UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Diseño y construcción a escala de un hidrogenerador interconectado a la red eléctrica a través de un convertidor VSC-Back to Back

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Eléctrico Electrónico

P R E S E N T A

Gabriel Osorio Rodríguez

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Juan Ramón Rodríguez Rodríguez

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

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.

Resumen

En los últimos años, el incremento en la participación de las energías renovables dentro de las redes eléctricas ha sido impulsado por las actuales necesidades medioambientales y el incremento de demanda energética. Estas acciones han propiciado un cambio de paradigma de generación centralizada a partir de fuentes fósiles contaminantes hacia la generación distribuida a partir de fuentes de energía limpia o renovable con base en tecnologías como solar, eólica y marina. Sobre esta última, considerando que gran parte de nuestro planeta es agua y que la mayoría se encuentra en los océanos bajo continuo movimiento, sin duda la energía marina tiene un gran potencial de utilización para incrementar paulatinamente los niveles de generación limpia y reducir las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera. El uso la energía marina ha tomado fuerza en países como Francia, Canadá, Reino Unido, Estados Unidos y China, y de forma paralela los países en vías de desarrollo han avanzado continuamente hacia el mismo objetivo. Particularmente México cuenta con 11 122 km de litoral dividido en 17 estados, por lo que el potencial de generación es vasto.

En esta tesis de ingeniería se expone el diseño, modelado y construcción a escala de una sistema de generación de energía eléctrica basada en corrientes marina, en donde se contempla reproducir los datos de oleaje a un generador síncrono y posteriormente inyectar la potencia generada a través de un convertidor de electrónica potencia CA/CD/CA llamado back to back construido en laboratorio.

Se considera que la realización de este prototipo de laboratorio permitirá contar con una sólida plataforma experimental para el estudio y análisis de los sistemas de energía limpia a través la generación por corrientes marinas, lo cual representará una concreta área de conocimiento global y multidisciplinaria, que siente las bases para trabajos futuros en este mismo tema.

Dedicatoria

Dedico este escrito a mis compañeros y profesores y principalmente a mis padres Irma Rodríguez y Esteban Osorio que me estuvieron acompañando en el transcurso de esta etapa

Agradecimientos

A mi director de tesis **Dr. Juan Ramón Rodríguez Rodríguez** por haberme dado la oportunidad de haber trabajado con él, por la paciencia y asesoramiento.

A mis padres **Esteban Osorio** e **Irma Rodríguez**, a mi hermano **Carlos Osorio** por darme esa paciencia y Fortaleza.

A m familia, principalmente a mis primas **Alma Delia Teopantitla** y **Ana Karen Retana** por siempre estar presente cuando los necesité y apoyo emocional para que lo dejara y pudiera terminarlo.

A mis compañeros tesistas **Alfredo Velazquez**, **Maidier Diaz**, **Cristobal Ramirez**, **Jesus Sanchez** y **Brenda Nallely Ortega** por haberme apoyado, dar me animo y consejos que me fueron tan valiosos para mí.

A mis amigos **Oscar Javier Bárcenas**, **Baruch Paez**, **Gabriela Castillo** y **Miguel Angel Esteban** por haberme dado su valiosa amistad y Fortaleza durante la Carrera y esta etapa dela vida para poder seguir adelante con mis sueños y nunca darme por vencido.

A la **Universidad Nacional Autónoma de México** por haberme recibido en sus maravillosas instalaciones de primer nivel y el gran nivel de estudios que me ha ofrecido

A la **División de Ingeniería Eléctrica** por haberme contratado como ayudante de profesor durante un año en el área de Ingeniería Eléctrica.,

Al **Dr. Mario Alberto Santoyo** por el asesoramiento con la DSP y la interfaz del prototipo.

Al **Centro Mexicano para la Inovacion en Energía de** Oceano por el material y apoyo brindado para la elaboración de los prototipos usados en el desarrollo de esta tesis, bajo el proyecto del CONACYT con clave FS-2014-06-249795.

Índice

Resumen iii
Dedicatoria iv
Agradecimientos v
Índice vi
Acrónimos viii
Índice de figuras ix
Índice de tablas xi
CAPÍTULO 1 1
Introducción 1
1.3 Planteamiento del problema 9
1.4 Hipótesis 9
1.5 Propuesta 10
1.6 Objetivos 11
1.7 Justificación 11
1.8 Metodología 12
1.9 Organización de la tesis 13
CAPÍTULO 2 14
Estado del arte 14
2.1 Sistemas de energía marina en el mundo 14
2.2 Tipos de hidrogeneradores por corrientes marinas 20
2.4 Análisis crítico de generadores 23
2.3 Impacto ambiental de la generación marina 24
CAPÍTULO 3 25
Modelado y simulación 25
3.1 Interconexión de los generadores a la red eléctrica 25
3.1.1 Convertidor Back to Back 25
3.1.2 Modelado VSC 26
3.1.4 Control de corriente 29

3.1.5 Control de voltaje 34
3.2 Generador PMSG 39
3.2.1 Descripción general 39
3.2.2 Modelo 39
3.2.3 Simulación como generador con carga 43
3.3 Simulación del hidrogenerador 45
3.3.2Simulación con corrientes marinas 47
3.4 Conclusiones particulares 52
CAPÍTULO 4 53
Experimento 53
4.1 Experimento del impulsor 54
4.2 VSC operando como inversor 57
CAPÍTULO 5 63
Conclusiones 63
5.1 Conclusiones 63
5.1.2 Aportes 63
5.1.3 Impacto en el entorno 63
5.1.4 Discusión 64
5.2 Conclusión Final 64
5.3 Trabajos futuros 65
Bibliografía 66

Acrónimos

VSC:	Voltaje Source Converter (Fuente convertidora de voltaje)
DSP:	Digital Signal Procesor (Procesador digital de señales)
PMSG:	Permanent Magnet Synchronous Generator (Generador síncrono de imanes permanentes)
WEC:	Wave Energy Converter (Convertidor de oleaje)
SiC:	Carburo de Silicio
GaN:	Nitruro de galio
CD:	Corriente directa
CA;	Corriente alterna
DFIG:	Doubly-fed induction generator (generador de inducción doblemente alimentada)
SPWM:	Sinusoidal Pulse Width Modulation (Modulación senoidal por ancho de pulso)
fem:	fuerza electromotriz
f_p:	Frecuencia de conmutación
Va_{red}:	Voltaje en la fase A de la red
Va_{red}:	Corriente de la fase A de la red
P red:	Potencia activa en la red
Q red:	Potencia reactiva en la red
Vcd ref:	Referencia del voltaje de corriente directa
Vcd real:	Voltaje corriente directa real
$m_{\ i}$:	Moduladoras
Icd:	Corriente del lado de CD
$P\ cd$:	potencia del lado de CD

Índice de figuras

Fig. 1 Generación maremotérmicas. (Obtenida [4]) 3
Fig. 2 Generación por gradiente de salinidad. (Obtenida [7]) 3
Fig. 3 Generación por medio de corrientes marinas. (Obtenida [8]) 4
Fig. 4 Colocación de las WEC´s 5
Fig. 5 Sistema electrónico de potencia con la red, carga / fuente, inversor de potencia y control. 8
Fig. 6 Diagrama de la propuesta de la tesis. 10
Fig. 7 Sistema de captación Pelamis. (obtenida [15]). 14
Fig. 8 Funcionamiento del wave dragón (Obtenida [17]). 15
Fig. 9 Sistema de generación oyster. (Obtenida [18]). 16
Fig. 10 Central mareomotriz sihwa lake (Obtenida [41]). 16
Fig. 11 La Rance. (Obtenida [21]) 17
Fig. 12 Estación de generación JianGxia. (Obtenida [23]) 18
Fig. 13 Planta de Mutriku. (Obtenida [42]) 18
Fig. 14 Estación de Annapolis royal. (Obtenida [26]) 19
Fig. 15 Estructura del PMSG. 21
Fig. 16 Generador de doble alimentación. 22
Fig. 17 Estructura generador lineal. 23
Fig. 18 Esquema básico del convertidor back-to-back. 25
Fig. 19 VSC trifásico de seis pulsos. 26
Fig. 20 Operación de un convertidor PWM con la frecuencia de conmutación de 16 veces la fundamental. 27
Fig. 21 Circuito promedio equivalente del convertidor de seis pulsos. 29
Fig. 22 Diagrama a bloques del control de corriente de un VSC. 32
Fig. 23 Diagrama a bloques del control de corriente aplicado a un VSC (potencia activa/reactiva). 33
Fig. 24 Diagrama a bloques del control de voltaje cd aplicado al convertidor de seis pulsos. 35
Fig. 25 Simulación del control de voltaje CD. 36
Fig. 26 Comportamiento de cambio de carga. 36
Fig. 27 Cambios de carga. 37
Fig. 28 Comportamiento del control. 38
Fig. 29 Comportamiento del control de voltaje. 38
Fig. 30 Circuito eléctrico equivalente del generador síncrono. 39
Fig. 31 Esquema de la PMSG. 42
Fig. 32 Simulación de PMSG con cambios de carga. 43
Fig. 33 Comportamiento mecánico del generador 44
Fig. 34 Comportamiento de la parte eléctrica. 45
Fig. 35 Modelo del hidrogenerador, máquina y convertidor back-to-back. 46
Fig. 36 Esquemático de simulación del hidrogenerador en Matlab-Simulink®. 46
Fig. 37 Comportamiento mecánico. 47
Fig. 38 Comportamiento eléctrico del generador. 48
Fig. 39 Forma de onda del voltaje y corriente. 49

Fig. 40 Comportamiento del control. 50
Fig. 41 Moduladoras y señales vt del control. 50
Fig. 42 Comportamiento en la parte del la red. 51
Fig. 43 Señal de voltaje y de corriente. 52
Fig. 44 CREE High Performance MOSFET and Diode Evaluación Kit. 53
Fig. 45 TI C2000. 53
Fig. 46 Prototipo de inversor. 54
Fig. 47 Estado estable del inversor. 54
Fig. 48 Prototipo del simulador de olas. 55
Fig. 49 Simulador sin carga. 55
Fig. 50 Simulador a media carga. 56
Fig. 51 Cambio de carga (de media carga a sin carga). 56
Fig. 52 Simulador a media carga. 57
Fig. 53 Simulador a media carga (zoom). 57
Fig. 54 Prototipo del back to back. 58
Fig. 55 Sensor CA. 58
Fig. 56 Sensor de CD. 58
Fig. 57 Prueba como inversor. 59
Fig. 58 Voltaje y Corriente de CA y el voltaje CD controlado a diversas condiciones. 59
Fig. 59 Prototipo de hidrogenerador completo 60
Fig. 60 Voltaje CD controlado y Voltaje, corriente CA conectado a la red. 61
Fig. 61 Control del back to back completo. 62

Índice de tablas

Tabla 1 Comparación cualitativa entre los tipos de generadores. *23*
Tabla 2 Principales parámetros de simulación *47*

CAPÍTULO 1
Introducción

Actualmente, la energía eléctrica que consumimos proviene de varias fuentes, principalmente de energías no renovables y contaminantes como son el carbón y los derivados del petróleo. Pero es importante resaltar que, con el paso del tiempo dichos recurso energéticos se van agotando y han dejado una gran huella ecológica en el planeta, tal como lo que es la contaminación y el efecto en el cambio climático.

En este escenario, nuevas alternativas de fuentes de energías limpias y que sean renovales se han ido buscando, a fin de cubrir la demanda que va en crecimiento. Desde hace poco han ido en aumento así como el estudio de estas ya sea la solar, eólica, geotérmica, hidroeléctrica y la marina.

1.1 Energía Marina

Actualmente, la energía proveniente del mar o energía marina es una gran promesa energética para su futura implementación y aprovechamiento en las actividades humanas, esto debido a que en nuestro planeta gran parte es agua, y la mayoría se encuentra en los océanos y mares que no se encuentran estáticos.

Debido a lo anterior la energía marina es una fuente de energía renovable, en el océano y los mares se concentra tanto energía solar, eólica y fuerzas de gravedad. Específicamente, la energía solar proporciona un flujo continuo de energía necesaria para el crecimiento de cosechas vía fotosíntesis, gradiente térmico en la superficie terrestre y en el mar, el cual deriva en vientos que a su vez genera oleaje y por supuesto lluvia, factor primordial para la generación hidroeléctrica, la cual es una de las primeras formas de energía renovable actual [1].

El uso de la denominada energía marina ha tomado fuerza en países como Francia, Francia, Canadá, Reino Unido, Estados Unidos y China en los cuales, los sistemas de de generación eléctrica ya se encuentran en operación. Sin embargo, el desconocimiento del desconocimiento del modo de operación, los procesos de producción, el diseño y la construcción de estos sistemas pero sobretodo de sus beneficios medioambientales, han retrasado el desarrollo de este tipo de fuentes de energía en países en vías de desarrollo como los latinoamericanos [2].

De los océanos y mares se pueden utilizar varias fuentes de energía para el uso y aprovechamiento como son:

- **Vientos marinos**

Aprovechada por generadores eólicos anclados en el lecho marino o en plataformas marinas cuando el lecho marino está muy profundo, a la vez el tamaño de las aspas son más grandes para el mejor aprovechamiento del aire; cuando el viento sopla las aspas se mueven y hacen funcionar al generador y esta energía es trasportada por medio de cables marinos a la costa donde se encuentran subestaciones.

- **Gradiente térmico**

El agua caliente de la superficie entra por la parte superior, a través de orificios y se convierte en un vapor húmedo a baja presión. El vapor húmedo forma una corriente central, mientras que una película de agua desciende mediante las paredes; este vapor se separa del líquido en la sección inferior, de forma que la turbina utilice únicamente vapor saturado seco [3]

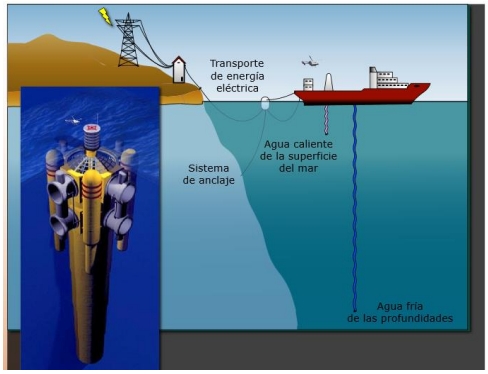

Fig. 1 Generación maremotérmicas. (Obtenida [4])

De acuerdo a la Fig. 1 se observa que las plantas maremotérmicas transforman la energía térmica en energía eléctrica utilizando el ciclo termodinámico denominado ciclo de Rankine [5] para producir energía eléctrica, cuyo foco caliente es el agua de la superficie del mar y el foco frío el agua de las profundidades.

- **Gradiente de salinidad.**

La energía que se obtiene a partir del gradiente salino, también conocido como energía azul, se origina en el aprovechamiento de un proceso de transporte de masa a través de membranas, usando aguas con diferente concentración de sal, cuyo resultado final es el equilibrio de las concentraciones. Uno de los procesos de mezclado del que se puede aprovechar el potencial energético, es el que se da naturalmente donde los ríos desembocan en el mar [6].

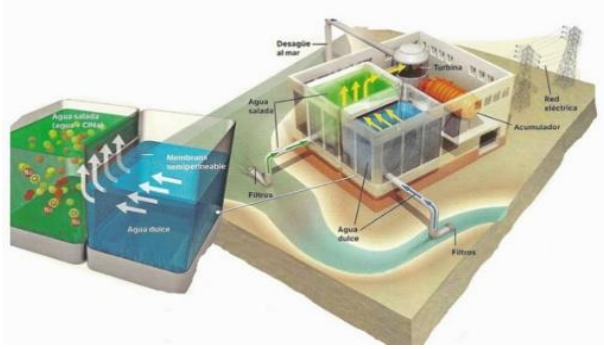

Fig. 2 Generación por gradiente de salinidad. (Obtenida [7])

Como se puede observar en la Fig. 2, se ingresa a un recipiente el agua del rio y de mar, entre ambos se coloca una tela semipermeable que no permite de las sales y por medio de la diferencia de salinidad, permita que el agua de rio fluye a través de la tela hacia una cámara que contiene el agua salada incrementando la presión y asi una elevación en el recipiente del agua salada, la cual al desbordarse puede ser empleada para impulsar un generador.

- **Corrientes marinas**

Un recurso energético importante de los océanos reside en la energía cinética contenida en las corrientes marinas, su origen entre otras causas es debido a diferencias de temperatura o de salinidad, a las que se añade la influencia de las mareas. Cuando las corrientes pasan por lugares estrechos se hace un embudo y por lo tanto están tienden a subir su velocidad.

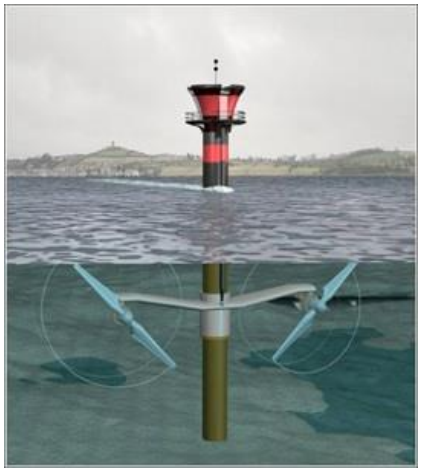

Fig. 3 Generación por medio de corrientes marinas. (Obtenida [8])

En el generador de corriente en la Fig. 3 se puede apreciar el uso de la energía cinética del agua en movimiento a las turbinas, de manera similar al efecto qu produce sobre las turbinas eólicas.

- **Olas (Undimotriz)**

Se define como energía undimotriz aquella que es obtenida a través de la captación de la energía cinética contenida en el movimiento de las olas [9] . Se estima que el recurso potencial de energía de las olas a nivel mundial es de 2TW [10]. Producida por el movimiento superficial de los océanos o por la interacción del viento sobre el agua.

Este tipo de movimiento se han utilizados diversas estructuras para poder aprovechar esta fuente; el oleaje en general, tiene dos componentes que son: el oleaje local producido por el viento que sopla de manera particular durante un tiempo específico sobre una región y el oleaje lejano que se produce un sitio remoto. A estas estructuras se les denomina en convertidores de energía del oleaje (WEC, por sus siglas en ingles).

Los WEC se han desarrollado para extraer energía desde aguas profundas del mar hasta la costa. Estos dispositivos generalmente se clasifican según la ubicación de la instalación y el sistema de toma de fuerza (PTO, por sus siglas en ingles). Las ubicaciones son en la costa, cerca de la costa y en alta mar, como se puede ver en la Fig. 4.

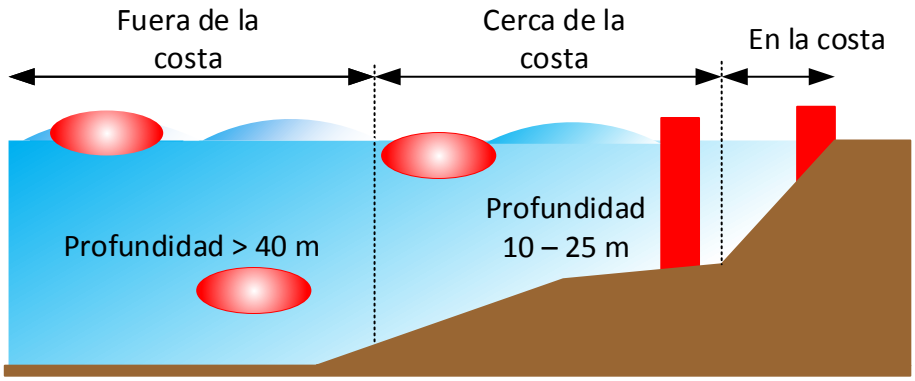

Fig. 4 Colocación de las WEC´s

Dispositivos en tierra: estos convertidores están ubicados en la orilla y pueden colocarse sobre el mar (en aguas poco profundas), integrados en un rompeolas, en una presa o fijados a un acantilado. La principal ventaja de estos convertidores es su fácil mantenimiento e instalación, ya que en la mayoría de los casos la ubicación es accesible. Sin

embargo, en la costa, las olas contienen menos energía debido a que su interacción con el lecho marino y la falta de sitios apropiados causa dificultades para el despliegue de estos sistemas; ocasionado el surgimiento de problemas ambientales.

Dispositivos costa afuera: Estos convertidores están instalados a unos cientos de metros de la costa en profundidades de agua moderadas (10-25 m). Usualmente, descansan en el lecho marino (evitando los anclajes) pero la estructura debe soportar el estrés que surge cuando las olas pasan sobre él mismo. En otros casos, también son estructuras flotantes.

Dispositivos mar adentro: Estos convertidores están ubicados en aguas profundas (más de 40 m), lejos de la costa y construidos en estructuras flotantes o sumergidas ancladas al lecho marino. Debido a su ubicación, podrían explotar el gran potencia de las olas del mar abierto. Sin embargo, debido al mar abierto, la confiabilidad y la capacidad de supervivencia del dispositivo es un gran problema; ya que su estructura debe soportar cargas muy elevadas. Además, su mantenimiento es un proceso complicado y costoso, por ejemplo, los cables marinos que se utilizan para transportar la energía a la red eléctrica son largos y costosos [11].

Similar a otras estructuras marinas sujetas en el fondo marino, un sistema de amarre típico de WEC probablemente se componga de tres partes: la línea de amarre, los conectores y el anclaje [12].

La energía de las olas es enorme y tan confiable como otros recursos renovables, tales como la energía solar y eólica; porque su densidad (2-3$\frac{kW}{m^2}$) es mayor a comparación de otras (viento 0.4-0.6$\frac{kW}{m^2}$, solar 0.1- 0.2 $\frac{kW}{m^2}$). Las olas pueden viajar grandes distancias con poca pérdida de energía [11].

- **Mareas**

Las mareas son producidas por la interacción de la luna y el sol debido a la gravedad que estos astros tienden a ocasionar mareas altas o mareas bajas.

Este fenómeno descrito puede ser aprovechado por medio de barreras que sirven para almacenar el líquido cuando suba la marea para producir una diferencia de potencial.

Para esto tenemos que tener ciertas condiciones entre la altura cuando tengamos marea alta y marea baja para que convenga.

Una vez que se han analizado brevemente las formas más populares de producción de energía por medio del océano, es importante resaltar que en casi todos los escenarios se hace uso de una máquina eléctrica operando en modo generador, la cual es impulsada por cada una de las diferentes potencias mecánicas analizadas.

Posteriormente es necesario considerar una sección capaz de convertir esa energía eléctrica oscilante, en parámetros fijos de voltaje y frecuencia, a fin de poder establecer una interconexión confiable con la red eléctrica convencional de baja y media tensión, para que finalmente dicha energía pueda ser utilizada para las diferentes actividades humanas.

Actualmente la forma más utilizada para la conversión de energía eléctrica y su interconexión a la red, es a través de convertidores de electrónica de potencia, por lo tanto, dicha disciplina es de suma importancia en la implementación de producción de energía por medio de fuentes renovables, específicamente en esta tesis energía marina

1.2 Electrónica de potencia en las fuentes de energía renovables

La electrónica de potencia se puede definir como, la aplicación de la electrónica de estado sólido para el control y conversión de la energía eléctrica, con la máxima eficiencia posible.

En el contexto de fuentes de energía renovable para la producción de energía eléctrica a partir del sol, el viento o el océano, se requiere de etapas de conversión de energía eléctrica o convertidores de electrónica de potencia, para procesar eficientemente la energía desde los traductores mecánicos/eléctricos o generadores hasta las cargas que deben consumirla o su integración a la red eléctrica.

La electrónica de potencia y sus diferentes tipos de convertidores estáticos han cambiado rápidamente durante los últimos treinta años y el número de aplicaciones ha aumentado, esto es principalmente debido al desarrollo de dispositivos semiconductores y tecnología de microprocesadores [13]. La mejora de los dispositivos de electrónica de potencia de nueva generación (SiC), (GaN) junto con sistemas electrónicos de control más potentes, permiten crear convertidores de media frecuencia más eficientes energéticamente con ventajas significativas en aumento de potencia, reducción de costos, peso y volumen, lo

cual, ha sido un fuerte incentivo que impulsa a la instalación de este tipo de fuentes emergentes y limpias para la generación eléctrica.

En este contexto, es fácil deducir que la electrónica de potencia es una disciplina clave prácticamente en todas las tecnologías de generación con energías alternativas, y de forma complementaria los sistemas de almacenamiento; permitiendo así, una generación y consumo inteligente y distribuido. Lo anterior promueve el camino hacia las redes eléctricas inteligentes y el desplazamiento paulatino de las fuentes de energía contaminantes.

El esquema de los sistemas de potencia más utilizados se muestra en la Fig. 5, este esquema es aplicable tanto en sistemas de generación, como en aplicaciones de consumo en los que interviene la red eléctrica. Se observa que el sistema de conversión de energía es la interface entre la red y la carga/generador, también se aprecia un bloque de control, que es el encargado de ajustar los parámetros de rendimiento del dispositivo de potencia de acuerdo a una referencia y a la dirección del flujo de energía.

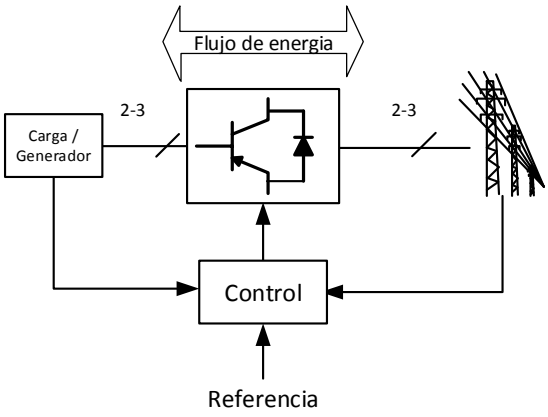

Fig. 5 Sistema electrónico de potencia con la red, carga / fuente, inversor de potencia y control.

Dicho lo anterior, es posible deducir que el estudio y análisis de los tipos de convertidores de electrónica de potencia, junto con sus estrategias de control y modulación, son una herramienta indispensable para el desarrollo de los sistemas de energías renovables, por lo que, en vías del aprovechamiento de la energía marina, es necesario conocer variables de conversión, como potencial mecánico, variaciones e índices de interconexión establecidos por normas o códigos de red [12], a fin de garantizar la estabilidad de la red eléctrica ante la penetración estocástica de fuentes renovables derivadas de la energía marina.

1.3 Planteamiento del problema

No obstante a la tendencia de migración hacia fuentes de energía limpia, las bases de conocimiento multidisciplinario en el estado del arte y el potencial de generación de energías renovables, actualmente el potencial marino en el mundo aún no ha sido aprovechado satisfactoriamente, por lo que hoy en día se requiere de continuas propuestas técnicas científicas multidisciplinarias, que en conjunto contribuyan en la instalación de fuentes de energía marina. Todo esto debido a que, gran parte de nuestro planeta es agua concentrada en los océanos y se encuentra en continuo movimiento, por lo tanto, dicho recurso es una fuerte promesa para la obtención de energía eléctrica.

Particularmente México cuenta con 11 122 km de litoral dividido en 17 estados, por lo que el potencial de generación es vasto, pero la generación de esta forma de energía aún es considerada nula en nuestro país, perdiendo valiosas oportunidades para reducir los efectos del cambio climático ya mencionados.

1.4 Hipótesis

Ante el escenario planteado anteriormente, es evidente que se requiere iniciar una serie de trabajos multidisciplinarios orientados a explorar las diferentes formas de obtención de energía derivada del océano.

Específicamente, la investigación básica sobre la forma de obtener energía eléctrica a partir de un solo generador síncrono, impulsado por un simulador de corrientes marinas y su interconexión a la red eléctrica a través de una interfaz de electrónica de potencia, será una puerta de entrada para perfilar las formas básicas de producción desde pequeña escala hasta grandes plantas de generación.

1.5 Propuesta

.

En esta tesis de ingeniería se expone el diseño, modelado y construcción a escala de una sistema de generación de energía eléctrica basada en corrientes marinas, en donde se contempla reproducir los datos de oleaje a un generador síncrono, y posteriormente, inyectar la potencia generada a través de un convertidor de electrónica potencia CA/CD/CA llamado back to back construido en laboratorio.

Específicamente, se muestran los modelos matemáticos por separado de los convertidores de electrónica de potencia, las etapas de control y modelo del generador síncrono, el cual puede ser de rotor devanado o de imanes permanentes.

En simulación se muestra la integración de todos los componentes operando en conjunto ante una entrada de excitación mecánica intermitente, que simula los datos reales del oleaje exponiendo las principales variables en el proceso de conversión de energía.

En el experimento se muestra la construcción de un driver de motor que simula los datos reales del oleaje, que a su vez impulsa al generador síncrono. Posteriormente, se expone el avance en la construcción de la etapa del convertidor back-to-back basado en convertidores fuente de voltaje (VSC, por sus siglas en ingles), controlado a través de una plataforma de un procesador digital de señales (DSP, por sus siglas en ingles) donde en conjunto se muestra la forma que dicha energía es inyectada a la red eléctrica. Finalizando con un resumen de los objetivos a corto y mediano plazo de este proyecto.

La Fig. 6 muestra el diagrama a bloques de las etapas de construcción de la propuesta técnico científica desarrollada en esta tesis de ingeniería.

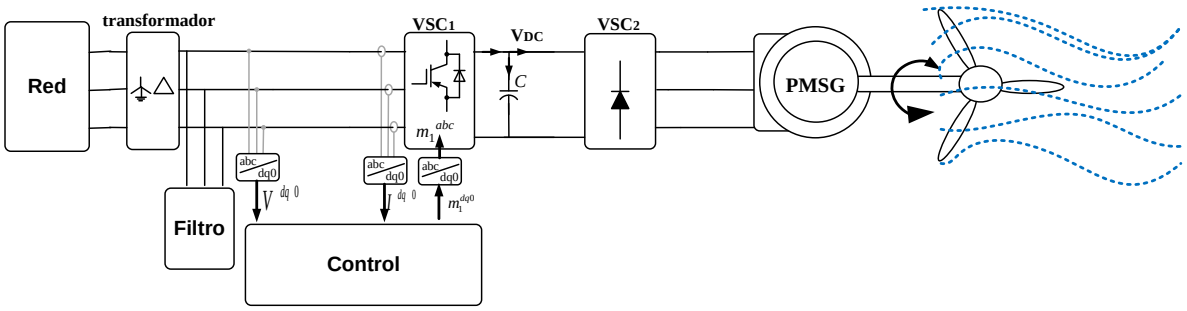

Fig. 6 Diagrama de la propuesta de la tesis.

1.6 Objetivos

General. – Realizar una investigación experimental concerniente al área de energías renovables y electrónica de potencia, a través de la implementación de un generador eléctrico impulsado por corrientes marinas y su interconexión a la red eléctrica, a través de una interfaz de electrónica de potencia.

Técnicos. – Realizar el modelado, construcción a escala y diseño de los controles primarios de un generador impulsado por corrientes marinas basado en un generador síncrono de imanes permanentes y un convertidor VSC Back to Back.

Particulares. - Adquirir el conocimiento técnico científico en un área de ingeniería eléctrica-electrónica para aspirar a el grado de ingeniero en el marco del reglamento de la FI-UNAM.

1.7 Justificación

En esta investigación de tesis de ingeniería eléctrica se plantea el diseño, simulación y validación física a escala de un convertidor Back to Back, el cual emplea las topologías de electrónica de potencia, VSC a fin de realizar un intercambio de energía entre un generador síncrono y la red eléctrica de baja tensión.

Con el diseño del sistema propuesto, se busca obtener un primer esquema de conversión y control de energía marina a eléctrica, lo cual servirá como punto de partida para estudios de integración de fuentes de energía eléctrica intermitentes.

Se considera que la realización del prototipo propuesto en esta tesis de ingeniería permitirá contar con una sólida plataforma experimental para el estudio y análisis multidisciplinario de energía marina, lo cual es una línea de investigación emergente que representará una base de experimentación global de electrónica de potencia, brindando beneficios de aprendizaje e investigación referente a las nuevas tecnologías de fuentes de energías renovables.

1.8 Metodología

La metodología a seguir para lograr los objetivos y metas trazadas en este proyecto de tesis de ingeniería, se detallan a continuación en orden progresivo**.**

Análisis del estado del arte: en base a tópicos relacionados al diseño y operación de sistemas de generación de energía eléctrica a partir de corrientes marinas, se realizará una revisión a fondo de los métodos actualmente instalados en el mundo, a fin de obtener un respaldo teórico sobre la forma de operación básica de generadores síncronos y modelos de convertidores de electrónica de potencia; así como; las diferentes soluciones de controladores internos para lograr su aplicación en niveles de voltajes y potencias conservando siempre los atributos de funcionalidad deseados.

Modelado y Simulación: en esta etapa se trabajará en la validación del desempeño de la arquitectura topológica previamente analizada, para posteriormente entrar en una etapa de respaldo matemático; en donde se representará en forma de ecuaciones las principales características del sistema, incluyendo los componentes pasivos activos, de conmutación y controles implementados.

Con el respaldo teórico matemático se procederá a evaluar en simulación la operación del sistema de generación por corrientes marinas diseñado a una potencia de 100 kW e implementado en plataforma Matlab-Simulink, para llevar a cabo casos de estudio básicos, que representen la integración de esta fuente de energía renovable e intermitente a la red eléctrica.

Construcción a escala: con la experiencia adquirida en la etapa de modelado y simulación, se procederá a realizar en laboratorio la construcción de convertidor de electrónica de potencia Back to Back, en base a submódulos de medio puente implementado dispositivos Mosfets de Carburo de Silicio. Lo anterior, con la finalidad de comprobar de forma experimental las etapas de control y modulación PWM y SPWM necesarias para conversión de energía CD/CD y CD/CA, operando desde un generador síncrono hasta un puerto de CA de una red de baja tensión.

1.9 Organización de la tesis

Capítulo 2: en este capítulo se presenta el marco conceptual que sustenta este trabajo de tesis de ingeniería. Asimismo, se analizan los antecedentes de solución encontrados en la literatura científica, que han dado origen al diseño de nuevos modelos que permiten el análisis de datos de una manera más rápida y certera.

Capítulo 3: en este capítulo se analiza el modelo matemático básico de un generador síncrono y un convertidor VSC, el cual da paso a la obtención del modelo del generador por corrientes marinas.

Capítulo 4: en este capítulo se presentá el proceso de construcción de los prototipos, así como, las pruebas a las que fueron sometidas para obtener los resultados experimentales

Capítulo 5: en este capítulo se muestran las conclusiones obtenidas al analizar los resultados experimentales, así como las aportaciones de la presente tesis; además, algunas recomendaciones para trabajos futuros donde este trabajo de tesis puedan servir como base para futuras investigaciones.

CAPÍTULO 2

Estado del arte

2.1 Sistemas de energía marina en el mundo

En el mundo se han ido desarrollando algunos sistemas de generación eléctrica que funcionan a partir de energía marina, de los cuales, varios se encuentran todavía en etapas de prueba y estudio, a fin de obtener el mayor provecho de la energía marina en cualquiera de sus formas, que van desde dispositivos fijos, dispositivos a flotantes en diferentes rangos de potencia.

- **Pelamis (cilindros articulados)**

Construido por Ocean Power Delivery en las costas de Portugal; se basa en aprovechar el movimiento que se produce en la articulación de la "serpiente marina" mediante pistones hidráulicos. Se han instalado tres equipos de 750 kW [14] cada uno con 120 m de largo y 3.5 metros de diámetro. Contiene tres módulos de conversión de energía, de 250 kW cada uno [15].

Fig. 7 Sistema de captación Pelamis. (obtenida [15]).

Como se puede observar en la Fig. 7 la estructura se mantiene en posición mediante un sistema de anclaje compuesto por una combinación de cables, flotadores y pesas, que mantiene el Pelamis en su posición, además, permite el movimiento de vaivén de los cilindros con las olas entrantes. Cada módulo contiene un sistema completo de generación de energía hidroeléctrica. Los equipos fueron retirados para hacerles modificaciones técnicas y se creó el nuevo Palamis

- **Wave Dragón (Dinamarca)**

El Wave Dragón toma agua que ingresa por el frente del equipo en su parte superior, la cual es acumulada por unos brazos laterales de 58 metros de largo en total, para luego ser retornada al mar pasando a través de una turbina hidroeléctrica [16]. El dispositivo fue probado en las costas de Dinamarca desde 2003 hasta 2009. Su potencia era de 20 kW [17].

Fig. 8 Funcionamiento del wave dragón (Obtenida [17]).

De acuerdo a la Fig. 8 en un primer momento, el agua se almacena en un depósito y seguidamente se hace circular a través de unas turbinas que producen electricidad. Esta tecnología es competitiva con respecto a las centrales hidroeléctricas clásicas [9].

- **Oyster (Gran Bretaña)**

Aprovechando las olas cercanas a la costa, el Oyster consiste en un plano articulado fijo conectado con el fondo marino, desde donde envía agua a alta presión a una turbina en tierra para la generación de energía, Fig. 9. El sistema fue desarrollado por la compañía escocesa Aquamarine Power y diseñado para operar de 10 a 12 m de profundidad. Consiste en un marco conector de energía (PCF, por sus siglas en ingles) y una unidad de captura de

energía (PCU, por sus siglas en ingles). El PCF de 36 toneladas se atornilla en el lecho marino a través de pilotes de hormigón. El PCU es una aleta flotante (de 200 toneladas, y que mide 18x12x4 m), que está articulada a la PCF. La PCU se balancea hacia adelante y hacia atrás con el movimiento de las olas, y este movimiento impulsa dos pistones hidráulicos que bombean agua a alta presión a través de tres oleoductos submarinos a una turbina hidroeléctrica en tierra [9].

Fig. 9 Sistema de generación oyster. (Obtenida [18]).

- **Central mareomotriz sihwa lake (Corea del Sur)**

La Fig. 10 muestra la instalación de energía mareomotriz más grande del mundo, con una potencia total de 254 MW, Posee diez turbinas bulbo de 25,4MW de potencia.

Fig. 10 Central mareomotriz sihwa lake (Obtenida [40]).

La estructura utiliza un dique construido en 1994 para la agricultura y la mitigación de inundaciones. La media de amplitud de la marea es de 5,6 m. El área de la cuenca es de 43 km^2, aunque esto ha sido reducido por la recuperación de tierras y diques de agua dulce.

La planta de energía está diseñada para la generación de inundaciones de efecto único que puede operarse en una dirección, desde el mar hasta el lago, permitiendo que hasta 60 mil millones de toneladas de agua de mar circulen anualmente [19].

- **Central eléctrica de mareas de Rance (Francia)**

Central eléctrica que funciona a partir de la marea ubicada en el estuario del río Rance en Bretaña, Francia. Inaugurada en 1967, operada por Électricité de France, Fig. 11. Durante estos años, las 24 turbinas de La Rance alcanzan una potencia máxima de 240 MW y un promedio de 57 MW, con una producción anual de aproximadamente 500 GWh. La barrera tiene una longitud de 750 m. La parte de la planta de energía de la presa tiene 332,5 m de largo y la cuenca de marea mide 22,5 km^2. La planta de energía ha operado sin mayores incidentes o averías durante 160,000 horas en las que ha generado 16 billones kWh hasta el primer mantenimiento importante que debió realizársele [20].

Fig. 11 La Rance. (Obtenida [21])

El volumen de agua de mar que puede penetrar en el estuario es del orden de 20.000 m^3/seg. Un dique artificial cierra la entrada del río y una esclusa mantiene la comunicación de ésta con el mar, asegurando la navegación en su interior [22].

- **Planta de jiangxia (China)**

Localizada en Wuyantou, la capacidad instalada actual es de 3.200 kW, generados a partir de una unidad de 500 kW, una unidad de 600 kW, y tres unidades de 700 kW. La instalación produce hasta 6,5 GWh al año. Jiangxia alimenta la demanda de energía de los pueblos en un radio de 20 km, a través de una línea de transmisión de 35kV. La amplitud máxima de las mareas en el estuario es de 8,39 m. [23]

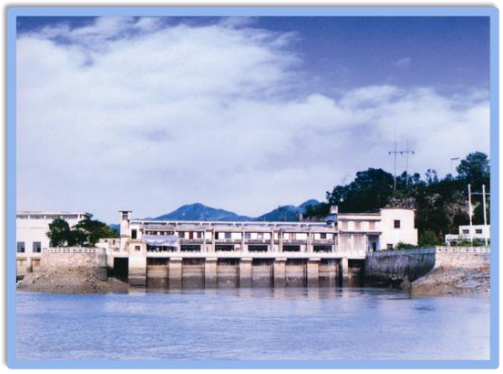

Fig. 12 Estación de generación JianGxia. (Obtenida [23])

- **Mutriku (España)**

Aprovechando el nuevo diquede Mutriku, España, Fig. 13, se ha incorporado al proyecto una planta de energía de las olas con la tecnología de columna de agua oscilante. Esta planta de 300 kW de potencia y 16 grupos turbogeneradores, es la primera con configuración multiturbina del mundo. Ocupa 100 m de dique y es la primer planta undimotriz en conectarse a la red eléctrica de España en 2011. Las cámaras de aire que se encuentran dentro del dique son comprimidas por el movimiento ondular del mar [24].

Fig. 13 Planta de Mutriku. (Obtenida [41])

- **Estación generadora de Annapolis Royal (Canadá)**

Estación de energía de marea de 20 MW ubicada en el río Annapolis inmediatamente aguas de la ciudad de Annapolis Royal, Nueva Escocia, es la única estación de generación de mareas en América del Norte. La estación generadora aprovecha la diferencia de marea creada por las mareas grandes en la Cuenca de Annapolis Fig. 14, una subcuenca de la Bahía de Fundy. Inaugurada en 1984 [25], la Royal Generation Station de Annapolis fue construida por Nova Scotia Power Corporation [26]

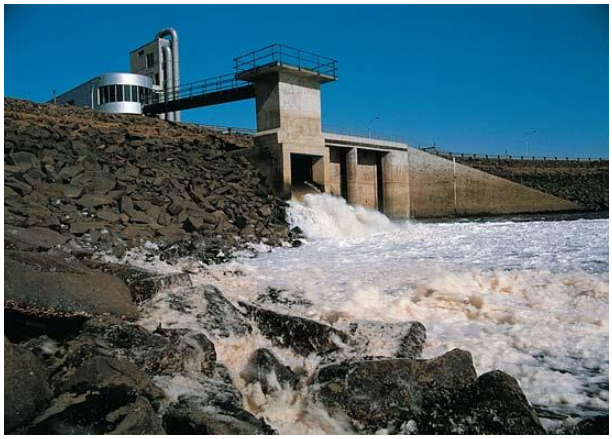

Fig. 14 Estación de Annapolis royal. (Obtenida [26])

2.2 Tipos de hidrogeneradores por corrientes marinas

Un hidrogenerador es una máquina capaz de transformar la energía mecánica ya sea cinética en energía eléctrica aprovechando las corrientes marinas, mareas, por medio del movimiento angular en el eje del generador eléctrico.

- **Generador síncrono de imanes permanentes (PMSG)**

El generador síncrono de imanes permanentes (PMSG) es un generador en el que se ha sustituido el bobinado de excitación por un sistema formado por imanes permanentes que suministran un campo de excitación constante, por lo que al cargar el generador cae la tensión sin opción a poderse regular. Los PMSG son principalmente usados cuando no importa demasiado la regulación de tensión a la salida, siempre que se aplique electrónica de potencia

El funcionamiento del PMSG dista mucho de ser como un generador síncrono normal. En un generador usual se controla la tensión mediante la corriente de campo, mientras que en un PMSG la excitación es constante, además de que reduce el número de sus terminales.

En el PMSG los imanes son usados para generar el flujo magnético en lugar de emplear una corriente de magnetización, como ocurre en el motor de inducción, logrando de esta forma que en los PMSG no haya pérdidas en el rotor. Además, posee otras ventajas como ser de menor tamaño, alta relación par/inercia, una alta densidad de potencia y un alto rendimiento.

Ofrece muchas ventajas ya que es el más eficiente de todas las máquinas eléctricas, debido a que tiene una fuente magnética móvil dentro de sí mismo. El uso de imanes permanentes no consume energía eléctrica adicional. Por lo tanto, la pérdida de cobre del excitador de campo no existe y la ausencia de conmutador y escobillas mecánicas o anillos de deslizamiento significa que no se generan pérdidas de baja fricción mecánicas.

En la Fig 15 se puede observar la configuración más usadas donde se ve una etapa de electrónica de potencia así como también se puede observar la etapa de filtrado para la interconexión a la red.

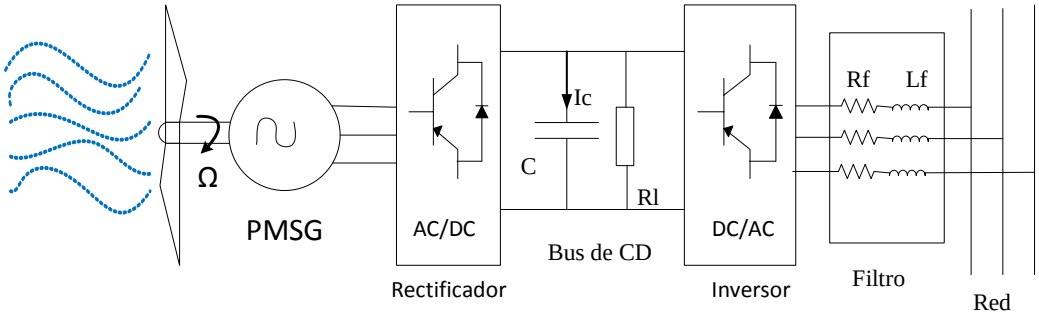

Fig. 15 Estructura del PMSG.

- **Generadores eléctricos de doble alimentación (DFIG)**

Las máquinas eléctricas de doble alimentación y los generadores de anillos deslizantes son motores o generadores eléctricos, donde tanto los devanados de imán de campo como los devanados de armadura están conectados por separado a los equipos fuera de la máquina. Al alimentar la potencia de CA de frecuencia ajustable a los devanados de campo se puede hacer que el campo magnético gire, lo que permite la variación en la velocidad del motor o del generador. Esto es útil, por ejemplo, para generadores utilizados en turbinas eólicas.

Los generadores eléctricos de doble alimentación son similares a los generadores eléctricos de CA, pero tienen características adicionales que les permiten funcionar a velocidades ligeramente superiores o inferiores a su velocidad sincrónica natural.

Un devanado está conectado directamente a la salida y produce alimentación de CA trifásica a la frecuencia de red deseada. El otro devanado (tradicionalmente llamado campo, pero aquí ambos devanados pueden ser salidas) está conectado a una alimentación de CA trifásica a una frecuencia variable. Esta potencia de entrada se ajusta en frecuencia y fase para compensar los cambios en la velocidad de la turbina [2].

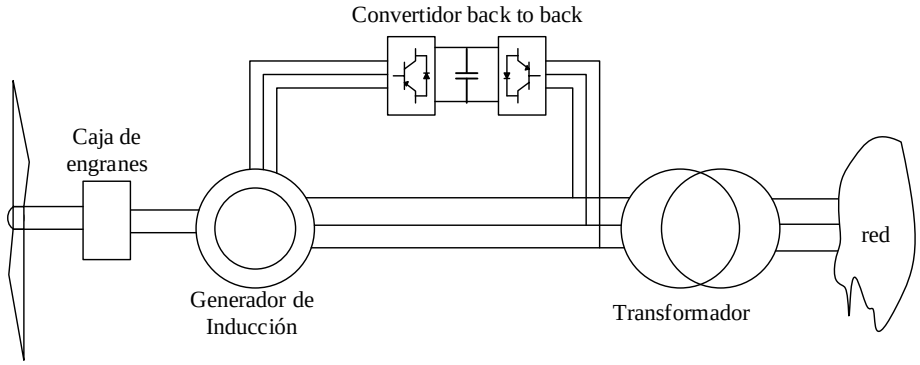

Fig. 16 Generador de doble alimentación.

El ajuste de la frecuencia y la fase requiere un convertidor de CA a CD a CA. Esto generalmente se construye a partir de semiconductores IGBT muy grandes. El convertidor es bidireccional y puede pasar potencia en cualquier dirección. La energía puede fluir desde este devanado, así como desde el devanado de salida [3].

- **Generador Lineal**

El generador lineal, aprovecha un movimiento lineal para la generación de energía eléctrica a diferencia de los generadores rotativos que utilizan la potencia mecánica existente en el giro de un eje. Este generador es profundamente utilizado en dispositivos de conversión del tipo absorvedor puntual. Estos absorvedores solo captan el movimiento oscilatorio vertical del oleaje, de forma directa sin necesidad de pasos intermedios de conversión. La eliminación de estos pasos intermedios y, por tanto, de sus pérdidas asociadas, la alta eficiencia mostrada por estas máquinas, el abaratamiento de los materiales magnéticos y la madurez adquirida en la electrónica de potencia han hecho posible esta tendencia sobre este tipo de generador.

Su principio de funcionamiento se basa en la ley de Faraday. La variación de un flujo magnético que atraviesa una espira induce una f.e.m. en la misma. Generalmente, este flujo magnético, al igual que en las máquinas rotativas, puede ser creado por un imán permanente o por un devanado inductor alojado en el dispositivo.

El concepto básico de este generador es tener un convertidor (lo que sería en una máquina rotativa) en el que los imanes se montan con polaridad alterna directamente acoplado a la boya de empuje con el estator que contiene los devanados montado en una

estructura relativamente estacionaria (conectada a un plato de arrastre con gran inercia o fijo al lecho marino). A medida que la boya de empuje oscila, se inducirá una corriente eléctrica en el estator [27]. El esquema se puede ver en la Fig 17

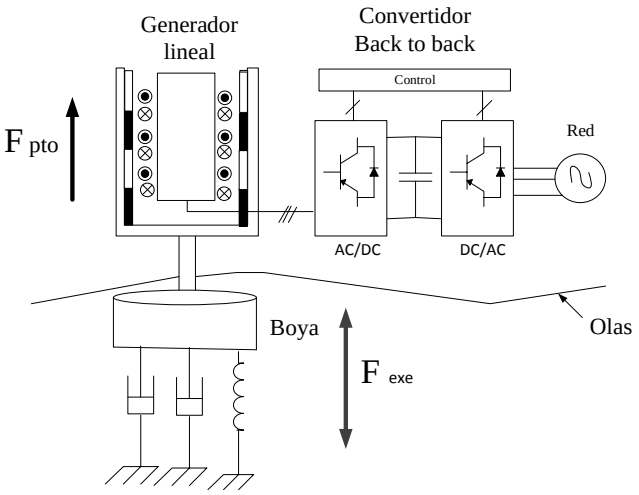

Fig. 17 Estructura generador lineal.

2.4 Análisis crítico de generadores

En la Tabla 1 se podrá ver una comparación de los generadores para observar las ventajas que ambos tipos de generadores tienen.

Tabla 1 Comparación cualitativa entre los tipos de generadores.

Generador lineal	Ventajas del generador rotórico
• No se necesitan engranes ya que la boya está directamente conectada con el pistón. • Menor mantenimiento y con menor frecuencia. • Condiciones de trabajo más fiables. • Menor pérdida del sistema en conjunto.	• El movimiento rotórico normalmente se ajusta a la velocidad óptima del generador a través de los engranes. • Mejor rendimiento del generador. • Menor costo.

2.3 Impacto ambiental de la generación marina

El impacto ambiental en muchos casos se presume pequeño. Es probable que este dependa de las condiciones específicas del sitio, así como en la tecnología elegida. La energía marina, es constante y podría proporcionar una carga base. Tal sistema requiere una costa donde la fase de marea varía con la localización geográfica [28].

Los posibles efectos nocivos sobre el medio ambiente tal como el aterramiento, reducción de las playas de los estuarios, de las que dependen multitud una de aves y organismos marinos, la reducción de zonas de cría de especies marinas y la acumulación de residuos contaminantes en los estuarios aportados por los ríos.

Los inconvenientes de este tipo de energía hacen que pueda resultar muy polémica su utilización, por lo que probablemente no sea conveniente su implantación más que en casos muy concretos, en los que se compruebe que sus impactos son muy pequeños comparados con sus beneficios.

CAPÍTULO 3

Modelado y simulación

3.1 Interconexión de los generadores a la red eléctrica

Como se ha mencionado con anterioridad, a fin de mantener parámetros fijos de frecuencia y voltaje a partir de los parámetros estocásticos de generación, es necesario incluir una etapa de electrónica de potencia, que para el efecto de interconexión de este proyecto, se pretende utilizar un dispositivo de conversión alterna a directa y alterna nuevamente, el cual es llamado Back to Back en la literatura científica.

3.1.1 Convertidor Back to Back

Un convertidor back-to-back está formado por dos VSC, como se muestra en la Fig.18, donde dos puertos de CA están interconectados a través de VSC_1 y VSC_2, con sus respectivas inductancias de acoplamiento.

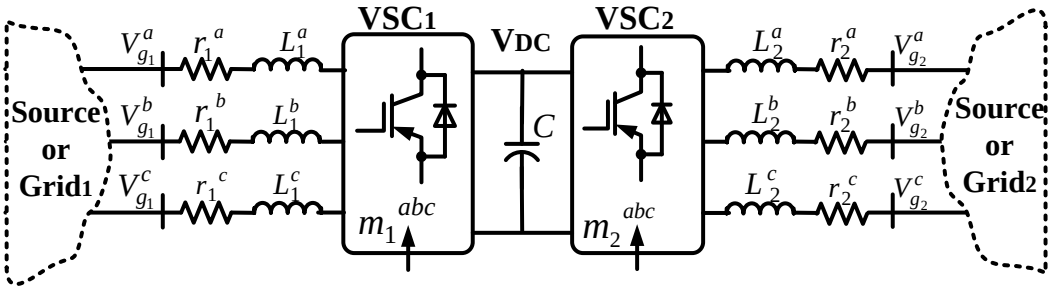

Fig. 18 Esquema básico del convertidor back-to-back.

Los convertidores VSC_1 y VSC_2 comparten el enlace de corriente directa (V_{DC}) a través del condensador C, lo que permite que ambos VSC se controlen de manera independiente en un cierto rango de potencia, donde VSC_1 y VSC_2 pueden actuar como rectificadores o inversores según la dirección del flujo de energía. En este esquema, el convertidor VSC_1 opera comúnmente en modo de control de voltaje de CD proporcionando tensión constante en el condensador C, mientras que el convertidor VDC_2 opera en modo de control de corriente, definiendo la cantidad de energía transferida [29].

A fin de entender a detalle el proceso de conversión de energía en un convertidor back-to-back es necesario analizar la operación por separado de un convertidor VSC.

3.1.2 Modelado VSC

El VSC trifásico de seis pulsos está compuesto por tres convertidores idénticos de medio puente (denominados brazos o ramas). Las terminales de CD del convertidor están conectadas a una fuente de voltaje de CD o un capacitor, mientras que el puerto de CA de cada brazo de medio puente está conectadas con una fase del sistema trifásico de CA [30].

La Fig.19 muestra un VSC trifásico de dos niveles. Las terminales del capacitor integran el puerto de CD del convertidor. Las terminales de CA de cada brazo del medio puente están conectadas en fase con el sistema trifásico de la red eléctrica. En el VSC trifásico las fases se indican como a, b y c, en relación directa con las fases correspondientes del sistema trifásico.

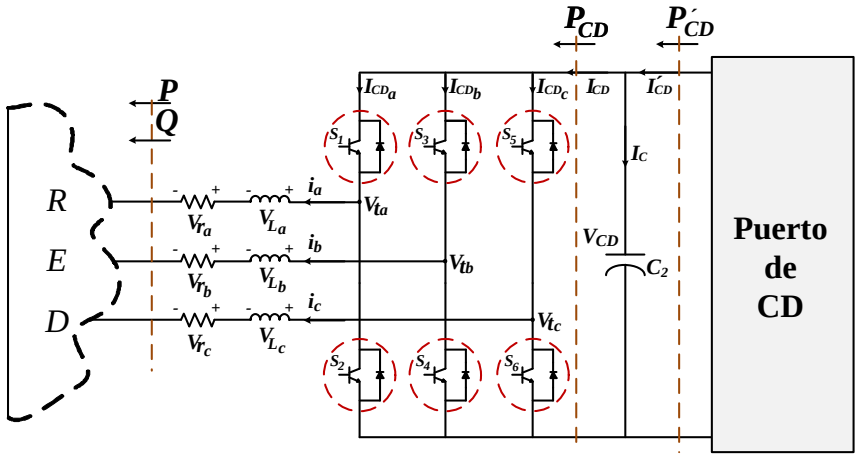

Fig. 19 VSC trifásico de seis pulsos.

Debido a que el convertidor de la Fig.19 contiene interruptores de estado, es posible controlar la tensión de salida y optimizar las componentes armónicas mediante la modulación deancho de pulso sinusoidal (SPWM, por sus siglas en ingles).

3.1.3 Modulación 6 pulsos

Para mejorar la calidad del voltaje de salida, se puede usar la técnica SPWM. Esto da como resultado una forma de onda sinusoidal un componente fundamental dominante, permitiendo la variación de la tensión fundamental y desplaza los armónicos del dominio hacia frecuencias más altas, lo que explica la necesidad de un filtrado más pequeño [31].
Al aumentar la frecuencia de conmutación, los armónicos en el rango de frecuencia más bajo (típicamente por debajo de la frecuencia de conmutación) pueden reducirse o casi eliminarse. Como consecuencia, los armónicos en el rango de frecuencias más altas aumentan, pero el filtrado se puede lograr más fácilmente. Sin embargo, aumentar la frecuencia de conmutación también incrementa la pérdida de potencia. Por lo tanto, debe realizarse una optimización para equilibrar el nivel armónico, por un lado, el costo de capital, la pérdida de potencia, etc. En la Fig. 20 se muestran las tensiones de salida de un inversor trifásico, para una frecuencia de conmutación ($\boldsymbol{f_p = 1000\ Hz}$).

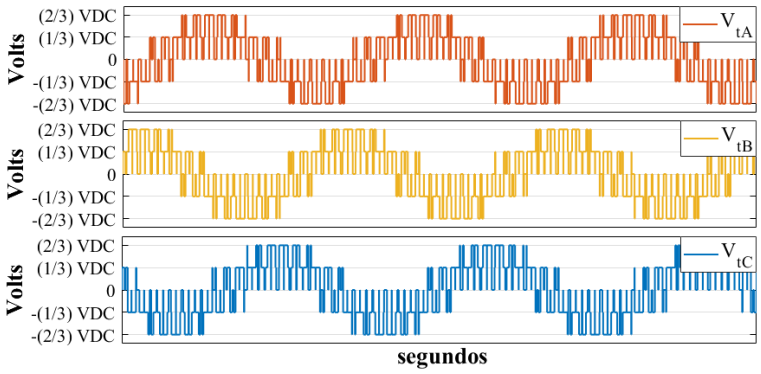

Fig. 20 Operación de un convertidor PWM con la frecuencia de conmutación de 16 veces la fundamental.

En la Fig.20 se observa que la tensión a la salida es una tendencia a la señal sinusoidal deseada, la cual se recupera a través de una etapa de filtrado.

3.1.3.1 Modelo Matemático VSC seis pulsos

En el VSC trifásico de seis pulsos de la Fig. 20, las fases se indican con las letras A, B y C, en relación directa con las fases correspondientes del sistema trifásico de CA [32], suponiendo que $\boldsymbol{i} \in \{\boldsymbol{A}, \boldsymbol{B}, \boldsymbol{C}\}$, los voltajes de red del lado de CA para cada fase están definidos por:

$$V_{gA} = V_m \cdot sen(\omega t + \theta_i) \tag{1}$$

Los voltajes en las resistencias de cada fase se definen por:

$$V_{ri} = r_i \cdot i_i \tag{2}$$

Los voltajes en las inductancias de cada fase se definen:

$$V_{Li} = L\frac{d(i_i)}{dt} \tag{3}$$

Las variables de modulación para el control de cierre y apertura de los interruptores pueden representarse como:

$$m_A = m \cdot sen(\omega t + \emptyset_i) \tag{4}$$

De acuerdo con [33], los voltajes en las terminales de cada fase de CA se especifican por:

$$V_{ti} = \frac{1}{2}V_{CD} \cdot m_i \tag{5}$$

Las corrientes en el lado de CD del circuito de la Fig.16 son de la forma:

$$I_{CDi} = i_i \cdot m_i \tag{6}$$

Donde: $\boldsymbol{m_a}$, $\boldsymbol{m_b}$ y $\boldsymbol{m_c}$ son los índices de modulación, por lo tanto $\boldsymbol{I_{CD}}$ se representa por:

$$I_{CD} = I_{CDa} + I_{CDb} + I_{CDc} \tag{7}$$

El voltaje en el capacitor $\boldsymbol{C}$, $\boldsymbol{V_{CD}}$ se representa por:

$$V_{CD} = \frac{1}{2}\int (I_C)dt + V_0 \tag{8}$$

Donde: $I_C = (I_{CD} - I_{CD}{}')$ y $\boldsymbol{V_0}$ son las condiciones iniciales del capacitor.

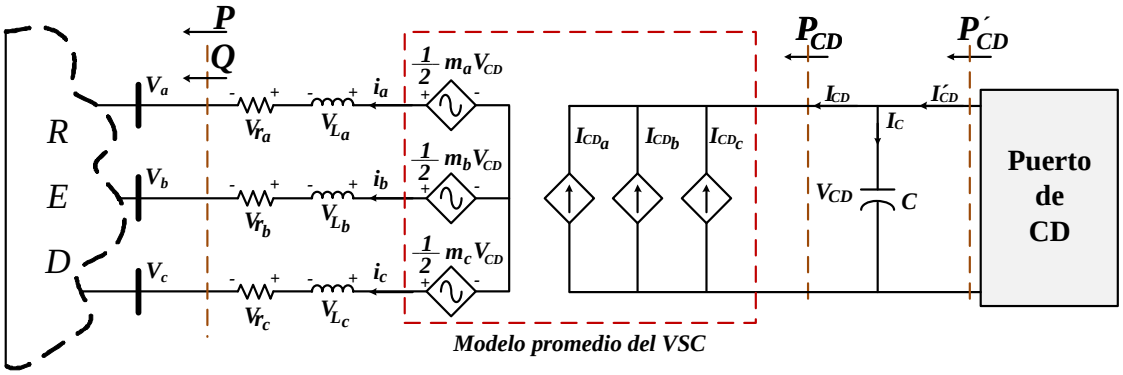

Fig. 21 Circuito promedio equivalente del convertidor de seis pulsos.

La Fig. 19 presenta el modelo promedio de un VSC trifásico de seis pulsos, el cual está integrado de tres fuentes de voltaje dependientes del lado de CA y tres fuentes de corriente dependientes del lado de CD [34].

3.1.4 Control de corriente

Una vez obtenido el modelo promediado del VSC en la Fig. 21 y considerando a $i \in \{a, b, c\}$, es necesario aplicar un sistema de control para el manejo de potencia activa y reactiva, entre el VSC y la red eléctrica, específicamente, la transferencia de potencia de entrada/salida entre el nodo de transmisión $V_{gi}(t)$ y el nodo de recepción $V_{ti}(t)$ junto con $I_{gi}(t)$, puede analizarse utilizando el control dq0, utilizando ecuaciones equivalentes basadas en la transformación de Clarke y Parke, como se muestra en [35]. Aquí, los objetivos principales son la reducción de tres variables a dos, transformándolas en señales invariantes en el tiempo o en señales de CD. Finalmente, un modelo dq0 para el convertidor en el lado de CA (c) se puede describir como:

$$L_i \cdot \frac{d}{dt} \cdot I_{dg_i} = \omega L_i \cdot I_{qL} - r_i \cdot I_{dg} + V_{dt} - V_{dg} \tag{9}$$

$$L_i \cdot \frac{d}{dt} \cdot I_{qg_i} = -\omega L_i \cdot I_{dL} - r_i \cdot I_{qg} + V_{qt} - V_{qg} \tag{10}$$

Dónde los voltajes generados por el VSC son:

$$V_{dt} = \frac{1}{2} \cdot V_{CD} \cdot m_{dt} \tag{11}$$

$$V_{qt} = \frac{1}{2} \cdot V_{CD} \cdot m_{qt} \tag{12}$$

Suponiendo que $L_i = L_d = L_q$, la presencia de ωL_i en (11) y (12) indica la dinámica acoplada entre I_{dL}(t) y $I_{qL}(t)$. Para desacoplar tales dinámicas, $m_{dt}(t)$ y $m_{qt}(t)$ se modifican, basándonos en la teoría dq0**:**

$$m_{dt} = \frac{2}{V_{DC}} \left[u_{dt} - \left(\omega L_i \cdot I_{qg}\right) + V_{dg}\right] \tag{13}$$

$$m_{qt} = \frac{2}{V_{DC}} \left[u_{qt} + \left(\omega L_i \cdot I_{dg}\right) + V_{qg}\right] \tag{14}$$

Donde u_{dt} y u_{qt} son dos entradas adicionales de control.

Sustituyendo (13) y (14) en (11) y (12), respectivamente, se puede obtener un sistema lineal de primer orden. Las ecuaciones (15) y (16) describen el VSC trifásico de seis pulsos:

$$L_i \cdot \frac{d}{dt} \cdot I_{dg_i} = - r_i \cdot I_{dg} + u_{dt} \tag{15}$$

$$L_i \cdot \frac{d}{dt} \cdot I_{qg_i} = - r_i \cdot I_{qg} + u_{qt} \tag{16}$$

Las ecuaciones de dominio de tiempo (15) y (16) pueden definirse en el dominio de frecuencia como en (17) y (18), que describen dos sistemas lineales de primer orden desacoplados, donde (17) representa la corriente activa en el VSC y (18) representa la corriente reactiva controlada por $u_{dt}(s)$ y $u_{qt}(s)$, respectivamente.

$$L_i \cdot \frac{d}{dt} \cdot I_{dg_i}(s) = - r_i \cdot I_{dg}(s) + u_{dt}(s) \tag{17}$$

$$L_i \cdot \frac{d}{dt} \cdot I_{qg_i}(s) = - r_i \cdot I_{qg}(s) + u_{qt}(s) \tag{18}$$

Con el objetivo de seguir los comandos de referencia de CD en lazo cerrado, se puede usar un control proporcional + integral (PI) simple, obteniendo así:

$$u_{dt}(s) \approx k_d(s) = \left(I_{dg_{ref}} - I_{dg}(s)\right)\left[k_p \frac{\left(s + {k_i}/{k_p}\right)}{s}\right] \tag{19}$$

$$u_{qt}(s) \approx k_q(s) = \left(I_{qg_{ref}} - I_{qg}(s)\right)\left[k_p \frac{\left(s + {k_i}/{k_p}\right)}{s}\right] \tag{20}$$

En (19) y (20), k_p y k_i son las ganancias proporcionales e integrales, respectivamente, donde los lazos $\ell_d(s)$ y $\ell_q(s)$ son:

$$\ell_d(s) = K_d(s) \cdot I_{dg}(s) = \frac{k_p}{s \cdot L_i} \cdot \frac{\left(s + {k_i}/{k_p}\right)}{\left(s + {r_i}/{L_i}\right)} \tag{21}$$

$$\ell_q(s) = K_q(s) \cdot I_{qg}(s) = \frac{k_p}{s \cdot L_i} \cdot \frac{\left(s + {k_i}/{k_p}\right)}{\left(s + {r_i}/{L_i}\right)} \tag{22}$$

El polo de (21) y (22) es $s = -r_i/L_i$, que está cerca del origen. Como consecuencia, la magnitud y la fase de la ganancia del bucle comienzan a caer desde una frecuencia relativamente baja (relación de frecuencia entre L_i y r_i). Para lograr esto, el polo de la planta se elimina por un cero del compensador PI, es decir, $s = -{k_i}/{k_p}$. En este contexto, se puede obtener una nueva relación entre el polo de la planta y el cero del PI como,

$$\frac{{k_p}/{\tau_i}}{{k_i}/{\tau_i}} = {r_i}/{L_i} \tag{23}$$

Donde el término "τ_i" es el tiempo de respuesta de la función de transferencia de bucle cerrado de primer orden. En esta condición, la ganancia de bucle tiene la forma de $\ell_d(s) = \frac{k_p}{s \cdot L_i}$. Por lo tanto, la función de transferencia completa de bucle cerrado es $\frac{\ell_d(s)}{\ell_d(s)+1}$, donde los comandos de referencia sobre CD son:

$$\frac{I_{dg}(s)}{I_{dg_{ref}}} = \frac{\ell_d(s)}{\ell_d(s)+1} = \frac{k_p/s \cdot L_i}{k_p/s \cdot L_i + 1} \approx \frac{1}{\tau_i \cdot s + 1} \tag{24}$$

$$\frac{I_{qg}(s)}{I_{qg_{ref}}} = \frac{\ell_q(s)}{\ell_q(s)+1} = \frac{k_p/s \cdot L_i}{k_p/s \cdot L_i + 1} \approx \frac{1}{\tau_i \cdot s + 1} \tag{25}$$

Según (23), las ganancias k_p y k_i se pueden definir como:

$$k_p = \frac{1}{\tau_i} \cdot L_i \tag{26}$$

$$k_i = \frac{1}{\tau_i} \cdot r_i \tag{27}$$

Finalmente, el diseñador puede seleccionar los tiempos de respuesta en la operación de control de corriente VSC en función de los tiempos de respuesta necesarios para las aplicaciones finales.

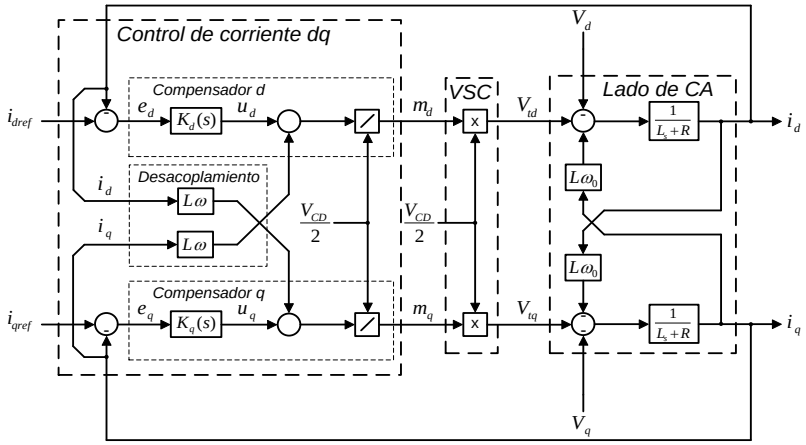

Fig. 22 Diagrama a bloques del control de corriente de un VSC.

La Fig. 22 muestra el control de corriente dq de un VSC a bloques en el cual u_d y u_q son las salidas de los compensadores correspondientes a $K_d(s)$ y $K_q(s)$, respectivamente, i_{dref} e i_{qref} son variables de CD. La potencia activa y reactiva que genera un VSC en su punto de conexión, se representan por:

$$P = \left(\frac{3}{2}\right)\left[[V_d \cdot i_d] + [V_q \cdot i_q]\right] \tag{28}$$

$$Q = \left(\frac{3}{2}\right)\left[\left[-V_d \cdot i_q\right] + \left[V_q \cdot i_d\right]\right] \tag{29}$$

Donde V_d y V_q son las componentes de voltaje en dq del sistema de CA y no pueden ser controladas por el sistema VSC, ya que son variables externas de la red. Si el PLL está en estado estable, $V_q = 0$, (28) y (29) pueden ser rescritas como:

$$P(t) = \left(\frac{3}{2}\right)\left[V_d \cdot i_d\right] \tag{30}$$

$$Q = \left(-\frac{3}{2}\right)\left[V_d \cdot i_q\right] \tag{31}$$

De acuerdo con las ecuaciones (30) y (31), P y Q pueden ser controladas por i_d e i_q, respectivamente.

$$i_{dref} = \frac{2}{3V_d} P_{ref} \tag{32}$$

$$i_{qref} = -\frac{2}{3V_d} Q_{ref} \tag{33}$$

La Fig.21 muestra el diagrama de la función de transferencia del control de potencia activa y reactiva del VSC. El sistema tiene controladores PI idénticos con variables de CD.

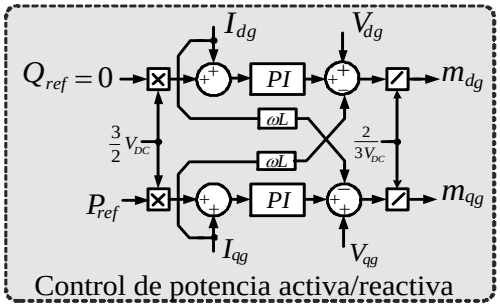

Fig. 23 Diagrama a bloques del control de corriente aplicado a un VSC (potencia activa/reactiva).

3.1.5 Control de voltaje

En el control de potencia activa y reactiva previo, el bus de CD es considerado como una fuente de voltaje ideal y el sistema VSC actúa como un intercambiador bidireccional de potencia entre el sistema CA externo y el sistema de CD interno al VSC. Para lograr que el capacitor se comporte como una fuente ideal de CD, dicho voltaje debe controlarse [36]. En la Fig. 17, mostrada en la sección 3.1.2, C se representa como un capacitor ideal sometido a las sumatorias de corrientes ($I_C = I_{CD} + I_{CD}{}'$), donde el almacenamiento de energía del capacitor C del lado de CD es expresado por:

$$W_{DC} = \frac{1}{2} C \cdot V_{CD}^2 \tag{34}$$

W_{CD} depende de la potencia de entrada P_{CD} y la potencia de salida $P_{CD}{}'$ en el circuito de CD, esto es:

$$\frac{dW_{CD}}{dt} = \frac{C}{2} \cdot \frac{dV_{CD}^2}{dt} = -P_{CD} - P'_{CD} \tag{35}$$

$P_{CD}(t)$ se define como:

$$P_{CD} = I_{CD} \cdot V_{CD} \tag{36}$$

$P_{CD}{}'(t)$ se define como:

$$P_{CD}{}' = I_{CD}{}' \cdot V_{CD} \tag{37}$$

Resolviendo (36) y (37) para V_{CD}, y aplicando la transformada de Laplace el resultado es:

$$W_{DC}(s) = \frac{-P_{DC}\,(s) - P'_{DC}(s)}{\frac{1}{2} sC} \tag{38}$$

El modelo de la planta dado por (38) que representa el almacenamiento de energía en el capacitor $W_{DC}(s)$ puede complementarse por un controlador $K_v(s)$, a fin de generar un sistema de lazo cerrado. El subíndice "v" se refiere a la compensación para el control de voltaje:

$$K_v(s) = -\left((V_{DCref})^2 - (V_{DC})^2\right)\left[k_v \frac{\left(s + {k_{v_i}}/{k_{v_p}}\right)}{s}\right] \tag{39}$$

Donde k_{pv} y k_{iv} son 10 veces más lentos que el tiempo de respuesta del lazo de control de corriente:

$$k_{v_p} = \frac{k_p}{10} \tag{40}$$

$$k_{v_i} = \frac{k_i}{10} \tag{41}$$

La Fig. 24 muestra el diagrama a bloques del control de voltaje, aplicado al VSC.

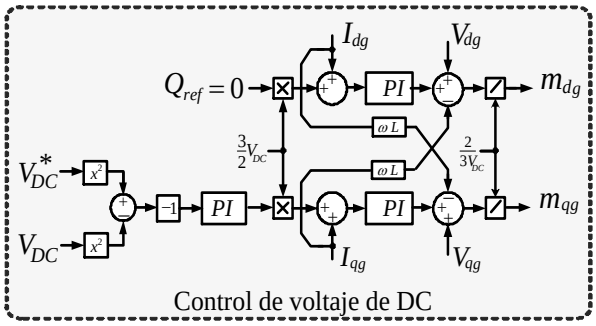

Fig. 24 Diagrama a bloques del control de voltaje cd aplicado al convertidor de seis pulsos.

Las ecuaciones (40) y (41) aseguran que la respuesta dinámica del control de voltaje no se ve afectada por la respuesta dinámica del control de corriente.

3.1.6 Simulación de convertidor Back to Back

Para poder llevar a cabo la prueba de del control de voltaje; el VSC se comportó como rectificador a fin de verificar de manera dinámica el análisis antes descrito, para este medio se realizó la simulación mediante la herramienta de Matlab Simulink como se muestra en el diagrama de la Fig. 25.

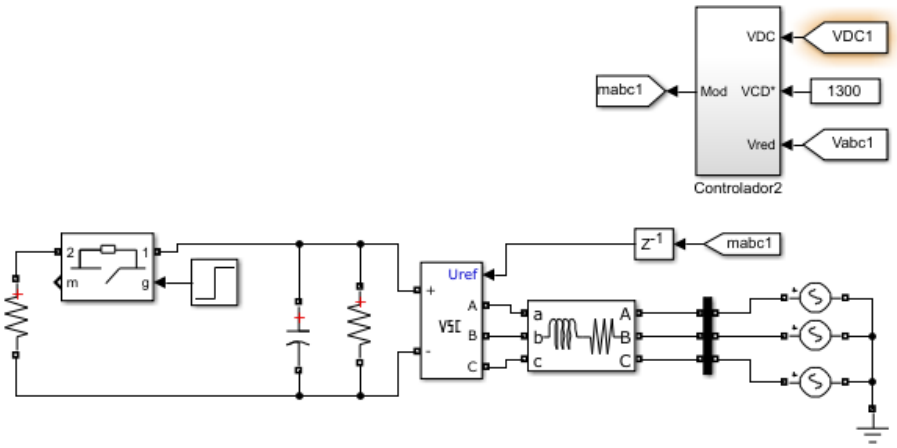

Fig. 25 Simulación del control de voltaje CD.

Como se puede observar en las Fig. 26 y 27 se realizaron dos cambios, uno incorporando carga y el segundo es regresar a la carga inicial.

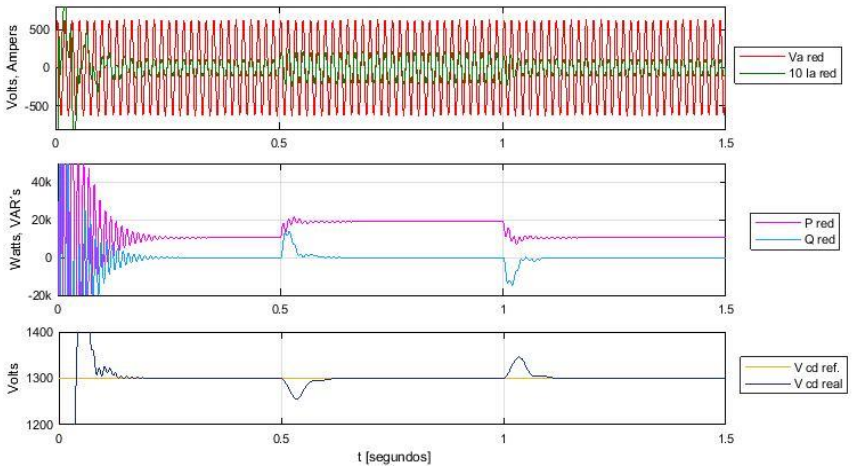

Fig. 26 Comportamiento de cambio de carga.

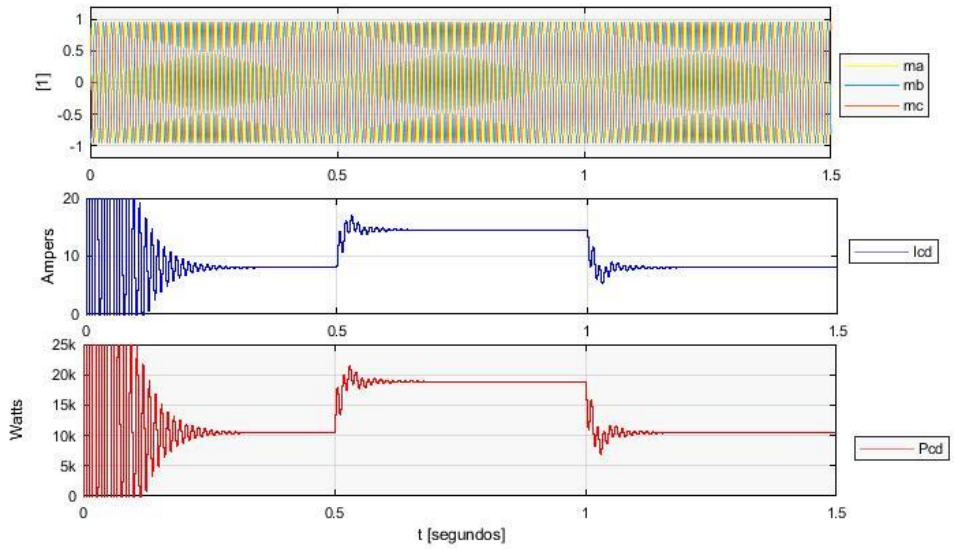

Fig. 27 Cambios de carga.

La respuesta de escalón de corriente tanto negativo como positivo se puede visualizar en el voltaje de CD en la Fig. 24 en donde se observa que la tensión de CD trata de mantenerse en la referencia de los 1300 V, ya que el voltaje CD se mantiene constante, de acuerdo con la ley de control propuesta en esta tesis; es decir, sin importar la variación de carga. En el enlace de CD se tratará demantener en una referencia que dentro del control se ha programado.

En la Fig. 27 es posible visualizar las señales moduladoras que ingresan al VSC necesarias para el control del rectificador.

En la ilustraciones 28 y 29 se puede apreciar de manera más detallada el comportamiento del control cuando existe un cambio de carga, donde se puede apreciar que a los 0.1 segundos el sistema se vuelve a estabilizar en el voltaje de CD (V cd real), con el cambio de carga la corriente que atraviesa el VSC aumenta. Así también, existe una variación instantánea de potencia reactiva (Q red) durante el cambio de carga, pero cabe destacar que, una vez que el sistema se ha estabilizado dicha potencia reactiva se mantendrá en 0.

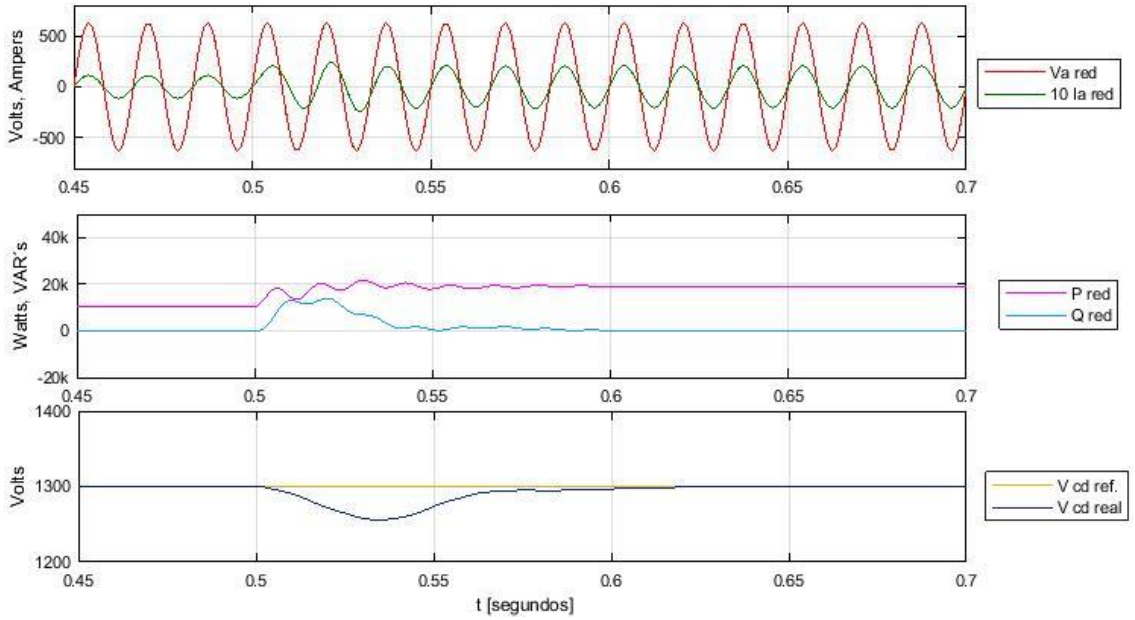

Fig. 28 Comportamiento del control.

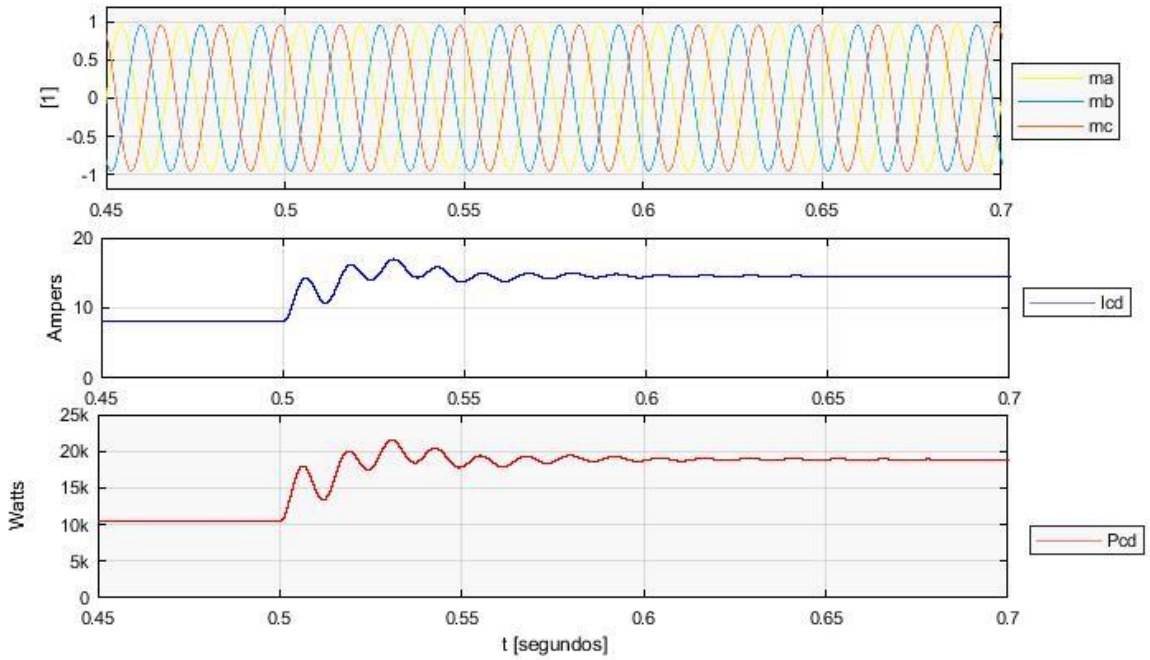

Fig. 29 Comportamiento del control de voltaje.

3.2 Generador PMSG

3.2.1 Descripción general

El generador síncrono, también conocido como alternador síncrono o sincrónico, es un tipo de máquina eléctrica rotativa capaz de transformar energía mecánica en energía eléctrica. Su velocidad de rotación se mantiene constante y tiene un vínculo rígido con la frecuencia f de la red.

Entre los diferentes tipos de generadores síncronos existen los de tipo trifásico, que son los más comunes a la hora de generar energía eléctrica para uso domiciliario e industrial, así como también existen generadores monofásicos usados para ferrocarriles.

3.2.2 Modelo

El análisis de la PMSG es similar al de una máquina síncrona clásica, siendo la excitación la única diferencia. El estator de una PMSG y el de una máquina síncrona de rotor devanado son similares. Además, no existe mucha diferencia entre la fuerza electromotriz producida por un imán permanente a la producida por una bobina excitada. De esta manera, el modelo matemático de la PMSG es similar al de la máquina síncrona clásica.

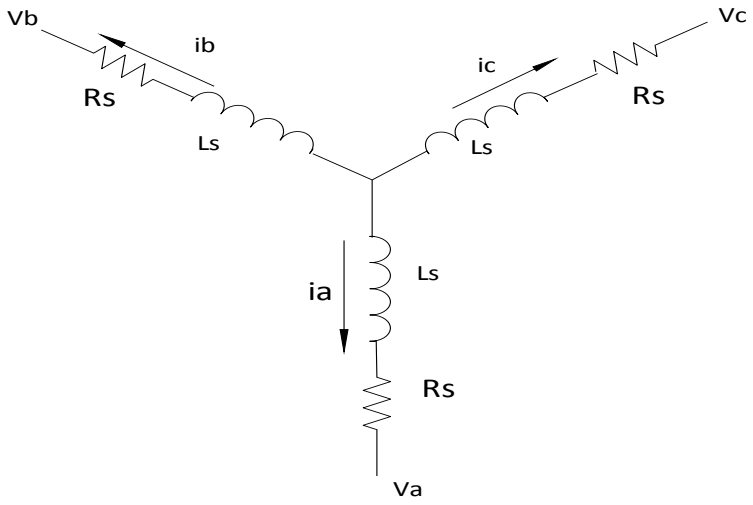

Fig. 30 Circuito eléctrico equivalente del generador síncrono.

Las ecuaciones de tensión de la máquina síncrona se encuentran reproducidas en su en su forma matricial en 42), que es obtenida partir del esquema de la Fig. 30, junto con la con la ecuación del par electromagnético conforman el modelo dinámico de la máquina. máquina.

La relación entre la tensión de cada devanado, la intensidad del mismo y la del resto de devanados de la máquina se expresa a través de las inductancias propias y mutuas.

$$V_{sabc} = -R_s I_{sabc} + \frac{d}{dt}\lambda_{sabc} \tag{42}$$

Este modelo es bastante explícito, pero a su vez es altamente no lineal y contiene una gran cantidad de coeficientes variables. Para modelación de la PMSG se consideran las siguientes características que simplifican su análisis.

- La distribución espacial de los devanados por fase del estator es sinusoidal, por lo tanto, la fuerza magneto motriz producida por el estator se considera sinusoidal.
- No existe ningún efecto térmico sobre las resistencias del estator ni sobre el imán permanente.
- No existe efecto de saturación.
- No existe pérdidas en el hierro de la máquina.

Es decir, en una máquina síncrona de imanes permanentes existen cuatro fuentes que contribuyen el flujo magnético total. Estas son las tres bobinas del estator y el rotor con su imán permanente.

El flujo concatenado del estator (λ_{sabc}) en parte es creado por el mismo flujo del estator y en parte por el flujo de los imanes permanentes del rotor. Por este motivo existen dos subíndices diferentes, el r (rotor) y el s (estator). El flujo concatenado creado por el estator se obtiene de la matriz de inductancias de la bobina del estator y el vector corriente del estator. El flujo concatenado creado por el rotor se obtiene de un vector que contempla el ángulo eléctrico del rotor (Θ) y la amplitud del flujo vista desde el estator, que es creada por los imanes del rotor (Λ). Las ecuaciones que definen el flujo concatenado en el estator y el rotor se muestran a continuación,

$$\lambda_{sabc} = \lambda_{abc\,(s)} + \lambda_{abc\,(r)} \tag{43}$$

$$\lambda_{abc\,(s)} = \begin{bmatrix} L_{aas} & L_{abs} & L_{acs} \\ L_{bas} & L_{bbs} & L_{bcs} \\ L_{cas} & L_{cbs} & L_{ccs} \end{bmatrix} \tag{44}$$

$$\lambda_{abc\,(r)} = \Lambda \begin{bmatrix} sin(\theta) \\ sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \tag{45}$$

Donde (44) define el flujo creado por el estator y (45) define el flujo creado por el rotor.

Según Faraday, si los enlaces de flujo de la superficie delimitada por una espira de conductor varían con el tiempo, entre los bornes de dicha espira se genera una tensión que resulta ser en todo momento proporcional a la velocidad de variación de flujo neto concatenado.

Matemáticamente, la ley de Faraday se enuncia como:

$$v(t) = \frac{d\emptyset(t)}{dt} \tag{46}$$

Por tal motivo, la variación del flujo que concatena cada fase induce una fuerza electromotriz en cada una de estas. Aplicando la ley de Faraday, ecuación (46), se obtienen las fuerzas electromotrices como sigue:

$$\frac{d\lambda_{ma}(t)}{dt} = L_m \frac{di_{ma}}{dt} + \Lambda\, \omega\, cos(\theta) \tag{47}$$

$$\frac{d\lambda_{mb}(t)}{dt} = L_m \frac{di_{mb}}{dt} + \Lambda\, \omega\, cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \tag{48}$$

$$\frac{d\lambda_{mb}(t)}{dt} = L_m \frac{di_{mb}}{dt} + \Lambda\, \omega\, cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \tag{49}$$

Donde:

$$\Lambda\ \omega\ cos(\theta) = e_{ma} \tag{50}$$

$$\Lambda\ \omega\ cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) = e_{mb} \tag{51}$$

$$\Lambda\ \omega\ cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) = e_{mc} \tag{52}$$

Sustituyendo (47) - (49) en (42), quedan escritas la ecuaciones de voltaje de la máquina síncrona de imanes permanentes en forma matricial.

$$\begin{bmatrix} V_{ma} \\ V_{mb} \\ V_{mc} \end{bmatrix} = -[R_m]\begin{bmatrix} I_{ma} \\ I_{mb} \\ I_{mc} \end{bmatrix} + L_m \frac{d}{dt}\begin{bmatrix} I_{ma} \\ I_{mb} \\ I_{mc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{ma} \\ e_{mb} \\ e_{mc} \end{bmatrix} \tag{53}$$

Para cada uno de los circuitos eléctricos se plantea una ecuación diferencial, quedando el modelo de la PMSG en coordenadas abc como sigue:

$$\frac{dI_{ma}}{dt} = \frac{1}{L_m}[V_{ma} - R_m I_{ma} + e_{ma}] \tag{54}$$

$$\frac{dI_{mb}}{dt} = \frac{1}{L_m}[V_{mb} - R_m I_{mb} + e_{mb}] \tag{55}$$

$$\frac{dI_{ma}}{dt} = \frac{1}{L_m}[V_{mc} - R_m I_{mc} + e_{mc}] \tag{56}$$

El modelo de la PMSG en coordenadas abc, descrito por las ecuaciones (54)-(56) puede ser representada como se muestra en la Fig. 31

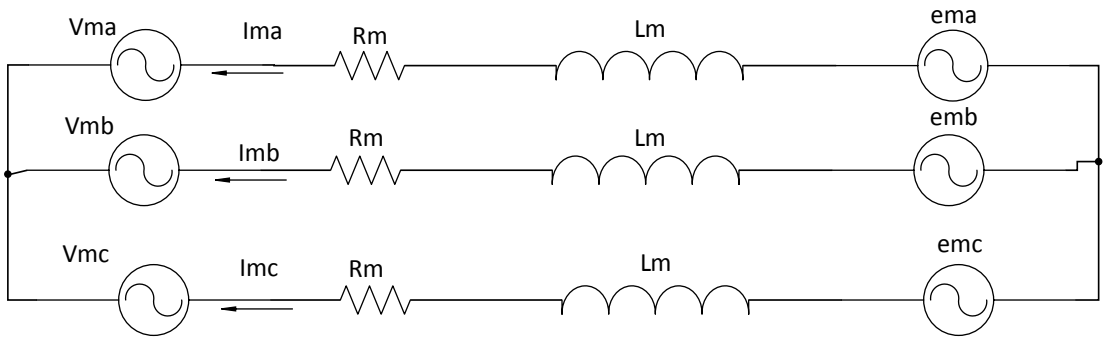

Fig. 31 Esquema de la PMSG.

A partir de la Fig. 31 se puede apreciar que, $e_{ma,b,c}$ son las fuerzas electromotrices inducidas en los respectivos embobinados por el imán permanente hacia el estator; *Lm* es la inductancia propia de cada fase correspondiente y *Rm* es la resistencia parásita en el estator del generador de cada fase; $V_{ma,b,c}$ son los voltaje en la salida del generador.

3.2.3 Simulación como generador con carga

Como ya se había mencionado anteriormente, el PMSG es un generador síncrono en el que se sustituye el embobinado de estación por imanes permanentes, esto quiere decir, que en el modelo de la máquina síncrona estándar que se implementó en Matlab simulink se implementó un voltaje de excitación constante, así como también, un cambio de carga a cierto tiempo.

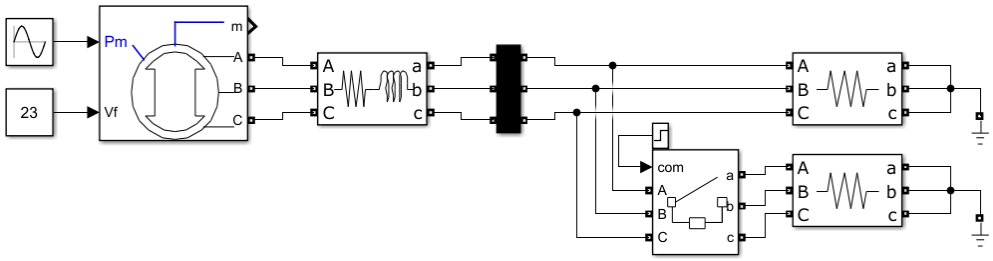

Fig. 32 Simulación de PMSG con cambios de carga.

En la Fig 32 se presenta la estructura de la simulación, donde se puede se implementó una máquina síncrona pero para hacerla simular en imanes permanentes se le introdujo un voltaje de excitación constante así como también la maquina debe de estar conectada a una carga en serie, después se le incorporo una carga de 100 Ω en serie, para poder realizar un cambio de carga se incorporó una carga igualmente de 100 Ω en paralelo mediante un interruptor que será activado en cierto tiempo para aumentar la demanda de la potencia.

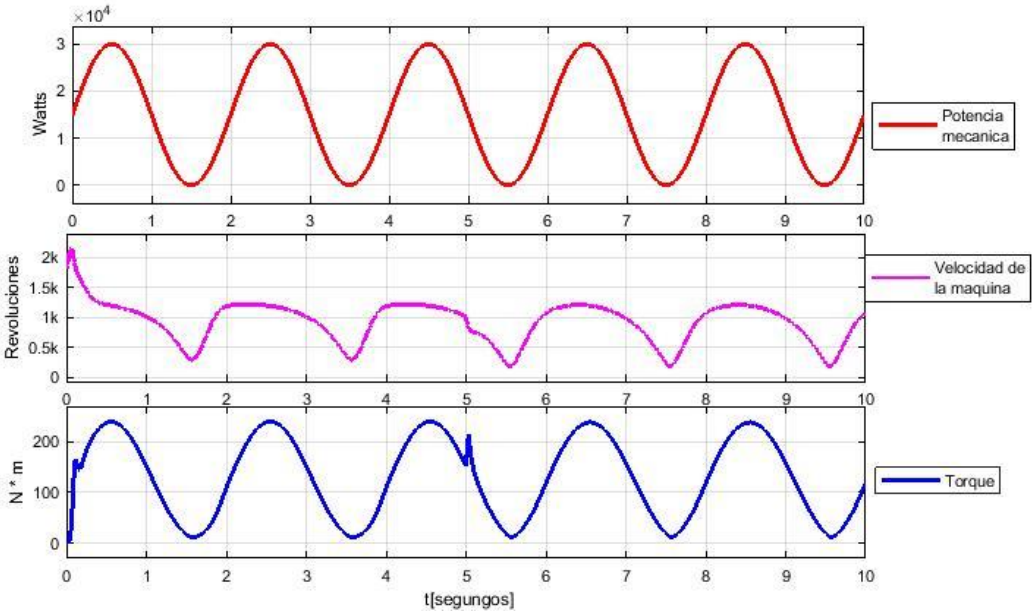

Fig. 33 Comportamiento mecánico del generador

Se puede observar en la Fig. 33 la parte mecánica de nuestro generador donde la potencia mecánica que está ingresando a la máquina es variable en el tiempo de forma senoidal donde la potencia máxima es de 30 000 Watts y la mínima es cero sin importar cambio de carga.

En la segunda gráfica de la Fig.33 se puede observar que la velocidad del rotor también es variable ya que depende de la potencia mecánica así como también de la demanda del sistema donde se puede observar que cuando llega al máxima potencia mecánica tenemos 1300 revoluciones y cuando la potencia es mínima la velocidad del rotor no se logra a detener por completo si no llega a 300 revoluciones, esto se debe a la inercia de la máquina.

En la tercer gráfica de la Fig.33se observa el torque que está siendo ejercido sobre la máquina para poder crear la potencia requerida mostrando un cambio de carga en el quinto segundo se puede ver que es igual a la forma de la potencia mecánica de entrada.

Finalmente, se deduce que considerando una potencia mecánica constante, es posible visualizar cambios de velocidad y de torque ante un cambio de carga a la salida eléctrica.

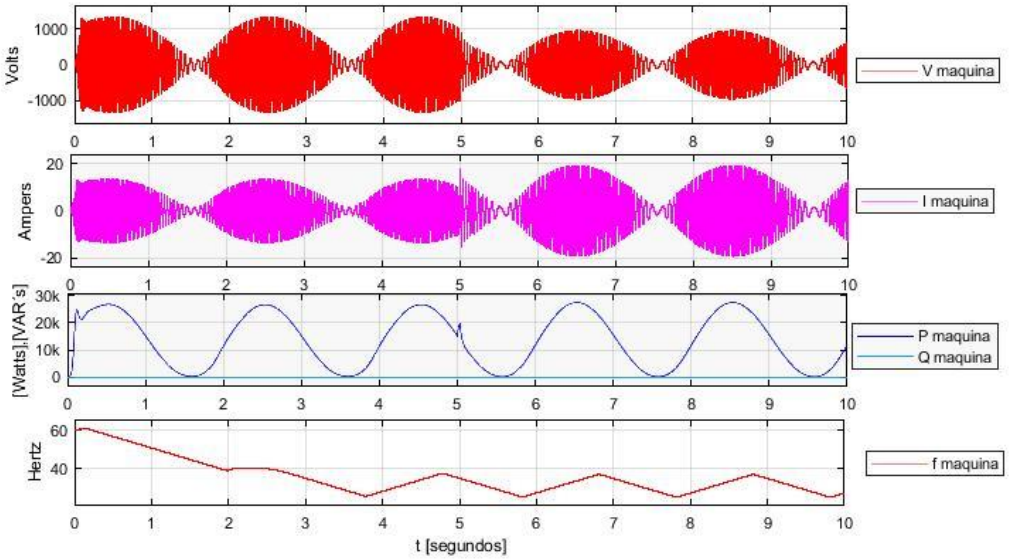

Fig. 34 Comportamiento de la parte eléctrica.

Considerando un voltaje de excitación es constante que emula al rotor de imán permanente, en la salida eléctrica del PMSG se puede observar que el voltaje dependerá de la potencia mecánica que se le esté inyectando en contraste con la carga eléctrica aplicada.

Observando de forma complementaria que las variaciones de frecuencia son directamente dependientes de la potencia mecánica de entrada, hasta este punto de análisis, se observa que la energía eléctrica que se produce no se puede inyectar a la red ya que no cuenta con ningún estándar y es muy variable.

3.3 Simulación del hidrogenerador

La estructura del hidrogenerador implementado consta de dos convertidores de electrónica de potencia: un VSC del lado de la máquina (MSC, por sus siglas en ingles) para proporcionar la conversión de energía entre los niveles de voltaje de CA medio y bajo, y un VSC del lado de la red (Grid Side Converter; GSC) para generar los voltajes requeridos para su interconexión, para lo cual, las siguientes secciones describen el modelado de control de MSC y GSC y se muestran estos en la Fig. 35.

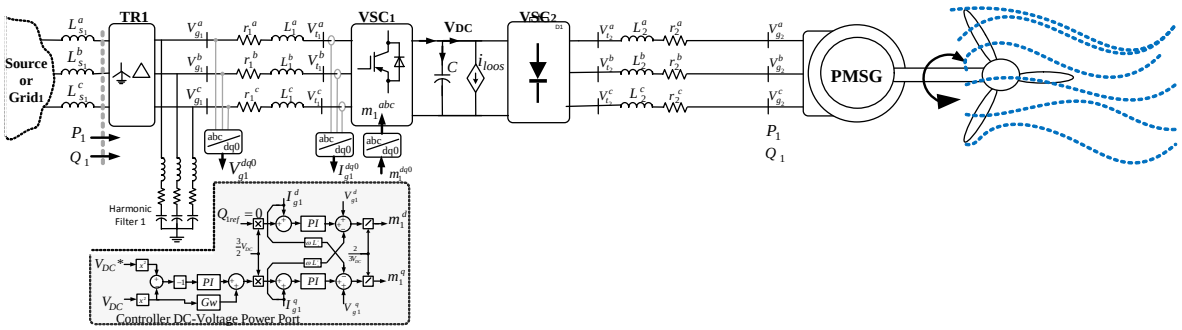

Fig. 35 Modelo del hidrogenerador, máquina y convertidor back-to-back.

Cabe resaltar que este modelo puede ser considerado para la generación de energía eléctrica por corrientes marinas en varias de sus formas, por lo que el objetivo de este periodo de investigación solo se implementa como un rectificador no controlado el VSC del lado de la máquina (;MSC, por sus siglas en ingles), adjunto a que se delimita a considerar una potencia mecánica variable aplicada al eje del generador, sin considerar el modelo de las turbina, modelos de engranaje y modelos o tipos de corrientes marinas específicos.

A fin de obtener una respuesta integral de cada uno de los elementos modelados con anterioridad, se ha implementado una simulación en plataforma Matlab-Simulink® donde se integra la operación en conjunto del generador con una potencia mecánica variable a la entrada, y posteriormente, la etapa de conversión de energía a través de un convertidor back-to-back. El esquemático implementado en simulación es mostrado en la Fig.26.

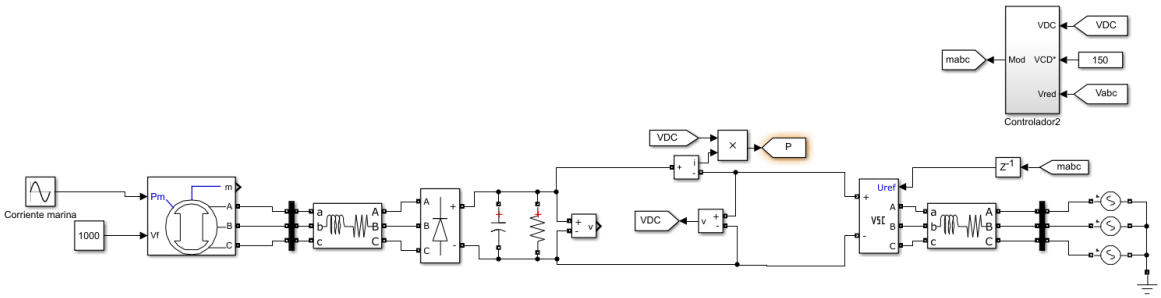

Fig. 36 Esquemático de simulación del hidrogenerador en Matlab-Simulink®.

Implementando un generador de 20kVA, con una tensión de fase de 460 volts, los parámetros de control e interconexión del VSC son mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2 Principales parámetros de simulación

Generador	Potencia	20kW
	Voltaje	460v
	Frecuencia	60Hz
back to dack	Inductancia	10mH
	Capacitor	1500uF
	Tiempo respuesta	0.01Seg
	Voltaje de CD	1300
Red eléctrica	Voltaje de red	650V

3.3.2Simulación con corrientes marinas

Utilizando el diagrama de la Fig. 36 implementado en Matlab Simulink sea implementado la potencia mecánica que emula la generación de energía marina. Para este caso en la Fig. 37 muestra las principales formas de onda de dicha implementación, iniciando desde una entrada de potencia mecánica variable aplicada en el eje de la máquina hasta la potencia eléctrica inyectada a una red de distribución.

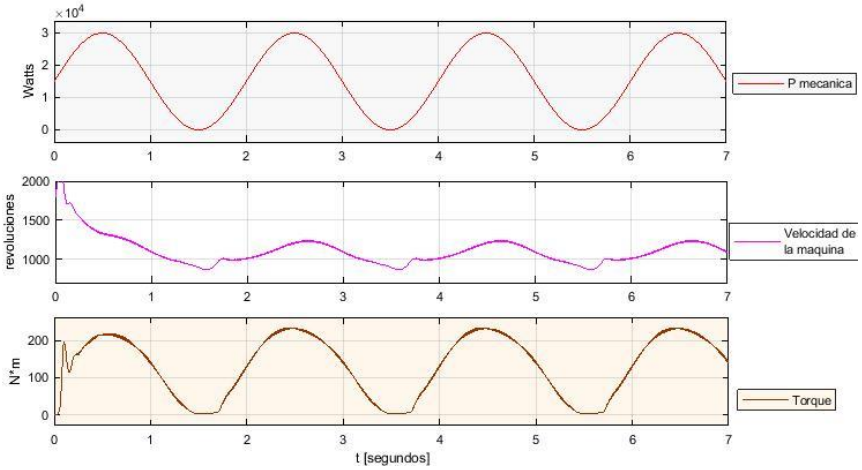

Fig. 37 Comportamiento mecánico.

La Fig.37 muestra una potencia mecánica de entrada, la cual es representada por una onda senoidal, que va desde 0kW hasta 30kW con un periodo de oscilación de 2 segundos, representando así una onda de oleaje regular. En la siguiente gráfica podemos ver que la velocidad del rotor no se va a mantener constante debido a que la potencia mecánica es variable y en su estado estable se mantendrá entre 800 y los 1300 revoluciones por minuto, así como en la tercera es el torque que también es proporcional a la entrada mecánica y es variable entre los 0 y los 220 N*m.

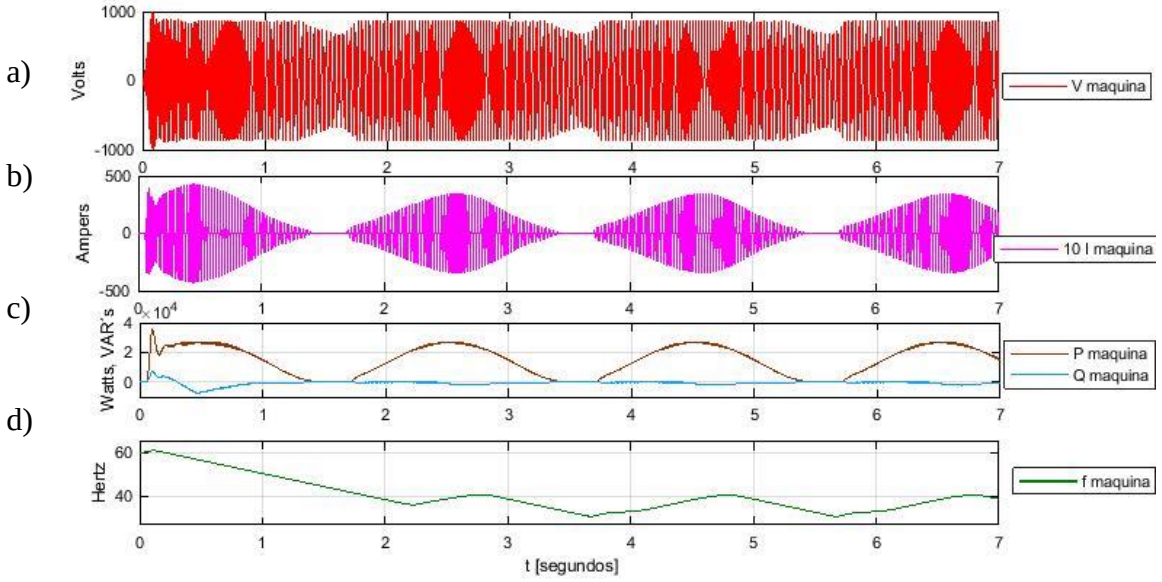

Fig. 38 Comportamiento eléctrico del generador.

En la Fig. 38a se observa una forma de onda de tensión de la fase a (Vga) en las terminales de la máquina, donde el voltaje es variable y proporcional a la potencia mecánica aplicada al generador sin llegar a un nivel cero, lo cual se atribuye a la inercia de la máquina.

Como se observa en la Fig. 38b, la corriente eléctrica que se genera en las terminales de la máquina logra una magnitud de hasta 30 Amp pico por fase, donde su magnitud también es oscilante y dependiente de la potencia mecánica inicial.

La potencia activa y reactiva obtenida por el generador de imanes permanentes es mostrada en la Fig. 38c donde se percibe una pequeña generación de potencia reactiva, en comparación con la generación de potencia activa.

En este contexto es necesario señalar que la forma de onda de potencia eléctrica no es del todo similar a la potencia mecánica de entrada, lo cual se atribuye a las inercias propias del generador síncrono.

En la Fig.38d, expone que la frecuencia de las ondas de voltaje de la máquina es variable en un cierto rango, con lo cual se deduce que la tensión y corriente del generador síncrono nunca podrá ser de magnitud y frecuencia constante.

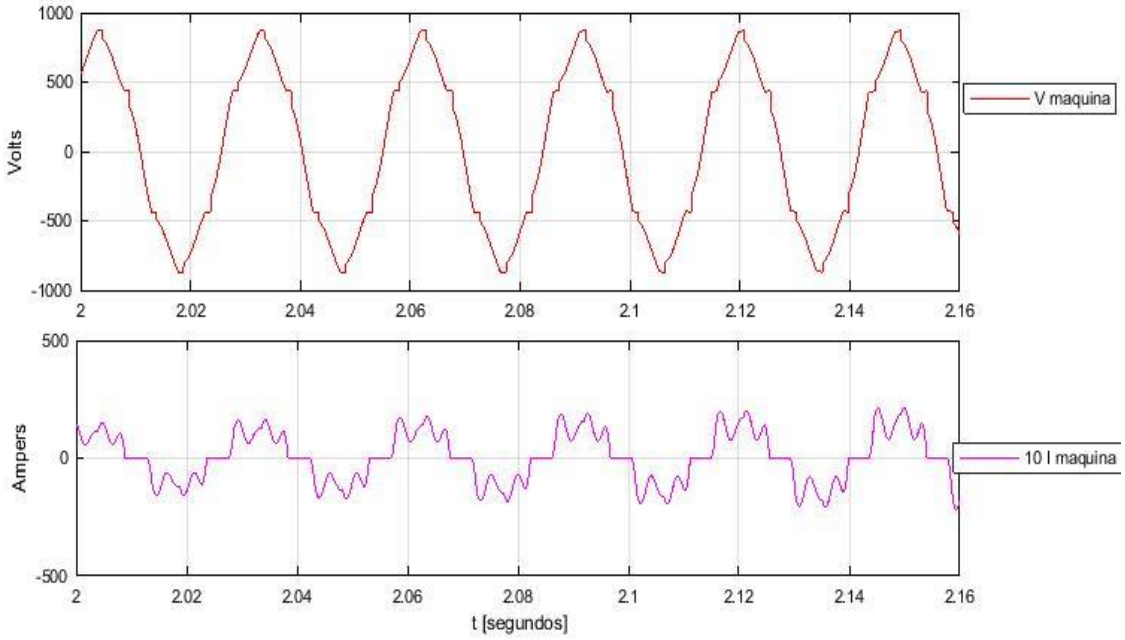

Fig. 39 Forma de onda del voltaje y corriente.

En la Fig. 39 se puede ver más de cerca el voltaje de la fase de la máquina así como también la corriente de dicha fase, donde vemos que ninguna de las dos es completamente senoidal, esto es debido a que en esta etapa del proyecto no existe un control de rectificador activo y esto ocasiona que las señales contengan distorsión armónica.

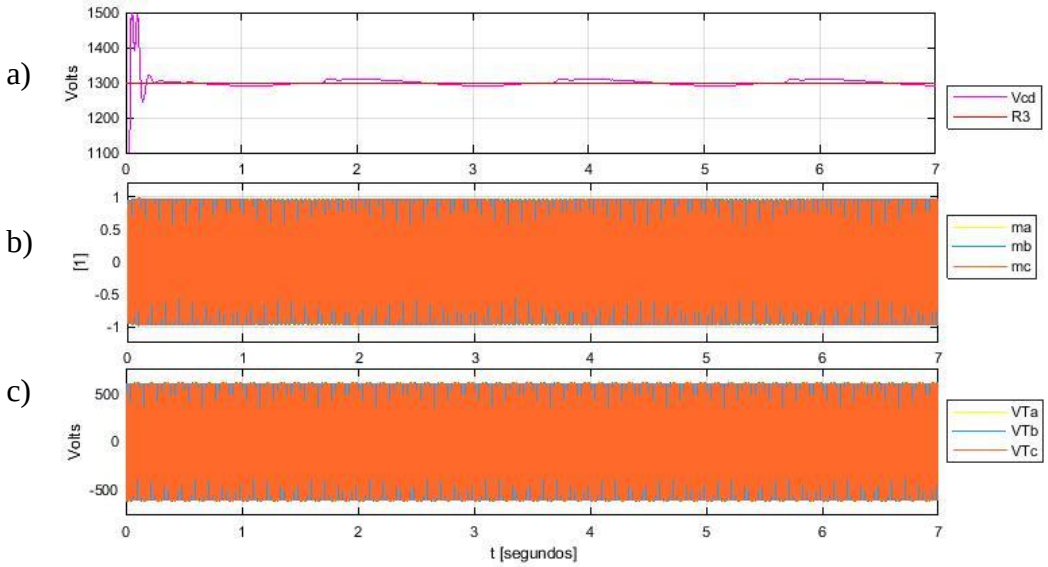

Fig. 40 Comportamiento del control.

En la Fig.40a se observa la tensión de CD en el puerto de conexión de los convertidores VSC, donde dicha tensión experimenta unas ligeras variaciones de entre el 1 y 3%, cabe señalar que idealmente la tensión de CD debe de ser constante, pero debido a los elementos parásitos y las intermitencias en el paso de la energía; así como también en la Fig.41 se puede observar las moduladoras del control y en la Fig.41c podemos ver VT donde se ve que son iguales mientras no pasen por el filtro.

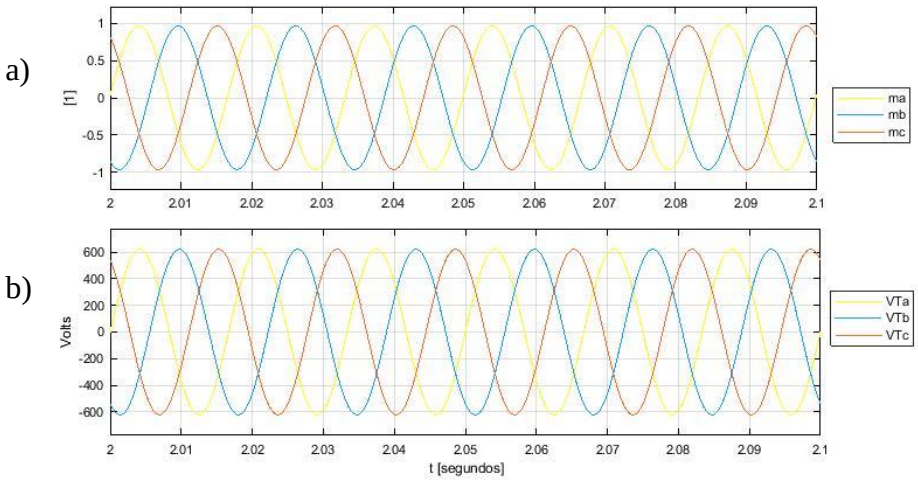

Fig. 41 Moduladoras y señales vt del control.

En la Fig. 41a se observa las moduladoras que son unitarias y en la Fig.41b la señal ya modificada se puede observar que son iguales pero con la única diferencia que ya no es unitaria sino ya es del valor máximo de la red pero aun todavía no se encuentran filtradas por los inductores.

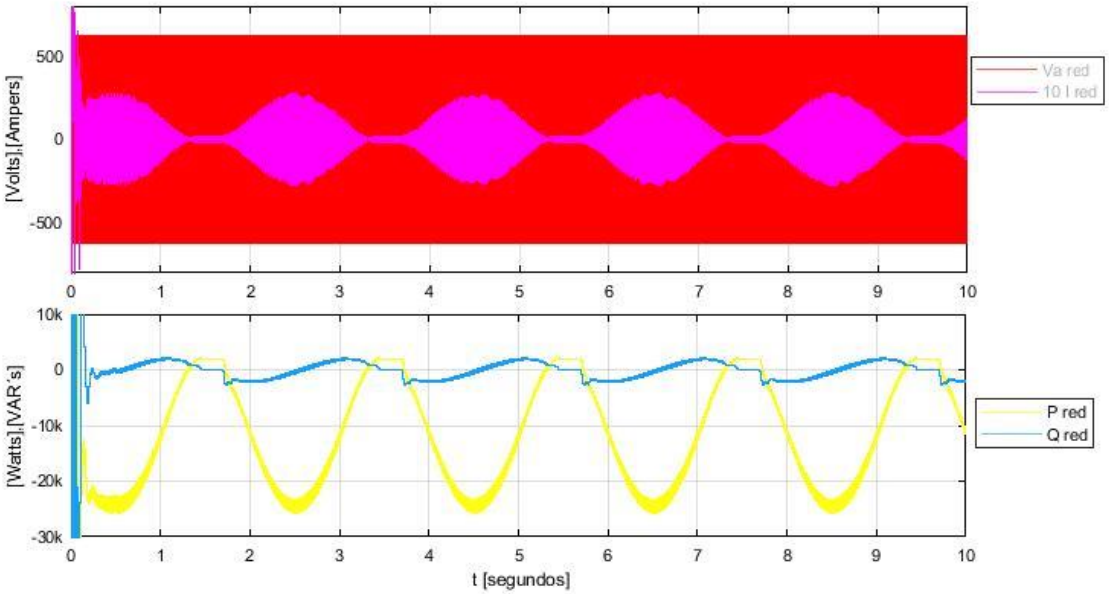

Fig. 42 Comportamiento en la parte del la red

Del lado de la red eléctrica en el punto de interconexión, se observa que el voltaje (Va) es de magnitud constante como se muestra en la Fig. 42, cabe señalar que en el escenario de simulación la red eléctrica es representada por un bus infinito, por lo que, no se presentan variaciones ante la inyección de potencia activa y reactiva.

Por otra parte, el convertidor VSC del lado de la red, es encargado de mantener una continua regulación y voltaje en el puerto de CD, por lo que la acción de control de este convertidor se encarga de extraer la energía excedente en el capacitor a fin de mantener un voltaje constante en este, dicha energía extraída en el capacitor es inyectada a la red eléctrica como se observa en la Fig.42, donde finalmente el producto de la corriente y voltaje de la red muestran una inyección de potencia activa con una magnitud de aproximadamente 25kW, con ligeras variaciones de potencia reactiva, así como también se puede observar que en la Fig.43 la señal de voltaje y la de corriente se encuentra en contrafase donde también se está demostrando que se está inyectando potencia.

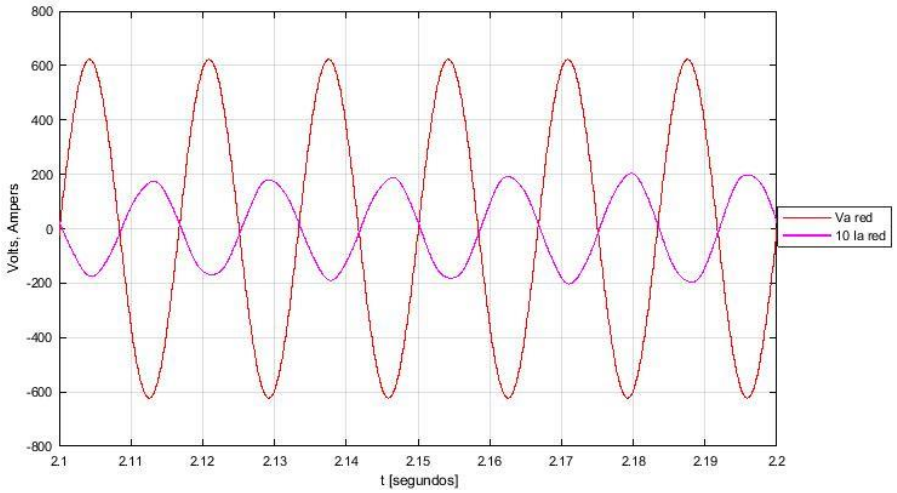

Fig. 43 Señal de voltaje y de corriente.

Una vez que se cuenta con un escenario de simulación del hidrogenerador, el paso subsecuente para su implementación física, consiste en iniciar una serie de pruebas en laboratorio a fin de construir un prototipo a escala reducida que representa una operación real del proyecto.

3.4 Conclusiones particulares

El análisis por separado del sistema por medio de simulación se puede observar el comportamiento de cada parte y como el generador es de con un voltaje de excitación constante y teniendo la fuerza mecánica de entrada se puede observar que en la parte eléctrica el voltaje, corriente, frecuencia de salida son dependientes de la fuerza mecánica, así como también en la parte mecánica las variables como son la velocidad del rotor y torque de la máquina.

El análisis del control de VSC trifásico se realizó como rectificador donde se puedo observar que del lado de CD se mantiene constante y dentro de los cambios de carga se mantendrá constante el voltaje de CD.

Al conjuntar la parte del generador y del VSC-Back to Back dentro de la simulación se pudo observar que en lugar de que la red entregue potencia y el generador se convierta en motor, ocurrió lo contrario donde el generador estuvo enviando potencia a la red.

CAPÍTULO 4

Experimento

Para el desarrollo de este experimento se han creado dos prototipos por separado: un inversor trifásico que emula el movimiento de la energía marina en el generador síncrono a través de una máquina de CD y un back to back que interconecta al generador síncrono a la red eléctrica, con el cual se comprueba las simulaciones que se han presentado en el capítulo anterior.

Para el desarrollo del experimento se han utilizado módulos ""CREE High Performance MOSFET and Diode Evaluación Kit", Fig. 45, en la cual consisten de medios puentes H que se ha utilizado para la conmutación asi como también se han utilizado el micro controlador de la compañía Texas Instrument y la familia c2000 , Fig. 44, que será el medio para poder incrustar el control y recibir señales de entrada y enviar los pulsos de control para la los módulos.

Fig. 44 CREE High Performance MOSFET and Diode Evaluación Kit.

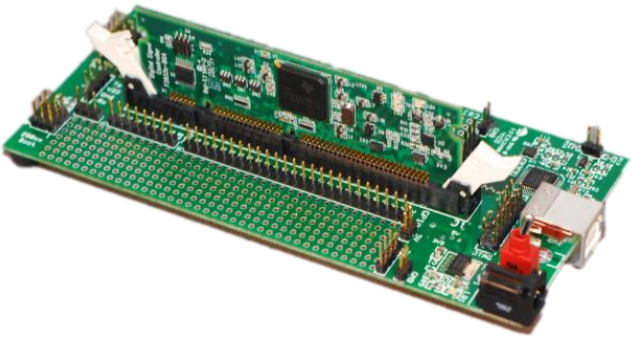

Fig. 45 TI C2000.

Así como también el software utilizado es Simulink® que es una herramienta de MATLAB® para la programación de tanto de las corrientes marinas u olas, así como también del control del back to back.

4.1 Experimento del impulsor

Para la primera parte se realizó el prototipo de variador de voltaje CD o driver por medio un VSC trifásico, Fig. 46 que consiste de tres medios puentes H que tienen que ser alimentados con 12 [V] así como también 3 inductores para poder filtrar la tensión de salida. La activación de los convertidores se realiza a través de la generación de pulsos SPWM provenientes del DSP.

Fig. 46 Prototipo de inversor.

Los pulsos de control provenientes del DSP son mostrados por la linea azul con 5v, miesntras que la linea amarilla muestra la salida del inversor antes del filtrado.

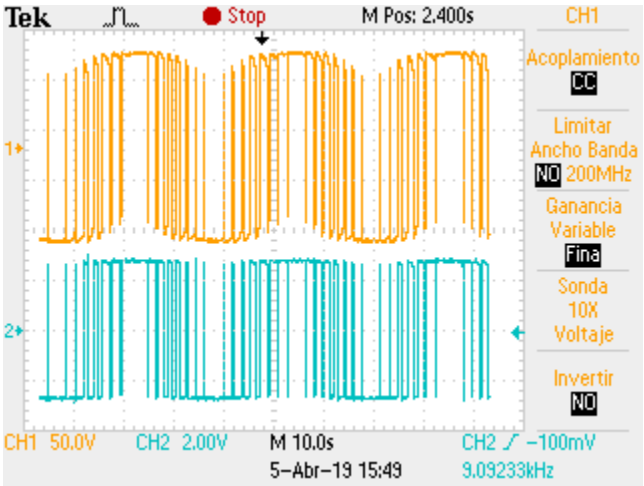

Fig. 47 Estado estable del inversor.

Para la generacion por medio de olas este fue construido por medio de un dinamo en la cual se le incrustó un voltaje controlado por medio de un VSC y por medio de la DSP se le programó la forma de la onda en la cual iba a reaccionar el dinamómetro, así como también este estaba conectado una máquina sincrona de imanes permanentes para poder extraer un voltaje en corriente alterna variable de acuerdo a la forma de onda, Fig. 48.

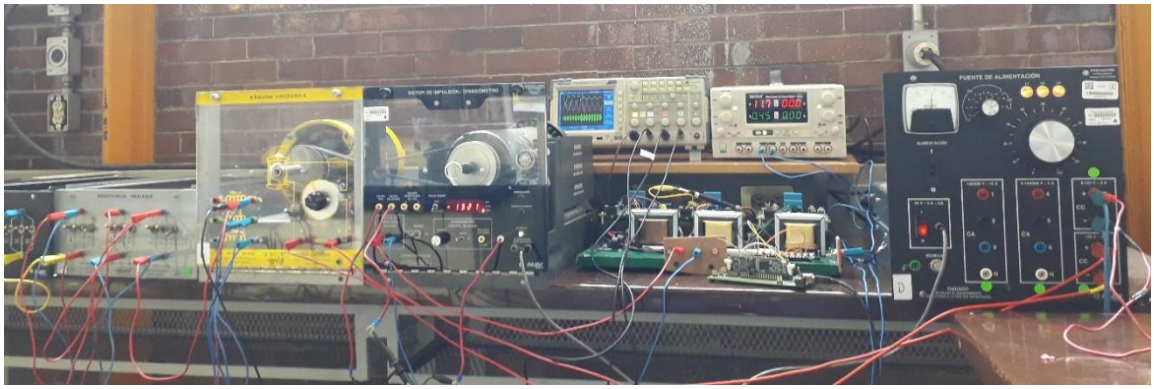

Fig. 48 Prototipo del simulador de olas.

Antes de interconectar el generador síncrono a la red por medio del convertidor back to back, se realizaron tres pruebas a diferentes condiciones de carga pero con una velocidad del dinamómetro de 1900 revoluciones máximo en las 3 condiciones; los resultados son mostados a continuacion:

- **Sin carga**

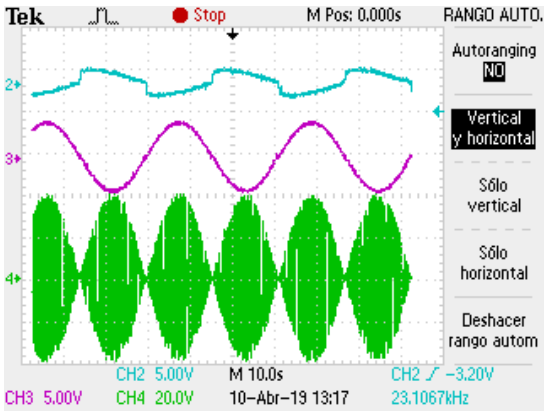

Fig. 49 Simulador sin carga.

La señal 1 de la Fig. 49 muestra el comportamiento del par de la máquina que casi es mínimo donde el valor es 0.4, es decir, es lo mínimo que va a dar la máquina cuando esté en vacío;

en la señal 2 podemos observar que la velocidad de nuestra máquina es siempre constante; vemos que es una frecuencia muy pequeña, así como también podemos observar la tercera señal donde el voltaje generado siempre se mantiene constante.

- **Media carga**

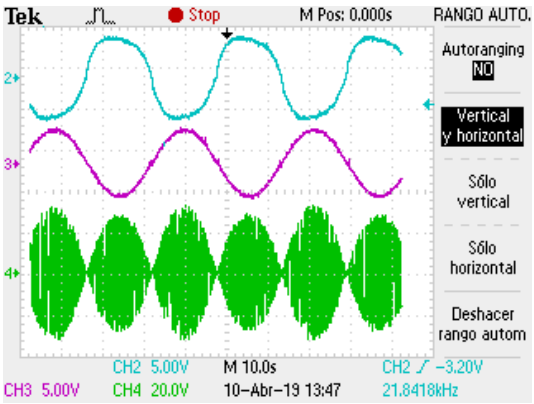

Fig. 50 Simulador a media carga.

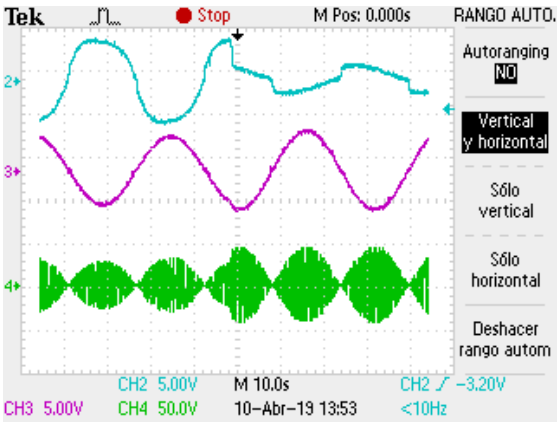

Fig. 51 Cambio de carga (de media carga a sin carga).

Con una resistencia de 120 [Ω] para poder obtener una carga que sea la mitad del máximo de nuestra máquina, se puede observar en la primera linea de la Fig.50 se pude que el par es de 1.08 [N* m], asi como también la velocidad que se presenta como la linea morada se ve que se mantiene constante sin ningun cambio, al igual la ultima linea (la verde) puede observar que el voltaje maximo es igual a cada medio ciclo.

En la Fig. 51 se puede observar un cambio de carga a los 15 segundos, dejándolo sin carga; en la primera línea azul se puede observar que cuando existe el cambio el par disminuye de forma brusca, por lo contrario, el voltaje aumenta cuando existe la desaparición de la carga y la velocidad aumenta de 1900 rev a 2000 revoluciones.

- **Carga Maxima**

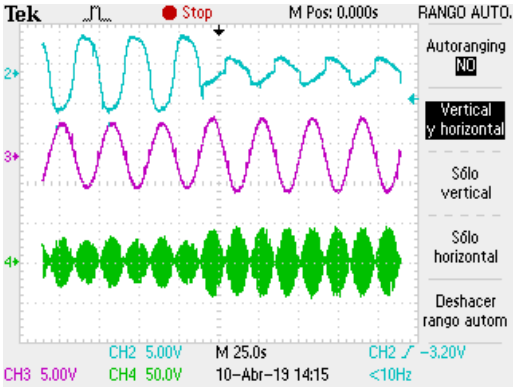

Fig. 52 Simulador a media carga.

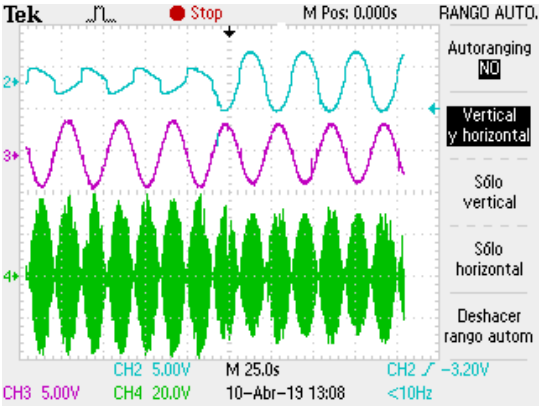

Fig. 53 Simulador a media carga (zoom).

En la Fig. 52 podemos apreciar que en los primeros 3 ciclos tenemos una carga de 240 [Ω] por ende el par que es la primera linea tenemos que aumenta hasta 1.38 que a la vez nos esta dando la potencia maxima de 240 watts que es la caraga nominal de nuestra maquina sincrona, asi como tambien podemos observar que el voltaje disminuye cuando se tiene una carga pero se puede observar que cuando le quitamos la carga aumenta el par regresa a los 0.4, asi como tambien la velocidad cambia de 1900 revoluciones a 2050 revoluciones.

En La Fig.53 se puede observar todo lo contrario a la Fig.52 donde a cierto tiempo se pude observar el cambio de crago en este caso se le puso y se pude apreciar que la velocidad disminuye de 1900 revoluciones a 1800, linea morada, asi como tambien el voltaje maximo diminuye de 120 [V] a 110 [V], linea verde, en cuanto a la linea azul que reprenta el par podemos observar un aumento de par en el momento de incorporarse el par.

.

4.2 VSC operando como inversor

La segunda fase consistio en el armado de un back to bak trifásico que esta constituido por dos VSC trifasicos conectados por medio de la terminales de CD en este caso no se le para no hacer muy grande el prototipo se pusieron las termilaes de CD para poder conectar el capacitor externamente, asi como tambien poder separar los dos VSC se trabajo de un solo lado si asi se requiriera ya que es un prototipo lo mas general posible, Fig.54.

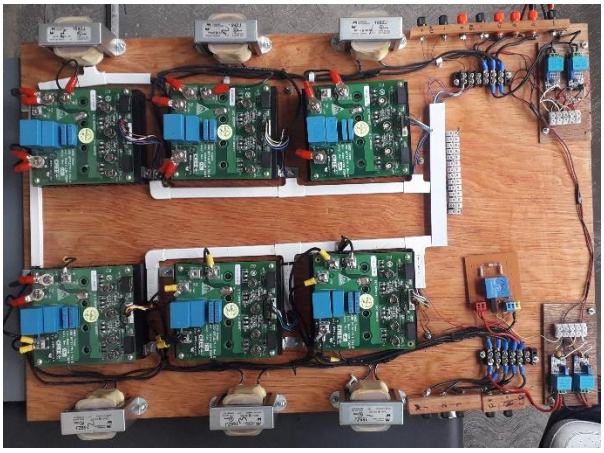

Fig. 54 Prototipo del back to back.

Uno de los dos VSC sera utilizado como un rectificador no controlado es decir como un puente de diodos, es decir la señal sera rectificada a voltaje en CD para conectar esta parte tendremos que conectar la señal de los pulsos a tierra para que solo funcionen los diodos.Para poder controlar el se utilizo dos clases de sensores uno que es un sensor de voltaje alterna monofasica, Fig. 55; por ser monofasica se utlizaron 3 de estos sensores, tambien se utilizo un sersor de voltaje dirrecta para el bus de CD, Fig. 56.

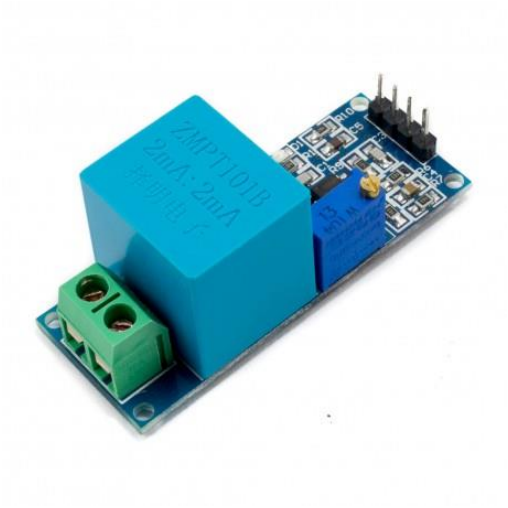

Fig. 55 Sensor CA.

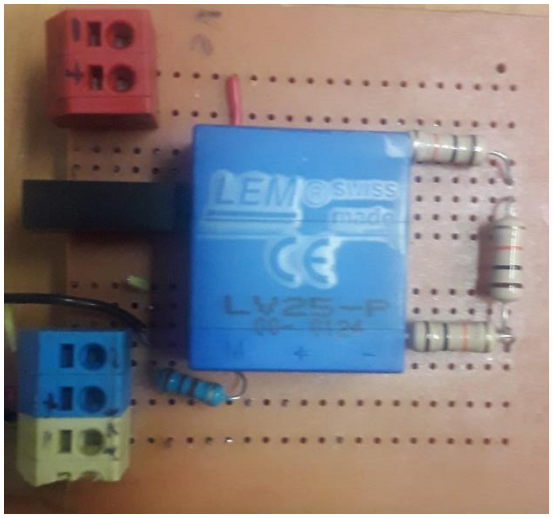

Fig. 56 Sensor de CD.

El segundo VSC esta segunda parte sera conectado como un inversor para probar nuestro control de voltaje es decir se ingresara un voltaje en el lado de CA por medio del control saldra voltaje en CD controlado con una resistencia.

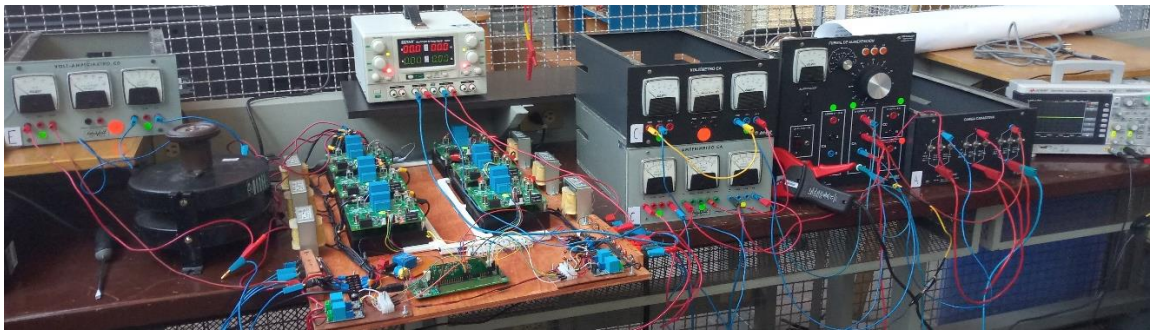

Fig. 57 Prueba como inversor.

Para esto se obtuvieron estos resultados:

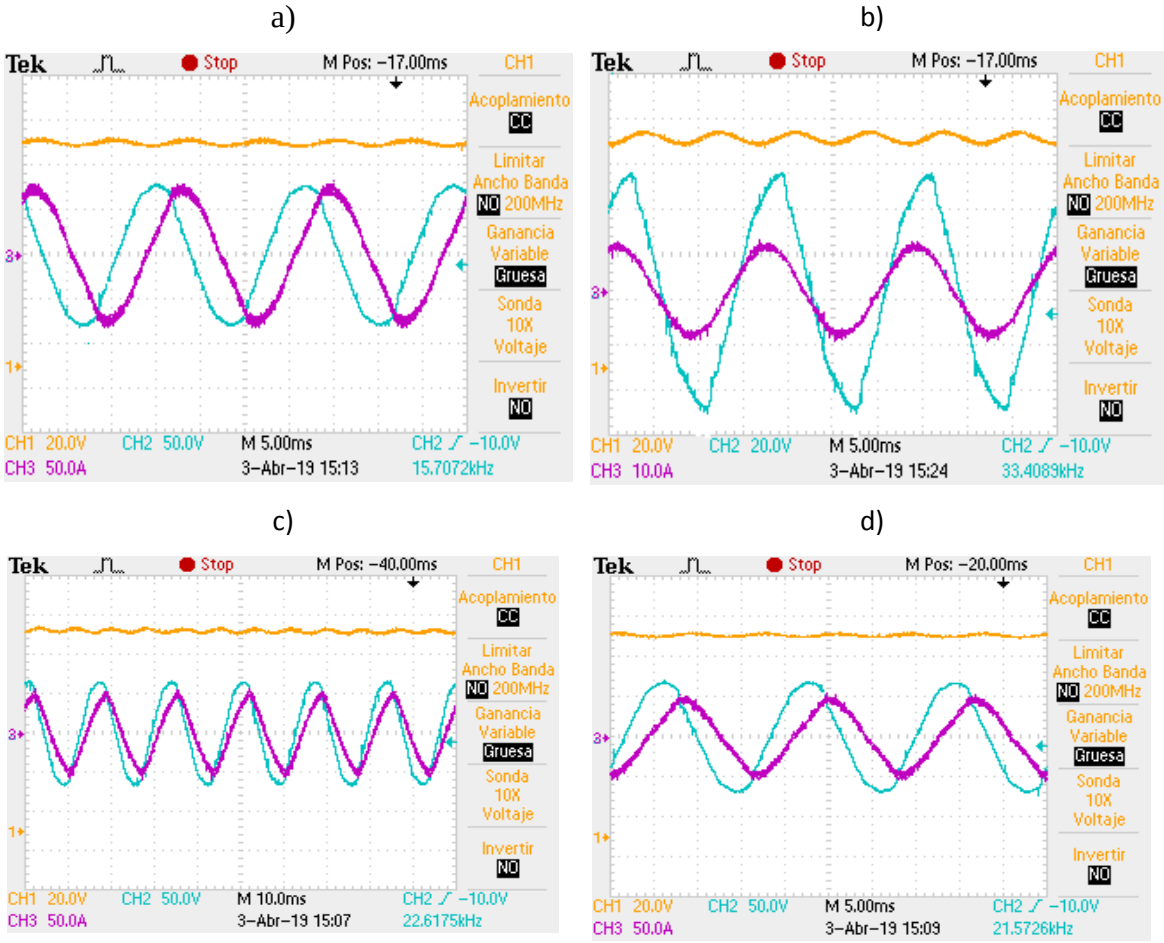

Fig. 58 Voltaje y Corriente de CA y el voltaje CD controlado a diversas condiciones.

Como se puede apreciar en la Fig.58 se hizo variar la el voltaje asi como tambien la carga se vario a diversas concdiciones para poder observar que el control implementado este funcionando a didiversas condiciones y en puntos criticos.

La linea azul representa el voltaje CA, la linea amarilla regresenta la corriente CA y la amarilla representa el voltaje de CD controñlado.

Se puede observar que entre mas grande sea la corriente esta se va atrasar respecto al volteje esto se puede apreciar mediante las Fig. 58a, 58b, y 58d pero a la vez se puede observar que el voltaje CD trata de conservarse en los 100 [V], en la Fig.58a tenemos un voltaje de 80[V], en la Fig.58b es de 90[V] y en la Fig.58d es e 60[V] podemos apreciar que con esta comparacion el voltaje nunca va a cambiar en el lado de CD o se va atratar de mantener en los 100 [V] pero entre mas bajos son los voltajes en CA a nuestro control le va a costar mantener el volrtaje controlado en el lado de CD.

En La Fig. 58b se puede observar que la corriente se adelanta respecto al voltaje ya que la corriente es mas pequeña respecto al voltaje pero a la vez se sigue viendo que el voltaje en CD se se trata de mantener en los 100 volts

.

4.3 Hidrogenerador completo

Como último fase se unieron ambas partes mediante la salida del generador síncrono hacia el back to back para así poder así ingresar la potencia eléctrica del generador síncrono a la red Fig. 59.

Fig. 59 Prototipo de hidrogenerador completo

Como resultados están representados en la Fig.60.

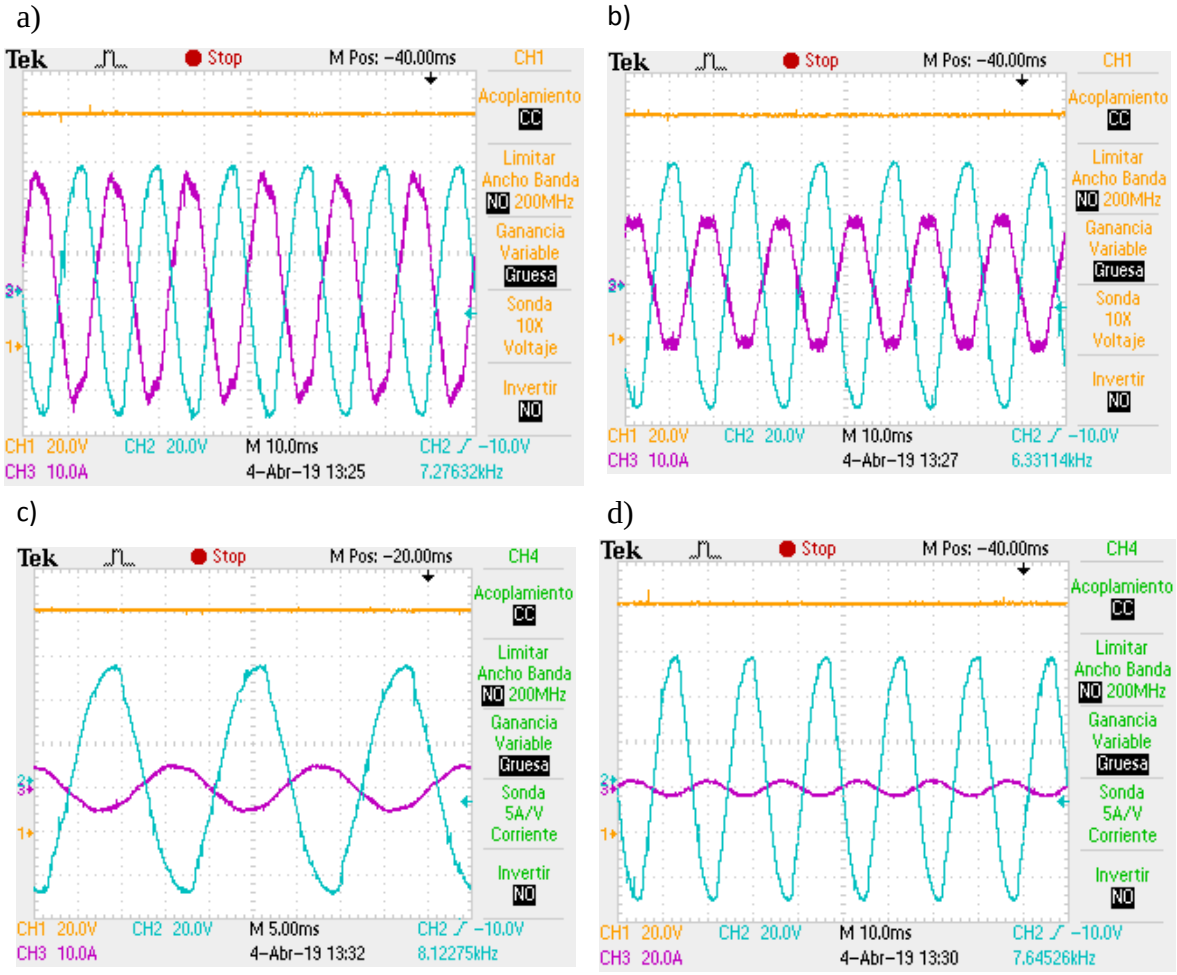

Fig. 60 Voltaje CD controlado y Voltaje, corriente CA conectado a la red.

En la Fig.60 en la señal azul representa el voltaje CA, la morada es la corriente y la amarilla el voltaje controlado de CD.

Se aprecia en las cuatro graficas que entre la corriente y el voltaje CA se encuentra desfasada 180° es decir está enviando corriente al sistema en las cuatro graficas en diferentes etapas.

En la Fig. 60a podemos ver en la etapa donde se está enviando la máxima corriente al sistema que nos esta proporcionando la maquina síncrona y en la Fig.60d podemos observar que es en la última parte donde se está entrenado la mínima corriente al sistema pero en ningún momento llega convertirse en motor en cualquier parte siempre estará enviando corriente al

sistema; también se puede apreciar que la que en cualquier instante el voltaje CD siempre se mantendrá en los 100[v] sin importar cuanta corriente estemos enviando a la red. También se puede apreciar que el voltaje nunca varía ya que se está censando el voltaje de la red que nunca varia.

En la Fig.60b la entrega 30% de la potencia total y de la Fig, 60c se entrega 60% de la potencia total.

En la Fig.61 se pude observar que el voltaje CD, señal amarilla nunca varia sin importar como este variando el voltaje que viene de nuestro simulador de olas, la señal azul, esto quiere decir que nuestro control de voltaje de cd está funcionando correctamente..

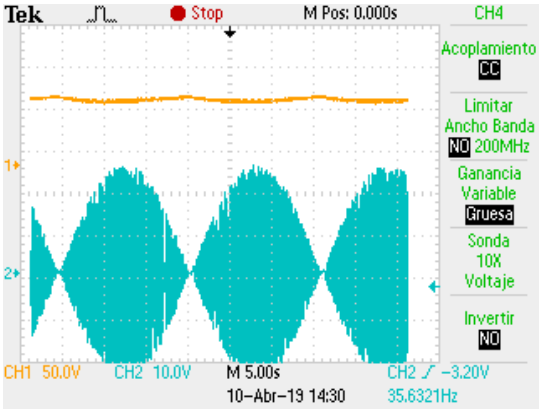

Fig. 61 Control del back to back completo.

4.4 Conclusiones particulares

Al analizar los resultados del experimento se puede observar que el prototipo a escala está enviando energía al sistema así como también se observa que el voltaje del lado de DC se mantendrá constante, lo anterior también comprueba que el control implementado en esta etapa está bien establecido.

|Por otra parte también se ha podido desarrollar nuestro simulador de olas por medio de un driver, el cual se ha configurado para hacer girar el rotor de nuestro generador síncrono a diversas velocidades, para así poder comprobar que en cualquier estado el generador estará enviando corriente y no motorizando

CAPÍTULO 5
Conclusiones

5.1 Conclusiones

5.1.2 Aportes

Los aportes realizados con la tesis a la Facultad de Ingeniería y a la Universidad Nacional Autónoma de México y en especial al área de eléctrica.

- ✓ Creación de un prototipo de un driver para la simulación por medio de un motor de impulsión de CD donde se contempla reproducir los datos de oleaje a un generador síncrono de imanes permanentes por medio del driver , en la Facultad de Ingeniería, UNAM.
- ✓ La creación de la interconexión a la red eléctrica por medio de una interfaz de electrónica de potencia CA/CD/CA también conocido como Back to Back, respectivamente, en la Facultad de Ingeniería, UNAM.

5.1.3 Impacto en el entorno

En el trabajo de tesis el impacto en el entorno donde se coloque este tipo de generadores y la interconexión a la red siempre debe de ser lo más amigable posible, lo cual hace que este tipo de proyectos sean multidicipliinarios.

Por otra parte se contempla que la producción de energía por este medio, no producirá contaminantes a la atmosfera ni requiere de compra de materia prima para la producción de energía, lo cual genera un impacto positivo y económico a mediano y largo plazo.

En cuanto a fauna se tratara que no se vea afectada ya que cada vez existen mejores técnicas ya sea como Pelamis, o las boyas que son más amigables a la fauna y a la flora de la zonas costeras o también en mar adentro; cada vez se busca que las nuevas tecnologías se

lleven mejor con la naturaleza y no sea tan invasiva entre especies y plantas de la zona en la que se coloquen nuevas plantas

.

5.1.4 Discusión

Durante el experimento del capítulo anterior, se presentaron algunos asuntos que afectaron la operación del sistema y son:

Para poder hacer la interconexión a la red, primero el Back to Back se tendrá que desconectar y empezar a funcionar como dos VSC por separado ; el del lado de la red se tiene que conectar como un rectificador hasta que se regule el lado de DC por medio de una resistencia , una vez que este regulando el voltaje de CD , por medio de un interruptor se conectó el otro lado VSC que ya está siendo alimentando por el PMSG se conectara y momentos después se desconecta la resistencia en paralelo para que el generador este enviando toda la energía posible a la red

5.2 Conclusión Final

El estudio de nuevas maneras de producir energía eléctrica de manera más amigable con el medio ambiente, usando recursos como energía la solar, la eólica y marina, conlleva a nuevos objetos de estudio para poder convertir energía mecánica en eléctrica.

Específicamente en México la instalación de plantas de generación por energía marina no se ha llevado a cabo, aun considerando que el potencial de generación es muy grande.

En esta tesis de ingeniería eléctrica se han desarrollado las primeras etapas experimentales para la producción de energía eléctrica a partir de corrientes marianas, como primer punto, para poder simular este oleaje en el laboratorio se ha logrado variar la velocidad de un generador síncrono a través de una máquina de corriente directa, que a su vez es impulsada por un inversor controlado por un DSP, en el cual se han podido programar diferentes comportamientos de oleaje marino.

Por otra parte, para la interconexión de dicho generador síncrono a la red eléctrica, se ha realizado la construcción de un convertidor back to back, aplicando un control tradicional

dq0 a fin de poder enviar toda la potencia posible a la red por medio de técnicas de modulación SPWM y la sincronización a la red.

Finalmente se espera que el aporte realizado por esta tesis de ingeniería eléctrica sea una herramienta de diseño y análisis, así como también una plataforma poder realizar en un futuro otros diversos estudios para estudiantes y especialistas del área eléctrica y de energías renovables, en vías de formar el concepto de redes eléctricas inteligentes.

5.3 Trabajos futuros

En este apartado veremos que se proponen respecto a trabajos futuros de estudio del hidrogenerador a escala.

- Implementación de diversas técnicas de modulación más eficientes.

Las técnicas que se implementen se deberá estar relacionados con la eficiencia y disminuir las pérdidas del back to back asi como también del driver del motor de impulsión de CD.

- Análisis de nuevos casos de estudio.
- Eliminación de armónicos.
- Amortiguamiento.
- Optimización.
- Mejora del experimento.

El experimento del capítulo 4 se utiliza sensores de voltaje de CA y de muy sencillos se necesitara que permita una rapidez y que no ocasione armónicos y deformaciones de la onda en la salida de los sensores para mejorar el control.

Así como también la incorporación de un sistema de protecciones contra fallas del sistema a fin de que no se perjudique al sistema ante una contingencia de la red.

- Incluir una etapa de almacenamiento de energía

La incorporación de un sistema de almacenamiento por cada unidad de generación o un solo almacenamiento en conjunto a fin de reducir la variabilidad de generación inyectada en el sistema y de esta forma reducir el impacto en la red de baja y media tensión.

Bibliografía

[1] J. lopez-Gonzales, H.-L. B. G. y S.-C. R, «Tidal Power Plant energy Estimation,» *Ingenieria Investigacion y Tecnologica ,* vol. XI, nº 2, pp. 233-245, 2010.

[2] J. R. Quintero González y L. E. Quintero González, «Production systems and energy potential of tial energy,» *Revista Ingeniería, Investiación y Desarrollo,,* vol. 16, nº 1, pp. 39-45, 2016.

[3] P. Fernández Díez, «Energía maremotermica,» Departamento de Ingenieria Electrica y energetica, universidad de Cantabria, 2013.

[4] «¿Qué es la Energía Maremotérmica? Descubre todo de ella aquí,» Mi sistema solar, [En línea]. Available: http://misistemasolar.com/energia-maremotermica/. [Último acceso: 24 Julio 2019].

[5] S. F. Paredes, Analisis Termodinamico de los ciclos de Rankine, Barcelona: Universidad politecnica de Cataluña, Abril, 2015, pp. 13-22.

[6] C. I. S. S. Sara Vallejo Castaño, «Generación de energía a partir de gradiente salino mediante Electrodiálisis Inversa,» April 2015.

[7] «Energía de gradiente salino una solución ecológica,» 2 Abril 2016. [En línea]. Available: https://minas.medellin.unal.edu.co/noticias/facultad/606-energia-de-gradiente-salino-una-solucion-ecologica. [Último acceso: 24 Julio 2019].

[8] A. F. Muerza, «Energía de las corrientes marinas,» EROSKI CONSUMER, 22 Diciembre 2008. [En línea]. Available: https://www.consumer.es/medio-ambiente/energia-de-las-corrientes-marinas-2.html. [Último acceso: 24 Julio 2019].

[9] T. Cuevas, A. Ulloa y G. Badal, «Energia Undimotriz,» Facultad de ciencias fisica y matematicas de la Universidad de Chile, 2015.

[10] T. W. Thorpe, «A brief review of wave energy,» Technical report no.R120, EnergyTechnologySupportUnit(ETSU), A report produced for the UK Department of Trade and Industry, 1999.

[11] C. M. S. (. d. I. –. G. Juan Manuel Ramírez Arredondo (CINVESTAV del IPN –GDL), «Revisión de convertidores de energía marina y la competitividad economica,» Centro Mexicano en Innovación de Energías del Océano, 2017.

[12] M. HosnaTitah-Benbouzid, «An Up-to-Date Technologies Review and Evaluation of Wave Energy Converters,» INTERNATIONAL REVIEW OF ELECTRICAL ENGINEERING-IREE, 2015, pp. 52-61.

[13] Z. C. R. T. F. I. F. Blaabjerg, «Power Electronics in Wind Turbine Systems,» de *Power Electronics in Wind Turbine Systems*, Shanghai, China, 2006.

[14] J. I. Andreotti, «Consultor de Telecomunicaciones y Electricidad (CTE): ¿Cómo funciona el PELAMIS?,» 2 Agosto 2014. [En línea]. Available: ingenieroandreotti.blogspot.com/2014/08/como-funciona-el-pelamis.html. [Último acceso: 24 Julio 2019].

[15] «Alternative marine energy resources,» Kresala, 26 Enero 2012. [En línea]. Available: https://kresalaenergia.wordpress.com/2012/01/26/pelamis-wave-power. [Último acceso: 24 Julio 2019].

[16] «Wave Dragon,» [En línea]. Available: www.wavedragon.net. [Último acceso: 24 Julio 2019].

[17] «Wikipedia,» 16 Abril 2019. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Wave_Dragon. [Último acceso: Julio 24 2019].

[18] S. Varela, «Oyster 2, generador de energia a partir de olas,» Sustentator, 29 Julio 2010. [En línea]. Available: www.sustentator.com/blog-es/2010/07/oyster-2-generador-de-energia-a-partir-de-olas-sigue-mejorando/. [Último acceso: 24 Julio 2019].

[19] Y. H. Bae, K. O. Kim y B. H. Choi, «Lake Sihwa tidal power plant project,» *Ocean Engineering ,* nº 37, pp. 454-463, 2010.

[20] «La central de energía mareomotriz de Rance, la segunda,» El Blog de la Energía Sostenible, 2012 Julio 2012. [En línea]. Available: https://www.blogenergiasostenible.com/central-energia-mareomotriz-rance-mas-grande-mundo. [Último acceso: 24 Julio 2019].

[21] «Framepool a RightSmith Company,» 2006. [En línea]. Available: https://footage.framepool.com/es/shot/113739289-usine-maremotrice-de-la-rance-rance-bretagne-energia-hidraulica-canal-de-la-mancha. [Último acceso: 24 Julio 2019].

[22] J. A. M. S. y. J. L. C. Rolle, «Energía mareomotriz: perspectiva histórica y estado actual,» *Tecnica Industrila,* nº 301, pp. 54-64, Marzo, 2013.

[23] «Jiangxia Pilot Tidal Power Plan,» Tethys, 1 Enero 2019. [En línea]. Available: https://tethys.pnnl.gov/annex-iv-sites/jiangxia-pilot-tidal-power-plant. [Último acceso: 24 Julio 2019].

[24] «La planta marina de Mutriku,» Energelia, 17 Enero 2008. [En línea]. Available: energelia.com/energias/la-planta-marina-de-mutriku.html. [Último acceso: 24 Julio 2019].

[25] «Estación Real de Annapolis,» Wikipedia, 1 Julio 2019. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Annapolis_Royal_Generating_Station. [Último acceso: 24 Julio 2019].

[26] «Annapolis Tidal Station,» Tethys, 2011. [En línea]. Available: https://tethys.pnnl.gov/annex-iv-sites/annapolis-tidal-station. [Último acceso: 24 Julio 2019].

[27] P. P. Cortes, «Aprovechamineto de la Energia Undimotriz en la Costa Asturiana, Master Tesis,» Escuela suoerior de la marina civil de Gijon, Julio 2018, p. 33.

[28] Q. C.-R. O. C.-M. L. y. R.-M. F. HERNÁNDEZ-ESCOBEDO, «Potencial mareomotriz como fuente de energía en la costa sur del estado de Veracruz, Méxic,» *Revista de Energía Química y Física,* vol. 3, nº 7, pp. 54-64, Junio 2016.

[29] V. G. A. a. G. D. D. N. Flourentzou, « VSC-Based HVDC Power Transmission Systems: An Overview,» *in IEEE Transactions on Power Electronics,* vol. vol. 24 , nº no. 3, pp. pp. 592-602, March 2009.

[30] V. C. J. E. M. D. Janeth Alcalá, «Investigation on the limitation of the BTB-VSC converter tocontrol the active and reactive power flow,» *in ELSEVIER Electric Power Systems Research,* vol. Vol 143, pp. pp 149-162, Feb 2017.

[31] H. N. a. R. Iravani, «Dynamic Model and Control of AC–DC–AC Voltage-Sourced Converter System for Distributed Resources,» *in IEEE Transactions on Power Deliver,* vol. vol. 22, nº no. 2, pp. pp. 1169-1178, April 2007.

[32] A. Yazdani and R. Iravani, « “CONVERTER SWITCHED MODEL,",» de *in Voltage-Sourced Converters in Power Systems*, NJ: Wiley, 1st ed. Hoboken, Jan. 2010, pp. pp. 30-34.

[33] E. L. M.-G. V. V. R. M. J.R. Rodríguez-Rodríguez, «SPWM for Current-Sensorless Control of H-Bridge Based PFC Rectifier Considering Voltage Sag Condition,» *in ELSEVIER Electric Power Systems Research, Elsevier,* vol. vol 130, pp. pp 181-191, January 2016.

[34] E. L. M.-G. a. O. A.-L. D. Campos-Gaona, «Fault Ride-Through Improvement of DFIG-WT by Integrating a Two-Degrees-of-Freedom Internal Model Control,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* vol. vol. 60, nº no. 3, pp. pp. 1133-1145, March 2013.

[35] D. A. Woodford, «HVDC Transmission,» *Manitoba HVDC Research Center,* March 1998.

[36] M. Davari y Y.-R. Mohamed, «Robust Multi-Objective Control of VSC-Based DC-Voltage Power Port in Hybrid AC/DC Multi-Terminal Micro-Grids,,» *Smart Grid, IEEE Transactions on,* vol. vol. 4, nº no. 3, pp. pp.1597,1612, Sept. 2013.

[37] O. M. H. G. Juan David León Parada, «Power electronics: Aplications in renewable energy sources EDP y energia renovable,» *Revista de Investigaciones - Universidad del Quindío,* vol. 25, pp. 154-158, 2014.

[38] C. R. Pereda, «Electrónica de potencia, tecnología estratégica para la sostenibilidad,» interempresas, 17 enero 2018. [En línea]. Available:

https://www.interempresas.net/Energia/Articulos/215253-Electronica-de-potencia-tecnologia-estrategica-para-la-sostenibilidad.html. [Último acceso: 12 Marzo 2019].

[39] E. M. Carrasco, M. A. López, S. B. Vicente, D. L. Cortón, R. A. Gallego y L. P. Cebrián, «smartgridsinf.es Todo sobre redes electricas inteligentes,» 6 12 2016. [En línea]. Available: https://www.smartgridsinfo.es/comunicaciones/comunicacion-impacto-conexion-masiva-energias-renovables-electronica-potencia-seguridad-red. [Último acceso: 12 3 2019].

[40] «Central eléctrica de marea del lago Sihwa,» Wikipedia, 22 Mayo 2019. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Sihwa_Lake_Tidal_Power_Station. [Último acceso: 24 Julio 2019].

[41] «El Gobierno Vasco aspira a un 'despegue' de la energia marina 2020,» EiTB, 17 Marzo 2015. [En línea]. Available: https://www.eitb.eus/es/noticias/sociedad/detalle/3061496/energia-marina--bilbao-marine-energy-week-bilbao/. [Último acceso: 24 Julio 2019].

[42] V. G. A. a. G. D. D. N. Flourentzou, «VSC-Based HVDC Power Transmission Systems: An Overview,» *IEEE Transactions on Power Electronics,* vol. 24, nº 602, pp. 592-602, Marzo, 2019.