURBINA EÓLICA</b>	0	[°]

Y se insertan en el sistema del mismo orden, de la misma manera en que se muestra en la Figura 22.

Parameters

Nominal mechanical output power (W):

Base power of the electrical generator (VA):

Base wind speed (m/s):

Maximum power at base wind speed (pu of nominal mechanical power):

Base rotational speed (p.u. of base generator speed):

Pitch angle beta to display wind-turbine power characteristics (beta >=0) (deg):

*Figura 22 Características de la turbina de viento.*

### *Permanent Magnet Synchronous Machine*

En la Figura 23 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.

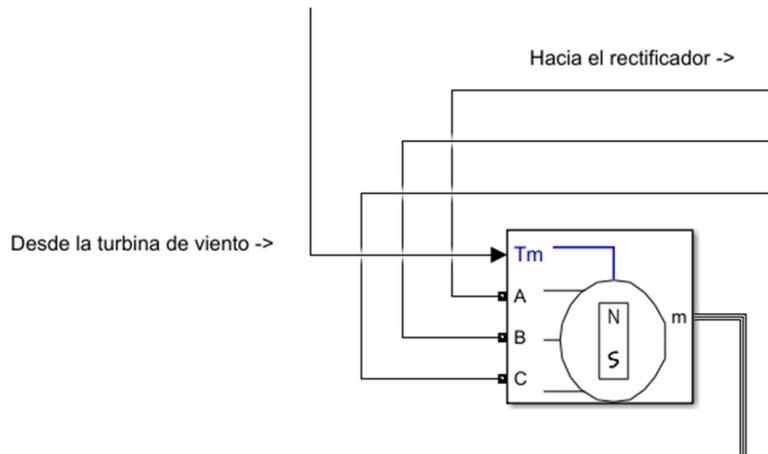


Figura 23 Diagrama de conexión del PMSG.<sup>4</sup>

De este bloque tenemos los parámetros definidos por modelos, por lo que para esta implementación se usará el modelo 08 como se muestra en la Figura 24, 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.

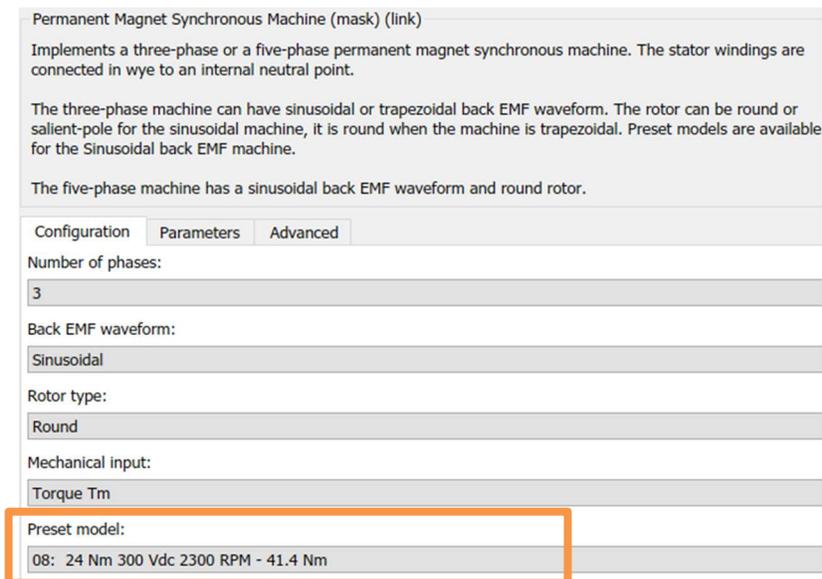


Figura 24 Modelo y características del PMSG (Pestaña configuración).

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

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.m<sup>2</sup>) F(N.m.s) p() Tf(N.m)]: [0.003945 0.0004924 4 0]

Initial conditions [  $\omega_m$ (rad/s)  $\theta_{tam}$ (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 25 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
<b>PESTAÑA DE CONFIGURACIÓN (FIGURA 24)</b>	
NÚMERO DE FASES	3
FORMA DE ONDA DE LA FUERZA ELECTROMOTRIZ EN CONTRA	Senoidal
TIPO DEL ROTOR	Liso o Redondo (Round)
ENTRADA MECÁNICA	Torque $T_m$
<b>PESTAÑA PARÁMETROS (FIGURA 25)</b>	
CONDICIONES INICIALES	[200, 0, 1, 1]
$\left( \omega_m \left( \frac{rad}{s} \right), \theta_{tam}(deg), i_a [A], i_b [A] \right)$	

### *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 26.

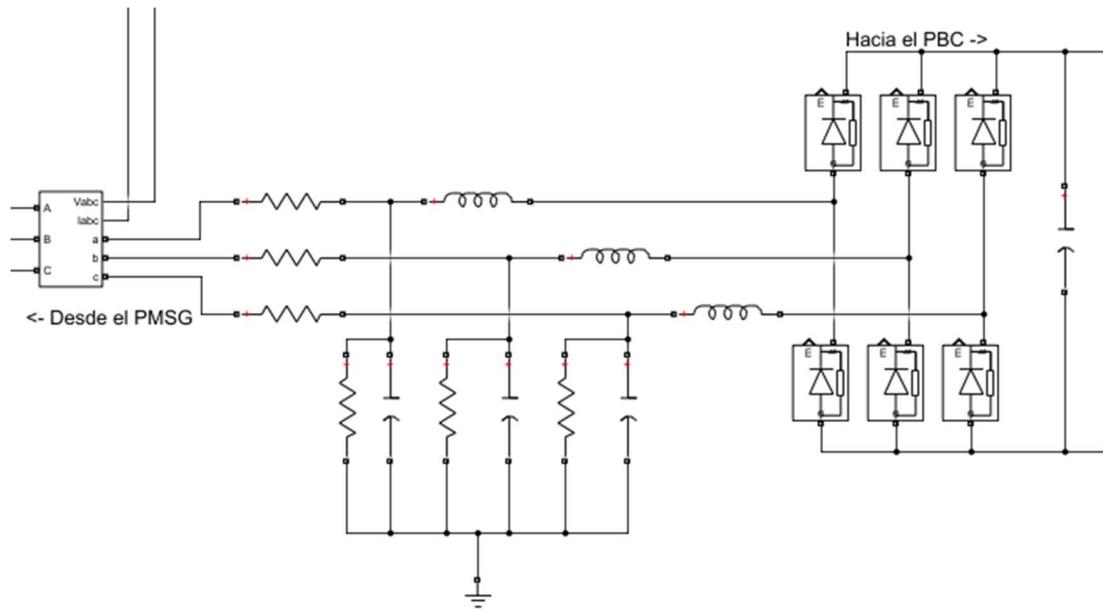


Figura 26 Esquema de conexión del puente de diodos.

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

### 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 27 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.

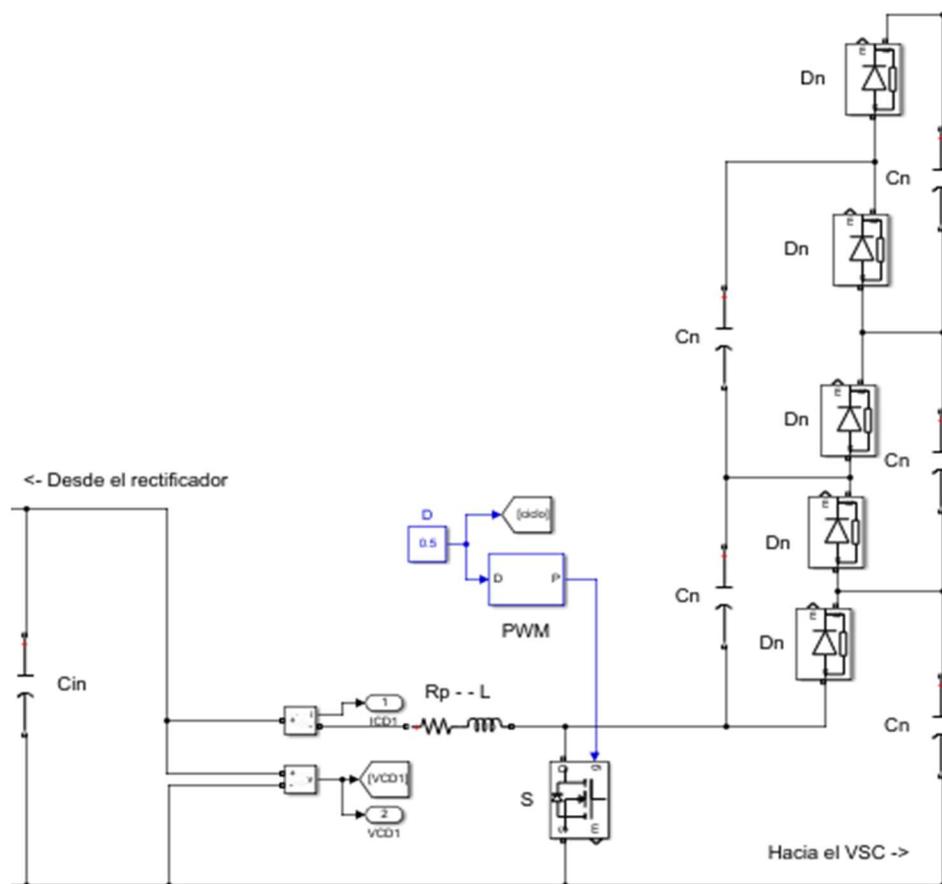


Figura 27 Esquema de conexión del convertidor Boost multinivel.

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

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

#### *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 28. Los parámetros de este modelo estarán mostrados en la Figura 29.

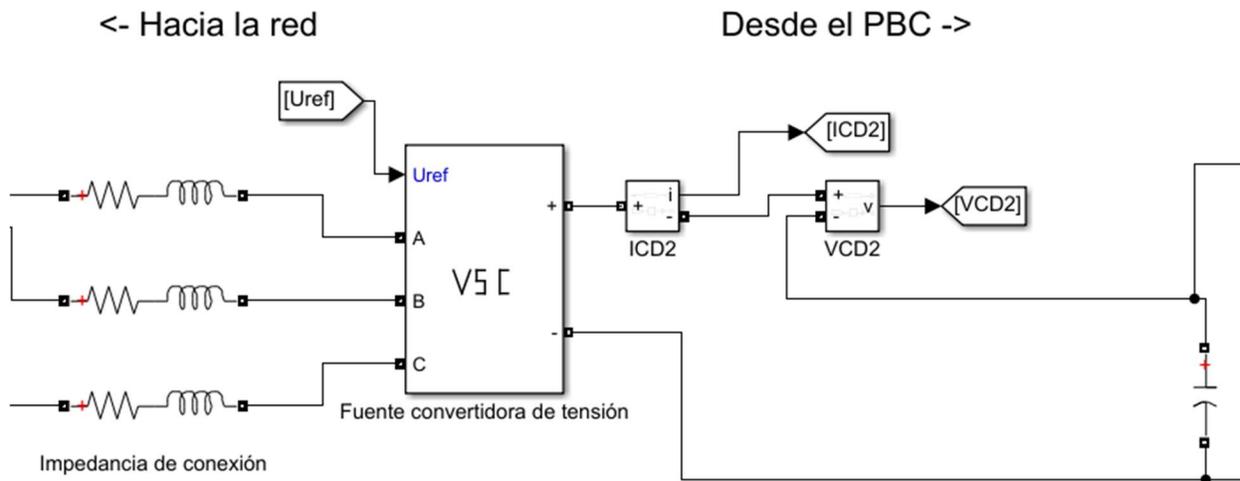


Figura 28 Esquema de conexión del VSC.

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 29 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.

### 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 30.

La impedancia de interconexión tendrá las siguientes características:

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

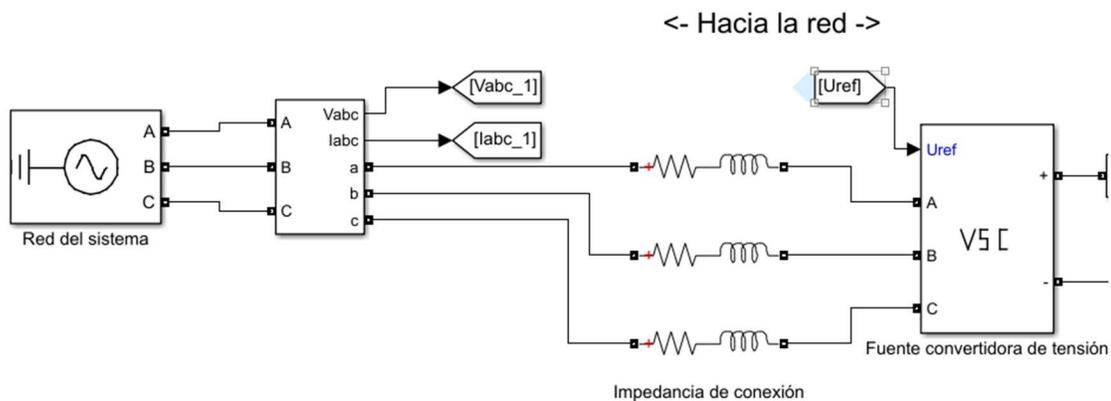


Figura 30 Esquema de conexión del nodo de red y la VSC.

Los parámetros definidos para este bloque serán los mostrados en la Figura 31.

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 31 Parámetros del nodo de interconexión a la red.

### III.2) Seguimiento del punto de máxima potencia de la turbina (MPPT)

#### 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), este 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.<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> 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.

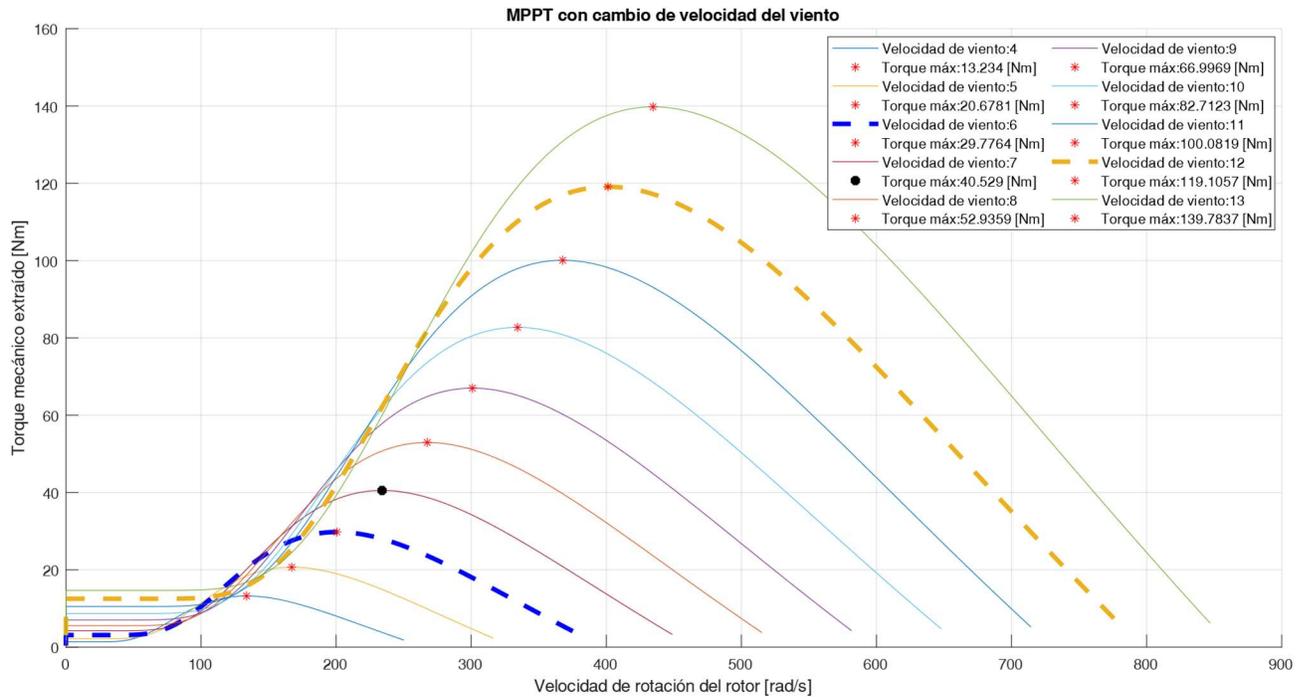


Figura 32 MPPT del conjunto turbina-generator, considerando un cambio de velocidad del viento.

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.

## Carga máxima del sistema.

### *Esquema de conexión del experimento*

Para el experimento propuesto se tendrán como entradas velocidad de viento (de 4 a 13 [m/s]), carga puramente resistiva (variable [ $\Omega$ ]) 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 33.

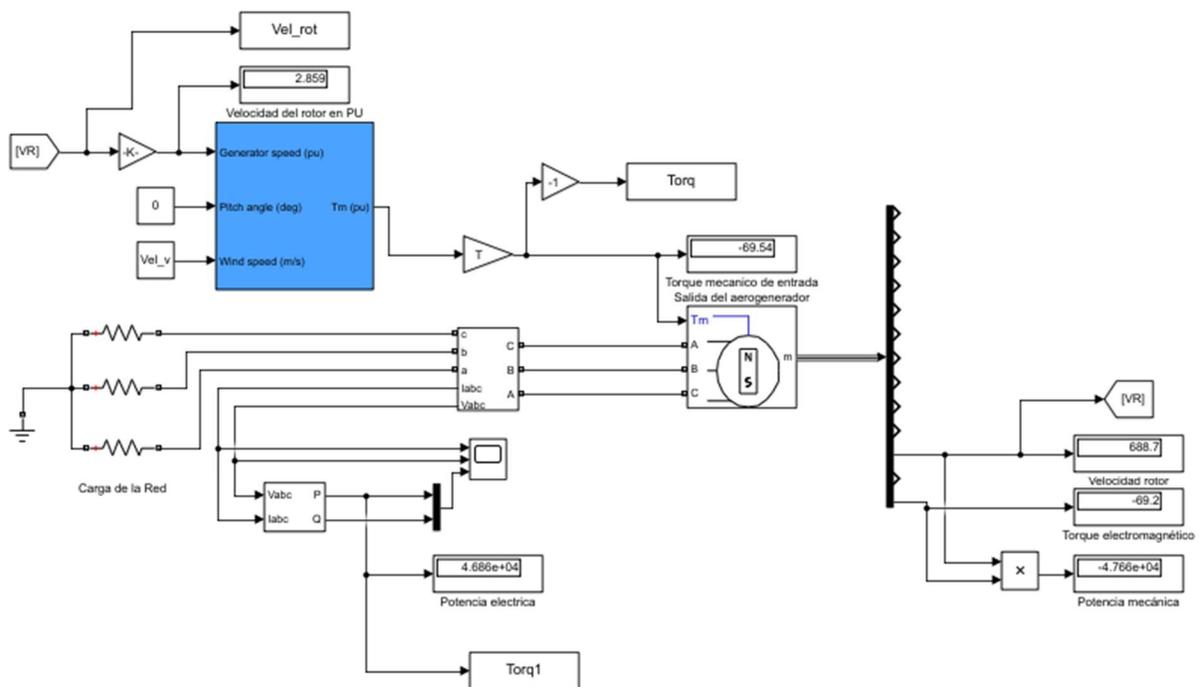


Figura 33 Esquema de conexión del experimento, carga máxima.

### *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

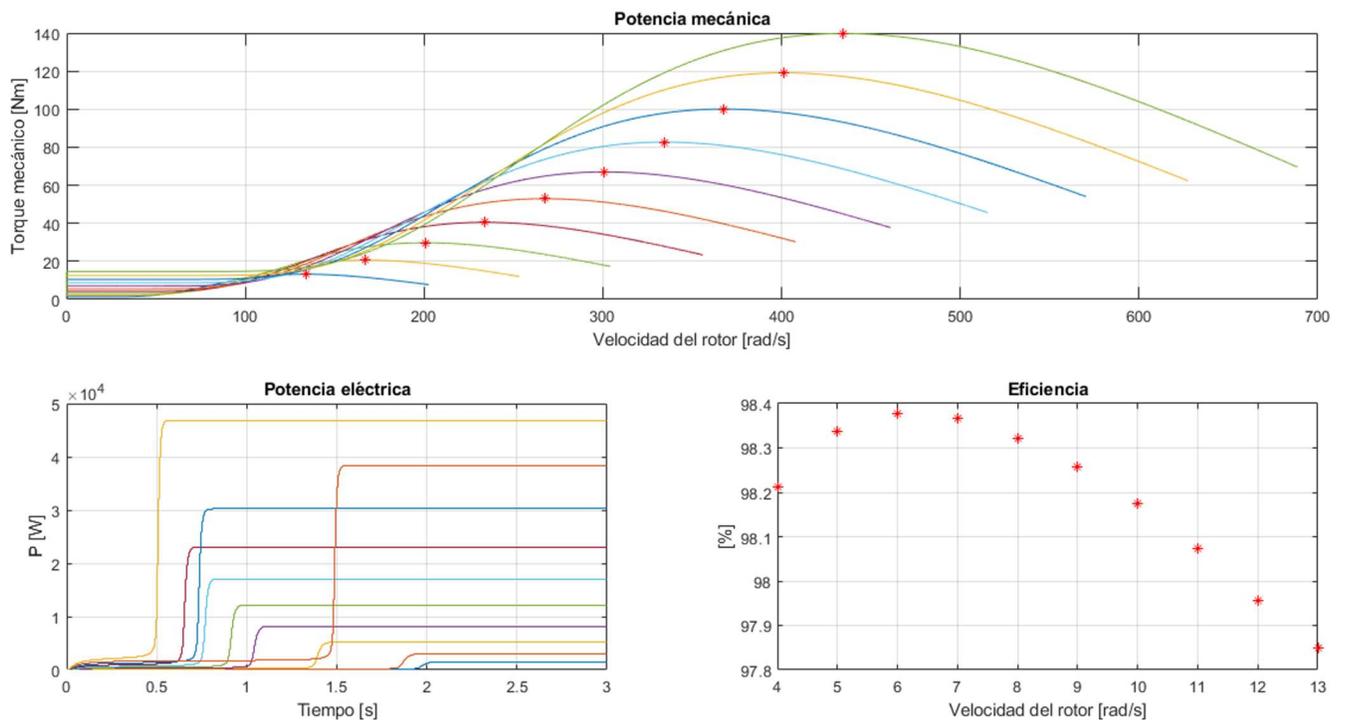


Figura 34 Eficiencia del PMSG, con condiciones de carga máxima en  $[\Omega]$ .

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 35 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.

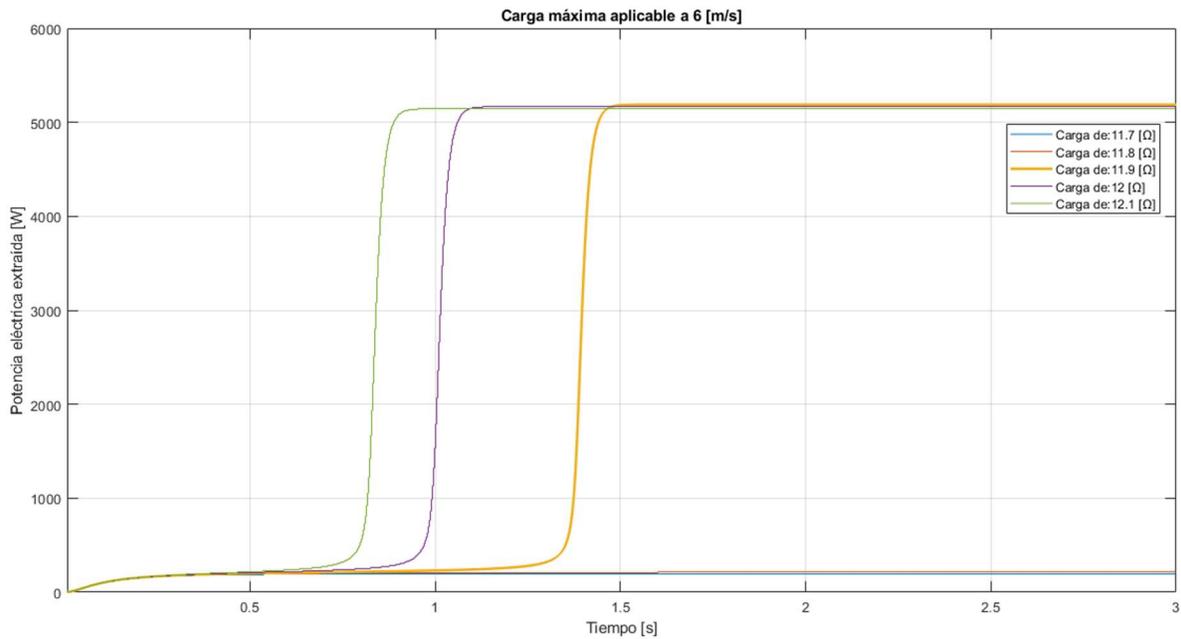


Figura 35 Respuesta gráfica del PMSG al cambio de carga.

### 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.

*Esquema de conexión del experimento*

Las conexiones realizadas para este experimento, conforma la conexión de las Figuras Figura 30, Figura 28, Figura 27, Figura 26, Figura 23 y Figura 21 como se muestra en la

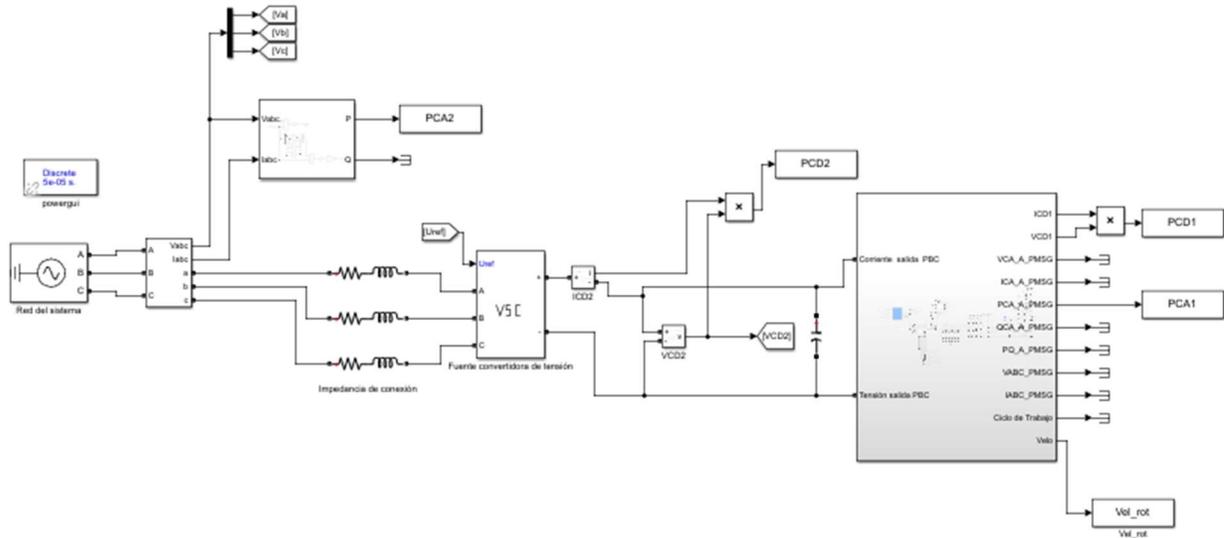


Figura 36 Diagrama de conexión de la red, VSC y salida del subsistema de la Figura 37.

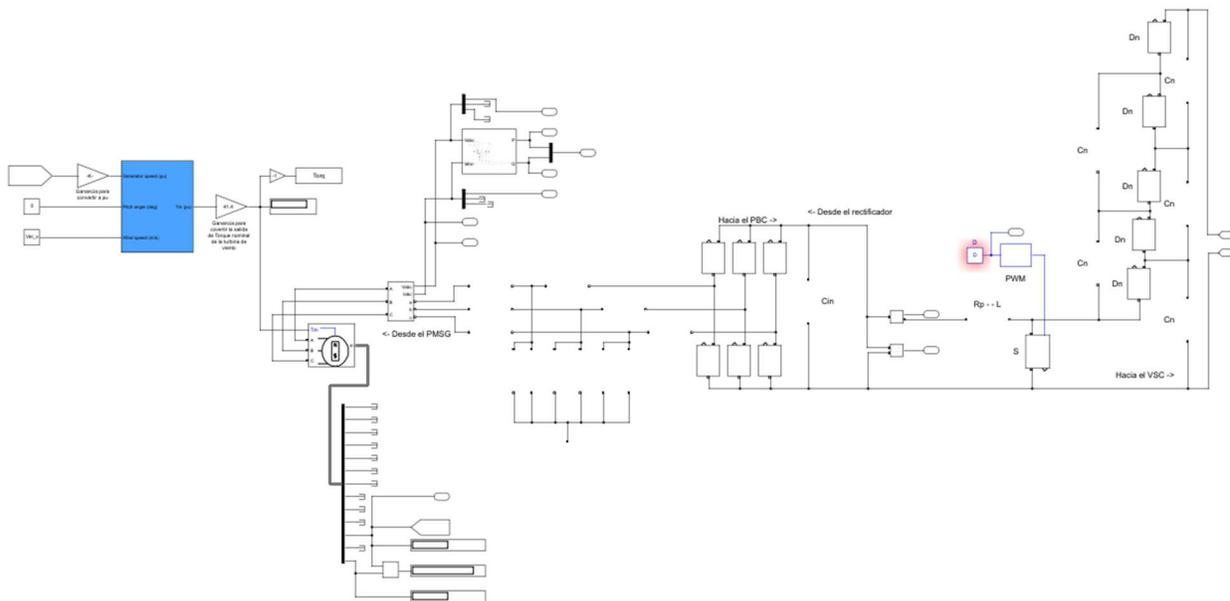


Figura 37 Subsistema de conexión turbina de viento, PMSG y PBC.

### 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 $\left[\frac{m}{s}\right]$	CICLO DE TRABAJO $D$	VELOCIDAD DE TURBINA $\left[\frac{rad}{s}\right]$	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

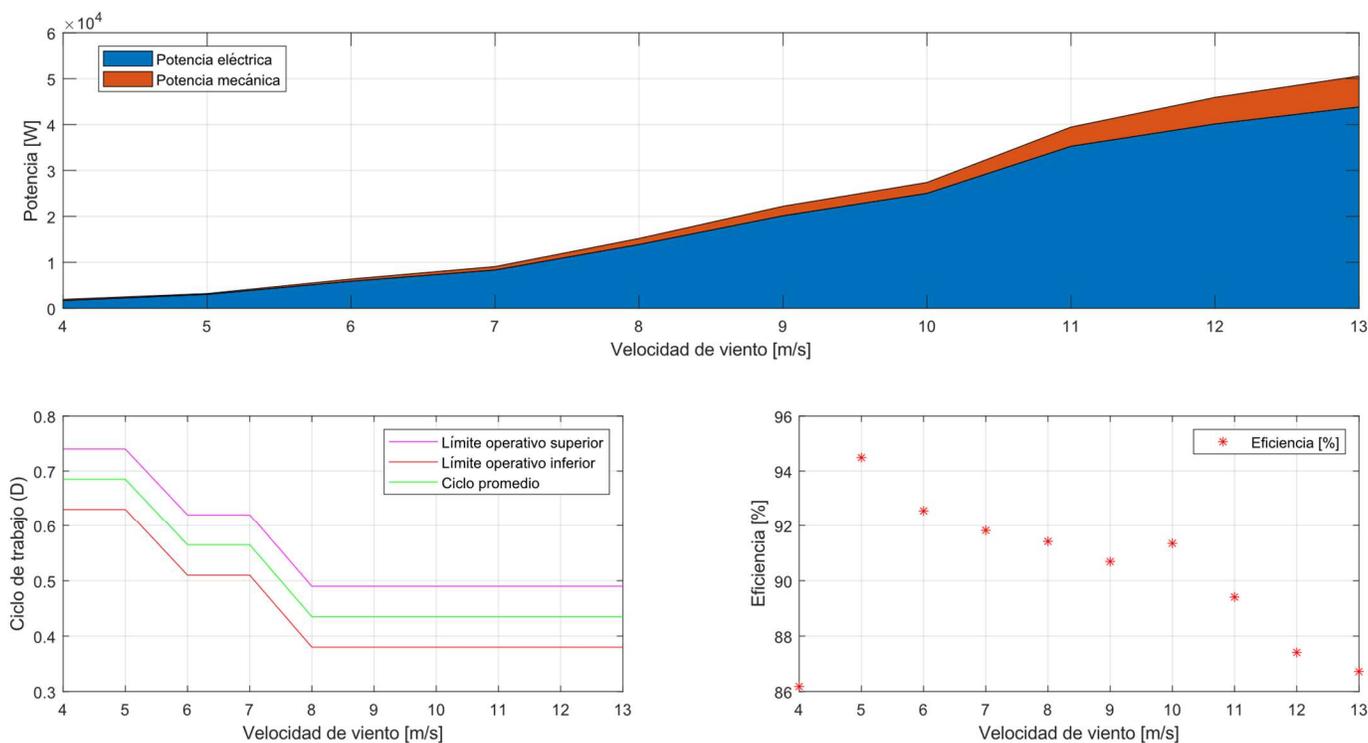


Figura 38 Eficiencia del PMSG, con condiciones de ciclo de trabajo.

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 38 en color verde, este ciclo al no chocar con los límites operativos permite manejarse un cambio de este a 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.

### III.3) Control aplicado a las variables eléctricas (Tensión en CD y en CA y Potencia entregada)

En la Figura 39 se muestra el esquema de control detallando las secciones que lo componen.

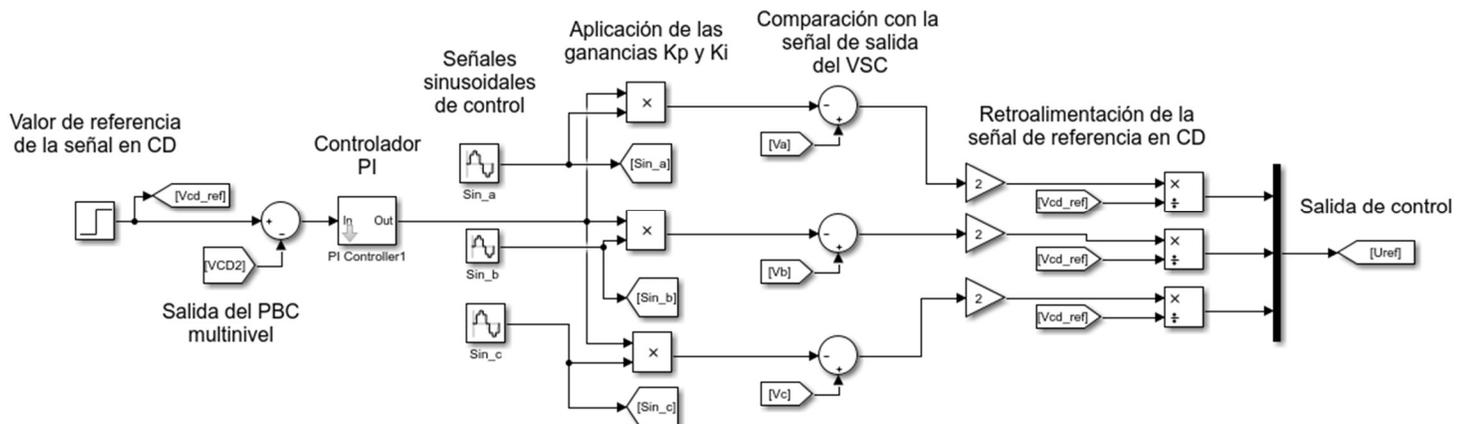


Figura 39 Esquema de control detallado.

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 ( $U_{ref}$ )

## Respuesta del PI a cambios de viento con ciclo de trabajo óptimo

### *Esquema de conexión del experimento*

Para este experimento, se usarán los mismos diagramas mostrados en las figuras Figura 36 y Figura 37 aplicando un cambio de velocidad de viento y el valor de la Tabla 8 del ciclo de trabajo.

### *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 red y la potencia entregada a la red

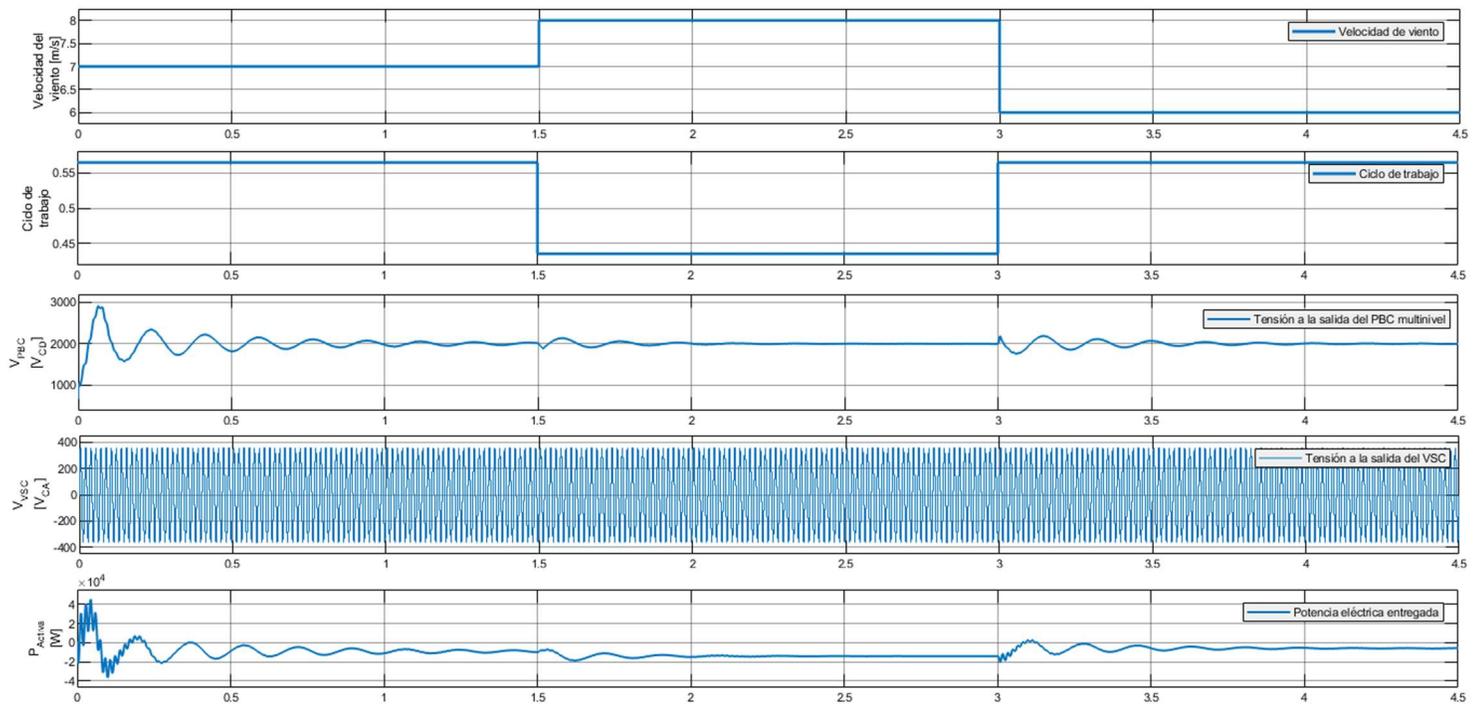


Figura 40 Comportamiento de las variables eléctricas (Tensión en CA y CD y Potencia entregada)

De la Figura 40 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.

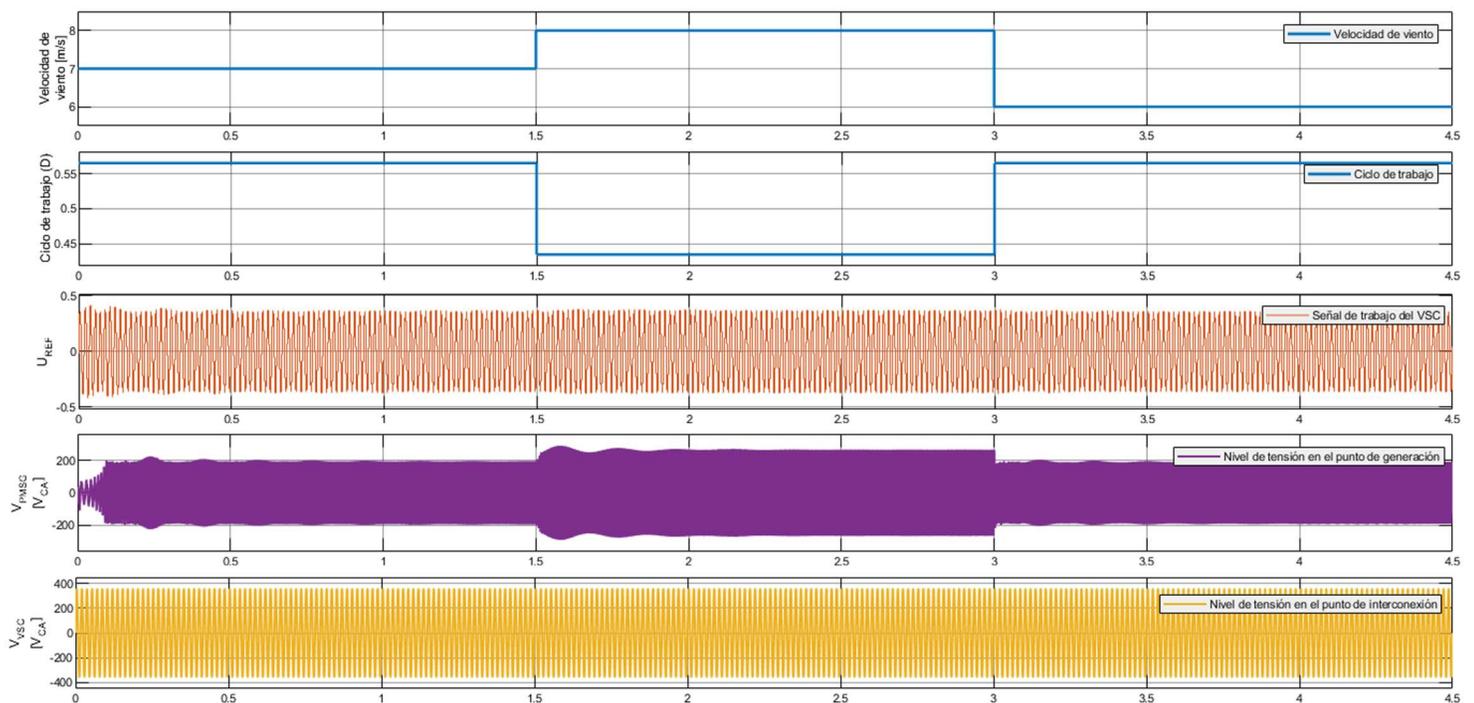


Figura 41 Comportamiento de la tensión eléctrica en CA con cambios en viento y ciclo de trabajo.

En la Figura 41 se muestra que la señal en CA en el punto de generación del PMSG oscila (señal 4 de 5 de arriba abajo) constantemente incluso más en los puntos de cambio de la velocidad del viento con lo que la propuesta del uso del VSC (señal 5 de 5 de arriba abajo) mejora las características de la señal en cuestión de mantener la amplitud y la frecuencia desde el inicio de la puesta en servicio inclusive en los cambios que se tengan en las cuestiones operativas.



## IV. Conclusiones y trabajos futuros

### IV.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 41 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.

### IV.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.

#### Resonancia del conjunto

Debido a la naturaleza de las redes eléctricas y a su comportamiento reactivo con naturaleza inductiva podría llegar a presentar resonancia con el conjunto de capacitores

usados en el PBC. Esto se cuestiona por la razón de que en el desarrollo de este trabajo se encontraron zonas donde el sistema a distintos ciclos de trabajo por encima o por debajo de los límites definidos en la Figura 38 así como en la Tabla 8 por el valor de una centésima, el sistema llegaba a presentar oscilaciones en la potencia y en la tensión, sin presentar un frenado en la turbina de viento o en la velocidad de operación del PMSG.

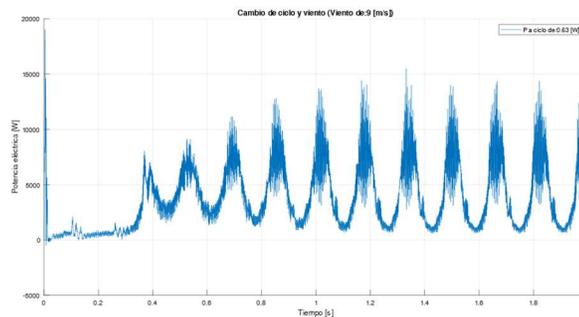


Figura 42 Oscilaciones de la potencia activa a un ciclo de trabajo superior al establecido en la Tabla 8.

### Operación del conjunto como regulador de potencia reactiva

Así mismo se observó que el sistema consumía potencia reactiva mientras que el sistema seguía inyectando potencia activa a la red, ya sea por la cantidad de capacitores usados o por su comportamiento esto puede suponer una técnica de control y mejora del FP.

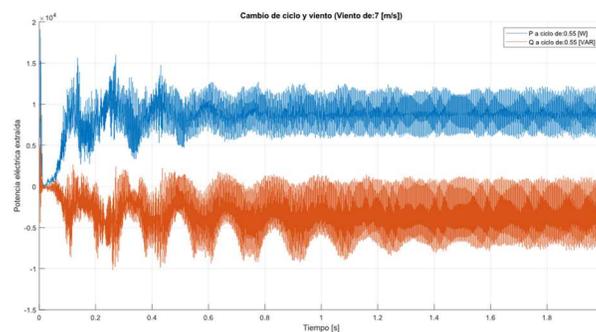


Figura 43 Comportamiento del PMSG, potencia activa y reactiva.

### Evaluación del sistema ante fallas

Para la inclusión nuevos sistemas en las redes eléctricas, siempre es necesario realizar evaluaciones y estudios que garanticen la seguridad de la operación de estos en las redes, esto con la intención de no solo proteger al equipo, sino también asegurar la integridad de los usuarios y operadores ante las fallas recurrentes de estos sistemas.

### IV.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 los experimentos.

- ❖ Para el primer experimento, 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.
- ❖ El segundo experimento 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 experimento 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.

- ❖ El tercer experimento involucró los resultados del experimento 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%.
- ❖ El cuarto experimento 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 40 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 41 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.

## 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] 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.
- [10] 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.
- [11] I. K. Geoff Klempner, Handbook of Large Turbo-Generator Operation and Maintenance, Hoboken, New Jersey: IEEE, 2008, p. 829.
- [12] E. Rodríguez S., Obtención de la curva de potencia de un aerogenerador de 2MW, mediante un modelo CFD, para el pronóstico de generación, Cuernavaca: Universidad Autónoma del Estado de Morelos, 2019.
- [13] Infineon, «PFC boost converter design guide,» Infineon, 2016.

## Anexos

### Respuesta del PMSG con cambio del torque mecánico de entrada.

De la Figura 32 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 44 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.

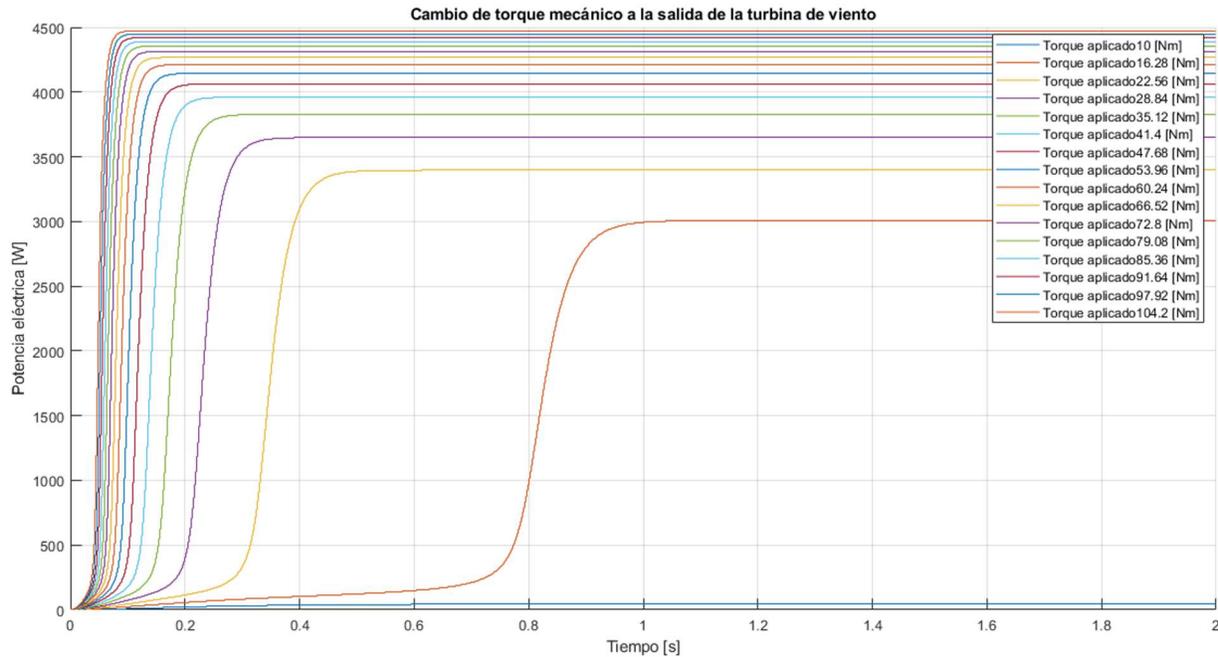


Figura 44 Potencia eléctrica con un cambio de torque mecánico aplicado al PMSG.

Este gráfico se hizo con una carga ( $30 [\Omega]$ ) 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.