



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Modelos de red de un sistema
de generación por corrientes
marinas**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Eléctrica Electrónica

P R E S E N T A

Lissette Valdivia Díaz

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Juan Ramón Rodríguez Rodríguez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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

Actualmente y en los últimos años, se ha impulsado la implementación de más fuentes de energías renovables dentro de la red eléctrica, contribuyendo a la reducción de contaminantes atmosféricos y a la necesidad de incrementar la demanda energética gracias al aumento de la población. Estos acontecimientos propician a tener un nuevo enfoque dentro de las redes eléctricas y provocar un paradigma diferente hacia la generación eléctrica a partir de fuentes de energía renovable o limpia, haciendo uso de tecnologías como son eólica, marina, solar, generación distribuida, geotérmica, corrientes marinas etc.

Se considera en esta tesis de ingeniería eléctrica a la energía por corrientes marinas, para aprovechar su gran potencial de generación. Además, la tierra está conformada en su mayoría por agua gracias a sus océanos, y tomando en cuenta que la ubicación de México nos aporta una amplia diversidad de recursos para acelerar el crecimiento de generación renovable y limpia.

Aunado a esto, la tecnología por corrientes marinas está experimentando un enorme avance científico y tecnológico en los últimos años en países como Dinamarca, Noruega, Irlanda, Corea del sur, Reino Unido entre otros. En México organismos públicos y privados como Conacyt y el Centro Mexicano de Innovación en Energía Océano (CEMIE-Océano) aportan en la innovación e investigación de proyectos para el aprovechamiento de la energía oceánica. Derivado de estos propósitos y considerando contribuir a las metas de la energía oceánica, en esta tesis de ingeniería se expone a detalle el proceso para obtener modelos de red a partir de un análisis detallado de un sistema de generación por corrientes marinas, logrando apoyar a proyectos propuestos que se logren realizar con el tiempo en el Mar Caribe, Canal de Yucatán.

Este proyecto considera el modelado, simulación y casos de estudio para obtener los resultados necesarios y constatar la implementación de estos nuevos modelos matemáticos. Se presenta el modelo del arreglo turbina-generador, la operación de un sistema de conversión CD/CA-VSC o inversor trifásico, convertidor PFC Boost Rectificador, así como los controles necesarios para obtener la máxima extracción de energía de las corrientes marinas, como son: *i*) control para la variable de modulación, *ii*) control de voltaje de CD, y *iii*) control MPPT.

Finalmente, se obtienen resultados importantes para la implementación de los modelos de red, mostrando el análisis detallado de su obtención, el comportamiento de sus principales variables de interés, la comparación de usar los modelos de red a un sistema de una unidad de generación por corrientes marinas, y las conclusiones pertinentes de cada uno de los capítulos y finales.



Dedicatoria

Dedico este trabajo de tesis a mis personas favoritas que me alentaron y acompañaron a lo largo de esta etapa de mi vida.

A mis amados padres

María Luisa Díaz González

Bernabé Valdivia Vallejo

A mi mejor amiga, babe, y hermana

Stephania Valdivia Díaz

A mis mentores más significativos.

*Dr. Juan Ramon Rodríguez Rodríguez, Dr. Mario Arrieta Paternina, Dr. Vicente Torres García,
Dr. Luis Miguel Castro González, Dr. Rubén Tapia Olvera, Mtro. Germán Jorge Carmona Paredes.*

A mis perritos.

Coloso, Zucky y Layla.



Agradecimientos

Agradezco principalmente a mi familia empezando por mis amados padres **María Luisa Díaz González** y **Bernabé Valdivia Vallejo**, a mi mejor amiga, hermana y compañera de vida **Stephania Valdivia Díaz**, quienes me enseñaron a tomar el control en mi preparación, confiando en ellos cuando no podía confiar en mí misma, aprendiendo a perder, a identificar aquellos errores y a seguir intentándolo para lograr ganar con una gran sonrisa en el rostro. Por ser mis guías desde pequeña e inspirarme como hasta ahora lo hacen, por apoyarme, brindarme consejos y disciplinas para poder lograr ver mi propio potencial como ellos lo vieron en mí. Gracias por creer en cada decisión que tomaba en mi vida y corregirme en algunas de ellas. Cada día de mi vida trataré de aprender algo nuevo, dar lo mejor de mí para convertirme en una mejor persona, sentirme orgullosa de mí y que ustedes como mi familia también lo estén como yo lo estoy de ustedes. Siempre estaré en deuda por todo el esfuerzo que me ofrecieron para cumplir mis objetivos.

A mi tutor de tesis el **Dr. Juan Ramon Rodríguez Rodríguez** por brindarme su apoyo, amistad, conocimientos, asesorías, a pesar de las dificultades a lo largo de la pandemia, por impulsarme a formarme más sobre esta área de conocimiento para poder llevar a cabo este trabajo de tesis, y querer seguir en la rama de la investigación.

A todos mis profesores durante mi estancia en la universidad, principalmente a mis mentores del módulo como fue el **Dr. Mario Arrieta Paternina** quien me brindo su apoyo, amistad, conocimientos, asesorías, y por sus valiosos consejos a lo largo de mi proceso de titulación. A mis profesores como el **Dr. Vicente Torres García**, el **Dr. Luis Miguel Castro González**, el **Dr. Rubén Tapia Olvera** y el **Mtro. Germán Jorge Carmona Paredes**, quienes fueron parte muy importante para mi formación académica, por poder aplicar los conocimientos que me brindaron en este proyecto y en mi formación profesional a futuro, gracias a sus enseñanzas.

A mis sinodales como fue la **Dra. Nadia María Salgado Herrera** y el **Dr. Néstor González Cabrera** por ser parte de mi jurado, por su tiempo dedicado en la revisión de tesis y por sus recomendaciones para lograr mejorarla.

A mis personas favoritas que conocí antes y durante esta etapa de mi vida como son **Ariel Solís**, **Valeria Solís**, **Mariana Rangel**, **Vanessa Almendarez**, **Fanny Aparicio**, **Adrián Flores**, **Andy Jesús Mendoza**, **Jonathan Córdoba** y **Luis Antonio Álvarez**, quienes me alentaron a seguir siendo mejor cada día, por inspirarme, por las risas, por el estrés compartido para aprender, por volvernos más fuertes y creer mucho más en nosotros mismos. Quizás en la vida no haya respuestas correctas y solo existe el proceso de convertir nuestras decisiones, en esas respuestas. Por ello no temamos a cometer errores porque ellos nos acercarán un paso más a las respuestas del mañana.

Agradezco a la **UNAM** por otorgarme la oportunidad de pertenecer a la **Facultad de Ingeniería**, por ser mi segunda casa, y finalmente gracias por el apoyo por parte del programa de apoyo a proyectos para innovar y mejorar la educación **DGAPA-PAPIME, PE108422**.



Índice General

<i>Resumen</i>	<i>i</i>
<i>Dedicatoria</i>	<i>ii</i>
<i>Agradecimientos</i>	<i>iii</i>
<i>Índice General</i>	<i>iv</i>
<i>Índice de Figuras</i>	<i>vii</i>
<i>Índice de tablas</i>	<i>xi</i>
<i>Acrónimos</i>	<i>xii</i>
<i>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN</i>	<i>1</i>
1.1 Concepto general de un sistema de generación por corrientes marinas	2
1.2 Planteamiento del problema	3
1.3 Hipótesis	4
1.4 Propuesta de investigación	5
1.5 Objetivo	6
1.6 Justificación	6
1.7 Metodología.....	7
1.8 Organización.....	8
1.9 Contribución	8
<i>CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE</i>	<i>9</i>
2.1 Electrónica de Potencia y Energías Renovables.....	9
2.1.1 Concepto de la Electrónica de Potencia	10
2.1.2 Clasificación de los circuitos electrónicos de potencia	11
2.1.3 Esquema de conversión (CD/CD).....	11
2.1.4 Convertidores CD/CD conmutado elemental.....	12
2.2 Sistemas de generación de energía por corrientes marinas en el mundo.....	13
2.3 Estructuras básicas de turbinas marinas	17
2.4 Conclusiones particulares	20
<i>CAPÍTULO 3</i>	<i>21</i>



MARCO TEÓRICO: MODELOS MATEMÁTICOS POR ETAPAS 21

3.1 Unidad de generación 21

 3.1.1 Estructuras básicas de generadores marinos 21

 3.1.2 Descripción de la Máquina Síncrona PMSG..... 23

 3.1.3 Eficiencia y curvas características..... 27

3.2 Turbomáquina..... 28

 3.2.1 Modelo matemático..... 28

 3.2.2 Eficiencia y curvas características..... 29

3.3 Topologías y controles empleados..... 31

 3.3.1 Convertidor PFC Boost Rectificador 31

 3.3.2 Control MPPT 35

 3.3.3 Convertidor VSC Inversor 37

 3.3.4 Control para la variable de modulación 39

 3.3.5 Control de voltaje CD 42

3.4 Interconexión a la red 44

 3.4.1 Operación en estado estable..... 45

CAPÍTULO 4..... 63

PROPUESTA: OBTENCIÓN DE MODELOS POLINOMIALES DE RED..... 63

4.1 Reducción de modelos por etapas..... 63

 4.1.1 Modelo de la turbina-generador 64

 4.1.3 Modelo VSC Inversor 66

 4.1.4 Modelo de la potencia de CD 66

 4.1.5 Modelo de la potencia activa hacia la red eléctrica..... 67

 4.1.6 Operación de los modelos en conjunto 68

4.2 Modelos polinomiales de red del sistema por corrientes marinas 69

 4.2.1 Operación en paralelo del modelo detallado y de los modelos polinomiales de red 70

 4.2.2 Simulación de datos reales 71

4.3 Conclusiones particulares 72

CAPÍTULO 5..... 74

CONCLUSIONES 74



5.1 Aportes.....74

5.2 Trabajos futuros74

5.3 Impacto en el entorno75

5.4 Discusión76

5.5 Conclusión final.....77

BIBLIOGRAFÍA79



Índice de Figuras

Capítulo 1

<i>Figura 1.1. Corrientes marinas y zonas potenciales en México.</i>	3
<i>Figura 1.2 a) Sistema por corrientes marinas experimental (modelo detallado), b) Modelos polinomiales de un sistema de generación por corrientes marinas.</i>	5

Capítulo 2

<i>Figura 2.1. Vínculo entre la electrónica de potencia con el control, potencia y electrónica.</i>	10
<i>Figura 2.2. Convertidor de CD/CD conmutado elemental.</i>	12
<i>Figura 2.3. Respuesta del convertidor de CD/CD.</i>	12
<i>Figura 2.4. Rotores y estructura del proyecto SeaGen en Irlanda, [2.7].</i>	14
<i>Figura 2.5. Turbina por mareas O2 en prueba de energía, [2.8].</i>	15
<i>Figura 2.6. Prueba del funcionamiento de una de las turbinas para el proyecto MeyGen, [2.10].</i>	15
<i>Figura 2.7. Modelo en 3D para el proyecto MeyGen con 270 turbinas instaladas [2.11].</i>	16
<i>Figura 2.8. Turbina de eje horizontal [2.12][2.13].</i>	17
<i>Figura 2.9. Turbina de eje vertical [2.12][2.13].</i>	18
<i>Figura 2.10. Dispositivo Venturi [2.12].</i>	18
<i>Figura 2.11. Cometa de corriente [2.12].</i>	18
<i>Figura 2.12. Alabe oscilante o Hidroala [2.12].</i>	19
<i>Figura 2.13. Tornillo de Arquímedes [2.12].</i>	19

Capítulo 3

<i>Figura 3.1. Generador lineal de imanes permanentes.</i>	22
<i>Figura 3.2. Generador eléctrico de doble alimentación (DFIG).</i>	23
<i>Figura 3.3. a) Dibujo representativo de un generador síncrono de imanes permanentes de dos pares de polos, b) Generador síncrono físicamente.</i>	24
<i>Figura 3.4. a) Representación del circuito del devanado de armadura, b) Representación del circuito del devanado de campo del generador síncrono.</i>	25
<i>Figura 3.5. Circuitos equivalentes del generador síncrono de imanes permanentes en el marco de referencia dq0.</i>	26



Figura 3.6. Generador síncrono PMSG en Simulink de MATLAB......27

Figura 3.7. a) Curva de estabilidad del par- ángulo y curva potencia-ángulo, b) Curva característica mecánica par-velocidad......28

Figura 3.8. a) Coeficiente de potencia, b) turbomáquina de Simulink de MATLAB que se ocupó, [3.7]......30

Figura 3.9. Características de la turbomáquina empleada a diferentes niveles de velocidad de corriente.30

Figura 3.10. Circuito del convertidor elevador Boost......32

Figura 3.11. Circuito del convertidor elevador Boost en estado activo......32

Figura 3.12. Circuito del convertidor elevador Boost en estado activo......33

Figura 3.13. Gráfica representando los momentos de VL33

Figura 3.14. Curva característica del control MPPT......36

Figura 3.15. VSC trifásico de dos niveles y seis pulsos conectado a la red.38

Figura 3.16. Modelo promediado del VSC trifásico de dos pulsos.39

Figura 3.17. Diagrama que representa la simplificación a partir del VSC inversor.40

Figura 3.18. a) Circuito inductivo respecto al voltaje, b) Representación de la fase a.40

Figura 3.19. Diagrama a bloques de la ley de control de voltaje.44

Figura 3.20. Diagrama a bloques para la sincronización con las respectivas fases en la red eléctrica......44

Figura 3.21. Simulación del sistema detallado experimental implementado en Simulink de MATLAB......46

Figura 3.22. Simulación del control de voltaje CD implementado en el sistema detallado......47

Figura 3.23. Simulación de la variable de modulación del sistema detallado con $SM = 1.5$ [m/s].47

Figura 3.24. Corriente I_{Ga} y V_{Ga} en las terminales de CA en operación en estado estable......48

Figura 3.25. Potencia activa P en las terminales de CA en operación en estado estable.48

Figura 3.26. Potencia reactiva Q en las terminales de CA en operación en estado estable......49

Figura 3.27. Comportamiento de la velocidad de la corriente marina SM con una excitación tipo escalón......50

Figura 3.28. Comportamiento de la velocidad de la máquina síncrona SPMSG con una excitación tipo escalón.50



Figura 3.29. Comportamiento del torque T con una excitación tipo escalón. 51

Figura 3.30. a) Comportamiento del voltaje trifásico V_{CM} , b) V_{CM_a} de la fase a, con una excitación tipo escalón. 52

Figura 3.31. a) Comportamiento de la corriente I_{CM} , b) I_{CM_a} de la fase a, con una excitación tipo escalón. 53

Figura 3.32. a) Comportamiento de la potencia activa P_{Ams} , b) reactiva Q_{Ams} a la salida de la máquina síncrona de imanes permanentes con una excitación tipo escalón. 54

Figura 3.33. Comportamiento del control MPPT con una excitación tipo escalón. 55

Figura 3.34. Voltaje de entrada y de salida del convertidor boost con una excitación tipo escalón. 55

Figura 3.35. Potencia mecánica PCM a la entrada del convertidor y potencia de corriente directa PCD a la salida del convertidor boost con una excitación tipo escalón. 56

Figura 3.36. Corriente a la salida del convertidor boost I_o con una excitación tipo escalón. 56

Figura 3.37. a) Voltaje de entrada V_o al VSC. 57

Figura 3.38. Frecuencia f en las terminales de CA. 57

Figura 3.39. a) Magnitud de la variable de modulación m_{abc} , b) Magnitud de m_a de la fase a, con una excitación tipo escalón. 58

Figura 3.40. Ángulo de la variable de modulación. 59

Figura 3.41. Voltaje trifásico de la red V_{Gabc} en las terminales de CA, b) V_{Ga} de la fase a, con una excitación tipo escalón. 60

Figura 3.42. a) Corriente trifásica de la red I_{Gabc} en las terminales de CA, b) I_{Ga} de la fase a, con una excitación tipo escalón. 61

Figura 3.43. Potencia activa P en las terminales de CA con una excitación tipo escalón. 61

Figura 3.44. Potencia reactiva Q en las terminales de CA con una excitación tipo escalón. 62

Capítulo 4

Figura 4.1. Serie de puntos para el modelo polinomial de red turbina-generator. 64

Figura 4.2. Serie de puntos para el modelo polinomial de red del rectificador boost PFC. 65

Figura 4.3. Simulación del modelo VSC inversor polinomial de la red. 66

Figura 4.4. Serie de puntos para el modelo polinomial de red de la potencia CD 67

Figura 4.5. Serie de puntos para el modelo polinomial de red de la potencia activa. 68

Figura 4.6. Simulación de los modelos polinomiales en conjunto. 68



Figura 4.7. Serie de puntos de cada modelo polinomial de red en conjunto.....69

*Figura 4.8. a) Simulación a partir de datos reales de SM, b) Mediciones de la velocidad de la corriente marina en el Pacífico de Baja California y el Golfo de California en dos semanas [4.1].
.....72*



Índice de tablas

Capítulo 2

Tabla 2.1. Capacidad instalada de energías del mar en el mundo.....14

Capítulo 3

Tabla 3.1. Ventajas de usar una máquina síncrona PMSG.....24

Tabla 3.2. Principales variables nominales de interés del sistema detallado.....45

Tabla 3.3. Valores de la variable de modulación en el modelo detallado.....58

Capítulo 4

Tabla 4.1. Medición de las variables de interés para la obtención de los modelos polinomiales de red.....63

Tabla 4.2. Comparación de las variables de interés del modelo detallado vs modelos polinomiales de red.....70

Tabla 4.3. Porcentaje de error entre el modelo detallado y los modelos polinomiales de red.....71



Acrónimos

β :	Ángulo de inclinación beta.
λ_{abc} :	Flujos totales a través del estator de cada fase.
<i>BJT</i> :	Transistor de unión bipolar.
<i>C</i> :	Capacitor.
<i>CA</i> :	Corriente Alterna.
C_{Boost} :	Convertidor Boost.
<i>CD</i> :	Corriente Directa.
<i>CM</i> :	Corriente Marina.
<i>D</i> :	Ciclo de servicio.
D_i :	Diodo
<i>f</i> :	Frecuencia.
f_c :	Frecuencia de conmutación.
I_{Gabc} :	Corriente trifásica de la red en las terminales de CA.
I_{CM} :	Corriente entregada por la Corriente Marina.
I_{CD} :	Corriente de Corriente Directa al inicio del VSC.
$I_{CD'}$:	Corriente de Corriente Directa al inicio del Convertidor Boost.
I_o :	Corriente a la salida del Convertidor Boost.
<i>L</i> :	Inductor.
L_{ci} :	Inductor con condición inicial.
m_{abc} :	Moduladora.
<i>MPPT</i> :	Extracción del máximo punto de potencia (Maximum Power Point Tracker).
<i>P</i> :	Potencia Activa.
P_{Ams} :	Potencia Activa a la salida de la máquina síncrona.



P_{CM} :	Potencia de la Corriente Marina (Potencia mecánica).
P_{CD} :	Potencia de Corriente Directa.
PLL :	Lazo de seguimiento de fase (Phase Locked Loop).
PWM :	Modulación por ancho de pulso (Pulse-Width Modulation).
Q :	Potencia Reactiva.
Q_{Ams} :	Potencia Reactiva a la salida de la máquina síncrona.
R :	Resistencia.
R_p :	Resistencia parasita.
S_M :	Velocidad de la Corriente Marina.
S_{PMSG} :	Velocidad de la Máquina Síncrona de Imanes Permanentes.
T :	Torque de la Máquina Síncrona.
V_{Gabc} :	Voltajes trifásicos de la red en las terminales de CA.
V_{CM} :	Voltaje entregado por la Corriente Marina.
$V_{CD_{ref}}$:	Voltaje de Corriente Directa de referencia.
V_{CD} :	Voltaje de Corriente Directa al inicio del VSC.
$V_{CD'}$:	Voltaje de Corriente Directa al inicio del Convertidor Boost.
V_o :	Voltaje de Corriente Directa en las terminales del Convertidor Boost.
V_t :	Voltaje en las terminales del VSC.
VSC :	Convertidor de Fuente de Voltaje (Voltage Source Converter).
X_L :	Reactancia Inductiva.



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Un sistema eléctrico es un motor de desarrollo económico y social para cada nación en desarrollo, en México un sistema de energía eléctrica debe ser confiable, de calidad, eficiente y robusto esto para que soporte el consumo diario de los 128.9 millones de usuarios.

En los últimos años, se ha buscado implementar más fuentes de energía renovable que contribuyan a la reducción de contaminantes atmosféricos como el dióxido de carbono, esto por el aumento de la población en México y en el mundo, a la contaminación mundial, a el deterioro ambiental, a el agotamiento de los combustibles fósiles, entre otros.

México se comprometió en la Ley General de Cambio Climático, la cual dice que el 35% de la generación eléctrica debe provenir de energías renovables y limpias para el año del 2024. De ahí que exista un claro compromiso para la reducción de emisiones y en la investigación e implementación de estas mismas [1.3].

Los océanos cuentan con el 97.5% del agua total en la tierra y México tiene una amplia diversidad en recursos para la generación de energías renovables. Dentro de la energía oceánica se consideran cinco maneras para la producción de electricidad como son energía por corrientes marinas, de las mareas, del oleaje, gradiente térmico marino, y gradiente salino marino.

A partir del 2017, México y sus investigadores con ayuda de organismos públicos y privados como Conacyt y el Centro Mexicano de Innovación en Energía Océano (Cemie-Océano) y países afiliados, han sido parte de los esfuerzos de innovar, investigar e invertir en el aprovechamiento de la energía oceánica.

De momento se han ubicado inicialmente dos zonas con mayor riqueza para la implementación de estas tecnologías: El Mar Caribe y El Golfo de California, gracias a la gran región marina que cuenta México y sus condiciones oceanográficas, pero el desarrollo e investigación de los proyectos va más allá de estas dos zonas.

Es por ello que hoy en día el crecimiento e implementación de energías renovables representa un desafío futuro y actual para las diferentes líneas de investigación involucradas, así mismo es necesario contemplar a los requerimientos como son las herramientas académicas, las



matemáticas, sistemas de simulación, personal calificado, recursos, inversión, entre otros para sacar adelante los diferentes percances para el desarrollo de los proyectos a fin.

El diseño de nuevos modelos matemáticos desarrollados en un menor tiempo de simulación, que sean capaces de dar a conocer el nivel de electricidad generado, facilitar información de las variables principales y del estado del sistema, permitirá un funcionamiento óptimo en un sistema de generación por corrientes marinas.

Lo anterior permitirá conocer el modelo detallado del sistema por corrientes marinas, la operación de los convertidores de electrónica de potencia como son el VSC (CA/CD), el convertidor boost (CD/CD). Así mismo se permite conocer los modelos reducidos de cada una de las etapas del sistema, como son la potencia activa inyectada a la red, la extracción en el punto de máxima potencia (MPPT), potencia mecánica, potencia de corriente directa, y la variable de modulación.

1.1 Concepto general de un sistema de generación por corrientes marinas

Las corrientes marinas son cantidades de agua moviéndose en las superficies o en las profundidades de mares y océanos, causadas por el movimiento de las mareas; ellas son originadas gracias a la rotación de la tierra, la interacción gravitacional entre la luna, el sol y la tierra, los vientos, la forma de la tierra y la ubicación de sus continentes, la temperatura, la salinidad, el suelo marino, gradientes de presión, entre otros efectos [1.7]. Se clasifican mediante la profundidad del mar u océano, siendo estas de superficie o de profundidad (resultado de la compensación con las de superficie), y a su temperatura (mixta, fría, cálida) [1.7].

La energía por corrientes marinas se aprovecha mediante la energía cinética y potencial del flujo de agua, esta puede entrar en un proceso de conversión y llegar a ser energía eléctrica empleando equipos apropiados como el hacer girar turbinas para la generación de electricidad. Esta fuente de energía renovable aún es muy poco aplicada por estar en proceso de investigación, pero el potencial obtenido de la generación es vasto.

Centrándonos en la corriente de Yucatán ubicada en el Mar Caribe, Canal de Yucatán, su velocidad promedio de esta corriente es de 1.5 m/s, teniendo máximos de hasta 2.5 m/s, observado en la Figura 1.1. Las mediciones fueron resultado de un análisis de 6 años, y son corrientes adecuadas para la obtención de energía mediante turbinas marinas, [1.4].



Figura 1.1. Corrientes marinas y zonas potenciales en México.

En general, el aprovechar la energía por corrientes marinas es muy semejante al proceso del viento o un sistema eólico, pero la densidad del aire es menor que la del agua y se va a requerir equipo de menor tamaño para generar potencias similares. A pesar de ello, el movimiento transporta bastante energía gracias a su densidad. Es decir, en un área similar de agua que se mueve a 20 km/hr ejercerá la misma fuerza de viento de 176 km/hr, lo que simboliza un gran potencial energético para un crecimiento sustentable, [1.5].

La generación por corrientes marinas dependerá de información e investigación marina necesaria como son los modelos numéricos, diseño de las turbinas generadoras, perfiles de variables como la densidad, conductividad, temperatura, profundidad, modelos matemáticos para la instalación de toda clase de equipo, mapas, estudios ambientales, entre otros, [1.1].

1.2 Planteamiento del problema

Actualmente, en México y en el mundo se ha logrado demostrar el gran potencial de utilización de la energía marina, como fuente de energía limpia y como tecnología emergente para incrementar paulatinamente los niveles de generación renovable.

El uso de esta energía ha tomado fuerza en países como Francia, Canadá, Reino Unido, Estados Unidos, Corea del Sur y China, y de forma paralela los países en vías de desarrollo han avanzado continuamente hacia el mismo objetivo. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (IEA), para el año 2050 el aprovechamiento de la energía oceánica se centrará en instalar más de 300 [GW] a nivel mundial, teniendo un ahorro de 500 millones de toneladas de emisiones de dióxido de carbono (CO_2) hacia la atmósfera, y generará 680 mil empleos directos, [1.10].



Particularmente México cuenta con 11,122 [km] de litoral dividido en 17 estados, por lo que el potencial de generación es enorme. Para el caso de corrientes marinas en México se han reportado potenciales hasta de 40,000 [MW] según el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), [1.9]. Esto, es un indicador que la energía marina en nuestro país es abundante para realizar la penetración distribuida de generación por corrientes marinas. Con esto, su impacto, confiabilidad, operación y diseño en la red eléctrica, se volverá cada vez más significativo.

En un ambiente de simulación de redes eléctricas e integración de fuentes renovables con base en convertidores de electrónica de potencia, existe una banda de diferencia entre los tiempos de simulación de cada área de investigación. Por necesidad, estos tiempos y el paso de integración en los sistemas eléctricos de potencia son diferentes a los usados en la representación de modelos de conmutación de convertidores basados en electrónica de potencia, en donde los primeros usan la frecuencia fundamental de trabajo de 60 [Hz], mientras que los segundos utilizan frecuencias de conmutación (*PWM* y *SPWM*) que van desde 3 hasta 20 [kHz].

En este contexto, los modelos de integración de energías renovables (convertidores y red eléctrica), deben de ser concordantes con ambas necesidades, para lo cual, los tiempos de cómputo deben de ser equivalentes, deduciendo así los modelos de conmutación detallados de una unidad de generación por corrientes marinas (turbina-generador y convertidores), deben de permitir una simulación rápida, y al mismo tiempo conserve la dinámica de interés de las principales variables usadas en el proceso de conversión de la energía, a fin de simular variaciones de tiempo que van desde los segundos hasta varias horas o días.

1.3 Hipótesis

- 1) La implementación del modelo y simulación del sistema por corrientes marinas será capaz de operar en paralelo en ambientes de simulación de un sistema eléctrico de potencia y electrónica de potencia, generará datos más próximos a la realidad, ayudando a la investigación e implementación sobre el funcionamiento de la integración de sistemas de energía renovable a las redes eléctricas, contribuyendo a proyectos exitosos para el desarrollo de la industria eléctrica en México.
- 2) La aplicación de un modelo matemático capaz de ser aplicable a estudios de interconexión de los sistemas de generación por corrientes marinas en sistemas eléctricos modernos a una gran escala, y que conserve la información fundamental en un menor tiempo de simulación, generará un cambio para estudios de integración de energía marina.

1.4 Propuesta de investigación

En esta tesis de Ingeniería Eléctrica, se propone generar un nuevo modelo matemático aplicable a estudios de interconexión de los sistemas de generación por corrientes marinas en sistemas eléctricos modernos de gran escala, conservando la información intrínseca de las principales variables internas (voltajes, corrientes, potencias y variables de modulación), y llevando a cabo una interconexión a la red eléctrica.

El diseño del nuevo modelo matemático, representará el funcionamiento del sistema de generación por corrientes marinas en estado estable, se analizará su operación en paralelo con el modelo detallado y los modelos polinomiales, y su operación de generación por corrientes marinas con diferentes tipos de excitación, así mismo una operación con un perfil de datos reales.

De forma paralela la aplicación de los modelos polinomiales en estado estable propuestos en esta tesis permitirá evaluar el impacto de la integración de sistemas de generación marinos en las redes eléctricas convencionales (estabilidad de tensión y potencia reactiva), los cuales son estudios necesarios para cuando se haya ya decidido donde invertir y así poder generar planes de expansión o planificación de generación, remplazos y mantenimiento. La figura 1.2 (a) muestra el esquema de un sistema de generación por corrientes marinas y la figura 1.2 (b) muestra los modelos polinomiales de red a obtener.

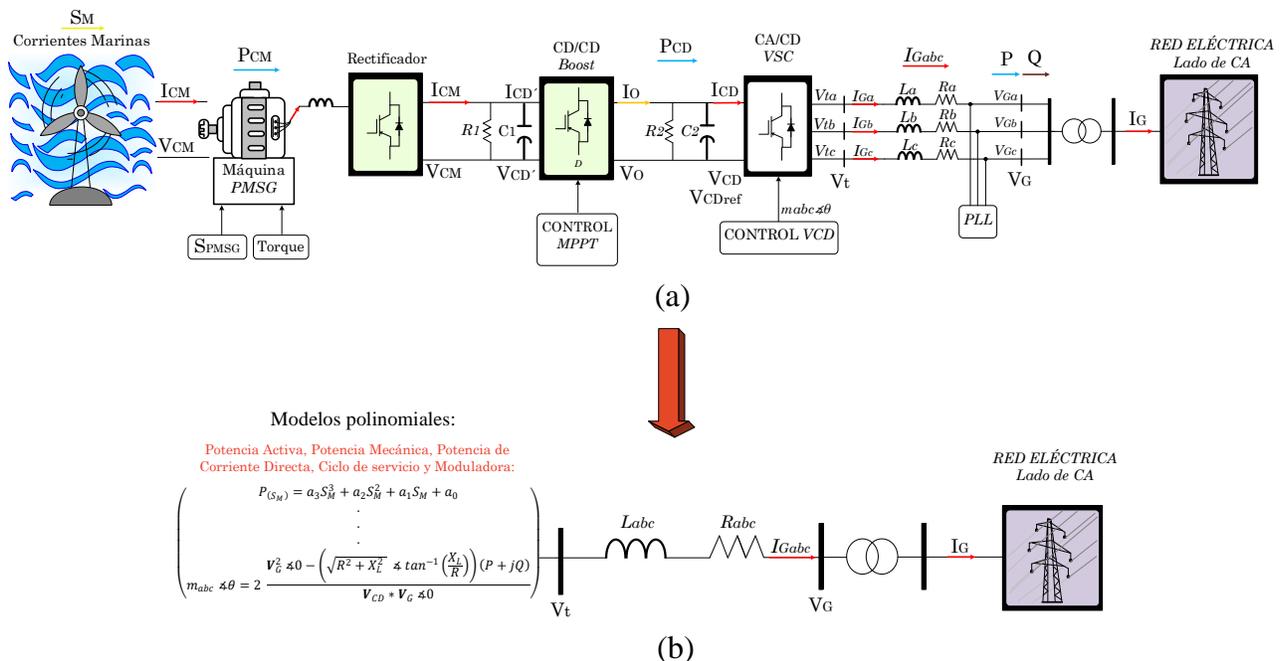


Figura 1.2 a) Sistema por corrientes marinas experimental (modelo detallado), b) Modelos polinomiales de un sistema de generación por corrientes marinas.



1.5 Objetivo

General. - Realizar un nuevo aporte útil en el área de ingeniería eléctrica y fuentes de energías renovables, proponiendo un nuevo modelo matemático que represente la operación de una unidad de generación por corrientes marinas interconectada a la red eléctrica, el cual sea compatible para estudios de integración, estabilidad y planes de expansión de los sistemas eléctricos actuales.

Específico 1.- Diseño de un sistema de generación por corrientes marinas (modelo detallado), compuesto por un arreglo turbina-generator y convertidores de electrónica de potencia como es el *VSC (CA/CD)* que opera con un control de voltaje de *CD*, el convertidor boost (*CD/CD*) controlado a través de un algoritmo de control de máxima extracción de potencia (*MPPT*), y sincronización a la red eléctrica.

Específico 2.- Diseño de un nuevo modelo matemático en estado estable (modelos polinomiales), obteniendo la reducción por cada una de sus etapas del modelo detallado, así mismo, que integre el funcionamiento de los controles y que represente el funcionamiento del sistema de generación para la obtención de las principales variables del modelo detallado en un menor tiempo.

1.6 Justificación

La aplicación del modelo matemático contribuirá al suministro de energía marina sostenible, la cual se encuentra en paso de desarrollo e investigación, estos proyectos están orientados al compromiso con el cumplimiento de las metas en la reducción en los efectos del cambio climático, ya que sigue siendo un requerimiento principal para la sociedad y el planeta [1.2].

Así mismo será capaz de estimar las variables esenciales a nivel de la planta de generación, convertidores empleados, y turbina-generator, como son:

- i) P_{CM} ;
- ii) punto *MPPT* de operación de la corriente marina;
- iii) niveles de tensión en la terminal de la red de *CA*;
- iv) niveles de tensión en las terminales del C_{Boost} ;
- v) P ;
- vi) P_{CD} ;
- vii) Porcentaje de error entre ambos modelos;
- viii) D ; y
- ix) m_{abc} .

Por otra parte, los modelos polinomiales integrados a una red eléctrica podrán brindar información relevante del sistema o modelo detallado en su totalidad, monitoreando los niveles de dichas variables esenciales en un menor tiempo de simulación. De esta manera realizamos un



progreso tecnológico que hará posible el desarrollo de los sistemas de generación por corrientes marinas, haciendo de vital importancia el contar con modelos y con simulaciones más eficientes que permitan sustentar los proyectos.

Finalmente, se comprueba que un modelo detallado en su totalidad de generación por corrientes marinas se puede reducir a modelos polinomiales, los cuales son útiles y compatibles en ambientes de simulación y análisis, para objetivos complementarios.

1.7 Metodología

La metodología que se llevó a cabo para lograr los objetivos y metas en este proyecto de tesis de ingeniería, es la siguiente:

1. Recolección de información y fuentes bibliográficas.

Se comenzó con recolectar información necesaria para este proyecto de tesis, utilizando para la investigación artículos científicos, libros, videos, sitios web, temarios de materias vistas a lo largo de la carrera, esto para conocer a detalle el funcionamiento por cada una de las etapas del sistema y en conjunto.

2. Análisis por etapa del sistema.

Consistió en estudiar las etapas por aparte del modelo detallado, con la ayuda de Simulink de MATLAB, el objetivo fue obtener y entender el comportamiento de todo el sistema a fin de conocer las estructuras básicas que lo componen, sus curvas de operación, modelo matemático y características de operación.

3. Modelos matemáticos por etapas.

Se unieron todos los modelos que conforman el sistema en su totalidad, una vez unido fue estudiado a detalle, observando el comportamiento en conjunto y realizando mejoras en cada subsistema para tener una mejor respuesta en conjunto. Así mismo, se interconectó a la red eléctrica.

4. Obtención de modelos polinomiales.

A partir de las curvas de comportamiento de cada etapa se obtiene la reducción del modelo detallado a los modelos polinomiales, observando que las variables esenciales conservaran su información intrínseca ya aportada en el modelo detallado. Posteriormente, se muestra un contraste cuantitativo entre los modelos polinomiales y el modelo detallado. Finalmente, se analiza su operación en paralelo implementando diferentes casos de estudio.



5. Análisis de datos obtenidos y conclusiones.

Con las observaciones y resultados de la etapa anterior se obtienen las conclusiones finales, y el impacto en el entorno que podrá tener este proyecto de tesis.

1.8 Organización

Capítulo 1: En este capítulo, se presenta la introducción general del proyecto de tesis, así como el planteamiento del problema, la hipótesis, la propuesta de investigación, los objetivos generales y específicos, la justificación, la metodología, la organización de cada uno de los capítulos y la contribución para la elaboración de este trabajo de tesis.

Capítulo 2: En este capítulo, se describe el estado de arte que sustenta este trabajo de tesis de ingeniería. Así mismo, se analizan los antecedentes de solución encontrados en la literatura científica sobre generación por corrientes marinas, además se analiza la necesidad de la electrónica de potencia y energías renovables, como son los convertidores y estructuras básicas de generadores marinos.

Capítulo 3: En este capítulo, se presenta el marco teórico que sustenta este trabajo de tesis de ingeniería, se analiza el modelo matemático detallado de generación por corrientes marinas, se describe la unidad de generación, la turbo-máquina, las diferentes topologías empleadas de convertidores, y la interconexión a la red realizada en el proyecto en estado estable.

Capítulo 4: En este capítulo, se discute la obtención de los modelos red polinomiales propuestos en esta tesis, se describe la reducción de modelos por etapas, su operación, y el funcionamiento del modelo detallado, así mismo se presentan los diferentes estudios de caso que se realizaron en el proyecto.

Capítulo 5: En este capítulo, se presentan las conclusiones al analizar los resultados obtenidos del proyecto, así como las aportaciones de la presente tesis, además recomendaciones para trabajos futuros en las próximas generaciones, donde este trabajo de tesis pueda servir de aporte a su investigación.

1.9 Contribución

- Desarrollo de un modelo detallado de generación por corrientes marinas, haciendo uso de convertidores CD/CD elevadores y convertidores VSC.
- Desarrollo de modelos polinomiales a partir de un modelo detallado.
- Demostración de la capacidad del modelo detallado y del modelo polinomial, bajo los siguientes estudios de caso: *i*) operación en paralelo del modelo detallado y modelo de red, *ii*) perfil de datos reales, y *iii*) excitación tipo escalón.



CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1 Electrónica de Potencia y Energías Renovables

La historia de la electrónica de potencia da comienzo en 1900 con dispositivos como el rectificador de arco de mercurio entre otros que se emplearon en el control de potencia hasta la década de 1950.

La electrónica de potencia tiene una primera revolución electrónica en 1948 con la invención del transistor de silicio por Bardeen, Brattain y Schokley en Bell Telephone Laboratories, se cree que a partir de esta contribución se inició con las tecnologías electrónicas avanzadas hasta esta actualidad, [2.2]. En 1956, se inventa el transistor de disparo conocido posteriormente como un tiristor o rectificador controlado por silicio (SCR), [2.2].

La nueva era de la electrónica surge a partir del desarrollo del tiristor comercial por General Electric Company, en 1958 conocida como la segunda revolución electrónica, con base en la evolución de los diferentes tipos de dispositivos electrónicos, semiconductores de potencia, y técnicas de conversión.

La electrónica de potencia cobra impulso a finales de 1980 y hasta ahora, teniendo la revolución de la microelectrónica que nos brinda la ayuda de procesar una gran cantidad de información a una increíble velocidad, permite controlar enormes cantidades de potencia con un porcentaje de eficiencia cada vez mayor o acondicionamiento de la red eléctrica en generación, transmisión y distribución. En el presente, están apareciendo demasiadas aplicaciones e investigaciones potenciales a base de la electrónica de potencia y esta tendencia va a continuar en los próximos años, convirtiéndose en pieza clave para la transición energética.

Actualmente, los sistemas eléctricos de potencia se combinan con la electrónica de potencia para energías que provienen de fuentes renovables y no renovables, siendo una tecnología para un futuro sostenible. La electrónica de potencia es una parte integral de las fuentes de energía renovable en sus diferentes campos, teniendo como comienzo la tercera revolución de la electrónica de potencia.

Las ventajas de implementar la electrónica de potencia en energías renovables van desde tener una mejora en la calidad y confiabilidad de la energía generada, transmitida, distribuida y

almacenada, hasta permitir un desarrollo de redes más económicas, más flexibles y con un menor costo de mantenimiento. Así mismo, se presentan algunas desventajas como puede ser que algunos de los dispositivos empleados para la conversión de energía tengan un elevado costo inicial.

Una de las respuestas para combatir el fenómeno del calentamiento global, contaminación o todo tipo de consecuencias antropogénicas, es realizar proyectos involucrando el uso de energías renovables y eficiencia energética en gran parte haciendo uso de los convertidores electrónicos de potencia para la generación, transporte y consumo de la energía eléctrica.

2.1.1 Concepto de la Electrónica de Potencia

En la figura 2.1 se observa como la electrónica de potencia combina la teoría de circuitos, teoría de control, teoría electromagnética, y la electrónica para controlar las aplicaciones de los circuitos eléctricos y electrónicos de potencia como son los equipos de conversión de alta potencia, sistemas de transmisión de corriente continua o aparatos de uso común. Se basa principalmente en la conmutación de dispositivos semiconductores de potencia, llevando a cabo aplicaciones de la electrónica de estado sólido para la parte del control y la conversión de la energía eléctrica, [2.1].

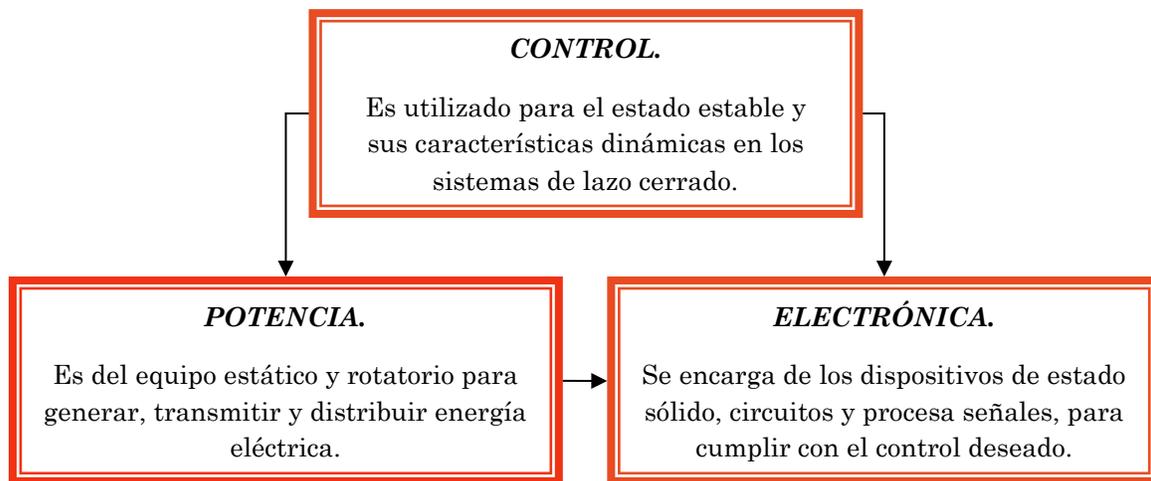


Figura 2.1. Vínculo entre la electrónica de potencia con el control, potencia y electrónica.

Finalmente, la electrónica de potencia será utilizada para satisfacer las necesidades deseadas al convertir la energía eléctrica en varias maneras, teniendo el arte de hacerlo de manera limpia, compacta, robusta y eficiente.



2.1.2 Clasificación de los circuitos electrónicos de potencia

Los dispositivos de potencia permiten que la energía eléctrica sea convertida de una forma a otra, se puede ejemplificar al convertidor como una matriz de conmutación donde uno o varios conmutadores son conectados a una fuente de potencia y obtienen el voltaje o corriente de salida requeridos. Los circuitos electrónicos de potencia se clasifican en:

- **Convertidor CD-CD (recortadores de CD).**
El convertidor de CD-CD conocido como recortador o regulador de conmutación, puede hacer que el voltaje de salida varíe controlando el ciclo de trabajo.
- **Convertidor CD-CA (inversores).**
El convertidor CD-CA logra transferir potencia desde una fuente de corriente directa a una carga alterna, son capaces de generar una tensión simétrica que varíe en el tiempo controlando su magnitud y frecuencia a través de variables moduladoras senoidales.
- **Convertidor CA-CD (rectificadores controlados).**
Es un dispositivo que proporciona una tensión continua con un factor de potencia unitario y con un mínimo de armónicos, así mismo su tensión de salida se puede controlar a través del ángulo de retraso de disparo o variando el tiempo de conducción.
- **Convertidor CA-CA (controladores de voltaje de CA).**
Es un dispositivo que se utiliza para tener una fuente de voltaje variable en magnitud y frecuencia a partir de una fuente de CA fija.

2.1.3 Esquema de conversión (CD/CD)

Los convertidores de CD/CD son circuitos electrónicos que transforman un nivel de voltaje en otro, se dice de corriente directa debido a que la corriente que aporta el convertidor no cambia de polaridad, es decir no tiene cruces por cero. En este tipo de convertidores tanto la entrada como la salida pueden o no ser regulados, y se pueden dividir en lineales y conmutados.

Una estrategia para transformar un nivel de voltaje de corriente continua en otro del mismo tipo, es a través del uso de un transistor *BJT* trabajando en la región lineal. En este circuito el transistor se puede modelar como un divisor de tensión, es decir, el transistor va a controlar la corriente que circula de su colector y emisor, y por tanto se comportara como si fuera una resistencia en el circuito.

Sin embargo, este tipo de arreglos, aunque son funcionales también serán bastantes deficientes en cuanto a las pérdidas que pueden generar, por lo tanto, se utilizan para bajos voltajes,

bajas corrientes, y para transformar un voltaje a otro donde la relación de transformación no sea muy grande.

2.1.4 Convertidores CD/CD conmutado elemental

En este tipo de convertidor el transistor se trabajará ahora en zonas de corte y saturación, considerando que un transistor tiene comportamiento como un interruptor cuando se trabaja en corte y saturación, apreciándose en la figura 2.2.

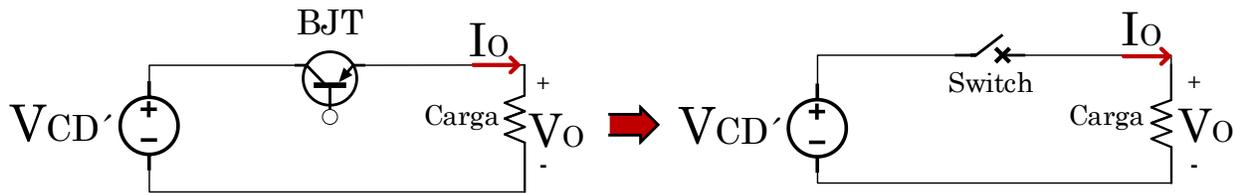


Figura 2.2. Convertidor de CD/CD conmutado elemental.

En este circuito el voltaje V_o sobre la carga será igual al voltaje $V_{CD'}$, si el interruptor se encuentra abierto, la corriente que fluye de él es cero y por lo tanto su potencia es cero. Cuando el interruptor se cierra la diferencia de voltaje en sus terminales se vuelve cero, teniendo un comportamiento como si fuera un cable y en este caso la potencia que disipa también será cero.

Una de las ventajas que tiene un transistor que actúa como interruptor, es que toda la potencia se disipa sobre la carga y por lo tanto el convertidor conmutado tiene una eficiencia casi del 100%, teniendo en cuenta las pérdidas por conducción y por conmutación.

La respuesta que se obtiene del convertidor será considerando una señal de activación con un periodo T , que mantenga parte del tiempo en conducción a el interruptor y otra parte lo mantendrá en corte, a la salida del circuito se producirá un tren de pulsos *PWM*, como se puede ver en la figura 2.3. Cuando el interruptor está cerrado el voltaje será $V_{CD'}$ y cuando está abierto el voltaje que va hacia la carga será cero y una señal cuadrada.

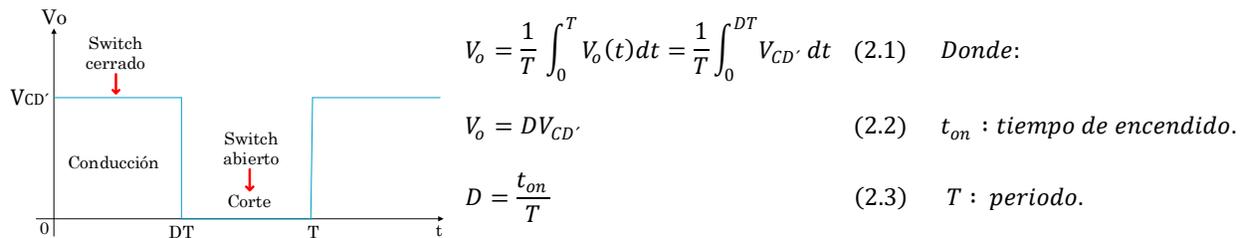


Figura 2.3. Respuesta del convertidor de CD/CD.



Si, el comportamiento de conducción y corte se repite a una frecuencia constante y a un valor fijo donde el tiempo de encendido y tiempo de apagado se mantiene, se obtiene el valor promedio de V_o en (2.2), así mismo, como obtener el ciclo de servicio D en (2.3), el cual toma valores de 0 a 1.

2.2 Sistemas de generación de energía por corrientes marinas en el mundo

Los mares y océanos generan un gran potencial energético teniendo la posibilidad de convertirlo en electricidad. La investigación e implementación del potencial de generación a partir de corrientes marinas es enorme, esta fuente de energía está siendo reconocida como un recurso a explorar para la generación sostenible de energía eléctrica. El aprovechamiento de dicho potencial se realiza mediante la energía cinética que llevan las corrientes marinas a través de la instalación submarina de estructuras y de equipo. De acuerdo con el Centro Europeo de Energía Marina (EMEC) este tipo de energía tiene grandes ventajas como el alto potencial en virtud de la predictibilidad de las corrientes marinas, [2.5].

La energía de las olas y corrientes marinas se distribuye de manera desigual en todo el mundo, teniendo mayor actividad de las olas y corrientes entre las latitudes de 30° y 60° en ambos hemisferios, estas son inducidas por vientos predominantes. Las siguientes regiones nos ofrecen enormes potenciales para la obtención de esta energía renovables: Europa occidental, Francia, Canadá, Reino Unido, Estados Unidos, costas del suroeste de Australia, Nueva Zelanda, América del Sur, Sudáfrica, Corea del Sur y China, [2.4].

De acuerdo con la base de datos de Engineering Village, el estado actual de actividad en investigación y en el desarrollo de la energía por corrientes marinas, se está realizando principalmente por artículos técnicos y congresos siendo un indicativo que estas tecnologías están actualmente en desarrollo, así como dispositivos en etapa de prueba para esta fuente de energía renovable.

La disposición de la comunidad científica, en lo que se refiere al mayor número de publicaciones internacionales en los últimos 6 años, se ha destacado la participación de universidades de China, Estados Unidos y Reino Unido, además los países que se encuentran en el número de patentes registradas a nivel mundial son Estados Unidos, China, Japón, Canadá y Australia, [2.5].

Los países que actualmente han implementado energías del mar se representan en la Tabla 2.1, conociendo así el tipo de energía implementada y sus capacidades instaladas.

Tabla 2.1. Capacidad instalada de energías del mar en el mundo.

Nombre de la planta de generación eléctrica.	Tipo de energía del mar.	País.	Capacidad instalada.
Planta de Shihwa Lake	Energía mareomotriz	Corea del Sur	254 MW
Planta de energía mareomotriz La Rance	Energía mareomotriz	Francia	240 MW
Proyecto Wave Piston	Energía de las olas	Dinamarca	215 kW
Planta Annapolis	Energía mareomotriz	Canadá	20 MW
Planta Orbital O2	Energía mareomotriz	Reino Unido	2.1 MW
Prototipo de planta Strangford Narrow	Energía por corrientes marinas	Irlanda	1.2 MW
Planta Murmansk	Energía mareomotriz	Rusia	0.4 MW
Planta de Jiangxia	Energía mareomotriz	China	3200 kW
Prototipo de planta Kvalsund	Energía por corrientes marinas	Noruega	300 kW
Planta Matriku	Energía undimotriz	España	300 kW

Actualmente, se están desarrollando proyectos que aprovechen las corrientes marinas, uno de los ejemplos es el proyecto comercial SeaGen que se encuentra en operación, este proyecto fue instalado en el 2008 en Strangford Narrow, al norte de Irlanda, convirtiendo energía de las corrientes marinas a energía eléctrica a través de equipo similar a las turbinas eólicas. El proyecto SeaGen genera 1.2 MW con una velocidad de la corriente marina de 2.4 m/s, se implementan rotores de 16 m de diámetro teniendo una eficiencia mayor al 45%, y están sostenidos a una estructura que fue fijada en el fondo del mar, como se puede ver en la figura 2.4, [2.6].



Figura 2.4. Rotores y estructura del proyecto SeaGen en Irlanda, [2.7].

Hoy en día se ha instalado la turbina de mareas “O2” más potente del mundo de 2MW por parte de Orbital Marine Power fabricante escocés, y ha comenzado a suministrar energía hacia la red de Reino Unido, está ubicada en el Centro Europeo de Energía Marina (EMEC) en las Islas Orcadas (Escocia), la turbina se encuentra en modo de prueba de energía a partir del año 2011, como se puede ver en la figura 2.5, [2.9].

La turbina “O2” genera energía a partir de las corrientes marinas y mareas más fuertes en Reino Unido, puesta a prueba de energía a 15 años y satisface una demanda de 2,000 hogares.



Figura 2.5. Turbina por mareas O2 en prueba de energía, [2.8].

Este proyecto “O2”, es la primera fase del proyecto MeyGen en Pentland Firth en el norte de Escocia por Andritz Hydro, el cual se convertirá en la planta de energía por corriente de marea más grande en el planeta, y suministrará energía a más de 175,000 hogares, creando nuevos empleos y será crucial para el futuro de la energía sostenible.

El proyecto MeyGen contempla tener instaladas 270 turbinas y cada una de ellas cuenta con una capacidad de 1.5 MW a una velocidad de giro de 14 revoluciones por minuto. Teniendo una vida útil de 25 años con un mantenimiento cada 5 años, se puede ver en las figuras 2.6 y 2.7.



Figura 2.6. Prueba del funcionamiento de una de las turbinas para el proyecto MeyGen, [2.10].

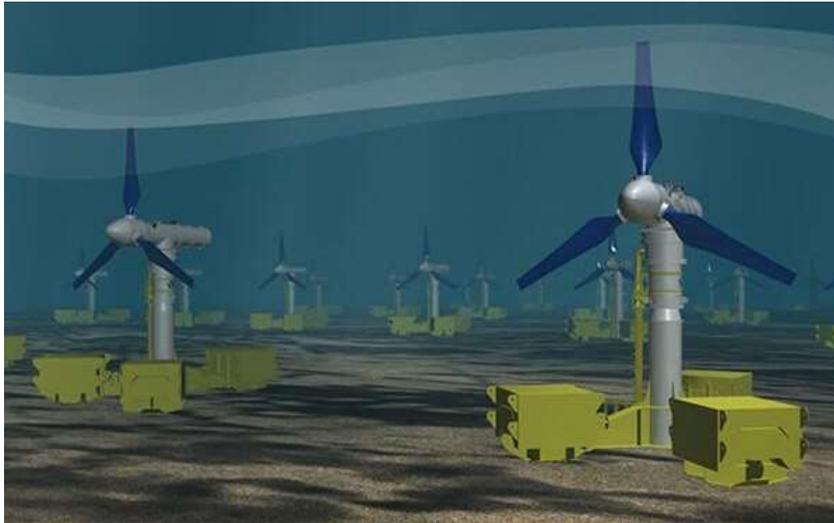


Figura 2.7. Modelo en 3D para el proyecto MeyGen con 270 turbinas instaladas [2.11].

Escocia actualmente genera el 30% de su energía eléctrica a partir de fuentes renovables con este proyecto se espera cumplir su reto de generar el 100% de la demanda con energías limpias y sostenibles. El aprovechamiento de la energía por corrientes marinas actualmente tiene grandes retos y una tendencia para seguir investigando la producción de electricidad a partir de la energía cinética proveniente de las corrientes marinas.

Los retos que se han considerado en las áreas identificadas como potenciales para su uso de la energía de las corrientes marinas en México son:

- o Obtener una evaluación precisa del potencial energético en ubicaciones específicas y del posible impacto social, ambiental y económico, [2.5].
- o Iniciación del aprovechamiento en las zonas ya localizadas como es el Golfo de California y el Mar Caribe, [2.5].
- o Promover la preservación ambiental y cuidados ambientales en los proyectos.
- o Desarrollo de equipos resistentes a agentes marinos con alta calidad, económicos, bajo mantenimiento y con alta durabilidad, [2.5].
- o Diseño e implementación de prototipos y pruebas en tiempo real con datos reales sobre el desempeño de cada equipo y su impacto ambiental, [2.5].
- o Seguimiento del desarrollo en tecnologías, materiales, metodologías de prueba y modelación, [2.5].
- o Obtener una evaluación nacional del potencial por corrientes marinas considerando otras actividades rurales en el ambiente marino (pesca, desembarque, navegación entre otros) y una evaluación de las posibilidades de conexión a la red, [2.5].

Las tendencias para el desarrollo de energía por corrientes marinas se van a enfocar en realizar alianzas internacionales, el intercambio de experiencia internacional y tecnológica, la combinación de tecnología disminuyendo así los costos, el desarrollo de materiales biodegradables, preservar los organismos vivos sobre la superficie y dentro del mar, entre otras.

2.3 Estructuras básicas de turbinas marinas

Actualmente, se están desarrollando diversas iniciativas empresariales o universitarias de prototipos o proyectos para aprovechar la fuerza por las corrientes marinas. Las turbinas de corrientes marinas aprovecharán la energía cinética para transformarla en energía mecánica rotacional, aprovechando las diferencias de presión formadas alrededor de un sólido inmerso en un fluido con movimiento, sus diseños están basados en la tecnología eólica.

Las principales estructuras de este tipo de energía se clasifican en:

a) Turbina de eje horizontal (flujo axial).

Las turbinas de este tipo de tecnología se presentan en la figura 2.8, tienen un funcionamiento en donde el flujo de agua hace que los rotores giren alrededor del eje horizontal, es decir, la dirección del flujo será paralela al eje de rotación, este tipo de tecnología se basa en el levantamiento de las aspas por la acción del flujo, [2.12].

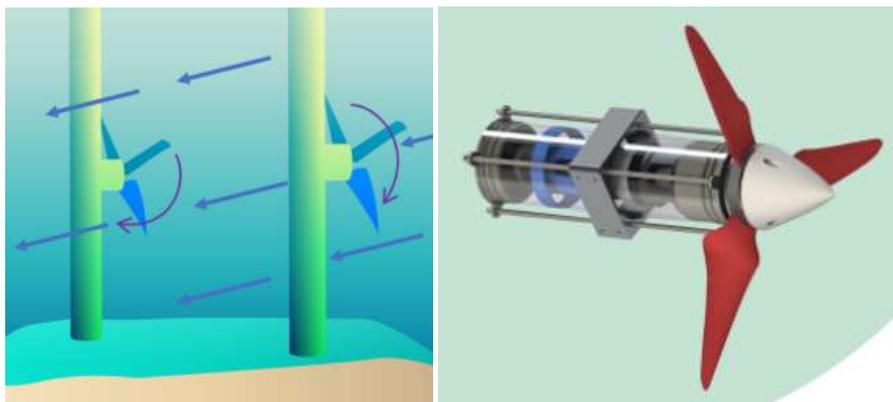


Figura 2.8. Turbina de eje horizontal [2.12][2.13].

b) Turbina de eje vertical (flujo transversal).

Este tipo de turbinas presentadas en la figura 2.9, contienen al generador montado sobre un eje vertical, la corriente marina hará que los rotores giren alrededor de ese mismo eje, es decir, el rotor gira en dirección perpendicular al flujo. Las turbinas de eje vertical permiten captar la energía desde cualquier dirección.

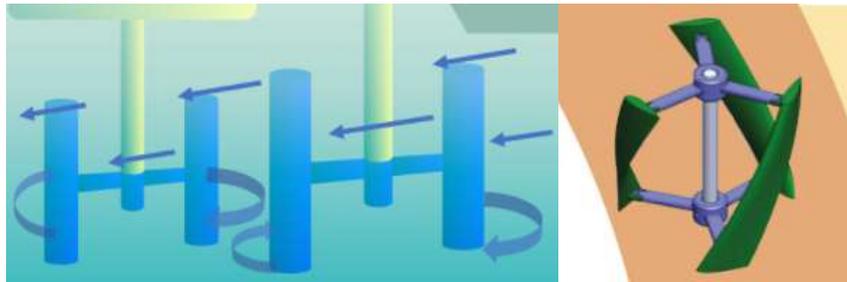


Figura 2.9. Turbina de eje vertical [2.12][2.13].

c) Sistema de efecto Venturi.

El dispositivo Venturi presentado en la figura 2.10, contiene una turbina de flujo axial dentro de un ducto Venturi el cual es diseñado así para que el flujo de la corriente marina que entra en el ducto pueda mover a la turbina en su interior, o usar el diferencial de presión que presenta.

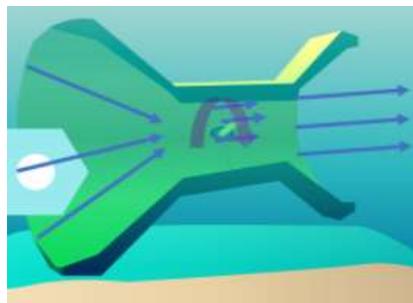


Figura 2.10. Dispositivo Venturi [2.12].

d) Cometa de corriente.

Este dispositivo mostrado en la figura 2.11, tiene forma de alerón sujetado a una pequeña turbina debajo del ala, la cometa se moverá por la corriente realizando una figura de forma de ocho; consiguiendo aumentar la velocidad del agua que fluye a través de la turbina.

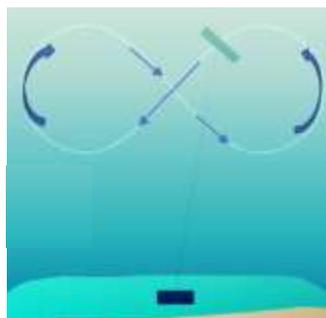


Figura 2.11. Cometa de corriente [2.12].

e) Alabe oscilante o Hidroala.

Este dispositivo presentado en la figura 2.12, contiene un brazo oscilante con una posición horizontal unida a una aleta, donde la fuerza de la corriente marina provoca que el brazo oscilante se desplace de manera vertical accionando un motor hidráulico que va a generar energía eléctrica.

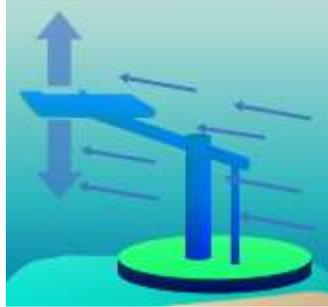


Figura 2.12. Alabe oscilante o Hidroala [2.12].

f) Tornillo de Arquímedes.

En la figura 2.13 se muestra este el dispositivo, tiene la forma de tornillos girando de forma ascendente sobre un eje central anclado al fondo marino, este sistema extrae la energía de la corriente marina por medio del movimiento generado en la espiral, y así mismo hace girar a la turbina.



Figura 2.13. Tornillo de Arquímedes [2.12]

Las turbinas de corrientes marinas ideales podrán alcanzar una eficiencia del 59% convirtiendo la energía cinética en energía mecánica, porcentaje conocido por la ley de Betz, es decir, en condiciones reales la eficiencia es menor debido a las pérdidas de energía por los efectos de la turbulencia, vorticidad, expansión de la estela originando corriente debajo de la turbina, [2.14].

La capacidad final de extracción de energía puede ser mayor a un 40%, además las turbinas marinas serán más costosas y se necesitará un mantenimiento más complejo, pero las



turbinas marinas van a operar a velocidades menores en comparación con un sistema eólico, esto reduce el riesgo de fallo.

En cada uno de los prototipos mencionados con anterioridad se verá como elemento fundamental la cimentación o el anclaje, garantizando que la turbina permanezca en la posición adecuada para la obtención de energía. Algunos de los parámetros que influyen en la elección del tipo de cimentación son:

- o La profundidad, el tipo de suelo, la complejidad de la instalación y las características de cada turbina.
- o Si las turbinas son fijas se podrán cimentar mediante: pilotes, estructuras de gravedad o succión.
- o Si las turbinas son flotantes se podrán cimentar mediante: arrastre, pilotes, estructuras de gravedad o placas.

2.4 Conclusiones particulares

Existe un impacto ambiental en el uso de la energía por corrientes marinas como cambios en la dinámica del hábitat marino, ruido, generación de campos electromagnéticos, cambios en el suelo o la disponibilidad del alimento para los mamíferos marinos; sin embargo, los recursos pueden ser explotados con un escaso impacto ambiental implementando este método que es menos perjudicial para la obtención a gran escala de energía. Así mismo, el promover la preservación ambiental, cuidados ambientales en los proyectos y estudios sobre la evaluación en el ambiente marino, la implementación de la energía por corrientes marinas será un enorme potencial para la futura generación de la electricidad.

En la actualidad, el minimizar las pérdidas de potencia en un equipo eléctrico o a gran escala es vital, siendo así primordial el implementar la electrónica de potencia en tecnologías de generación renovable para la sostenibilidad, ayudando a conseguir ahorros en la regulación de velocidad de motores eléctricos, iluminación eficiente, aumento del factor de potencia, reducción de distorsiones y desequilibrios, entre otros.

Al día de hoy, el hacer uso de la electrónica de potencia en la generación renovable es primordial para adaptar las variables eléctricas de la energía generada hacia la red eléctrica. Día a día existe una mejoría en los dispositivos de electrónica de potencia, haciéndolos más eficientes, potentes, con un ahorro energético importante y amigables con el ambiente.

En cuanto a la capacidad de las turbinas marinas el aumento ha sido notablemente durante la última década, así mismo el diseño o implementación de prototipos por investigadores, universitarios, inversores o empresas e industrias. Avances que, sin duda, progresarán el futuro para los parques de energías marinas.



CAPÍTULO 3

MARCO TEÓRICO: MODELOS MATEMÁTICOS POR ETAPAS

3.1 Unidad de generación

Comúnmente, la generación eléctrica que involucra las fuentes de energías renovables en la etapa de conversión mecánica a eléctrica de baja escala se implementan generadores eléctricos que pueden ser del tipo PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator), DFIG (Double Feed Induction Generator) y generadores lineales. Dichas máquinas son capaces de transformar la energía mecánica en energía eléctrica mediante el uso de una turbina, aprovechando la energía por corrientes marinas.

En este contexto, el sistema máquina-turbina se selecciona a partir de los datos en sitio del recurso marino los cuales son; velocidad, densidad, y distancia a la costa. En este capítulo se muestra una revisión de las tecnologías disponibles de generadores eléctricos para el diseño y construcción de las plantas de generación por corrientes marinas.

3.1.1 Estructuras básicas de generadores marinos

Existen diferentes tipos de generadores marinos para el aprovechamiento de la energía cinética en este caso corriente marina, la mayoría de los generadores que se emplean son los generadores de imanes permanentes dadas sus ventajas en peso y coste en comparación con los generadores con rotor devanado, a continuación, se presentan algunos de ellos.

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

El generador síncrono de imanes permanente es una máquina síncrona en el que se sustituyen los bobinados de excitación, normalmente en el rotor, por imanes permanentes los cuales suministran un campo de excitación constante.

- o **Generador lineal.**

Un generador lineal aprovecha el movimiento lineal para la generación de energía en lugar de utilizar la potencia mecánica en el giro de un eje, como funcionan los generadores rotativos, así mismo las dimensiones y desplazamientos son remplazados por lineales.

Su principio de funcionamiento se fundamenta en la ley de inducción electromagnética de Faraday; si en un circuito cerrado varía el flujo magnético se va a inducir una fuerza electromotriz (f.e.m.) y esta será proporcional a la variación temporal del flujo. Este flujo magnético podrá ser creado por un devanado inductor o un imán permanente y será perpendicular a la superficie plana del devanado inductor o del imán.

El generador lineal cuenta con el estator y su rotor, el espaciamiento entre ambas partes tiene un efecto en la magnitud del voltaje inducido, y la inducción magnética se produce por las variaciones del campo magnético que actúa sobre los devanados del estator, además cuenta con resortes en los bordes del generador accionando como un amortiguador para el movimiento del rotor, su representación en la figura 3.1.

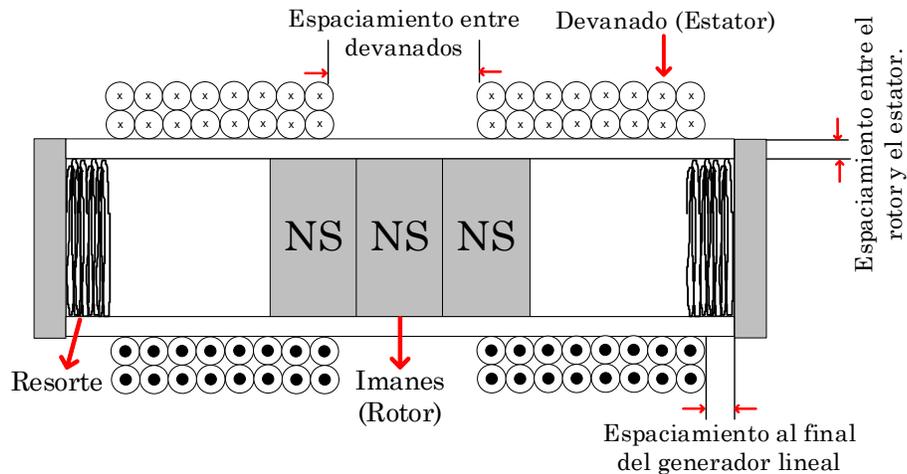


Figura 3.1. Generador lineal de imanes permanentes.

Los generadores lineales se implementan principalmente en la energía marina; ya que ofrece un menor peso, alta eficiencia en su generación y disminuye pérdidas por fricción, pero así mismo cuenta con desventajas y una de ellas es el aprovechamiento de energía en los parámetros como la frecuencia y la distorsión de la forma de onda del voltaje inducido, la cual se busca que sea lo más sinusoidal posible.

o **Generador eléctrico de doble alimentación (DFIG).**

Los generadores de doble alimentación son máquinas de inducción de velocidades variables y son frecuentemente utilizadas en los parques eólicos. Está formada por el circuito del estator y del rotor, y en este caso el estator se encuentra conectado directamente hacia la red eléctrica y el circuito del rotor está conectado mediante un convertidor electrónico bidireccional (CA/CD/CA) que también está conectado hacia la red, como se observa en la figura 3.2.

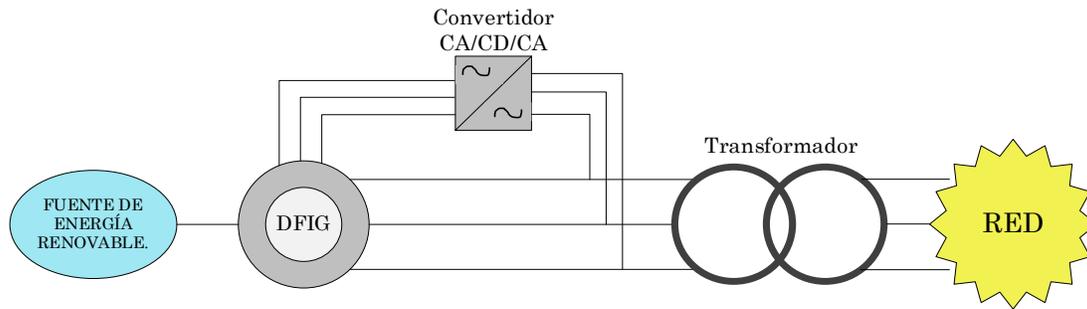


Figura 3.2. Generador eléctrico de doble alimentación (DFIG).

Una de las ventajas de este generador es que la potencia que circula por el convertidor que está conectado al rotor, es solo una mínima fracción de la potencia total de la máquina síncrona, es decir, existe un ahorro muy importante.

Se utiliza para aplicaciones donde se requiere control de velocidad, es decir, cuando trabaja como generador este puede lograr velocidades subsíncronas (rotor consume energía) o supersíncronas (rotor genera energía), llevando a la turbina a trabajar en un amplio rango de velocidades con una alta eficiencia.

3.1.2 Descripción de la Máquina Síncrona PMSG

La máquina síncrona de imanes permanentes se compone de dos partes una estática (estator) y una rotativa (rotor), separados por un espacio de aire llamado entrehierro. Se le denomina síncrona cuando la corriente alterna que circula por los devanados del estator, producen un campo magnético que gira en el entrehierro de la máquina a una frecuencia angular por las corrientes del estator que lo indujeron.

El rotor gira a la misma velocidad del campo magnético que produjo el estator, es decir, a la velocidad síncrona, la cual está ligada a la frecuencia y al número de pares de polos de la máquina, para que el par eléctrico sea diferente de cero.

En una máquina síncrona se genera un campo magnético a partir de imanes permanentes, en este caso, los imanes permanentes crean el campo de forma autónoma y continua, obteniendo una aplicación interesante como es la velocidad variable, la representación del generador se puede ver en la figura 3.3(a-b).



Figura 3.3. a) Dibujo representativo de un generador síncrono de imanes permanentes de dos pares de polos, b) Generador síncrono físicamente.

Al emplear imanes permanentes ya no hay necesidad de tener anillos rozantes, es decir, se eliminan las pérdidas en el cobre del rotor, y con ello se quita el sistema de refrigeración al rotor, disminuyendo el tamaño de la máquina en general. Algunas de las ventajas de usar una máquina de imanes permanentes se pueden ver en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Ventajas de usar una máquina síncrona PMSG.

Económicas	Técnicas
<ul style="list-style-type: none"> o La fabricación y montaje del rotor tiene un menor coste. o Larga vida de servicio. o La máquina es de menor dimensión. o Fiabilidad en el sistema. o Requieren un mínimo mantenimiento ya que no llevan escobillas. 	<ul style="list-style-type: none"> o No requieren de potencia extra para alimentar el campo de excitación magnético, ahorrando hasta un 20% de energía solo por usar imanes. o Alta relación en el par e inercia para conseguir elevadas aceleraciones. o La eficiencia y las características térmicas de la máquina mejoran gracias a la ausencia de las pérdidas del campo. o Tiene un nivel de ruido y vibración bajo, aun en altas revoluciones. o Alto rendimiento, confiabilidad, eficiencia y factor de potencia elevado.

El análisis del generador síncrono PMSG es similar a una máquina síncrona clásica, y la única diferencia es la excitación, se observa en la figura 3.4 (a) el devanado de armadura y el devanado de campo (b) correspondiente de una máquina síncrona para su análisis.

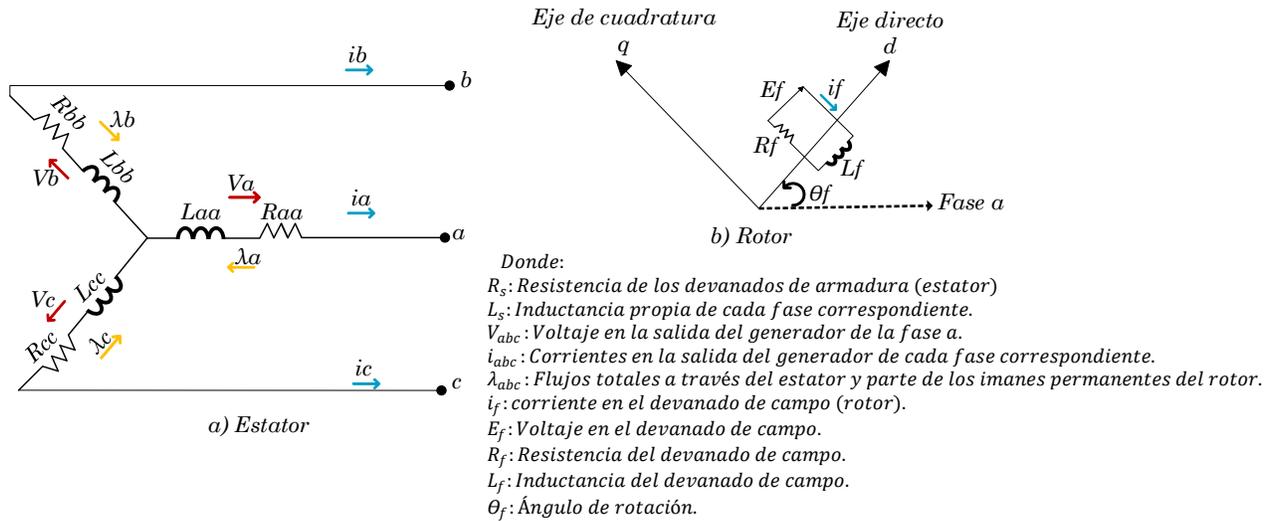


Figura 3.4. a) Representación del circuito del devanado de armadura, b) Representación del circuito del devanado de campo del generador síncrono.

El análisis de la máquina PMSG se encuentra reproducido a continuación, iniciando con las ecuaciones (3.1) por fase relacionando las tensiones del estator, las cuales son obtenidas a partir de la figura 3.4 (a), a donde las fases a-b-c están desfasadas 120° , el rotor se mantiene rotando girando a una velocidad síncrona $w_r = w_s = \omega$ en estado estable y el estator se mantiene fijo.

$$V_a = -R_{aa}i_a + \frac{d}{dt}\lambda_a \quad ; \quad V_b = -R_{bb}i_b + \frac{d}{dt}\lambda_b \quad ; \quad V_c = -R_{cc}i_c + \frac{d}{dt}\lambda_c \quad (3.1)$$

Este modelo de la ecuación (3.1) es altamente no lineal y contiene coeficientes variables, tenemos inductancias propias, mutuas y del rotor. Asumiendo un sistema balanceado, y no trabajando en el marco de referencia "abc", ya que tendremos inductancias variables y hace que otras variables estén en función del tiempo. Se realiza el análisis en el marco de referencia $dq0$, conocido como la transformada de Clark, Fortescue y Park, ecuaciones (3.2) y (3.3), [3.11].

Agregando un eje directo y un eje de cuadratura, desfasados 90° , ahora los ejes a-b-c estarán fijos y los ejes de cuadratura y directo estarán girando a la velocidad síncrona, como se puede ver en la figura 3.4 (b).

$$I_{dq0} = T_{dq0} * i_{abc} \quad (3.2)$$

$$[T_{dq0}] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_f) & \cos\left(\theta_f - \frac{2}{3}\pi\right) & \cos\left(\theta_f + \frac{2}{3}\pi\right) \\ -\sin(\theta_f) & -\sin\left(\theta_f - \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\theta_f + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Por lo tanto, las inductancias propias y mutuas serán constantes pues los devanados se mueven a una velocidad síncrona, los valores de las corrientes y voltajes serán constantes. Al aplicar la transformación a coordenadas $dq0$ da como resultado las ecuaciones que rigen el comportamiento de la máquina PMSG, donde $R_s = R_{abc}$, $L_s = L_{aa} = L_{bb} = L_{cc}$, y los subíndices diferentes como d (eje directo) y q (eje de cuadratura), representan a las variables como inductancias, voltajes y corrientes.

Las ecuaciones de los voltajes de eje directo y cuadratura, del generador síncrono de imán permanente se describen a continuación, donde $\lambda_q = -L_q i_q$ y $\lambda_d = -L_d i_d + \lambda p \omega$ son los enlaces de flujo que se encuentran en los devanados del eje directo y del eje de cuadratura, p : es el número de pares de polos del generador y λ : flujo inducido por los imanes permanentes del rotor en las fases del estator del generador.

$$V_d = -R_s i_d + \frac{d}{dt} \lambda_d - \omega \lambda_q \quad (3.4)$$

$$V_q = -R_s i_q + \frac{d}{dt} \lambda_q - \omega \lambda_d \quad (3.5)$$

Finalmente, los circuitos equivalentes en el marco de referencia $dq0$ se muestran en la figura 3.5, y las ecuaciones (3.4) y (3.3) se pueden escribir de la siguiente manera:

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} V_d - \frac{R_s}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \omega i_q \quad (3.6)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} V_q - \frac{R_s}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} p \omega i_d - \frac{\lambda p \omega}{L_q} \quad (3.7)$$

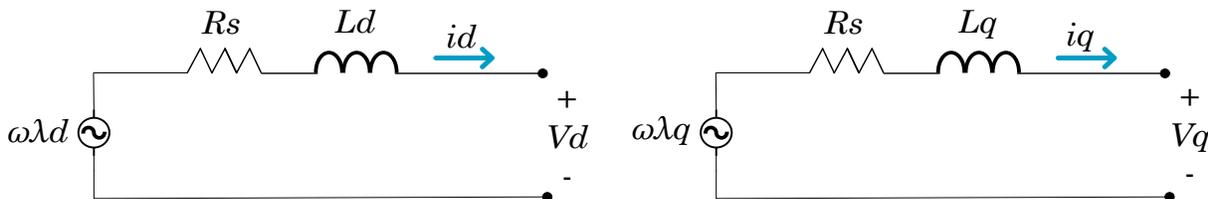


Figura 3.5. Circuitos equivalentes del generador síncrono de imanes permanentes en el marco de referencia $dq0$.

La potencia trifásica de salida de la máquina y el torque o par eléctrico a través del entrehierro son parte del conjunto de ecuaciones necesario para el modelo del generador, permitiendo obtener la información de la potencia que es demandada por la carga y la que se requiere para tener un sistema estable. Se aplica de igual manera la transformada a coordenadas $dq0$ en ambos casos y se obtiene (3.8) y (3.9), [3.11].



$$P_t = \frac{3}{2}(V_d i_d + V_q i_q) \quad (3.8)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p(\lambda i_q + ((L_d - L_q) i_d i_q)) \quad (3.9)$$

El modelo que se implementa para este trabajo de tesis es a partir de Simulink de MATLAB; se ocupa el siguiente generador síncrono trifásico de imanes, donde n : *velocidad síncrona en rpm*, y sus parámetros nominales son:

$$T = -45.6 [Nm] \quad ; \quad R_s = 0.0485\Omega \quad ; \quad L_d = L_q = 0.000395 [H] \quad ; \quad \lambda = 0.1194 [Wb]$$

$$p = 4 \text{ pares de polos} \quad ; \quad V = 560 [V] \quad ; \quad n = 3000 [rpm]$$

Velocidad de la máquina en rad/s:

$$\omega = \frac{3000 [rpm]}{1} * \frac{2\pi}{60} = 315.1592 \left[\frac{rad}{s} \right]$$

Potencia mecánica de la máquina nominal:

$$P_{CM} = 315.1592 \left[\frac{rad}{s} \right] * 45.6 [Nm] = 14,37125 [W]$$

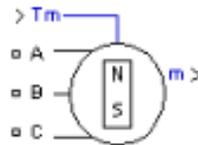


Figura 3.6. Generador síncrono PMSG en Simulink de MATLAB.

3.1.3 Eficiencia y curvas características

La máquina funcionando como generador tiene un par mecánico que se ejerce sobre el eje de la máquina acelerando de esta manera al rotor, se tiene un campo fijo por los imanes permanentes y se induce hacia los devanados del estator en un sistema trifásico, se tendrá la misma frecuencia y una velocidad síncrona de giro en el eje. Algunas de sus curvas características se observan en la figura 3.7.

La figura 3.7 (a) muestra el desempeño del par mecánico y la potencia, cuando se sale del margen de estabilidad la máquina perderá el sincronismo, es decir si $\theta_f > 90^\circ$, siendo una operación crítica de la máquina, por lo tanto, el ángulo siempre tomara valores menores a 90° , y así se obtiene seguridad y estabilidad en la máquina. La figura 3.7 (b) muestra como la máquina trabaja a una

velocidad síncrona, entregándonos un par máximo, mínimo y nominal, e implica que la curva será una recta rígida, es decir, sea cual sea su funcionamiento la máquina siempre va a trabajar en el sincronismo.

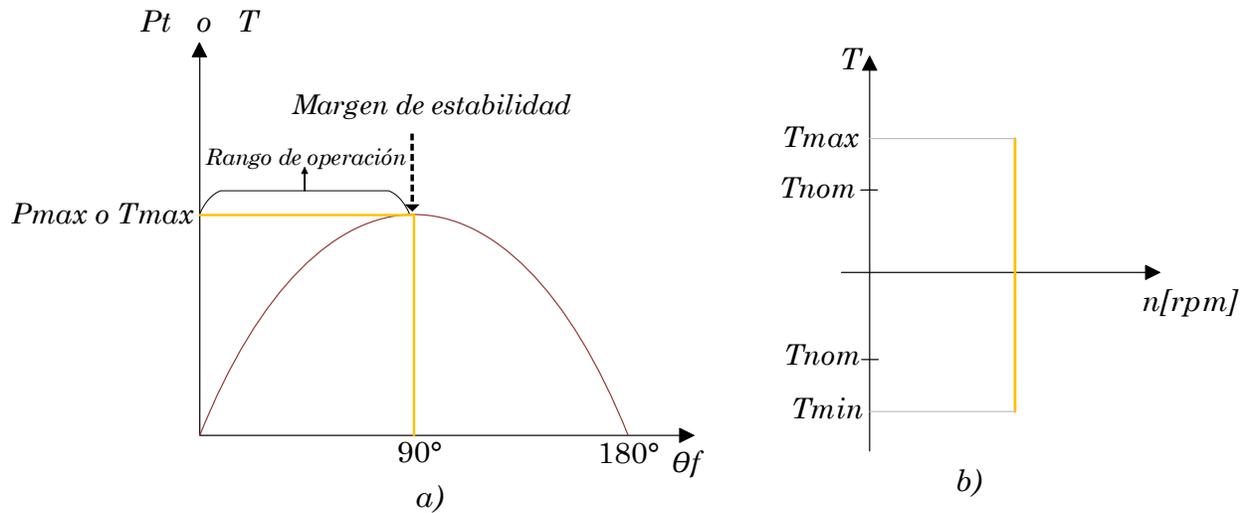


Figura 3.7. a) Curva de estabilidad del par- ángulo y curva potencia-ángulo, b) Curva característica mecánica par-velocidad.

3.2 Turbomáquina

Las turbinas de corriente marina pertenecen a un grupo de turbomáquinas motrices, mediante su rotación convierten la energía cinética de las corrientes marinas en energía mecánica, y esta propulsa a un generador para que genere corriente eléctrica, [3.11].

La transferencia de energía por corrientes marinas al rotor se realiza a través de fuerzas dinámicas en las palas del rotor, es decir, suelen clasificarse según el tipo de fuerza que provoca el giro del rotor, en este caso la corriente marina. Una turbina por corrientes marinas nos da la ventaja de obtener unas cuatro veces más potencia anual que un aerogenerador, con una velocidad de corriente entre 1 y 3 m/s, dando así un nivel alto de producción.

3.2.1 Modelo matemático

El modelo de la turbina se caracteriza por la potencia mecánica en estado estable (3.10), se obtiene de los rotores marinos y obedecen a una ecuación similar a la de los aerogeneradores. La cantidad de energía que puede generar una turbina depende de la velocidad del fluido y del volumen.

$$P_{CM} = \frac{1}{2} * \rho * A * S_M^3 * C_p(\lambda, \beta) \quad (3.10)$$



En donde “ ρ ” es la densidad del agua o del fluido la cual es alrededor de los $1027 \frac{kg}{m^3}$, “ A ” el área barrida por la turbina, “ S_M^3 ” la velocidad de la corriente marina en [m/s] y “ C_p ” es el coeficiente del rendimiento de la turbina, es decir, la turbina no podrá aprovechar toda la potencia, por ello existe el límite de “Betz” siendo un coeficiente que tiene pérdidas leves como las mecánicas, C_p dependerá de la relación de la velocidad de las palas del rotor y la velocidad del fluido “ λ ”, y del ángulo de inclinación en grados de la pala “ β ” da las características de potencia de la turbina.

La ecuación (3.10) se puede normalizar en el sistema por unidad pu, donde “ K_p ” es la ganancia de la potencia a una velocidad base del fluido de la potencia mecánica nominal, y es menor o igual que 1.

$$P_{CM} = S_{M_pu}^3 * K_p * C_{p_pu} \quad (3.11)$$

El empuje en la turbina es una magnitud elevada y es la fuerza que se genera en la dirección del fluido, resultado de la extracción de energía en la turbina. En el proceso de la extracción, existirán cambios como el aumento o la reducción de “ S_M^3 ”, es decir, la turbina y su anclaje marino deberá soportar este tipo de fuerzas. En la ecuación (3.12) se muestra como calcular el empuje máximo en la turbina o el torque máximo, donde C_t es el coeficiente del torque y $S_{M_max}^2$ la velocidad máxima del fluido.

$$T_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2} * \rho * A * S_{M_max}^2 * C_t \quad (3.12)$$

3.2.2 Eficiencia y curvas características

Cada diseño de turbina tendrá una eficiencia asociada por la vida útil que se le dé, la eficiencia de una turbina esta expresada en porcentaje, donde $P_{m\acute{a}x}$ es la potencia máxima total disponible en el flujo de la corriente y se define como:

$$\eta = \frac{P_{CM}}{P_{m\acute{a}x}} * 100 \quad (3.13)$$

El desempeño de una turbina se puede ver afectado por la velocidad del fluido y el torque de salida, teniendo efectos considerables sobre la potencia total de salida y por lo tanto también sobre la eficiencia.

El coeficiente de potencia C_p se puede ver como una eficiencia, puesto que cada tipo de turbina tiene un valor de C_p máximo definido. En la figura 3.8, se puede observar que para el caso de la turbina implementada por Simulink de MATLAB es de 0.48 el C_{p_max} con un $\beta = 0$, se busca tener un ángulo de cero en la inclinación de las palas.

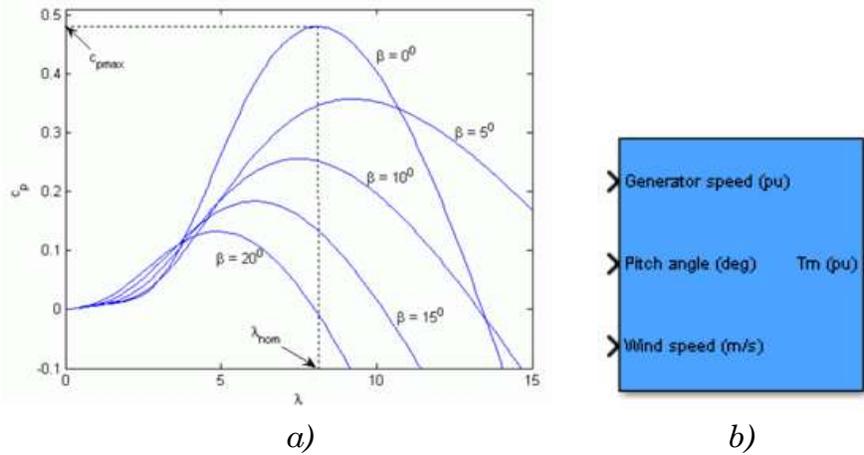


Figura 3.8. a) Coeficiente de potencia, b) turbomáquina de Simulink de MATLAB que se ocupó, [3.7].

La turbina que se implementa en Simulink de MATLAB en este trabajo de tesis fue una turbina para un sistema eólico, ya que este ambiente de simulación no se cuenta con turbinas para sistemas de generación por corrientes marinas, sin embargo no existen grandes diferencias entre ellas, en este caso se adaptó para hacerla funcionar con una entrada de energía renovable de corriente marina a una velocidad de 1.5 m/s en Yucatán ubicada en el Mar Caribe, Canal de Yucatán, en vez de 12 m/s utilizada para un sistema eólico.

La figura 3.9 muestra la potencia mecánica P_{CM} en función de la velocidad del generador, para diferentes velocidades de la corriente marina S_M y para un ángulo de inclinación de la pala de $\beta = 0$.

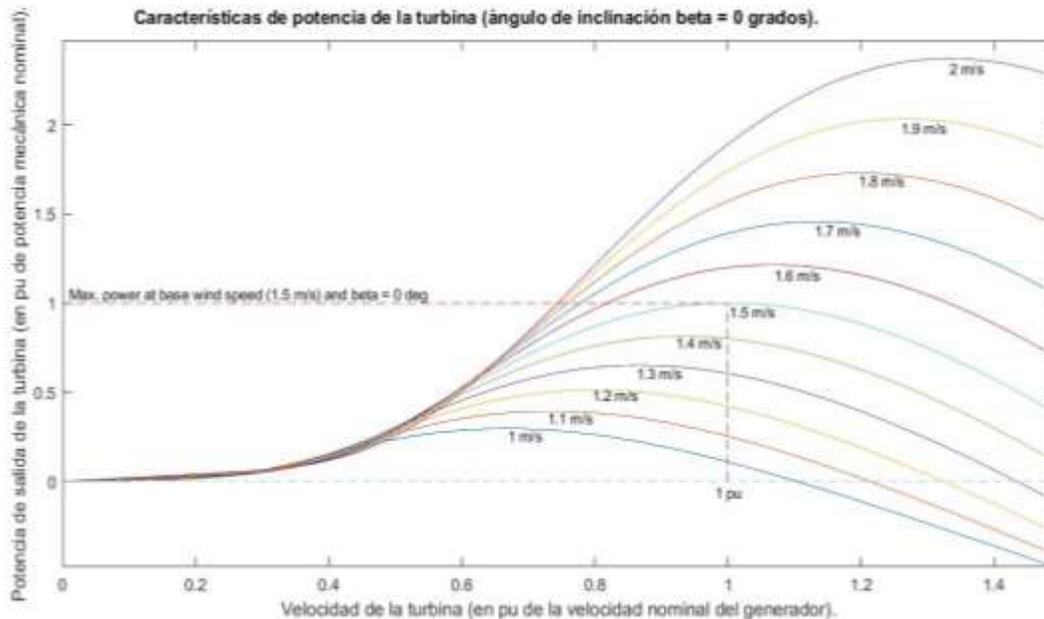


Figura 3.9. Características de la turbomáquina empleada a diferentes niveles de velocidad de corriente.



3.3 Topologías y controles empleados

Los circuitos electrónicos de potencia empleados son un sistema de seis diodos rectificadores para convertir la corriente de CA a CD, posteriormente se implementa el C_{Boost} siendo un convertidor de categoría CD/CD elevador implementando la extracción de máxima potencia *MPPT* de la turbomáquina, y finalmente se implementa el convertidor *VSC* inversor con una categoría CD/CA, llegando al nivel de la red eléctrica para su distribución.

La función de los convertidores se centra en el encendido y apagado de los dispositivos semiconductores de potencia que funcionan como interruptores, teniendo como función principal el procesamiento y control del flujo de la energía suministrado por voltajes y corrientes.

Se considera a la electrónica de potencia una parte primordial en la generación, transmisión, distribución y almacenamiento de la energía eléctrica, en este caso con fuentes renovables [3.9]. En este trabajo la turbomáquina nos entrega P_{CM} y el generador síncrono nos entrega P_{Ams} y es una potencia no regulada con fluctuaciones considerables en CA por ello se requiere implementar un convertidor CA/CD, un convertidor elevador CD/CD aumentando la tensión de salida, para luego utilizar un inversor CD/CA, controlando f, P y Q en la red eléctrica. En la figura 1.2 (a) del capítulo 1, se puede observar los controles implementados.

3.3.1 Convertidor PFC Boost Rectificador

El convertidor boost CD/CD o elevador tiene como característica que el voltaje a la salida " V_o " es mayor al que se le aplica en la entrada " V_{CD} " y realiza la corrección del factor de potencia (PFC). El PFC tiene como objetivo proporcionar un alto factor de potencia, manteniendo el voltaje de salida regulado al valor deseado, se utiliza el rectificador antes del C_{Boost} para la conversión de CA a CD, y es como se obtiene una entrada de CD en el convertidor elevador, es decir, el voltaje V_{CD} es rectificado, [3.12].

Para poder caracterizar el análisis del C_{Boost} se toman las propiedades del régimen permanente para que el convertidor pueda ser conmutado y así poder definir sus componentes. Se compone de dos interruptores, un diodo y un interruptor controlado el cual se suele implementar un transistor IGBT o MOSFET. Su principio de funcionamiento consiste en alternar continuamente entre el estado activo " t_{on} " y el apagado " t_{off} ". En la figura 3.10 se observa el circuito eléctrico.

El bloque *PWM* (CD/CD), emitirá un pulso para el interruptor MOSFET, teniendo como entrada al ciclo de servicio D y donde P emitirá el pulso, en este caso el *PWM* tendrá una frecuencia de conmutación de $f_c = 5000 [Hz]$, la cual es una señal utilizada para generar el pulso.

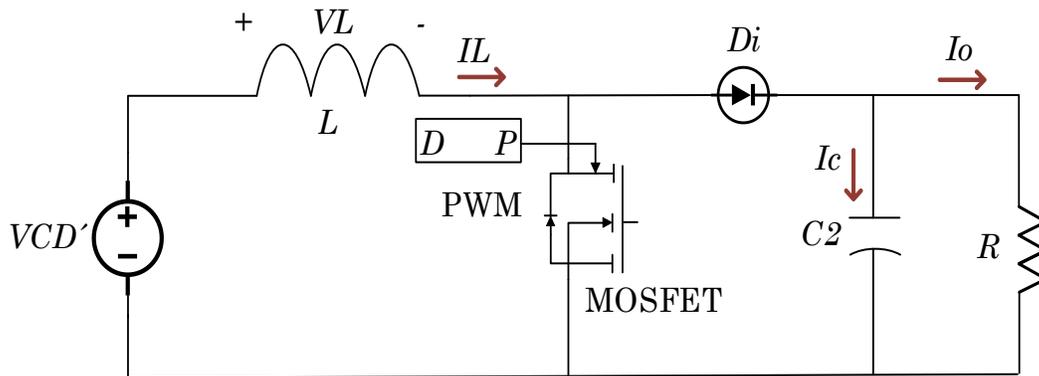


Figura 3.10. Circuito del convertidor elevador Boost.

Quando el interruptor se encuentra cerrado el convertidor se encuentra en estado activo, el inductor L queda en paralelo con la fuente $V_{CD'}$, es por ello que los voltajes son los mismos, es decir, $V_{CD'} = V_L$, [3.12].

La corriente I_L incrementa y la energía que suministra la fuente se va almacenar en L , es decir, el inductor se vuelve una fuente y la única forma que fluya corriente es porque se suman los voltajes $V_{CD'}$ y V_L . Además, si el capacitor C estaba previamente cargado podrá alimentar a la carga R . En la figura 3.11 se observa su el circuito en estado activo.

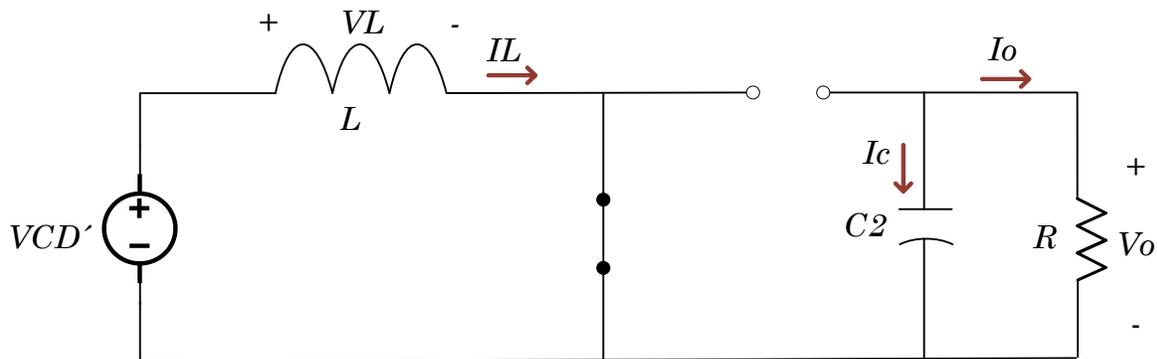


Figura 3.11. Circuito del convertidor elevador Boost en estado activo.

Quando el interruptor se encuentra abierto el convertidor se encuentra en estado apagado, y la energía almacenada en L es transferida a la carga pasando por el diodo D_i , la corriente I_L disminuye bastante pero no llega a tener el valor de cero esto si el sistema se mantiene trabajando en conducción continua. Por leyes de Kirchhoff $V_L = V_{CD'} - V_o$. En la figura 3.12 se observa su el circuito en estado apagado, [3.12].

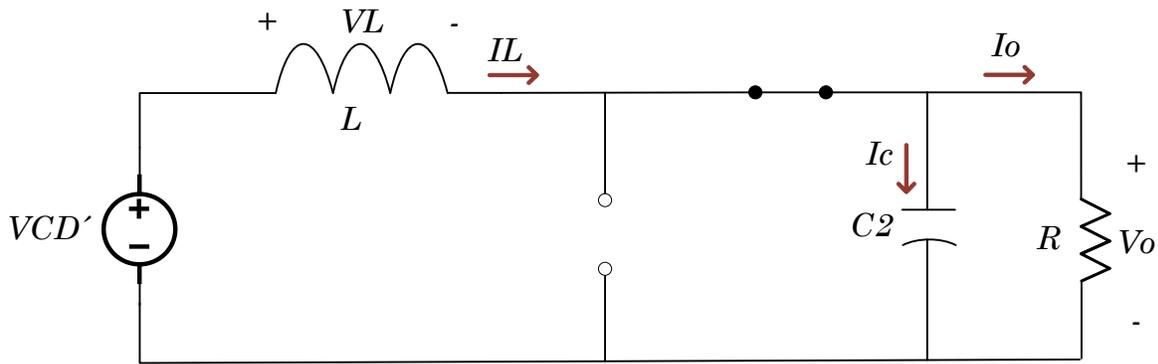


Figura 3.12. Circuito del convertidor elevador Boost en estado activo.

Gráficamente, en la figura 3.13 se observa los momentos en los cuales el valor de V_L es $V_{CD'}$ y cuando V_L toma el valor de $V_{CD'} - V_o$. El tiempo en el cual se mantiene en estado activo será de cero a DT y el tiempo en el cual se encuentra en estado apagado será de DT hasta que termine el periodo T , siendo los voltajes constantes.

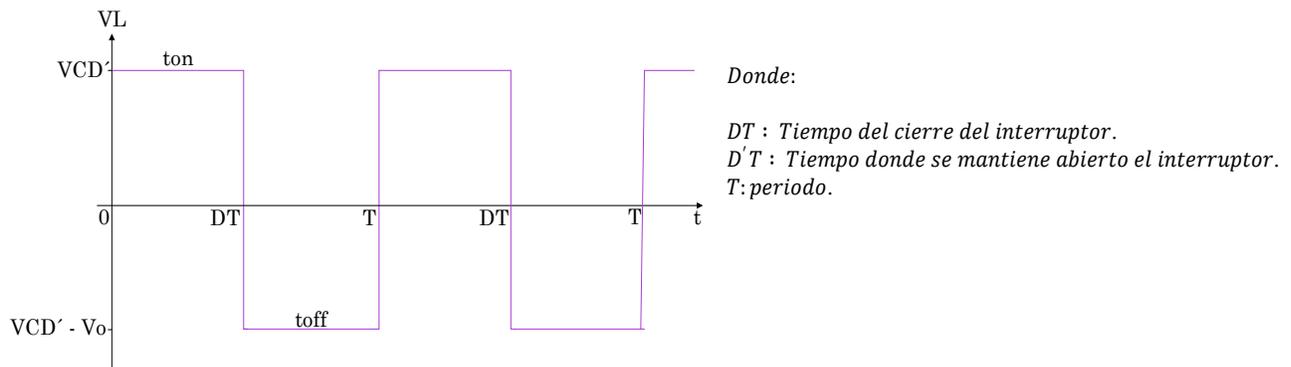


Figura 3.13. Gráfica representando los momentos de V_L .

De la figura 3.13 se puede obtener el valor promedio del voltaje del inductor en el tiempo t_{on} o estado activo, donde $D' = 1 - D$ en t_{off} y D en t_{on} , así mismo $D + D' = 1$. Recordando que el voltaje promedio de un inductor es cero, se tiene que:

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_{CD'} \quad (3.14)$$

El rizo de corriente o incremento y decremento de la corriente, nos indica como se descarga y se carga L , es decir, el cambio de la corriente, se describe en (3.15). Cabe mencionar que una buena estimación del rizo de corriente es entre el 20% y 40% de la corriente de salida, [3.12].

$$\Delta I_L^+ = \frac{V_{CD'} * DT}{L} \quad (3.15)$$



El análisis de DT a T, el interruptor se encuentra abierto y el decremento de corriente se describe en la ecuación (3.16), en donde se requiere un capacitor lo suficientemente grande para así mantener a V_o constante, [3.12].

$$\Delta I_L^- = \left(\frac{V_{CD'} - V_o}{L} \right) * D'T \quad (3.16)$$

Cabe mencionar que el incremento y decremento de la corriente en valor absoluto son los mismos, así mismo al término del ciclo del interruptor en “cerrado/abierto”, la corriente I_L debe ser igual al inicio del periodo, deduciendo (3.17) y (3.18), [3.12].

$$|\Delta I_L^-| = |\Delta I_L^+| \quad (3.17)$$

$$\Delta I_L^- + \Delta I_L^+ = 0 \quad (3.18)$$

Sustituyendo (3.15), (3.16) en (3.18) en función del ciclo de servicio D el cual solo toma valores que van desde el 0 al 1, se obtiene (3.19):

$$\left(\frac{V_{CD'} - V_o}{L} \right) * (1 - D)T + \frac{V_{CD'} * DT}{L} = 0 \quad (3.19)$$

Despejando V_o de (3.19), y teniendo una corriente de salida constante, se tiene que:

$$V_o = \frac{V_{CD'}}{(1-D)} \quad (3.20)$$

$$I_o = \frac{V_o}{R} = \frac{V_{CD'}}{R(1-D)} = \frac{P_{CM}}{V_o} \quad (3.21)$$

El valor de R_o se obtiene delimitando por el área de operación de S_M que garantizan cumplir con conducción continua y los factores de rizados obtenidos. Así mismo se está midiendo la potencia mecánica, la potencia de CD y la potencia activa. Verificando que la mayor parte de potencia mecánica se transfiera a CD .

$$R_o = 2000 \Omega \quad (3.22)$$

Del incremento y decremento de la corriente se puede obtener los valores para complementar el diseño del convertidor, el inductor para el diseño del C_{Boost} , siendo (3.23).

$$L = \left(\frac{V_{CD'} * DT}{\Delta I_L^+} \right) \quad ; \quad L = \left(\frac{V_{CD'} - V_o}{\Delta I_L^-} \right) * D'T \quad (3.23)$$

La corriente del inductor (3.24) se obtiene aplicando la corriente promedio de un capacitor donde esta será cero. Para que el sistema trabaje en conducción continua existe una inductancia mínima (3.25).



$$I_L = \left(\frac{V_o}{R_o}\right) \left(\frac{1}{1-D}\right) \quad (3.24)$$

$$L_{min} = \left(\frac{V_{CD} * DT}{2I_L}\right) \quad (3.25)$$

El rizo del voltaje (3.26) se emplea para encontrar el valor del capacitor C_2 y se calcula usando (3.27). Suponiendo que los factores de rizado son lo suficientemente pequeños para permitir una operación correcta, sea propone que sea menor al 1% de $\frac{\Delta V_o}{V_o}$, aunque esto implique tener capacitores de mayor capacidad. Cuando la tensión de alimentación del C_{Boost} proviene de generación renovable, se recomienda colocar un capacitor C_1 a la entrada del convertidor con el fin de atenuar el rizo del voltaje V_{CM} . [3.12].

$$\Delta V_o = \frac{V_o DT}{R_o C_2} = V_o \frac{1}{100} \% \quad (3.26)$$

$$C_2 = \frac{V_o DT}{R_o \Delta V_o} = \frac{V_o DT}{R_o \left(\frac{1}{100}\right)(V_o)} \quad (3.27)$$

Finalmente, en la practica V_o se podrá aumentar comúnmente a tres veces con respecto a la entrada, y el ciclo de servicio en ocasiones se suele ver como un porcentaje, sí se asume que D toma el valor de 0.6 nos dirá que el 60% este encendido y el 40% apagado, ahora bien, si D está a valores altos se presentan pérdidas importantes en el proceso de conversión. En un C_{Boost} se presentan pérdidas por conmutación y pérdidas por conducción.

3.3.2 Control MPPT

El control *MPPT* es implementado para extraer la máxima energía producida por la velocidad de la corriente marina, consiste en la búsqueda del valor óptimo del ciclo de servicio D para extraer la máxima potencia activa P en $[kW]$ a cada S_M , provocando que el control opere en o cerca del punto de máxima potencia. Se considera uno de los controles más importantes para mejorar la eficiencia de los sistemas de conversión de energía por energías renovables en nuestro caso por corrientes marinas.

Un sistema por corrientes marinas es altamente dependiente de S_M teniendo un comportamiento no lineal, lo que hace necesario implementar técnicas de control que sean capaces para realizar el seguimiento del punto de máxima potencia en cualquier condición de S_M .

En este trabajo de tesis se implementa un control *MPPT* donde se busca el valor óptimo del ciclo de servicio, se va a variar el valor de D del C_{Boost} , de acuerdo a estas condiciones solo

existe un punto de máxima potencia para cada valor de S_M y este se encargará de extraer esa potencia para maximizar la energía entregada. Posteriormente se realiza una relación entre S_M y D , considerando que en cada uno de los puntos se tiene la máxima potencia activa disponible.

Con los datos obtenidos se obtiene el polinomio característico del ciclo de servicio que se aplicara en Simulink de MATLAB, teniendo como entrada a S_M y a su salida el control *MPPT* ajustara automáticamente a el C_{Boost} para obtener la máxima potencia hacia la red eléctrica. Por lo que ante un decremento o incremento de S_M en el Mar Caribe, el control *MPPT* se ajustará para ese punto, en la figura 3.14 se muestra una aproximación de la curva característica del control *MPPT*.

Finalmente, se obtiene un polinomio el cual forma parte del proceso de conversión real del sistema, se obtuvieron los valores de las variables de interés para la obtención del polinomio de nuestro modelo detallado variando S_M .

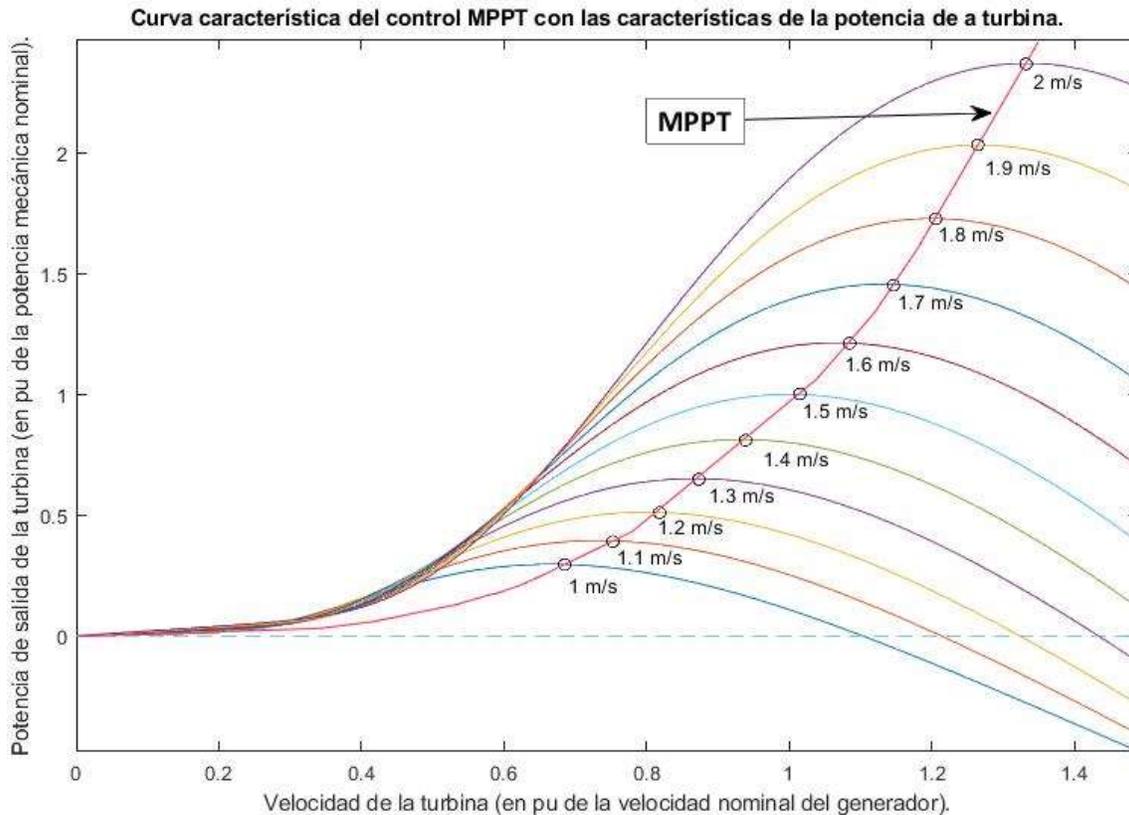


Figura 3.14. Curva característica del control *MPPT*.



3.3.3 Convertidor VSC Inversor

Un convertidor de fuente de tensión *VSC*, es comúnmente conocido como un convertidor *CD/CA*, son convertidores bidireccionales, es decir, entre la fuente de voltaje de *CD* y el sistema trifásico de *CA*. En este trabajo de tesis se emplea un convertidor *VSC* inversor trifásico, su principal utilidad se fundamenta en poder cambiar la tensión de entrada de *CD* a una tensión de salida en *CA*, teniendo en cuenta la magnitud y fase controlada, y la frecuencia que se requiera.

En la electrónica de potencia, los objetivos de los convertidores electrónicos es tratar de reconstruir señales a partir de pequeños escalones de voltaje, es decir, una señal senoidal se querrá construir a partir de pequeños escalones de voltaje. El inversor en este caso nos da señales cuadradas, es decir, $Vt\Delta\theta_t^{abc}$, las maneras para recuperar a la señal senoidal y poder trabajar con fasores son:

- o Incrementar la frecuencia de conmutación.
- o Incrementar los valores de la inductancia y capacitancia.

Las ondas de cierre y apertura de interruptores operan con base en una señal triangular y una señal senoidal, las cuales reciben el nombre de “señal portadora” y “señal moduladora”.

Este convertidor es capaz de generar tensiones balanceadas y controladas de manera casi instantánea, se consigue mediante la conmutación continua y controlada del *VSC*, teniendo como objetivo que disminuyan al máximo las pérdidas de los semiconductores empleados y producir ondas senoidales de calidad, con un mínimo filtrado.

Existen diferentes categorías de inversores como son los monofásicos, trifásicos, tipo de onda en el puerto de *CA* o por el tipo de modulación que se implemente.

El convertidor *VSC* trifásico trabaja con seis interruptores de potencia conectados en una configuración de puente y dos niveles de tensión $-V_{CD}$ y V_{CD} . Este sistema es de 3 ramas de conmutadores, cada rama está formada por dos conmutadores en serie y el nodo en común de cada rama se conecta a cada una de las fases del sistema trifásico de *CA* activo involucrando en su conexión a la red eléctrica, y todas las ramas se conectan en paralelo entre sí.

Las terminales de *CD* del convertidor están conectadas a una fuente de voltaje de *CD* o a un capacitor, en la figura 3.15 se muestra un *VSC* trifásico de dos niveles, así como su conexión para este trabajo de tesis.

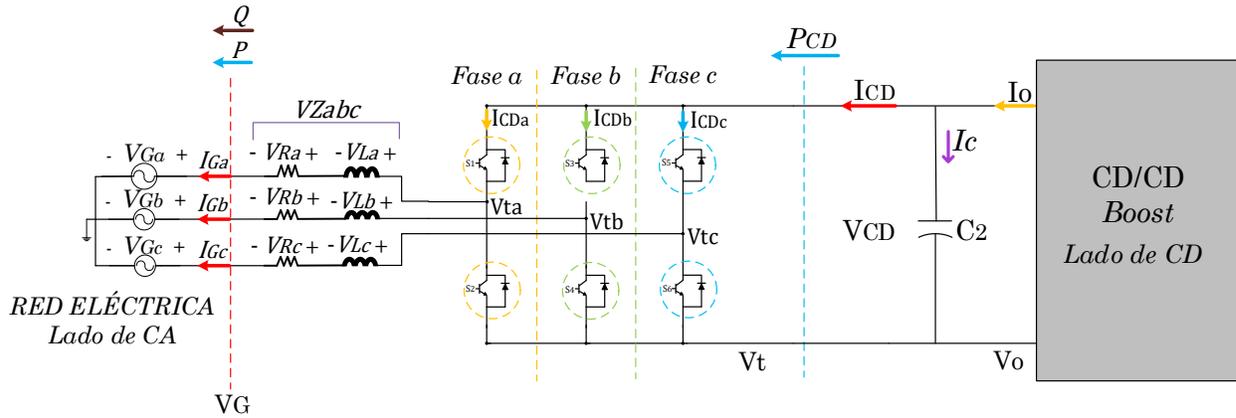


Figura 3.15. VSC trifásico de dos niveles y seis pulsos conectado a la red.

El funcionamiento del VSC trifásico va a consistir en generar tres tensiones de CA desfasadas una de otra 120° , controlando la conmutación de sus interruptores. En la figura 3.15, las fases se indican con las letras a, b y c, del sistema trifásico de CA, entonces los voltajes Vt_{abc} en las terminales CA en función de la variable de modulación m_{abc} , se definen como:

$$Vt_{abc} = \frac{1}{2} * V_{CD} * m_{abc} \quad (3.28)$$

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

$$m_a = |m| * \cos(\omega t + 0) \quad (3.29)$$

$$m_b = |m| * \cos\left(\omega t - \frac{2}{3\pi}\right) \quad (3.30)$$

$$m_c = |m| * \cos\left(\omega t + \frac{2}{3\pi}\right) \quad (3.31)$$

Los voltajes en las resistencias e inductancias de las fases se determinan en (3.32) y (3.33), así mismo se expresa la corriente del lado de CD, que circula por cada rama del VSC en función de la moduladora (3.34) [CITAS]:

$$VR_{abc} = R_{abc} * I_{Gabc} \quad (3.32)$$

$$VL_{abc} = L \frac{d(I_{Gabc})}{dt} \quad (3.33)$$

$$I_{CD}^{abc} = \frac{1}{2} * I_{Gabc} * m_{abc} \quad (3.34)$$

Aplicamos la ley de corrientes de Kirchoff en el lado de CD se llega a la expresión (3.35) donde se establece la relación que existe en V_{CD} e I_{CD} , donde I_o es la corriente de salida del convertidor Boost y C_2 el capacitor del C_{Boost} . Posteriormente se realiza el mismo análisis en el lado de CA para obtener la expresión (3.36) en la cual se establece le relación de la corriente y tensión en CA .

$$\frac{d}{dt} V_{CD} = \frac{I_o}{C_2} - \frac{I_{CD}}{C_2} \quad (3.35)$$

$$\frac{d}{dt} I_{Gabc} = \frac{1}{L_{abc}} * Vt_{abc} - \frac{1}{L_{abc}} * V_{Gabc} - \frac{R_{abc}}{L_{abc}} * I_{Gabc} \quad (3.36)$$

En la figura 3.16, se observa el modelo promediado del VSC trifásico de dos niveles, contiene tres fuentes de voltaje dependientes en el lado de CA y tres del lado de CD , y la corriente I_{Gabc} determina la dirección del flujo de potencia.

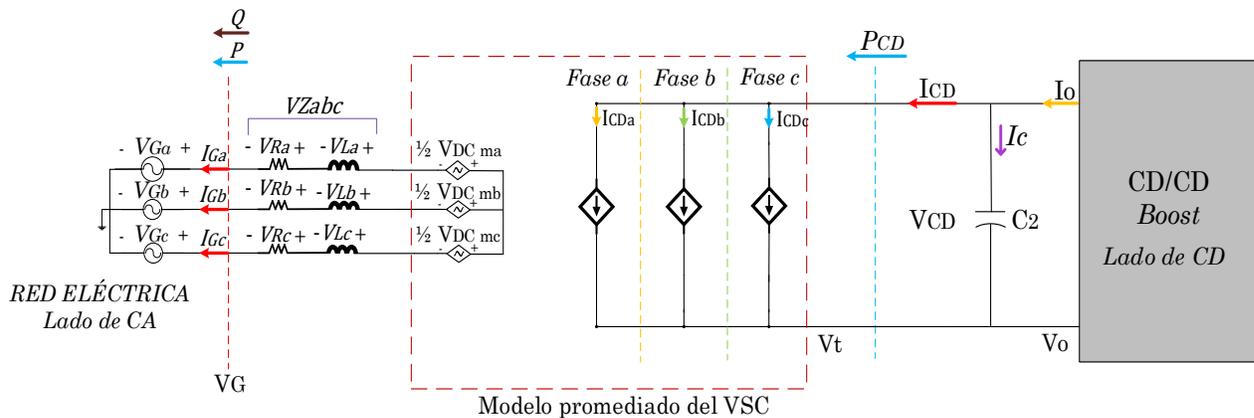


Figura 3.16. Modelo promediado del VSC trifásico de dos pulsos.

3.3.4 Control para la variable de modulación

Las variables moduladoras son obtenidas gracias a las ondas de cierre y apertura de interruptores con base en una señal triangular y una señal senoidal, las cuales reciben el nombre, en la práctica estas tres señales se podrán tomar de la red eléctrica funcionando con voltajes balanceados y una correcta fase entre ellos de 120° de separación.

Con la ley de voltajes de Kirchoff en el lado de CA en el circuito mostrado en la figura 3.17 se obtiene (3.37) la relación entre la tensión de la red eléctrica, la tensión asociada a la impedancia de acoplamiento y la tensión en las terminales de CA .

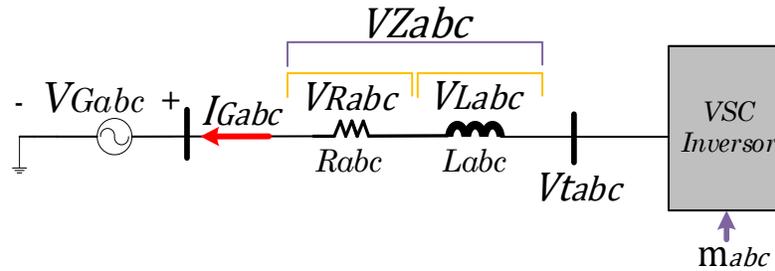


Figura 3.17. Diagrama que representa la simplificación a partir del VSC inversor.

$$VZ_{abc} = V_{Gabc} - V_{tabc} \quad (3.37)$$

En la figura 3.18 (b), se muestra la representación fasorial de la fase a de V_{ta} , V_{Ga} , VZ_a e I_{Ga} , así mismo en la figura 3.18 (a) se muestra un ejemplo de cómo la impedancia siendo puramente inductiva, hace que en un circuito inductivo la corriente esta retrasada 90° respecto al voltaje.

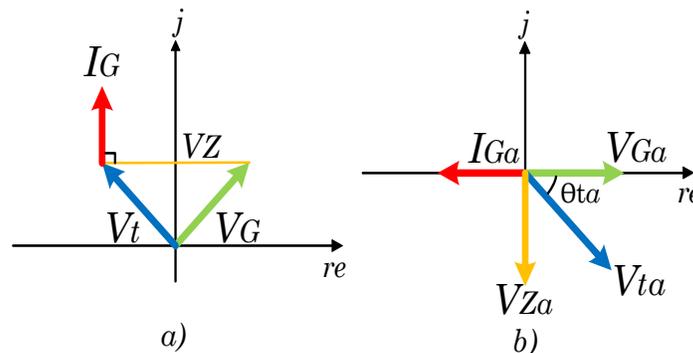


Figura 3.18. a) Circuito inductivo respecto al voltaje, b) Representación de la fase a.

Se requiere garantizar que la corriente I_{Gabc} se encuentre balanceada, y que tenga un factor de potencia unitario, por lo tanto, se debe cumplir que las tensiones en la impedancia, VZ_{abc} , estén balanceados entre sí con 120° . Así mismo, se espera que VZ_{abc} se encuentre retrasado 90° de V_{Gabc} y adelantada 90° de I_{Gabc} , además existirá un desfase de 180° entre V_{Gabc} e I_{Gabc} que indique que existe una inyección de potencia hacia la red.

Se puede decir con estas condiciones ya planteadas que la magnitud y fase de V_{tabc} va a variar en función de cómo se encuentre V_{Gabc} . Y a su vez, la corriente I_{Gabc} que se comparte con la red eléctrica, se puede mover solamente a partir de las variables de modulación. Por lo tanto V_{tabc} se puede ver en (3.38) y θ_t^{abc} en (3.39).

$$V_{tabc} = \sqrt{VZ_{abc}^2 + V_{Gabc}^2} \quad (3.38)$$



$$\theta_t^{abc} = \tan^{-1} \left(\frac{VZ_{abc}}{V_{Gabc}} \right) \quad (3.39)$$

Al implementar la ley de ohm es posible obtener la corriente que circula hacia la red eléctrica o la que pasa por la impedancia de acoplamiento en términos de Vt_{abc} y V_{Gabc} , es así como se obtiene (3.40), siendo $I_G \angle \theta_G^{abc}$, $V_G \angle \theta_G^{abc}$, $Vt \angle \theta_t^{abc}$ y $VZ \angle \theta_Z^{abc}$ los fasores correspondientes a las variables de interés.

$$I_G \angle \theta_G^{abc} = \frac{VZ \angle \theta_Z^{abc}}{R_{abc} + jX_L} \quad (3.40)$$

La potencia aparente “ S ” en el punto de interconexión se describe en (3.37) y considerando que “ $S = P + jQ$ ” y a (3.40) se puede obtener (3.42).

$$S = V_G \angle \theta_G^{abc} * I_G \angle \theta_G^{abc} \quad (3.41)$$

$$P + jQ = V_G \angle \theta_G^{abc} * \frac{VZ \angle \theta_Z^{abc}}{R_{abc} + jX_L} \quad (3.42)$$

Se considera que la caída de tensión en la inductancia de interconexión se define como la diferencia de voltajes entre el VSC y el voltaje de la red eléctrica, se asume que:

$$P + jQ = V_G \angle \theta_G^{abc} * \frac{V_G \angle \theta_G^{abc} - Vt \angle \theta_t^{abc}}{R_{abc} + jX_L} \quad (3.43)$$

Considerando que el voltaje en las terminales del VSC es proporcional al voltaje de CD y la variable moduladora, se podrá obtener:

$$P + jQ = V_G \angle \theta_G^{abc} * \frac{V_G \angle \theta_G^{abc} - \frac{1}{2} * V_{CD} * m_{abc} \angle \theta_t}{R_{abc} + jX_L} \quad (3.44)$$

Resolviendo la ecuación (3.44) para poder obtener la variable moduladora se llega a (3.45), posteriormente aplicando algebra se obtiene (3.46), donde V_G es la referencia y por lo tanto tiene ángulo de cero.

$$(R_{abc} + jX_L)(P + jQ) = V_G^2 \angle \theta_G^{abc} - \frac{1}{2} V_{CD} * m_{abc} \angle \theta_t * V_G \angle \theta_G^{abc} \quad (3.45)$$

Se debe tener presente que $X_L = 2 \pi fL$ y que $\theta_a = 0$, $\theta_b = -\frac{2}{3}$ y $\theta_c = \frac{2}{3}$, además en este trabajo de tesis requerimos que la potencia reactiva Q sea casi cero o cero, así que podemos decir que $jI_Q \approx 0$ y se tendrá solo la corriente de la potencia activa I_p o en este caso la potencia activa P .

Finalmente, la ecuación (3.46) se aplicará en Simulink de MATLAB siendo así un modelo que no contiene dinámicas es decir un modelo de red, y esta ecuación también permite expresar la



variable m_{abc} en el sistema detallado, el cual contiene a la moduladora del control y a su vez esta contiene dinámicas.

$$m_{abc} \angle \theta_t = 2 * \frac{V_G^2 \angle \theta_G^{abc} - \left(\sqrt{(R_{abc})^2 + (jX_L)^2} \angle \tan^{-1} \left(\frac{X_L}{R_{abc}} \right) \right) (P+jQ)}{V_{CD} * V_G \angle \theta_G^{abc}} \quad (3.46)$$

3.3.5 Control de voltaje CD

El primer proceso a realizar en un esquema de control de lazo cerrado consiste en la caracterización de la planta a controlar considerando sus curvas de operación e identificarla como un elemento lineal o no lineal, si el elemento es lineal es posible proponer una regla de control adjunto a un controlador, el cual esta retroalimentado por una variable de error a partir de un valor de referencia, y el valor instantáneo de la variable a controlar de la planta.

En este caso, el objetivo de aplicar un esquema de control de lazo cerrado en el sistema de generación por corrientes marinas es mantener la óptima transferencia de potencia activa a la red eléctrica ante las distintas perturbaciones de la variabilidad de la corriente marina y la variación en el punto de interconexión.

Específicamente se busca controlar y monitorear el voltaje V_{CD} , así mismo se tendrá a partir de un “set point” que es V_{CDref} . La diferencia entre el V_{CDref} y V_{CD} se le considera la función de la desviación o el error con respecto al valor deseado, se desea que el valor del error sea cero o lo más cercano a cero para que el voltaje siempre este en el valor de referencia que se espera. El error se le aplicará al controlador para posteriormente generar las variables de modulación.

En este trabajo de tesis se implementa un controlador proporcional e integral (PI) y se encargará de procesar el error, es decir, de comparar el valor de V_{CD} con el valor de V_{CDref} . De (3.24), (3.37) y de (3.40) se puede obtener (3.47) y posteriormente se puede obtener la variable de modulación en términos de la corriente de red (3.48).

$$I_G \angle \theta_G^{abc} = \frac{V_G \angle \theta_G^{abc} - \frac{1}{2} * V_{CD} * m_{abc}}{\sqrt{(R_{abc})^2 + (jX_L)^2} \angle \tan^{-1} \left(\frac{X_L}{R_{abc}} \right)} \quad (3.47)$$

$$m_{abc} \angle \theta_t = 2 * \frac{V_G \angle \theta_G^{abc} - \left(\sqrt{(R_{abc})^2 + (jX_L)^2} \angle \tan^{-1} \left(\frac{X_L}{R_{abc}} \right) \right) (I_G \angle \theta_G^{abc})}{V_{CD}} \quad (3.48)$$



Observamos que $VZ \angle \theta_Z^{abc}$ tiene una composición de 90° respecto al voltaje de la red eléctrica $V_G \angle \theta_G^{abc}$, entonces podemos decir que $V_G \angle \theta_G^{abc}$ es una variable cosenoidal ya que se encuentra sobre el eje de los reales, es decir, están desfasados uno del otro, por lo tanto, se obtiene (3.49).

$$-|VZ| * \sin(\omega t) = |V_G| * \cos(\omega t) - \frac{1}{2} * V_{CD} * m_{abc} \quad (3.49)$$

Para la regla de control es indispensable utilizar la variable de modulación para mantener un $FP = 1$ y solo la magnitud de $|VZ|$, ya que cualquier desviación en el ángulo procede a variaciones en VZ , lo cual deriva en errores en el factor de potencia.

La regla de control del sistema se obtiene a partir de (3.48), la magnitud y ángulo de m_{abc} y la magnitud de VZ permitirán que V_{CD} sea una tensión estable y cercana al valor de referencia y asegurando tener Q en cero o muy cercana a cero.

Para la regla de control VZ será la variable manipulada, y se tomaran en cuenta las siguientes consideraciones: 1) $V_{CD} \approx V_{CDref}$, 2) $VZ \approx |VZ'|$, en la figura 3.15 se observa como la potencia activa depende del incremento de VZ .

En la regla de control VZ' será definida como el resultado del compensador PI, donde kp y ki son las ganancias proporcionales e integrales, y se define en (3.50).

$$VZ' = (V_{CDref} - V_{CD}) \left[kp \frac{(s + \frac{ki}{kp})}{s} \right] \quad (3.50)$$

La ecuación (3.50) se va a implementar en (3.48) y se obtiene (3.51) que define la regla de control.

$$m_{abc} \angle \theta_t = 2 * \frac{V_G \angle \theta_G^{abc} - (V_{CDref} - V_{CD}) \left[kp \frac{(s + \frac{ki}{kp})}{s} \right] * \cos \left(\angle \theta_G^{abc} + \tan^{-1} \left(\frac{X_L}{R_{abc}} \right) \right)}{V_{CDref}} \quad (3.51)$$

La figura 3.19 especifica el diagrama de bloques empleado para la ley de control para m_{abc} de un VSC , se muestra cómo se controla a VZ_{abc} y la comparación entre V_{CDref} y V_{CD} , obteniendo el error para el lazo de voltaje.

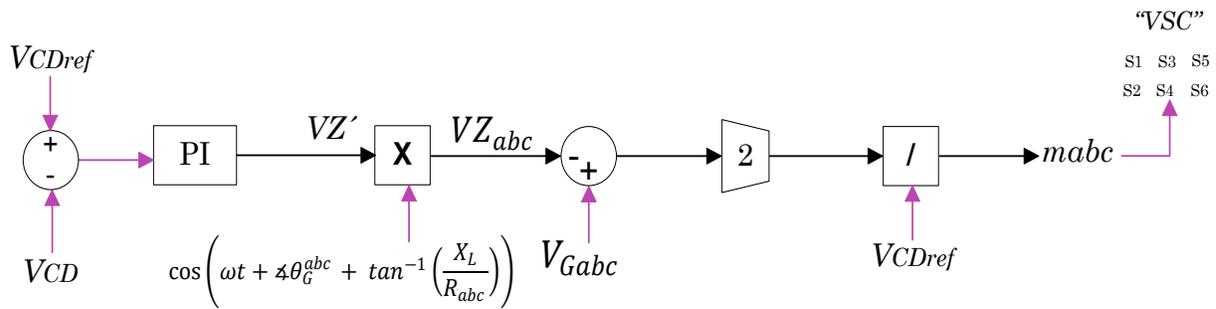


Figura 3.19. Diagrama a bloques de la ley de control de voltaje.

3.4 Interconexión a la red

La sincronización con las respectivas fases de la red se logra a través de los datos que obtiene el lazo de seguimiento de fase o *PLL* (Phase Locked Loop) y así monitorear el estado de la red eléctrica. Cada una de las fases del sistema (V_{Gabc}) y VZ' está en sincronía gracias a la utilización del *PLL*. En la figura 3.20, se observa un diagrama a bloques para la sincronización angular de la variable VZ' con las fases del sistema V_{Gabc} .

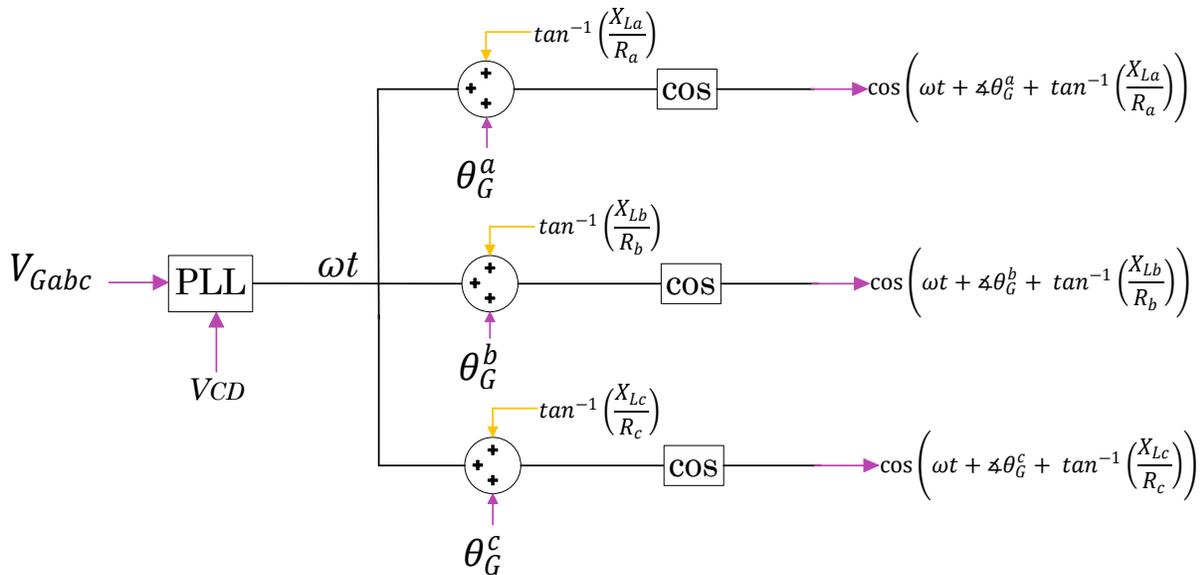


Figura 3.20. Diagrama a bloques para la sincronización con las respectivas fases en la red eléctrica.

El dispositivo *PLL* nos ayudara a medir la frecuencia (60 Hz) del sistema y la fase, pero la fase la manifiesta con una señal de diente de sierra y esto quiere decir que es una señal que empieza en 0 y va variando su valor cada que va cambiando la fase o va pasando el tiempo hasta llegar a 2π , es decir tendrá el mismo periodo de una señal cosenoidal.



La finalidad de realizar esto, es sincronizar el VSC con la red eléctrica y se encargue de inyectar potencia activa, es así como funcionan las energías renovables, de manera simplificada toman energía de *CD* y esa energía se transforma a energía *CA*, con la finalidad de conectarse a la red.

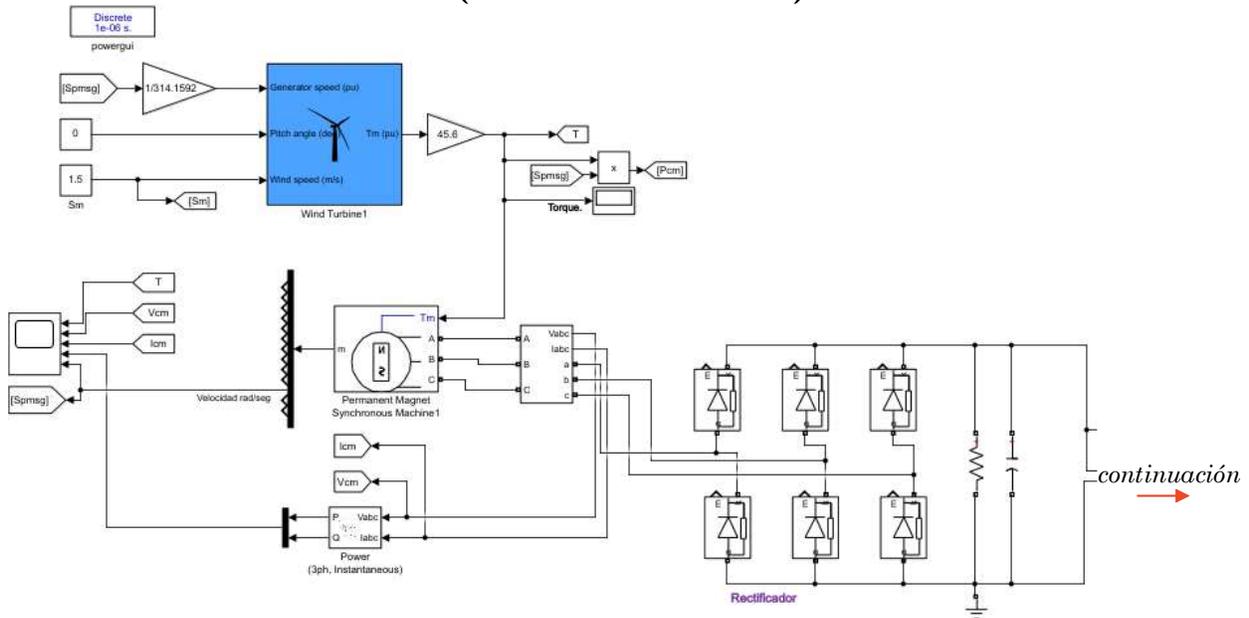
3.4.1 Operación en estado estable

Los parámetros nominales de operación se pueden observar en la Tabla 3.2, mostrando los valores de cada una de las etapas que conforman al sistema detallado, así mismo en la figura 3.21 se muestra a el sistema detallado implementado y simulado en Simulink de MATLAB.

Tabla 3.2. Principales variables nominales de interés del sistema detallado.

Turbina.	Potencia mecánica nominal:	1.5×10^6 [W]
	S_M :	$1.5 \left[\frac{m}{s} \right]$
	β :	0°
Máquina síncrona PMSG.	T :	-45.6 [Nm]
	S_{PMSG} :	315.1592 [rad/s]
	P_{CM} :	$14,37125$ [kW]
Convertidor PFC Boost Rectificador	$V_{CD'}$:	200 [V]
	V_o :	750 [V]
	f_c :	5000 [Hz]
	R_p :	0.1 [Ω]
	I_o :	19.167 [A]
	L :	205.6659562 [H]
	%D	$0.73 = 73\%$
	$C_1 = C_2$:	1000×10^{-6} [F]
	$R_1 = R_2$:	2000 [Ω]
Convertidor VSC Inversor y red eléctrica.	$V_{CD_{ref}}$:	750 [V]
	V_{Gabc} :	300 [V]
	kp :	0.1
	ki :	10
	f :	60 [Hz]
	L_{ci} :	1×10^{-3} [H]

Sistema por corrientes marinas experimental (Modelo detallado).



MPPT Polinomio del ciclo del servicio o boost Ciclo de servicio

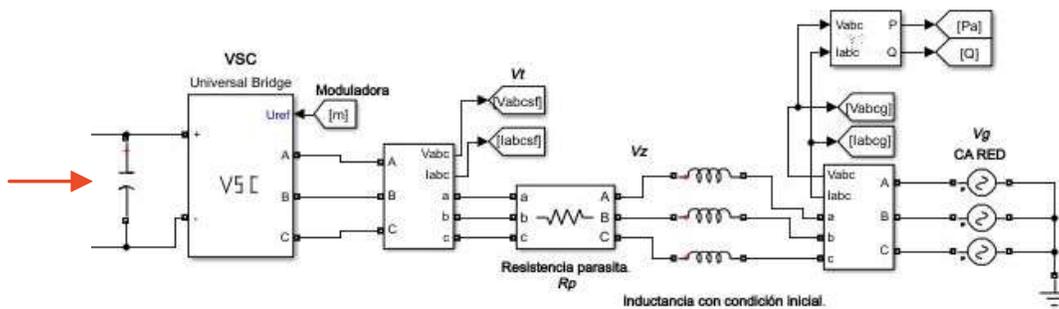
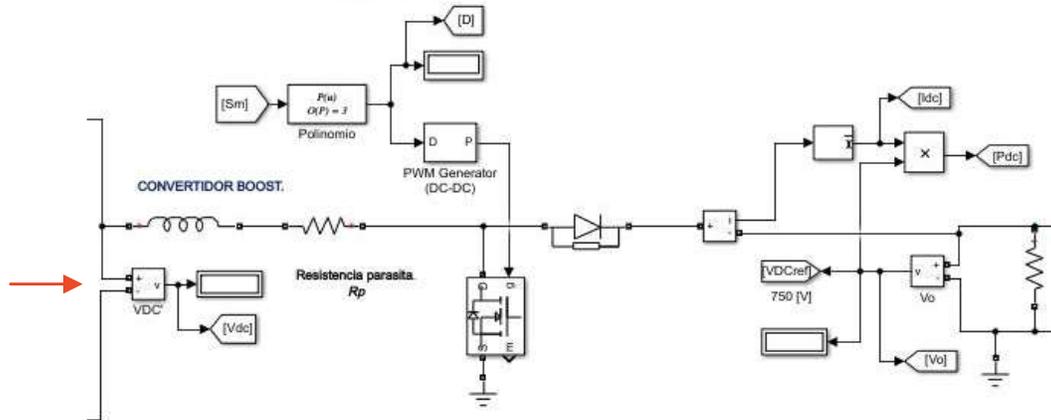


Figura 3.21. Simulación del sistema detallado experimental implementado en Simulink de MATLAB.

En la figura 3.22 se muestra el control de voltaje CD implementado en el sistema detallado utilizando la herramienta de Simulink de MATLAB, y en la figura 3.23 se observa cómo se implementó la medición de la magnitud y fase de la variable de modulación con el valor promedio en $S_M = 1.5 \left[\frac{m}{s} \right]$.

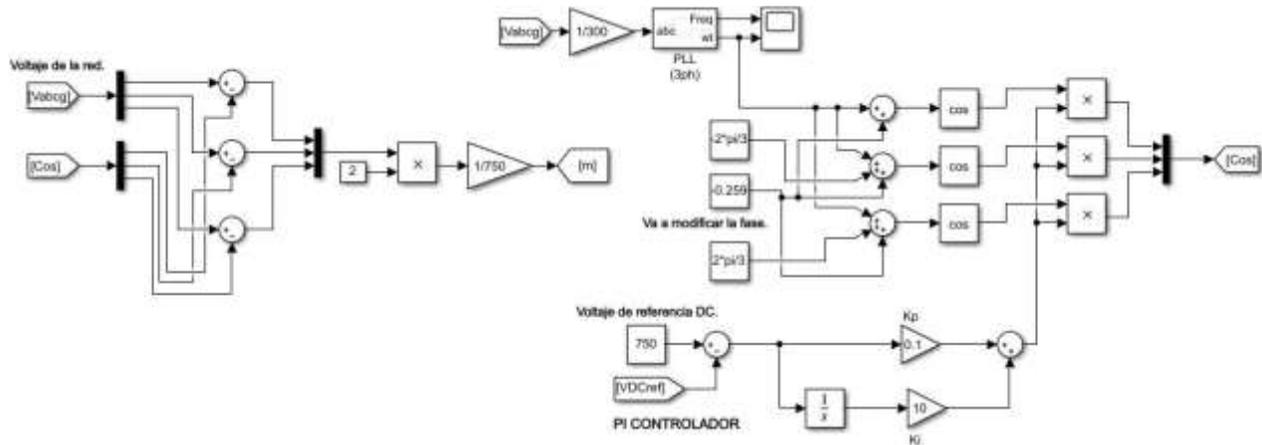


Figura 3.22. Simulación del control de voltaje CD implementado en el sistema detallado.

MEDICIÓN DE LA VARIABLE DE MODULACIÓN DEL SISTEMA DETALLADO.

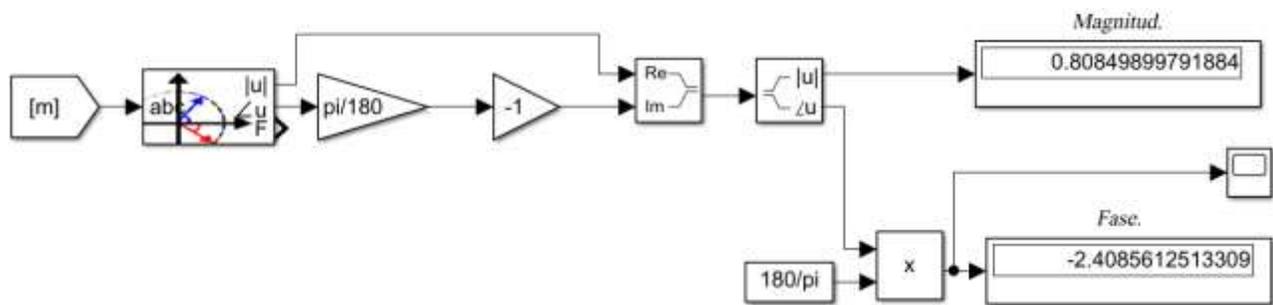


Figura 3.23. Simulación de la variable de modulación del sistema detallado con $S_M = 1.5 \left[\frac{m}{s} \right]$.

Una vez conociendo los parámetros nominales que conforman al sistema detallado se puede realizar la operación en estado estable la cual nos dará información vital del funcionamiento del modelo detallado por corrientes marinas, las siguientes figuras de este apartado hacen referencia a una entrada S_M de $1.5 \left[\frac{m}{s} \right]$ siendo la velocidad promedio.

En la figura 3.24 se muestra la corriente y el voltaje en el lado de CA correspondiente a la fase a, sin olvidar que es un sistema trifásico. Se puede apreciar un claro desfase de 180° , y este comportamiento se ve presente en las fases b y c.

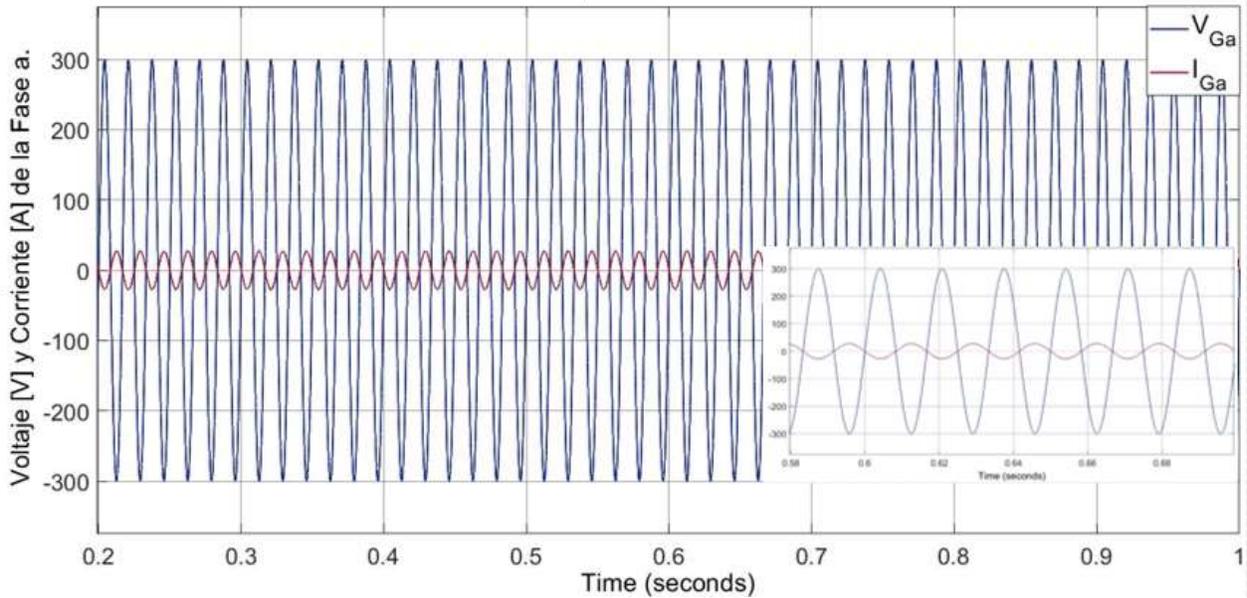


Figura 3.24. Corriente I_{Ga} y V_{Ga} en las terminales de CA en operación en estado estable.

Se observa en la figura 3.25 la inyección de la potencia activa “P” hacia la red eléctrica con un valor de 12,360 [W] y de la misma manera se observa en la figura 3.26 el intercambio de potencia reactiva “Q” entre el VSC y la red eléctrica, teniendo un valor de 0.08365 [VAr], es decir, aproximadamente cero. Concluyendo que, el VSC opera con un factor de potencia casi unitario.

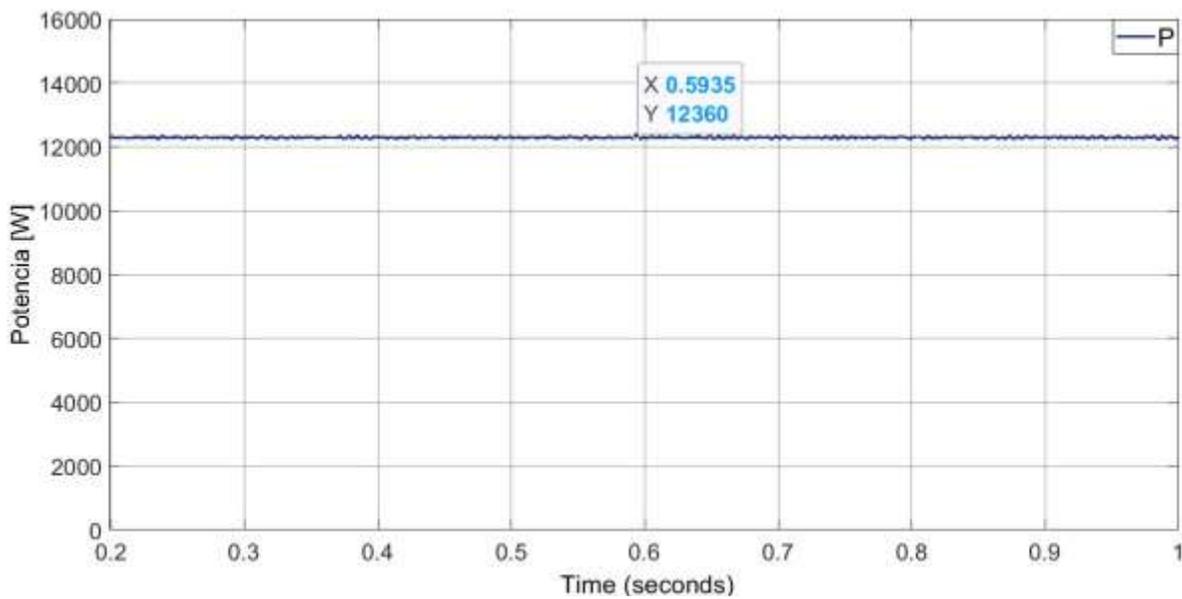


Figura 3.25. Potencia activa P en las terminales de CA en operación en estado estable.

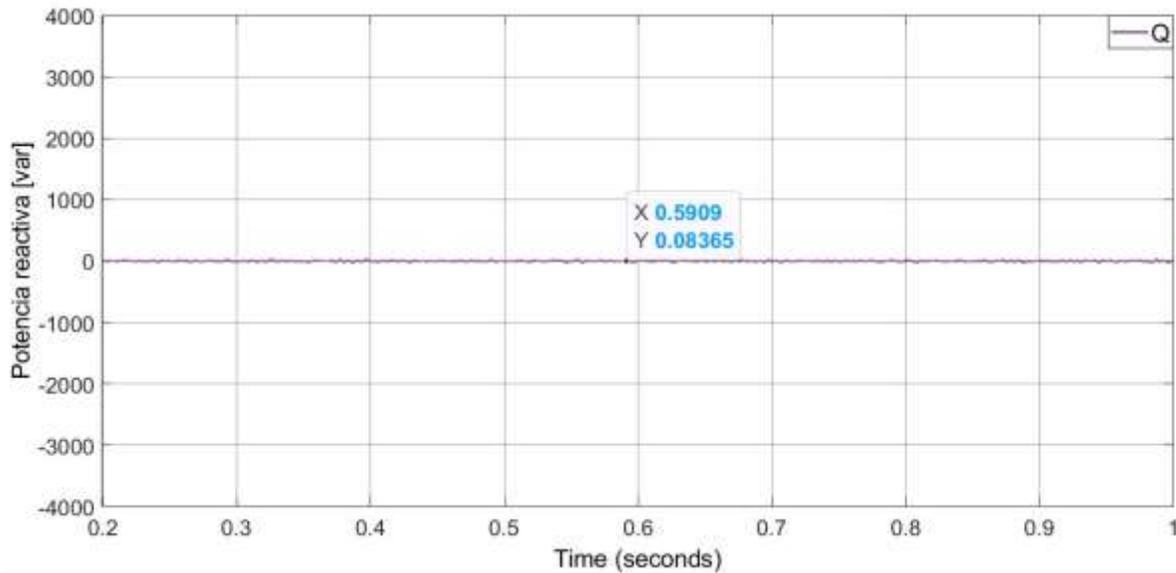


Figura 3.26. Potencia reactiva Q en las terminales de CA en operación en estado estable.

3.4.2 Excitación tipo escalón

En este apartado se aplica una excitación tipo escalón al modelo detallado. En primera instancia, se simula el comportamiento individual de cada una de las etapas que lo conforman como son la turbina marina, el generador marino o la máquina síncrona *PMSG*, el convertidor PFC boost rectificador y el convertidor *VSC* inversor. Con el objetivo de observar el funcionamiento del modelo detallado y los controles propuestos.

Se comienza con una velocidad de corriente marina de 1.3 [m/s] en $t=0.2$ [s], posteriormente en $t=0.5$ [s] se tendrá una velocidad de 1.5 [m/s] y finalmente en $t=0.8$ [s] se tiene una velocidad de 1.7 [m/s].

a) Turbina marina.

En las figuras 3.27 y 3.28 se observa los cambios en la velocidad de la corriente marina y en la velocidad de la máquina síncrona de imanes permanentes, debido al cambio en el ciclo de servicio ocasionado por la operación del *MPPT*. La variable de la velocidad se mantuvo en monitoreo para estar preferentemente en los $315.1592 \left[\frac{rad}{s} \right]$ y así no tener una aceleración en la máquina.

Cuando se implementa un punto óptimo de ciclo de servicio para extraer la máxima potencia, da como resultado que la máquina no se acelera o se frenara ante estos cambios, es decir, el voltaje inducido dependerá de la velocidad de la máquina síncrona.

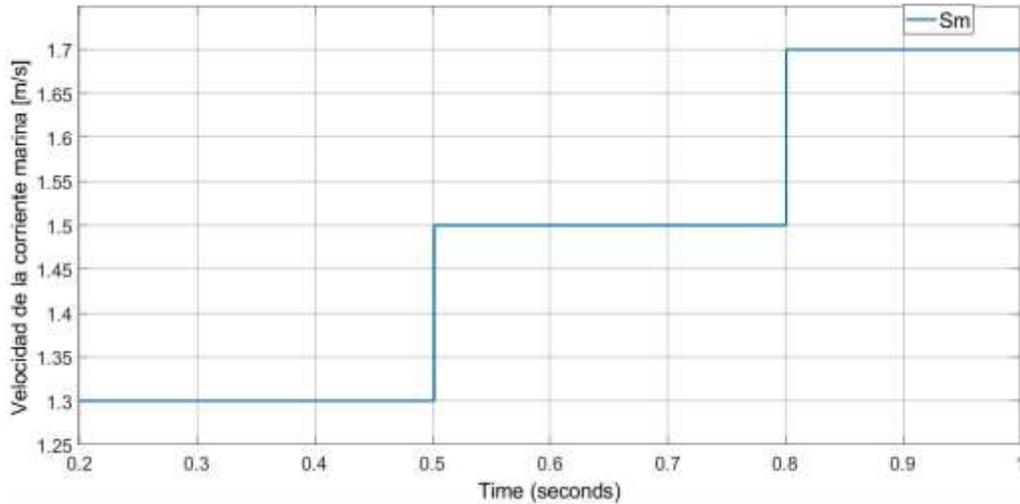


Figura 3.27. Comportamiento de la velocidad de la corriente marina S_M con una excitación tipo escalón.

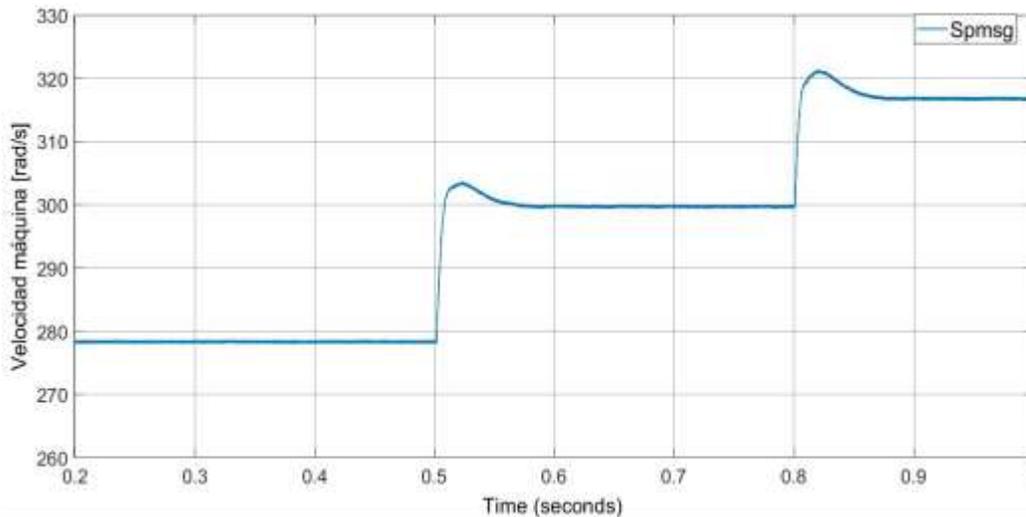


Figura 3.28. Comportamiento de la velocidad de la máquina síncrona S_{PMSG} con una excitación tipo escalón.

Teniendo como conclusión que la máquina síncrona tiene límites en cuanto a su giro y por lo tanto en las figuras 3.27 y 3.28 se observa que la máquina no tiene cambios bruscos en cuanto a S_{PMSG} y S_M , ya que, si la máquina nos indicará un giro mucho más rápido o una velocidad al doble o al triple de su velocidad nominal, la máquina estaría en riesgo de quemarse.

En el caso del torque (figura 3.29) o par eléctrico se observa como este se ejerce sobre la máquina para poder crear la potencia requerida y gracias a la operación del control *MPPT*, la turbina genera un punto máximo de torque al igual que un punto de máxima potencia al tener cambios en la velocidad de corriente marina. Si fuera el caso de no tener el control *MPPT*, la turbo-maquina podría a empezar a caer en puntos muy bajos, en consecuencia, se obtiene torque y velocidad entre otras variables intrínsecas a niveles inferiores de los esperados.

Teniendo un torque a niveles considerables ante cambios en S_M se mantiene la potencia mecánica en niveles estables, ya que la velocidad por el torque nos refleja a P_{CM} .

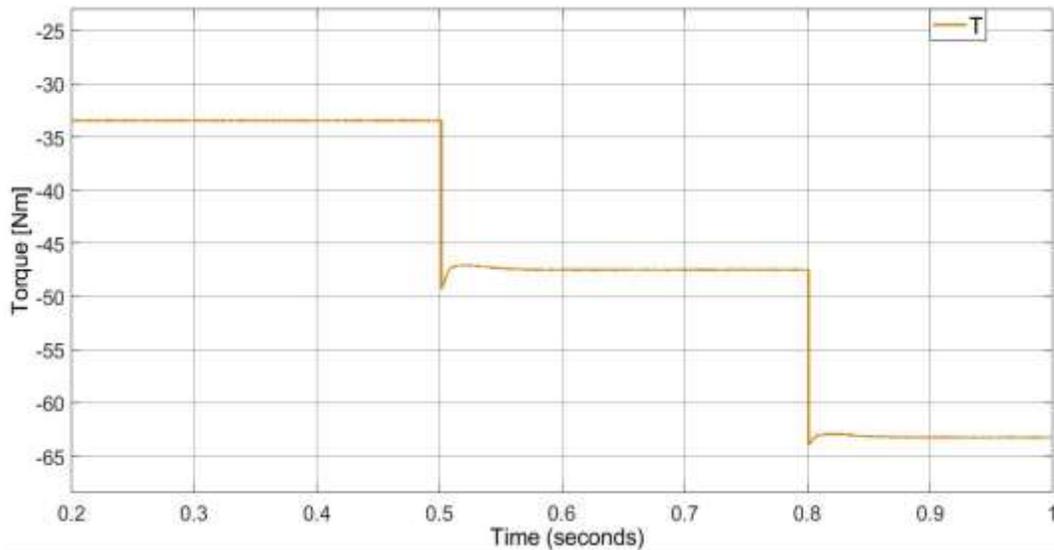


Figura 3.29. Comportamiento del torque T con una excitación tipo escalón.

b) Generador marino (Máquina Síncrona PMSG).

En la figura 3.30 ilustra las señales trifásicas de voltaje y la figura 3.31 representa la corriente a la entrada del convertidor boost. Estas señales como se observa tienen mucho ruido y no son tipo senoidales. El voltaje V_{CM} y la corriente I_{CM} trifásicos dependerán de la potencia mecánica que se le esté inyectando, analizando estas figuras podemos deducir que hasta este punto la frecuencia será dependiente de igual manera de la potencia mecánica de entrada y así mismo presentara variaciones.

Hasta este punto de análisis, se observa que la energía eléctrica que se produce a la salida del generador síncrono *PMSG* no se puede inyectar a la red ya que es demasiado variable y no cuenta con ningún estándar. Visto ya estos detalles en las figuras presentadas con anterioridad se puede concluir que es necesario utilizar los convertidores de electrónica de potencia para proporcionar la conversión de la energía.

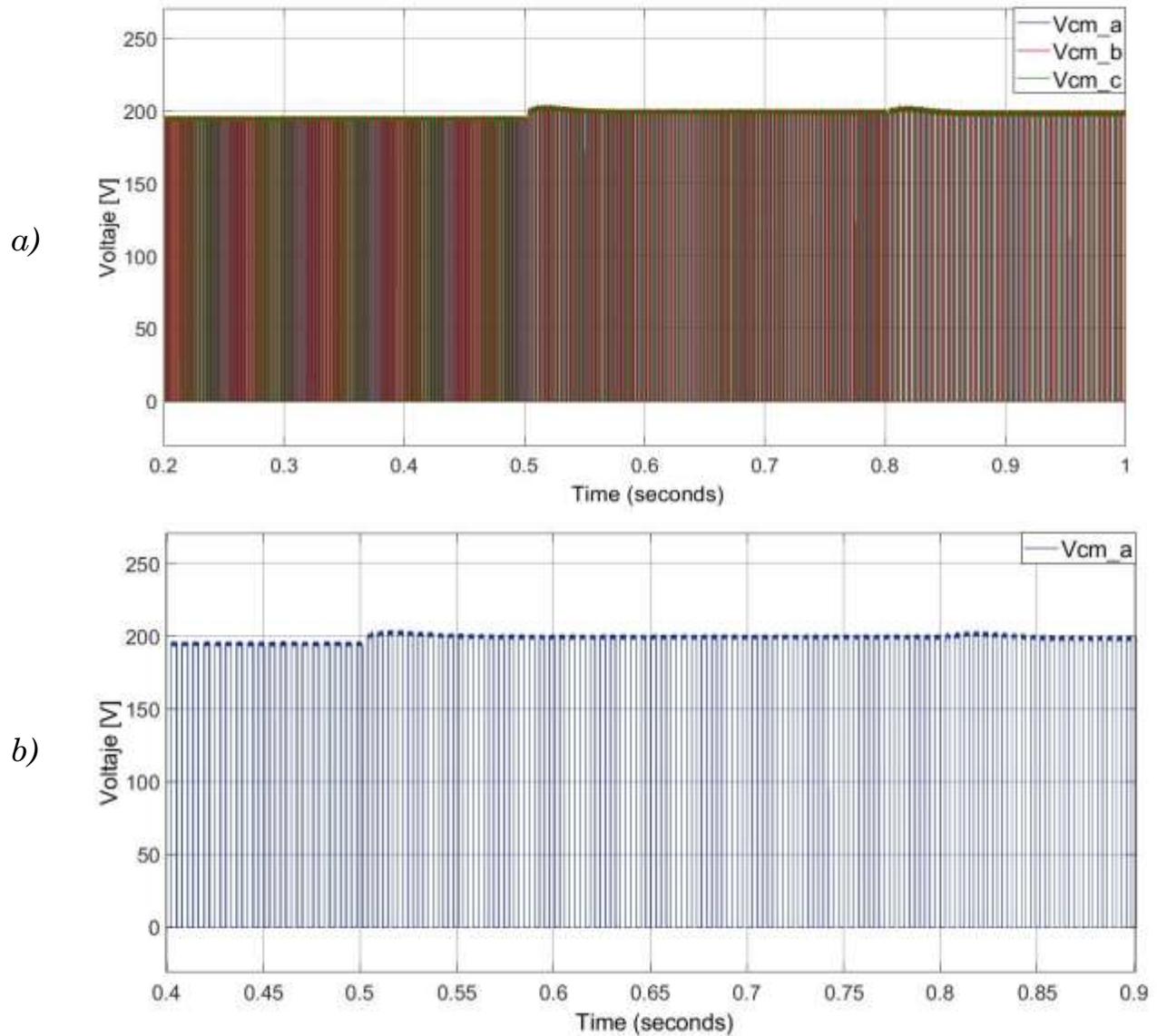


Figura 3.30. a) Comportamiento del voltaje trifásico V_{CM} , b) V_{CM_a} de la fase a, con una excitación tipo escalón.

Las figuras de voltaje V_{CM} y la corriente I_{CM} son trifásicas y se muestran en 3.-30a y en 3.31-a en un tiempo de simulación de 0.2 [s] a 1 [s]. Con fines para que el lector observe las señales con un mejor enfoque, se realiza un acercamiento a estas mismas figuras en un tiempo de 0.4 [s] a 0.9 [s], mostrando solamente la señal de la fase “a” sin olvidar que el sistema es trifásico.

Cuando se observa más de cerca el voltaje y la corriente de la fase “a”, ninguna de las dos señales es completamente senoidal, esto porque hasta este punto del proyecto no se ha realizado el control de rectificador, es por ello que tenemos señales con distorsión armónica.

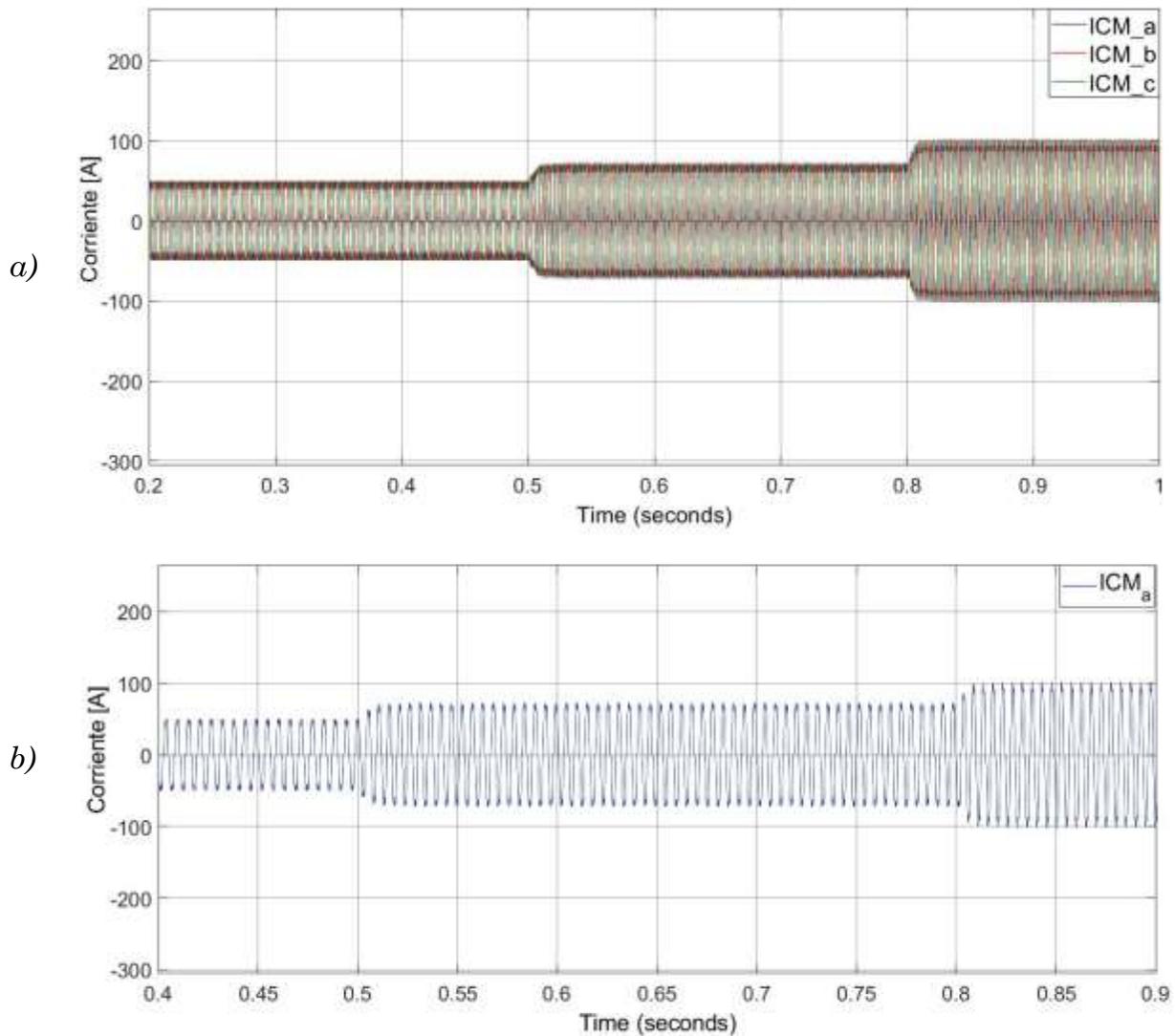


Figura 3.31. a) Comportamiento de la corriente I_{CM} , b) I_{CM_a} de la fase a, con una excitación tipo escalón.

Se puede observar en la figura 3.32-a la representación de la potencia activa y en la figura 3.32-b a la potencia reactiva a la salida del generador síncrono. Se puede percibir una generación de potencia reactiva, es decir, potencia consumida por el generador de imanes permanentes que se nutre para crear un campo electromagnético.

La potencia activa a la salida del generador síncrono, aunque esta sea una potencia útil no se podrá aprovechar en este punto, pues es necesaria la ayuda de la electrónica de potencia para poder inyectarla a la red eléctrica. Así mismo, es necesario señalar que la forma de onda de la potencia activa a la salida del generador de imanes permanentes no es del todo senoidal, gracias a las inercias propias del generador síncrono.

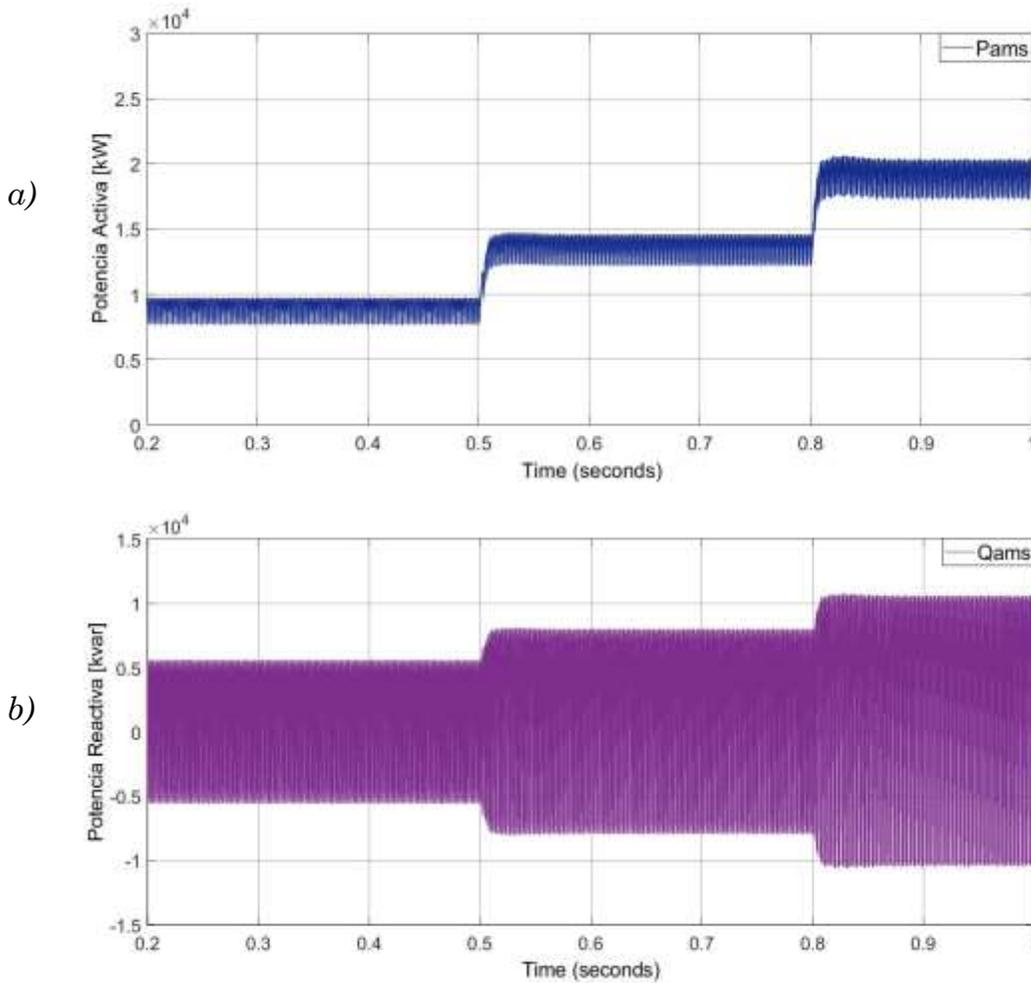


Figura 3.32. a) Comportamiento de la potencia activa P_{Ams} , b) reactiva Q_{Ams} a la salida de la máquina síncrona de imanes permanentes con una excitación tipo escalón.

c) Convertidor PFC Boost Rectificador.

En el C_{Boost} se pueden obtener un análisis de las tensiones de entrada " V_{CD} " y de salida " V_o ", así como de la corriente " I_o " y de la potencia a la entrada " P_{CM} " y a su salida " P_{CD} ". Con una excitación tipo escalón se obtienen las figuras 3.33, 3.34 y 3.35 con el fin de evaluar el funcionamiento y desempeño ante este tipo de excitación tanto al convertidor como al algoritmo *MPPT* implementado.

En la figura 3.33 observaremos cómo se comporta el control *MPPT* ante variaciones en la S_M . Esta prueba se caracteriza por contar con una corriente marina constante en un inicio y presentar cambios bruscos en ella en diferentes tiempos, llegando a la conclusión que el régimen en estado estable se presenta ante esos cambios.

Con el perfil de la corriente marina bajo el cual se simula la operación del C_{Boost} y el comportamiento del control $MPPT$, se concluye que trabaja automáticamente y ajusta de esta manera al C_{Boost} ante las variaciones por la corriente mariana.

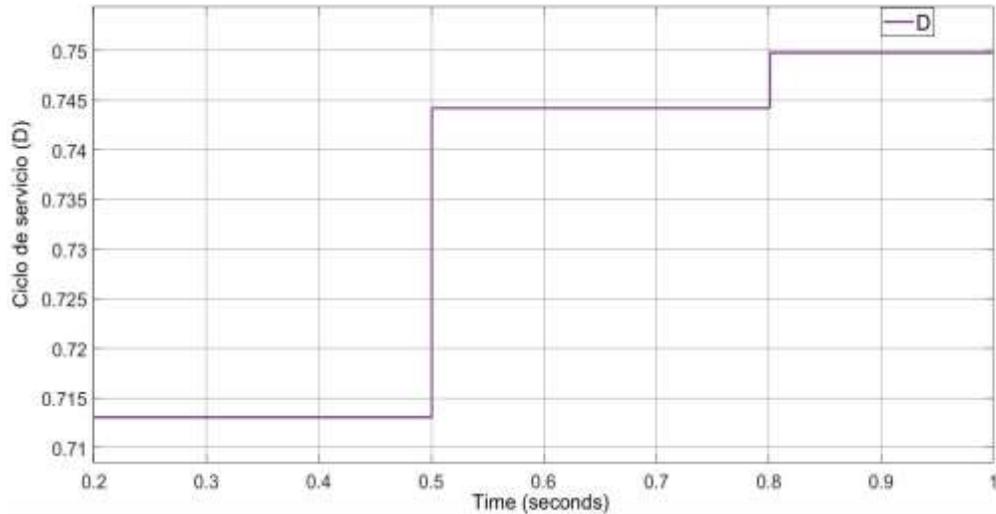


Figura 3.33. Comportamiento del control $MPPT$ con una excitación tipo escalón.

En la figura 3.34 se muestra la tensión V_{CD} a la entrada del convertidor, que corresponde al voltaje a la salida del rectificador, se aprecia que se mantiene prácticamente constante en un valor de 200 [V] junto con la tensión V_o a la salida del C_{Boost} en 750 [V]. Teniendo en cuenta que existe un cambio en el ciclo de servicio ocasionado por la variación en la corriente marina en los diferentes instantes de tiempo; las tensiones regresan al estado estable gracias al control implementado.

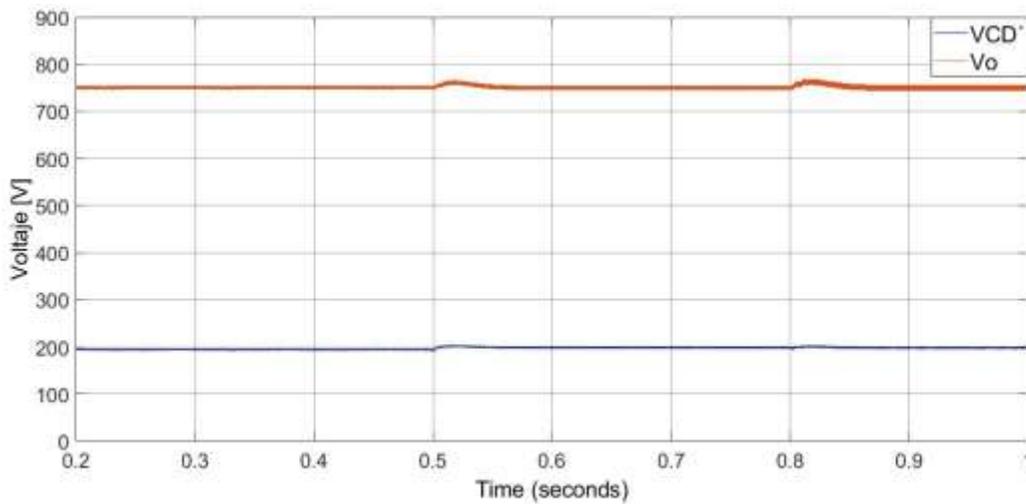


Figura 3.34. Voltaje de entrada y de salida del convertidor boost con una excitación tipo escalón.

Se compara la potencia que produce la corriente marina y la potencia entregada por el convertidor Boost. Los resultados se hacen notar en la figura 3.35 indicando que, a pesar de los cambios bruscos en la velocidad de corriente marina y de tener la existencia de una resistencia parásita en el convertidor Boost, el control *MPPT* realiza una adecuada extracción en el punto de máxima potencia.

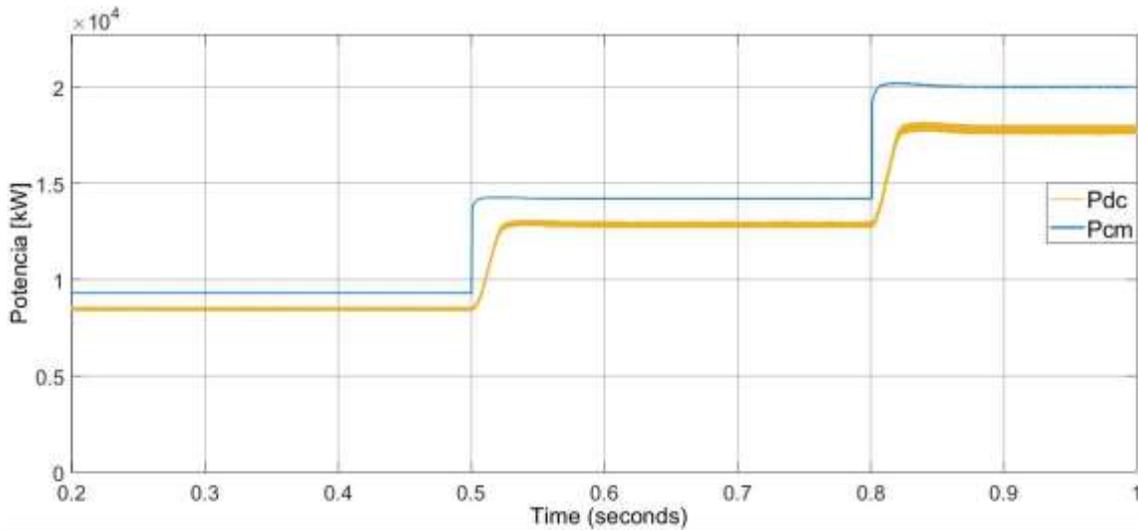


Figura 3.35. Potencia mecánica P_{CM} a la entrada del convertidor y potencia de corriente directa P_{CD} a la salida del convertidor boost con una excitación tipo escalón.

En la figura 3.35 se verifica que en su mayoría la potencia mecánica se transfiere a potencia CD aun con los diferentes cambios en la velocidad de la corriente marina. Así mismo en la figura 3.36 se muestra la corriente de salida en el convertidor.

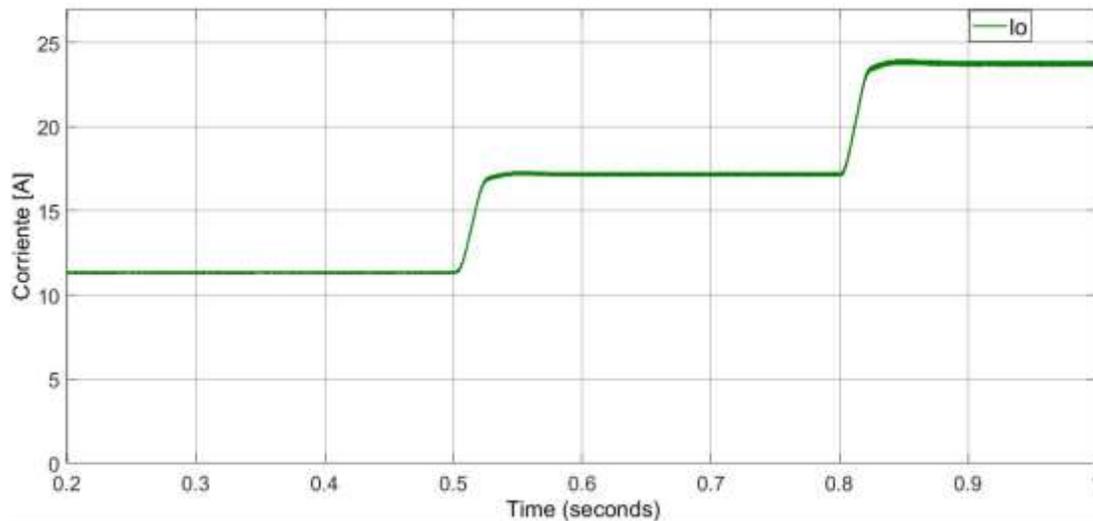


Figura 3.36. Corriente a la salida del convertidor boost I_o con una excitación tipo escalón.

d) Convertidor VSC Inversor.

En esta sección se observa el comportamiento de un *VSC* y su control propuesto en una excitación tipo escalón. El valor de la resistencia a la entrada del inversor se obtiene mediante una serie de iteraciones para alcanzar el valor deseado en el voltaje de entrada al *VSC*.

En la figura 3.37 se muestra el voltaje de entrada en el *VSC*, V_o que es así mismo el voltaje a la salida del C_{Boost} . Se puede apreciar que se alcanza el valor de referencia de 750 [V] ante cambios en la velocidad de la corriente marina, volviendo a un estado estable en segundos. La amplitud pico a pico o el rizado de voltaje V_o es de aproximadamente 3.5 [V].

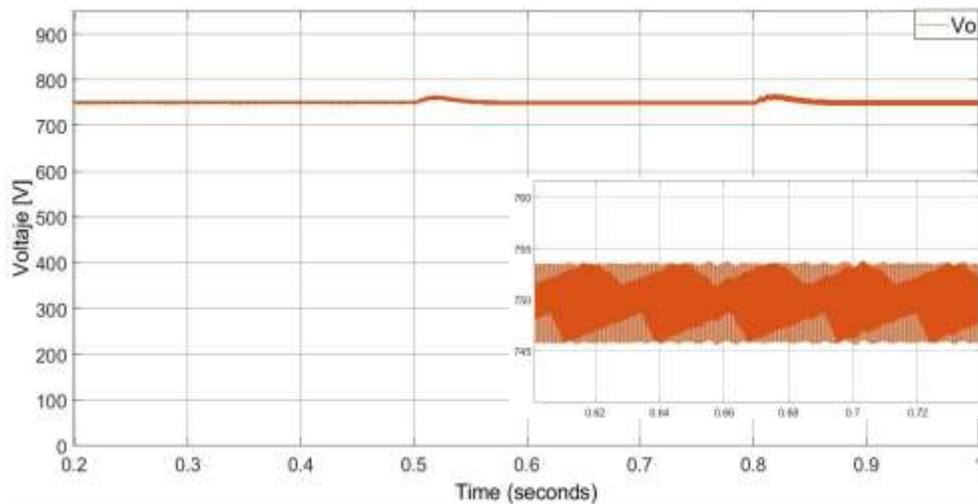


Figura 3.37. a) Voltaje de entrada V_o al *VSC*.

Del lado de la red eléctrica en la figura 3.38 se puede observar que el valor de la frecuencia eléctrica es de 60 [Hz] presentando un escenario en estado estable.

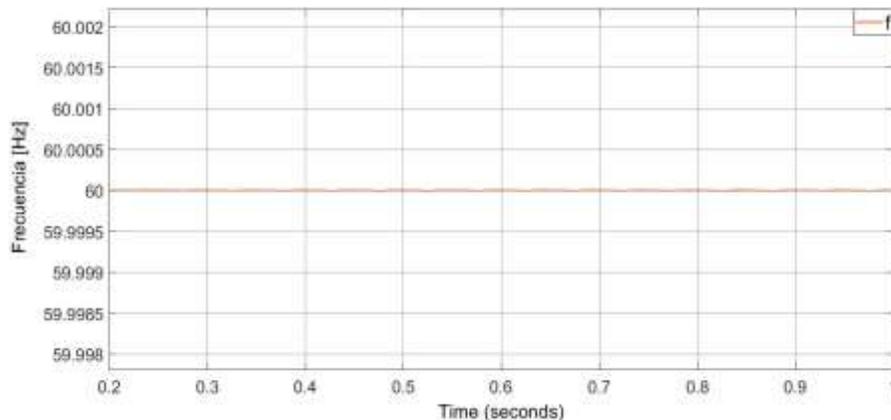


Figura 3.38. Frecuencia f en las terminales de CA.

En la figura 3.39-a se puede observar la magnitud trifásica, en 3.39-b a la magnitud de la fase “a” para un mejor enfoque, y en la figura 3.40 se aprecia a el ángulo de la variable de modulación. Hasta este punto tendremos el valor de la magnitud y el ángulo de m_{abc} que va a variar por los cambios en la velocidad de la corriente marina “ S_M ” en el modelo detallado. En la Tabla 3.3 se muestra los valores de la variable de modulación.

Tabla 3.3. Valores de la variable de modulación en el modelo detallado.

S_M	Magnitud	Ángulo
1.3 [m/s]	0.8050	-1.5177
1.5 [m/s]	0.8085	-2.4085
1.7 [m/s]	0.8124	-3.3269

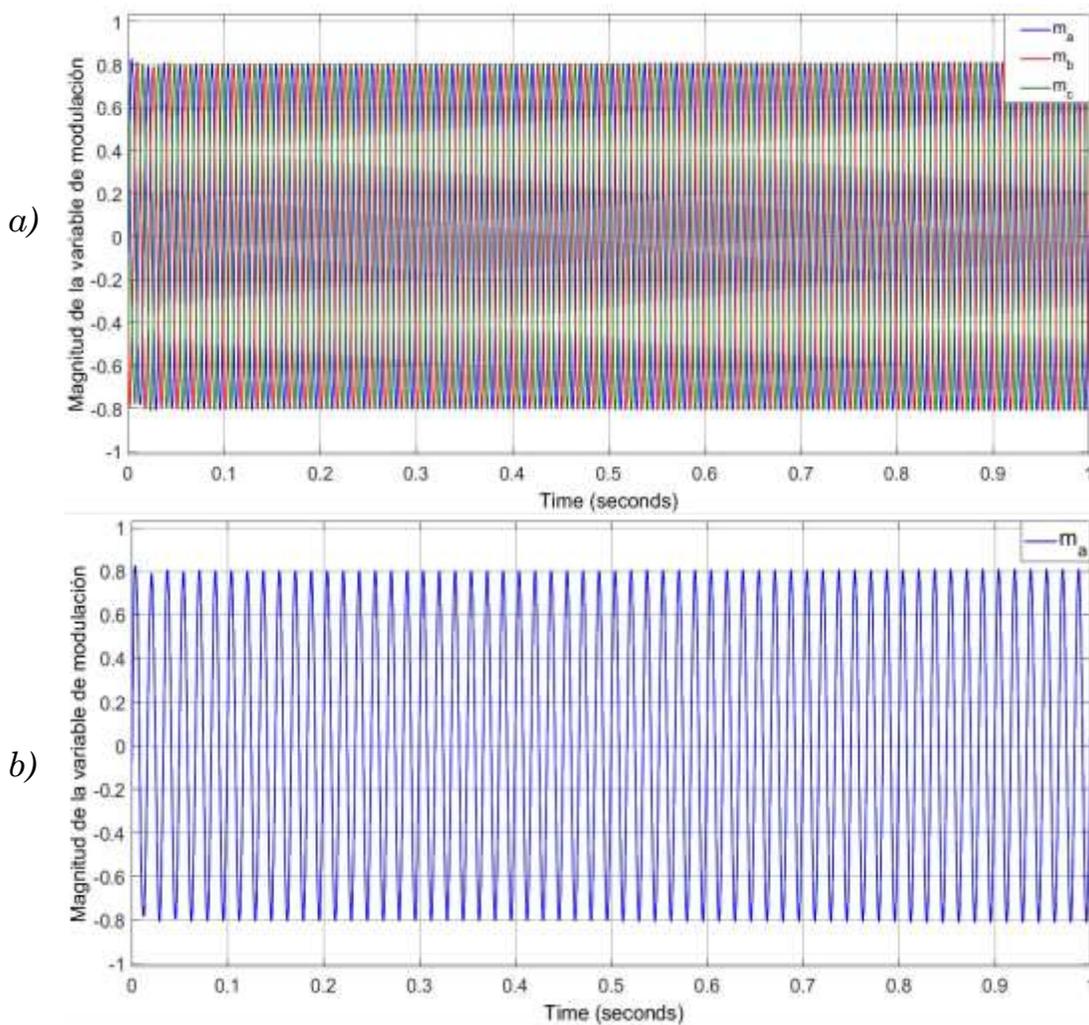


Figura 3.39. a) Magnitud de la variable de modulación m_{abc} , b) Magnitud de m_a de la fase a, con una excitación tipo escalón.

Posteriormente, se hará una comparación de la variable de modulación en el modelo detallado con su modelo de red polinomial, recordando que la variable de modulación tiene un desfase muy ligero, es decir, no será incorrecto si hay un poco de variación en esa comparación.

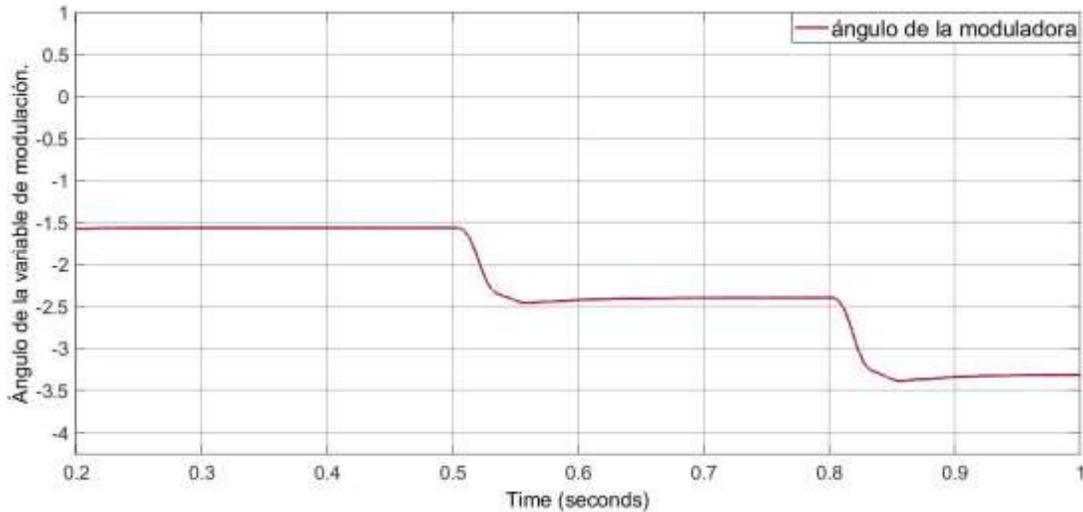
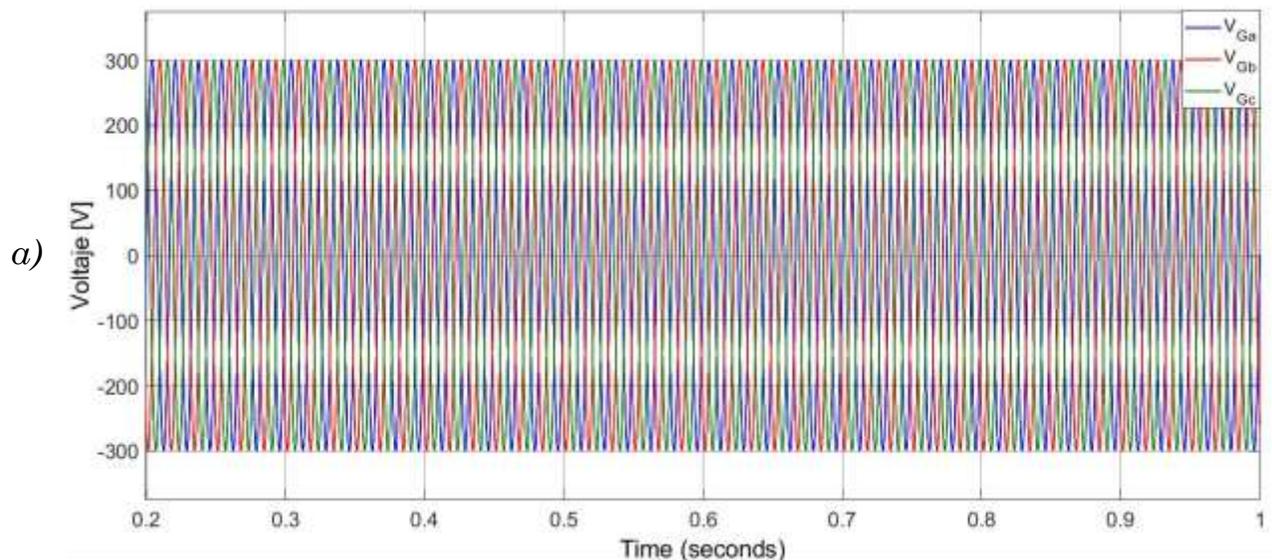


Figura 3.40. Ángulo de la variable de modulación.

En el lado de *CA* se observa en la figura 3.41-a, a el voltaje trifásico V_{Gabc} teniendo una magnitud constante de 300 [V] por otra parte el convertidor *VSC* ayuda a V_{Gabc} tener una continua regulación y voltaje en el puerto de *CD*, es decir, va a ejecutar una acción de extracción de la energía que excede en el elemento capacitor, con la finalidad de mantener un voltaje constante en este y esta energía será inyectada a la red eléctrica. En la figura 3.41-b, se muestra el voltaje de V_{Ga} de la fase “a” para una mejor apreciación, sin olvidar que el voltaje de la red es trifásico.



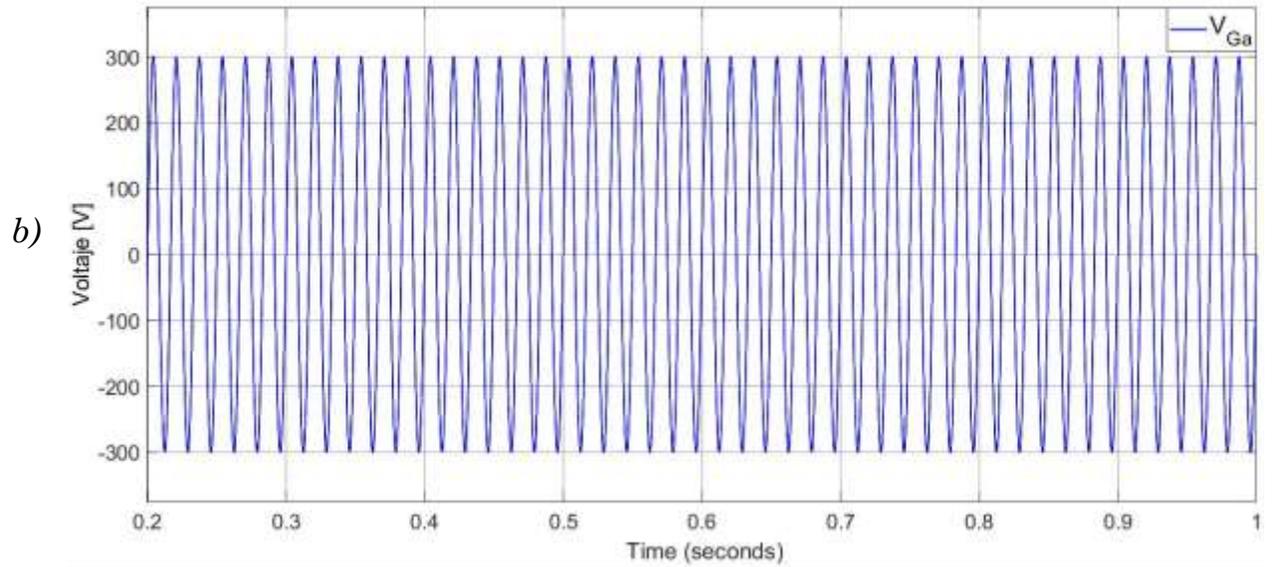
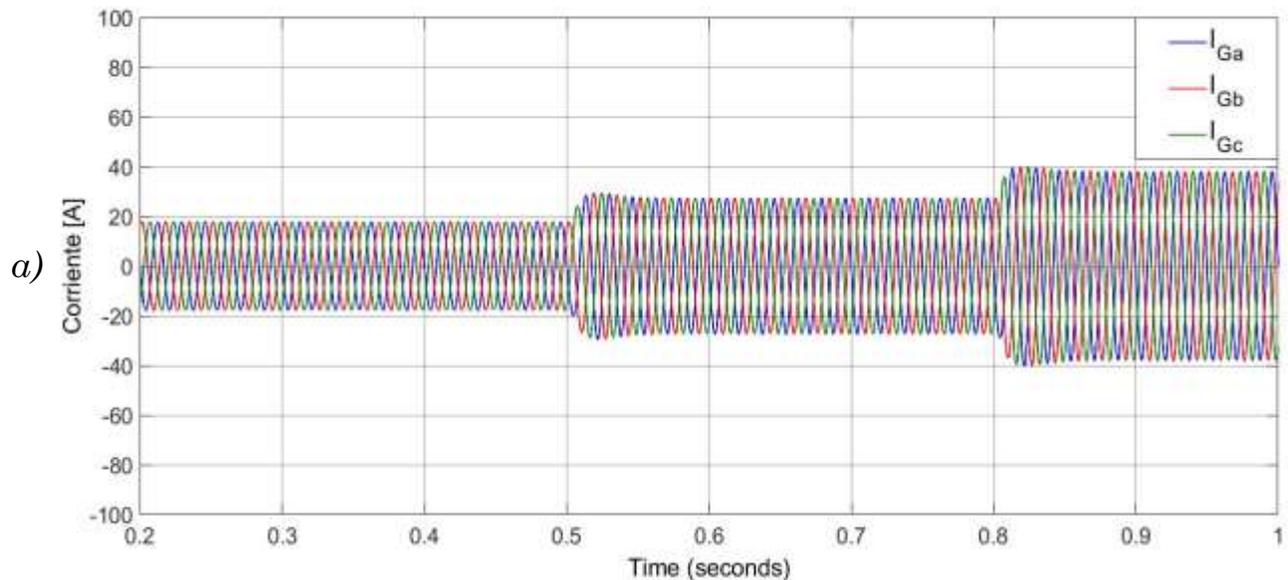


Figura 3.41. Voltaje trifásico de la red V_{Gabc} en las terminales de CA, b) V_{Ga} de la fase a, con una excitación tipo escalón.

En la figura 3.42 se muestra de igual manera la corriente en el lado de CA trifásica I_{Gabc} y la corriente de red de la fase “a” I_{Ga} . Recordando que la señal de voltaje y corriente de la red están en contrafase, este mismo comportamiento también sucede en las fases a y b.



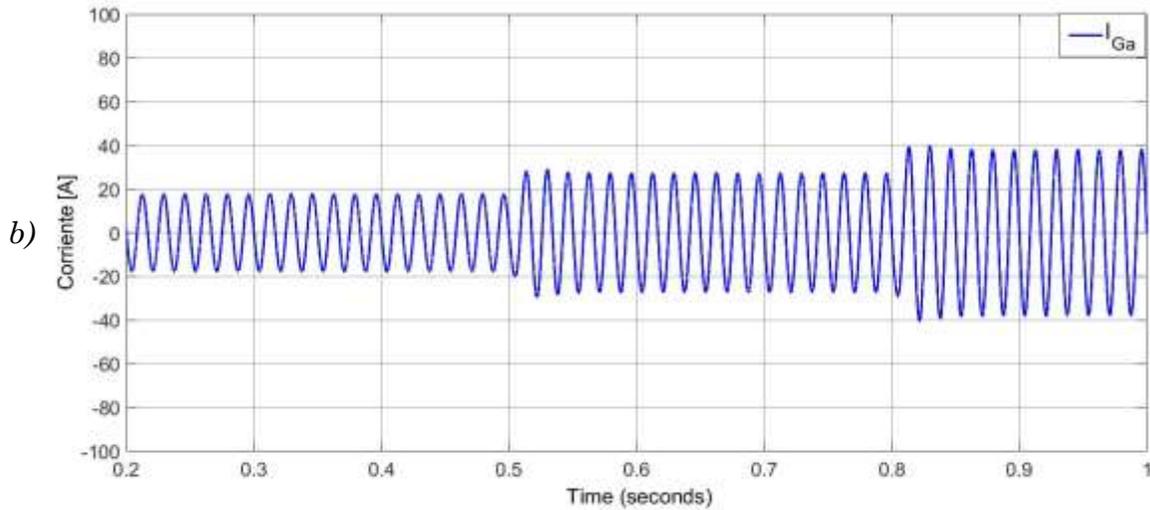


Figura 3.42. a) Corriente trifásica de la red I_{Gabc} en las terminales de CA, b) I_{Ga} de la fase a, con una excitación tipo escalón.

Recordando que el producto de la corriente de la red y el voltaje de la red nos da como resultado una inyección de potencia activa, en la figura 3.43 se muestra un incremento en la inyección de potencia activa hacia la red cuando hay cambios en la velocidad de la corriente marina “ S_M ”. Una comprobación de que existe la inyección de potencia activa es que el voltaje y la corriente estén en contrafase.

En la simulación de Simulink de MATLAB se colocó una “ganancia” de valor -1 para que fuera positiva la potencia activa esto solo para fines ilustrativos de la figura 3.43, ya que la inyección de potencia activa hacia la red es potencia activa negativa.

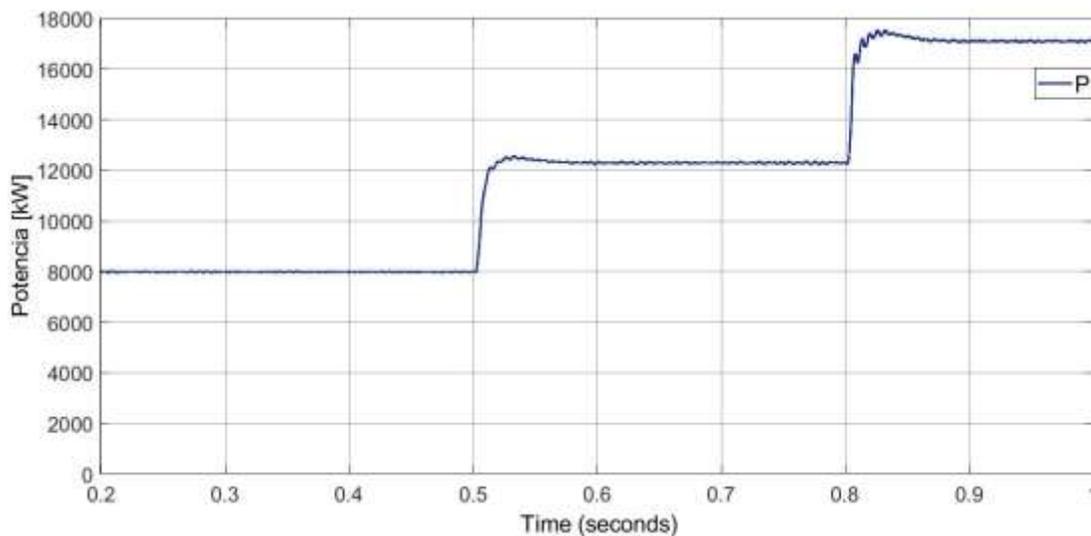


Figura 3.43. Potencia activa P en las terminales de CA con una excitación tipo escalón.



Todas las fuentes de energías renovables inyectan potencia activa hacia la red, pero tratan de no inyectar potencia reactiva, en este estudio de caso ante variaciones en “ S_M ” se observa la potencia reactiva “ Q ” en la figura 3.44. Se observa que en los tiempos 0.5 [s] y 0.8 [s] inicialmente existe un estado transitorio, pero después regresa a un estado estable a un valor aproximadamente cero.

En conclusión, cuando tenemos una potencia reactiva cercana al valor de cero nos asegura tener un factor de potencia aproximadamente unitario.

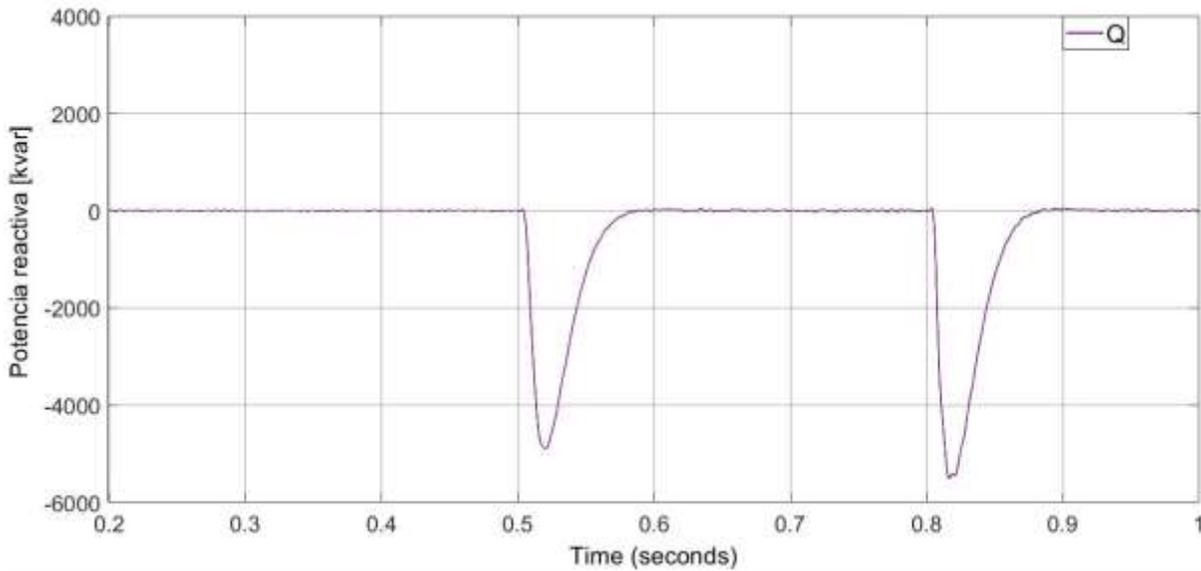


Figura 3.44. Potencia reactiva Q en las terminales de CA con una excitación tipo escalón.



CAPÍTULO 4

PROPUESTA: OBTENCIÓN DE MODELOS POLINOMIALES DE RED

4.1 Reducción de modelos por etapas

En este apartado se explicará la obtención de los modelos polinomiales de red obtenidos para cada una de las etapas del sistema detallado; uno de sus fines es que el sistema por corrientes marinas podrá realizar simulaciones de una planta de generación más robusta. La Tabla 4.1 nos muestra las mediciones de las variables de interés del sistema detallado y a partir de estas mediciones se obtienen los modelos de red polinomiales teniendo siempre como entrada las velocidades de la corriente marina S_M .

Tabla 4.1. Medición de las variables de interés para la obtención de los modelos polinomiales de red.

Velocidad de la corriente marina. S_M [$\frac{m}{s}$]	Torque T [Nm]	Velocidad de la máquina síncrona. S_{PMSG} [$\frac{rad}{s}$]	Potencia mecánica P_{CM} [kW]	Potencia CD P_{CD} [kW]	Potencia activa CA hacia la red P [kW]	Ciclo de servicio. D
1	-22.12	172.5	3,827	3,428	3,116	0.6452
1.1	-26.72	197.3	5,264	4,690	4,415	0.6686
1.2	-31.68	219.8	6,963	6,280	5,940	0.6918
1.3	-36.88	244.3	9,010	8,140	7,745	0.7132
1.4	-42.35	269	11,390	10,220	9,870	0.7312
1.5	-47.48	297.4	14,200	12,700	12,360	0.7444
1.6	-55.91	299.7	16,770	14,840	14,470	0.7512
1.7	-63.27	316.5	20,020	17,710	17,180	0.75
1.8	-70.53	340	23,990	21,096	20,520	0.7394
1.9	-76.74	375.2	28,881	25,350	24,570	0.7178
2	-79.80	424.5	33,940	30,400	29,120	0.6836



Se entiende que el sistema detallado tiene solo un elemento por cada etapa que lo integra, pero esto en la práctica no pasa pues se tienen más elementos de generación y no hay computador que pueda simular tantos elementos. Los modelos polinomiales resultan ser más ligeros y reducen así mismo el tiempo de simulación a gran escala en comparación con el modelo detallado. La información que contiene el sistema detallado se verá reflejada en polinomios; en la práctica así se lleva a cabo la implementación de energías renovables, a partir de modelos de red.

4.1.1 Modelo de la turbina-generator

El modelo polinomial de red turbina-generator se basó en obtener los valores de la potencia mecánica P_{CM} respecto para cada una de las velocidades de corriente marina S_M . Este nuevo modelo matemático representa el impacto en la potencia mecánica inyectada al sistema detallado, es decir como la velocidad de la máquina síncrona S_{PMSSG} , el torque T , voltaje V_{CM} y la corriente I_{CM} que provoca el fluido impacta al sistema.

El siguiente polinomio (4.1) integra la información de la turbina-generator, y en la figura 4.1 se puede apreciar la serie de puntos de la potencia mecánica respecto a la velocidad de la corriente marina para poder obtener la ecuación de la función polinomial.

Modelo polinomial de red para la turbina-generator:

$$P(S_M) = 11372 S_M^3 - 31268 S_M^2 + 44427 S_M - 20819 ; \quad R^2 = 0.9997 \quad (4.1)$$

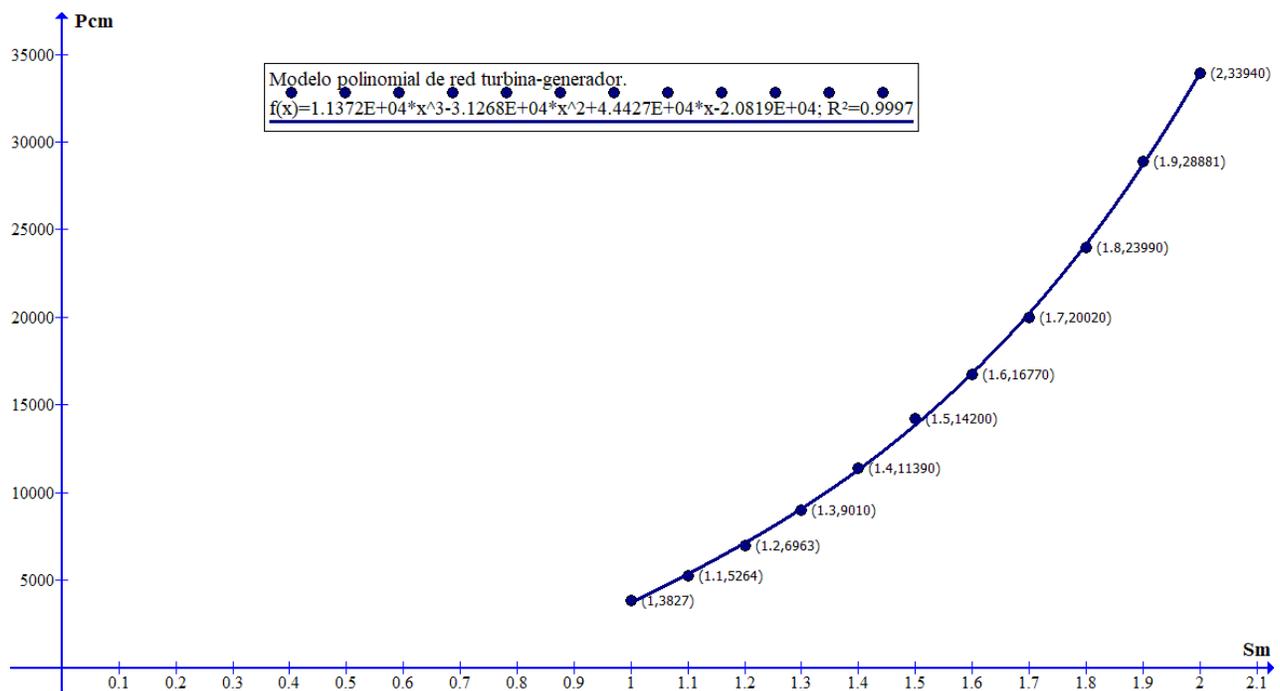


Figura 4.1. Serie de puntos para el modelo polinomial de red turbina-generator.



Donde R^2 es el coeficiente de determinación, reflejando la bondad del ajuste del modelo a la variable que se intenta explicar, oscila entre 0 y 1, y cuanto más cerca este del valor 1 mayor será el ajuste del modelo, en este caso vemos la fiabilidad de los modelos polinomiales obtenidos.

4.1.2 Modelo PFC Boost Rectificador

El modelo polinomial del rectificador boost PFC se observa en la ecuación (4.2) y se obtuvo a partir de encontrar un ciclo de servicio óptimo para cada velocidad de corriente marina, utilizando la herramienta del control *MPPT*. En la figura 4.2 se observa la serie de puntos para el modelo, cabe destacar que este modelo polinomial de red se implementó en el modelo detallado para ajustar automáticamente al convertidor boost.

El convertidor boost *CD/CD* se integra al sistema detallado cumpliendo con las ecuaciones de diseño (3.14-3.27) que se vieron en el capítulo 3.

La ecuación (4.2) se implementa en Simulink de MATLAB, para mejor aproximación se utiliza un polinomio de tercer orden. Se puede concluir que, si la velocidad de la corriente marina cambia, el ciclo de servicio de igual manera lo hará y así mismo todas las variables de interés, pero lo hará en los valores donde se tiene mayor potencia.

Modelo polinomial de red del rectificador boost PFC:

$$P(S_M) = -0.2558 S_M^3 + 0.831 S_M^2 - 0.6642 S_M + 0.7341 ; \quad R^2 = 1 \quad (4.2)$$

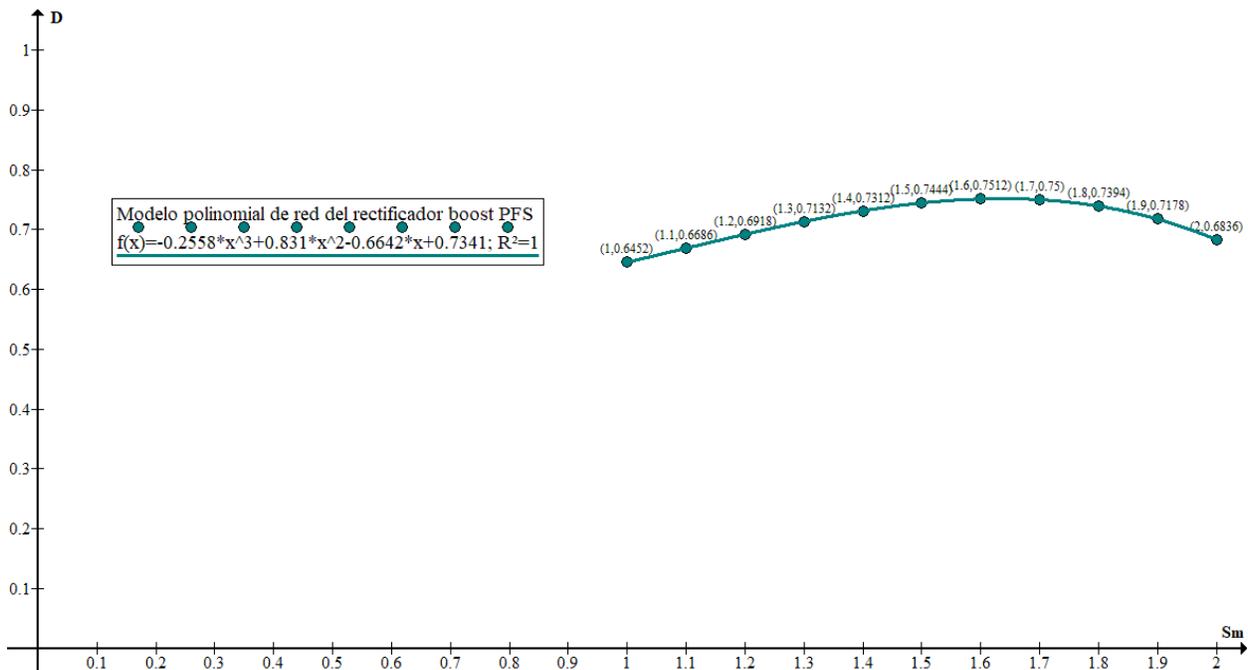


Figura 4.2. Serie de puntos para el modelo polinomial de red del rectificador boost PFC.

4.1.3 Modelo VSC Inversor

El modelo *VSC* inversor polinomial se obtiene de la variable de modulación m_{abc} , como se vio en el capítulo 3 se aplican las ecuaciones (3.37-3.46) en términos de potencia, es decir, este proceso de reducción nos conlleva a sacar ecuaciones más sencillas para no llevar toda la información de todo el proceso. El modelo polinomial será una sola ecuación y nos conservará el comportamiento e información para esta etapa.

Usando como ejemplo la velocidad promedio de la corriente marina en un valor de $S_M = 1.5 \left[\frac{m}{s} \right]$, se podrá observar en la figura 4.3 la simulación de la ecuación (3.46) que se interpreta como el modelo de red reducido para esta sección. Teniendo como entrada a la variable S_M que estaría en constante cambio en la práctica ante variaciones de la velocidad de corriente marina, y a si mismo la potencia activa hacia la red P .

Estos modelos de red se centrarán solo en el valor final ya que el sistema detallado contiene las dinámicas que lo representan, es decir, en este caso son cosas diferentes una es la variable de modulación del control o del sistema detallado que contiene dinámicas y otra es la variable de modulación del modelo de red que no contiene dinámicas.

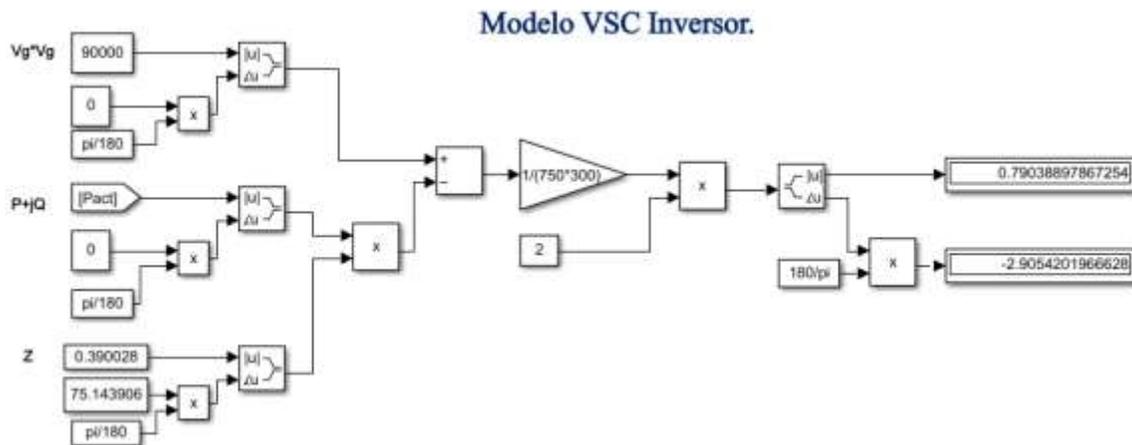


Figura 4.3. Simulación del modelo *VSC* inversor polinomial de la red.

4.1.4 Modelo de la potencia de CD

El modelo de la potencia de *CD* relacione la velocidad de la corriente marina con los valores obtenidos de la P_{CD} vistos en la tabla 4.1, brindándonos información de como funciona la P_{CD} en el sistema detallado a través de un polinomio representado en la ecuación (4.3) y en la figura 4.4 se aprecia la serie de puntos en relación con P_{CD} y S_M .



El modelo de la potencia de CD aun podría mejorar ajustándola con un filtro esto daría solución a el ruido que llega a tener la corriente I_{CD} , pero sin ello los valores de la potencia en CD que obtenemos no varían mucho respecto a los de P_{CM} .

Modelo polinomial de red de la potencia CD :

$$P(S_M) = 14463 S_M^3 - 47295 S_M^2 + 67655 S_M - 31585 ; \quad R^2 = 0.9995 \quad (4.3)$$

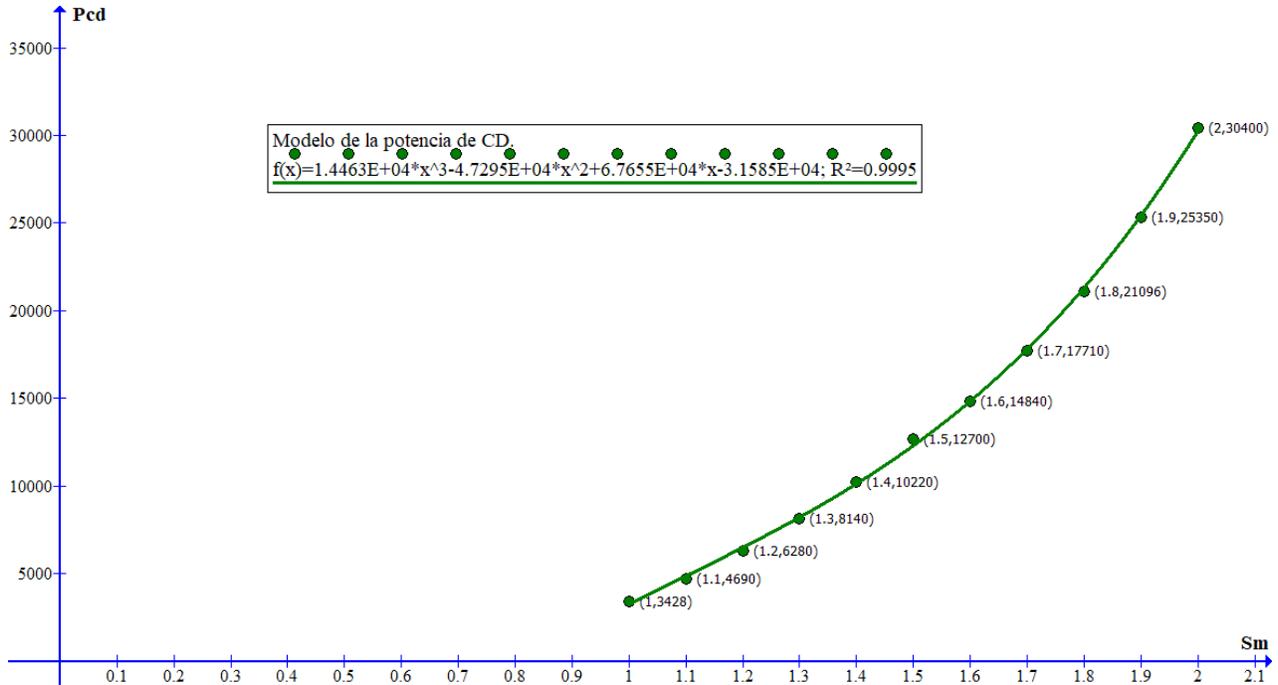


Figura 4.4. Serie de puntos para el modelo polinomial de red de la potencia CD .

4.1.5 Modelo de la potencia activa hacia la red eléctrica

Las mediciones de la potencia activa de la tabla 4.1 se ven reflejadas en la obtención del modelo de la potencia activa hacia la red eléctrica, hace referencia al polinomio de la ecuación (4.4) y en la figura 4.5 se muestra la serie de puntos de P y S_M .

La potencia activa va disminuyendo cuando el sistema detallado trabaja en conjunto es por ellos que la potencia activa no tendrá el mismo valor que la potencia de la corriente marina o la potencia mecánica, es decir, hay ciertas perdidas a lo largo del proceso.

Modelo polinomial de red de la potencia activa hacia la red eléctrica:

$$P(S_M) = 11077 S_M^3 - 33672 S_M^2 + 49533 S_M - 23967 ; \quad R^2 = 0.9996 \quad (4.4)$$

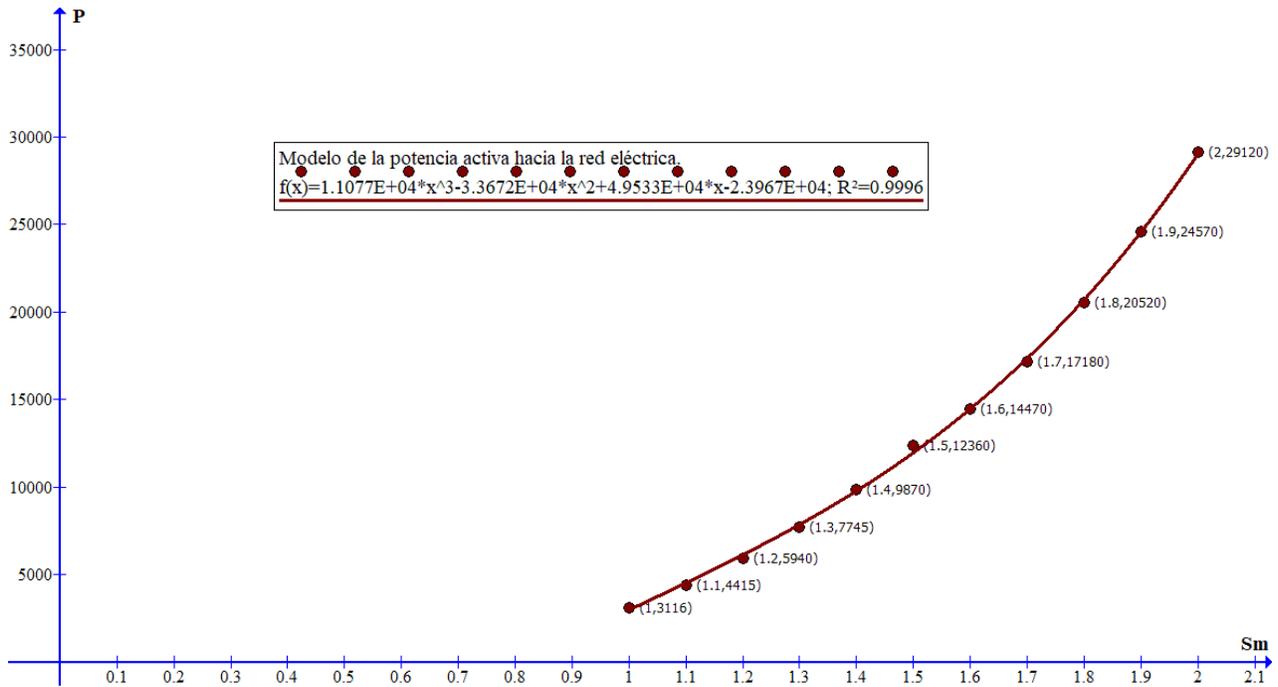


Figura 4.5. Serie de puntos para el modelo polinomial de red de la potencia activa.

4.1.6 Operación de los modelos en conjunto

La información del sistema detallado se reduce y la contienen los modelos polinomiales en ecuaciones más sencillas, representando estas cantidades de potencia en una sola ecuación conociendo su lugar de origen, además reduce a gran escala el tiempo de simulación. Con estos modelos ya explicados y obtenidos se observa en la figura 4.6 como se implementaron en Simulink de MATLAB, usando como ejemplo la velocidad promedio en un valor de $S_M = 1.5 \left[\frac{m}{s}\right]$.

MODELOS POLINOMIALES DE RED.

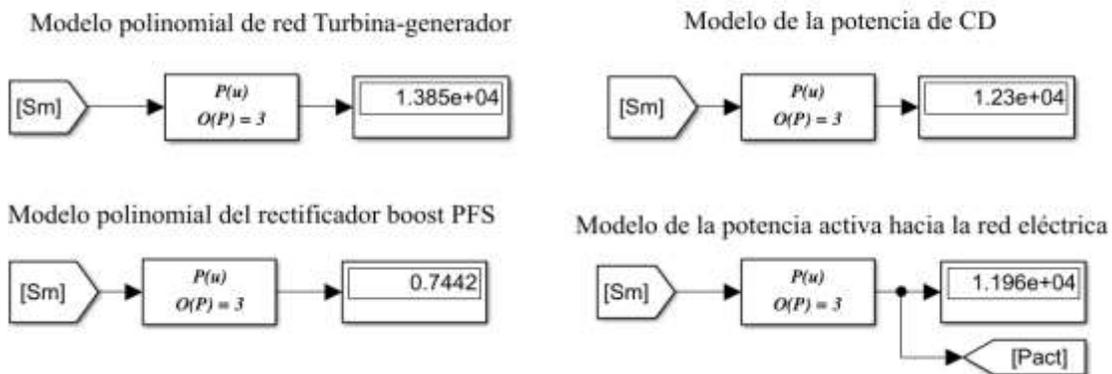


Figura 4.6. Simulación de los modelos polinomiales en conjunto.



La figura 4.7 muestra que efectivamente se está trabajando en los puntos máximos de operación y gracias al control MPPT se obtiene la máxima transferencia de potencia, cada uno de los puntos máximos se unen, reflejando un comportamiento como la curva característica del control MPPT (figura 3.14).

Además, otro dato que refleja una correcta operación es que la curva de la potencia mecánica P_{CM} es un poco mayor que la de P_{CD} , y por lo tanto la curva de potencia activa P hacia la red eléctrica será un poco menor que P_{CM} y que P_{CD} . Una buena respuesta es tener las curvas características de los modelos polinomiales casi iguales pues esto nos indica que no se está perdiendo mucha energía en el sistema.

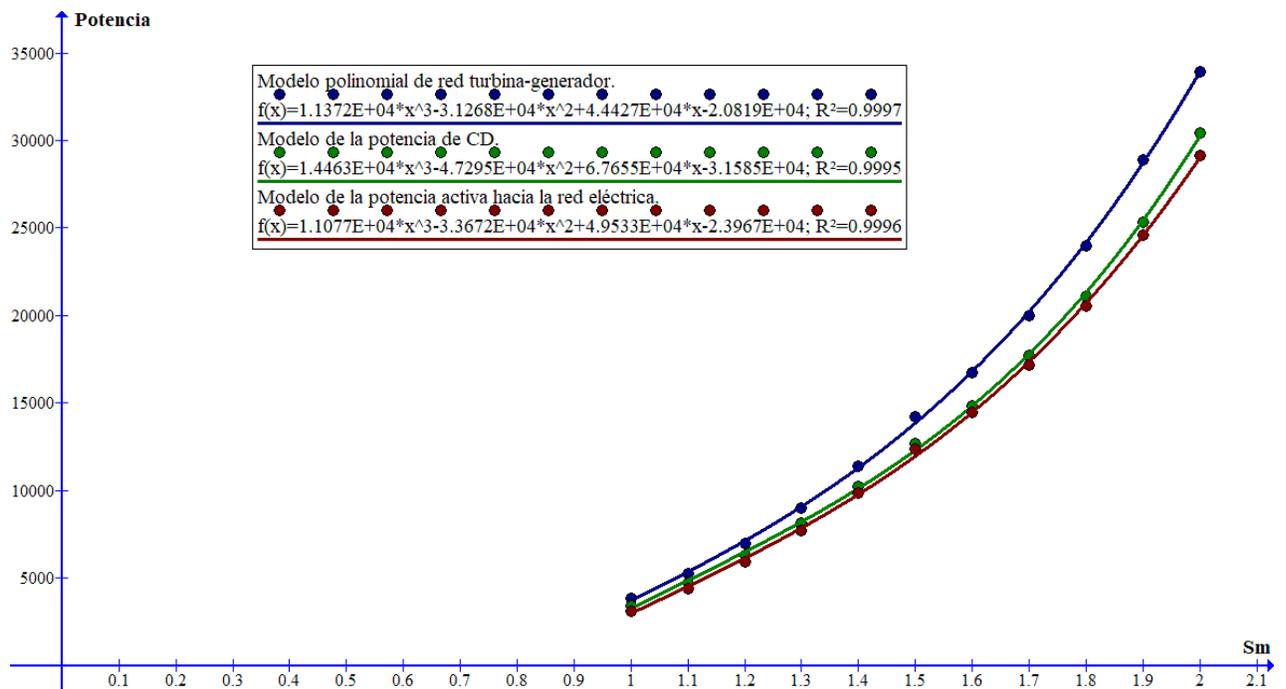


Figura 4.7. Serie de puntos de cada modelo polinomial de red en conjunto.

4.2 Modelos polinomiales de red del sistema por corrientes marinas

En este apartado, se podrá apreciar distintos estudios de caso que se aplican a los modelos polinomiales de red para verificar su óptimo funcionamiento. Se comprobará que el comportamiento es muy parecido al sistema detallado; toda la energía que entra al sistema está tratando de ingresar a la red para poder realizar un intercambio de energía. Comprobando que los modelos polinomiales son muy parecidos al modelo detallado, por ello se podrá identificar las diferencias que existen entre las variables de interés.



4.2.1 Operación en paralelo del modelo detallado y de los modelos polinomiales de red

Los modelos polinomiales de red implementados tienen ciertas diferencias con el sistema detallado. Sabemos que es normal que en todo el proceso se pierda energía, es decir, no se transmitirá toda la potencia mecánica (P_{CM}) hacia la red, pero en la Tabla 4.2 se muestra que no se está perdiendo cantidades de energía significativas, además conserva los valores para cada una de las velocidades de corriente marina del torque (T) y velocidad de la máquina síncrona (S_{PMMSG}).

Tabla 4.2. Comparación de las variables de interés del modelo detallado vs modelos polinomiales de red.

S_M $\frac{m}{s}$	D Modelo detallado	D Modelo polinomial	P_{CM} [kW] Modelo detallado	P_{CM} [kW] Modelo polinomial	P_{CD} [kW] Modelo detallado	P_{CD} [kW] Modelo polinomial
1	0.6452	0.6451	3,827	3,792	3,428	3,338
1.1	0.6686	0.6685	5,264	5,253	4,690	4,659
1.2	0.6918	0.6917	6,963	6,930	6,280	6,210
1.3	0.7132	0.713	9,010	9,000	8,140	8,110
1.4	0.7312	0.7311	11,390	11,300	10,220	10,120
1.5	0.7444	0.7442	14,200	14,100	12,700	12,560
1.6	0.7512	0.751	16,770	16,700	14,840	14,830
1.7	0.75	0.7498	20,020	20,010	17,710	17,700
1.8	0.7394	0.7392	23,990	23,980	21,096	21,000
1.9	0.7178	0.7175	28,881	28,720	25,350	25,310
2	0.6836	0.6833	33,940	33,940	30,400	30,250

P [kW] Modelo detallado	P [kW] Modelo polinomial	m_{abc} - magnitud Modelo detallado	m_{abc} - magnitud Modelo polinomial	m_{abc} - ángulo Modelo detallado	m_{abc} - ángulo Modelo polinomial
3,116	3,000	0.8019	0.7974	-0.6567	-0.7153
4,415	4,410	0.8027	0.7961	-0.9294	-1.0900
5,940	5,920	0.8037	0.7948	-1.2652	-1.4799
7,745	7,736	0.8050	0.7934	-1.5177	-1.9014
9,870	9,777	0.8065	0.7919	-1.9610	-2.3709
12,360	12,200	0.8085	0.7903	-2.4085	-2.9054
14,470	14,460	0.8102	0.7886	-2.9229	-3.5218
17,180	17,100	0.8124	0.7867	-3.3269	-4.1376
20,520	20,470	0.8153	0.7846	-3.9769	-5.0707
24,570	24,570	0.8191	0.7825	-4.9077	-6.0390
29,120	29,030	0.8237	0.7802	-5.5989	-7.1611



En la Tabla 4.3 se muestra los porcentajes de error entre el modelo detallado y los resultados obtenidos de los modelos polinomiales para las variables de interés.

Tabla 4.3. Porcentaje de error entre el modelo detallado y los modelos polinomiales de red.

$S_M \left[\frac{m}{s} \right]$	D % error	P_{CM} [kW] % error	P_{CD} [kW] % error	P [kW] % error
1	0.0154%	0.9145%	2.6254%	3.8667%
1.1	0.0149%	0.2089%	0.6609%	0.1132%
1.2	0.0144%	0.4739%	1.1146%	0.3367%
1.3	0.0280%	0.1109%	0.3685%	0.1162%
1.4	0.0136%	0.7901%	0.9784%	0.9422%
1.5	0.0268%	0.7092%	1.1023%	1.2944%
1.6	0.0266%	0.4174%	0.0673%	0.0691%
1.7	0.0266%	0.0499%	0.0564%	0.4656%
1.8	0.0270%	0.0416%	0.4550%	0.2436%
1.9	0.0417%	0.5574%	0.1577%	0%
2	0.0438%	0%	0.4934%	0.3090%

4.2.2 Simulación de datos reales

En la figura 4.8 se observa la comparación de los datos reales de la velocidad de la corriente marina en el Golfo de California tomando como referencia a [4.1], donde se analiza las velocidades máximas de la corriente marina en el Pacífico de Baja California y el Golfo de California implementado un modelo llamado “HYCOM”, el cual obtiene datos reales de la corriente marina en esta zona, antes efectos naturales y en un periodo de tiempo, por lo tanto obtuvo resultados de los flujos máximos de las mareas en esta ubicación, alcanzando una corriente marina máxima de $1.1 \frac{m}{s}$.

Para este apartado se realizó una simulación en Simulink de MATLAB, ajustada a la velocidad de corriente marina promedio de [4.1] teniendo un valor de $0.5 \frac{m}{s}$, es decir, $0.5 \frac{m}{s}$ tomará el valor de referencia para este trabajo de tesis de $1.5 \frac{m}{s}$ obtenido de [4.2] en el Mar Caribe, Canal de Yucatán.

La velocidad promedio de la corriente marina “ S_M ” implementada para este trabajo de tesis, es una de las variables más importantes y de interés, pues es la entrada al modelo detallado y a los modelos polinomiales de red.

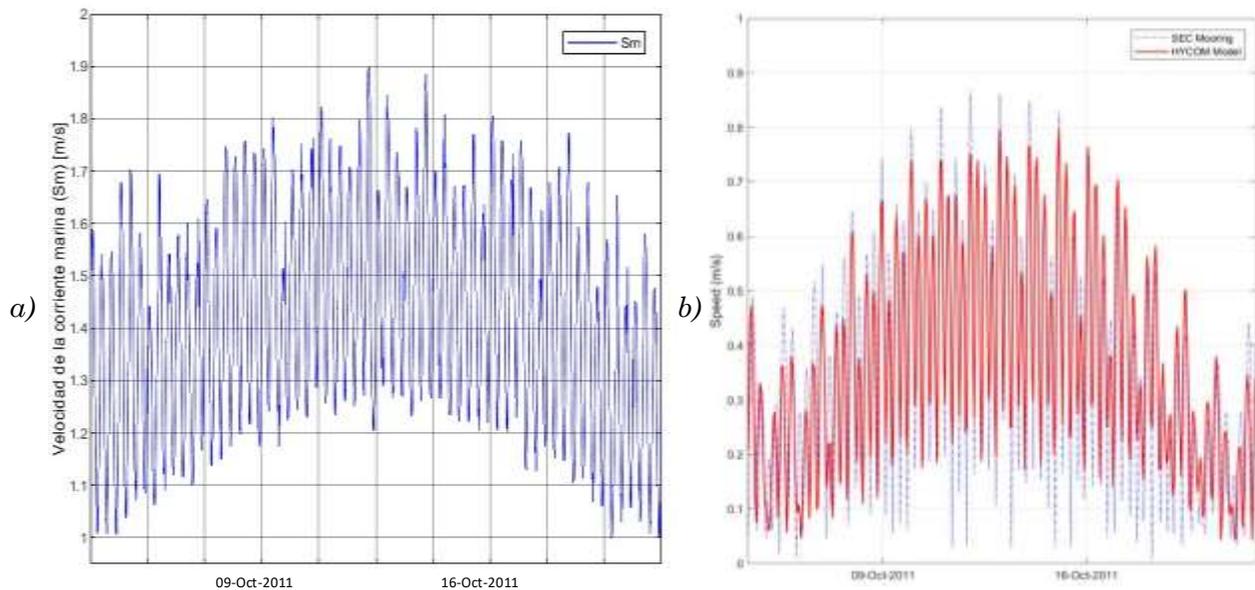


Figura 4.8. a) Simulación a partir de datos reales de S_M , b) Mediciones de la velocidad de la corriente marina en el Pacífico de Baja California y el Golfo de California en dos semanas [4.1].

Las velocidades promedio tomadas como referencia para esta comparación gestionan adecuadamente su implementación, aunque sean de diferentes áreas. Sin embargo, en ambos casos es una variable que depende de un comportamiento natural y por lo tanto nunca podrá ser constante o mantenerse en la velocidad ideal o promedio, es decir, siempre tendrá un rango con máximos y mínimos ante cambios de clima, fenómenos naturales, etc. Planteando diferentes desafíos para las tecnologías futuras.

Finalmente, se puede deducir que, aunque las velocidades promedio sean distintas en ambas zonas teniendo diferentes rangos, se podría implementar un correcto modelo detallado y modelos polinomiales de red, tomando en cuenta los diferentes tipos de estudio previos que se deben realizar vistos en el capítulo 1. Y si existiese un plan de interconexión con la red eléctrica o de almacenamiento de energía, se deberán tomar en cuenta las distintas fluctuaciones periódicas de la corriente marina para una explotación óptima de este recurso y de su implementación.

4.3 Conclusiones particulares

Los modelos polinomiales de red implementados en el software Matlab-Simulink®, el modelo detallado y las simulaciones obtenidas de ambos modelos ante estudios de caso, han demostrado las principales ventajas de la propuesta de este trabajo de tesis. Estos resultados obtenidos pueden evaluar el impacto de la integración de energías renovables en una red eléctrica más grande y robusta.



Así mismo, se ha demostrado la estrategia de los controles implementados manteniendo una tensión de CD estable a la entrada del VSC , además del correcto funcionamiento que realiza la herramienta del control $MPPT$ para estar en el punto de máxima potencia siendo adecuado para ambos modelos. Posteriormente se observaron los porcentajes de error entre el modelo detallado y los modelos polinomiales propuestos, obteniendo valores considerablemente bajos.

La potencia reactiva hacia la red eléctrica se mantiene en valores aproximadamente cero ante cambios de la velocidad de la corriente marina, y fue posible regular la tensión de CD mediante el compensador PI , además la velocidad de la máquina síncrona no excede al doble de la nominal.

Se puede observar que a menor velocidad de la corriente marina hay menor potencia mecánica y conforme se incrementa esta velocidad el ciclo de servicio cambia automáticamente, además los modelos polinomiales de red realizan en efecto su trabajo manteniendo valores cercanos a los que genera el modelo detallado.

Como se vio en este capítulo cada uno de los polinomios obtenidos representa las etapas del modelo detallado, es decir, relacionan desde la entrada de la corriente marina hasta la salida del lado de CA . Se observa que ante cambios bruscos la potencia mecánica, potencia de CD y la potencia activa automáticamente dan un valor cercano al valor del modelo detallado, por lo tanto, se demuestra que ante estos cambios el sistema es cada vez más óptimo. Concluyendo que la mayor parte de la potencia mecánica que se genera es la que se está transfiriendo hacia la red eléctrica.



CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

5.1 Aportes

En este trabajo de tesis para la Facultad de Ingeniería, para la Universidad Nacional Autónoma de México y en especial hacia el área de energía eléctrica y energías renovables, los aportes realizados son:

- ✓ Creación de un modelo matemático (modelo detallado), donde se contempla representar el funcionamiento de un sistema de generación por corrientes marinas en estado estable, obteniendo la información intrínseca de las principales variables internas.
- ✓ La creación de un nuevo modelo matemático (modelos polinomiales) a partir de un modelo matemático detallado que permite conservar la información de las principales variables de interés, logrando reducir a gran escala el tiempo de simulación para la generación eléctrica por corrientes marinas.

5.2 Trabajos futuros

En esta sección se verá que se propone para realizar trabajos futuros relacionados con este tema de tesis aportando nuevos conocimientos y tecnologías para la investigación.

- Implementación de nuevas técnicas para asegurar el valor obtenido del ciclo de servicio. Una de las técnicas es implementar un microprocesador con una tabla de los datos de la velocidad de la corriente marina, el cual seleccionará automáticamente el valor ideal del ciclo de servicio, así es como esta información con más precisión ingresara a los generadores. Por lo tanto, como resultado tendremos mayor exactitud y por ende se podrá enviar mayor energía a la red eléctrica.
- Realizar una operación con n generadores implementando los modelos polinomiales de red, observando su comportamiento y el tiempo de simulación que conlleva, no solo en un generador si no en muchos de ellos al mismo tiempo. Teniendo como objetivo que se emulen



muchas máquinas de generación a través de los modelos reducidos que se obtuvieron en este trabajo de tesis.

- *Simulation Hardware in the Loop*: Los modelos polinomiales de red (modelos reducidos) trabajaran en conjunto con convertidores CD/CD para aumentar o reducir el voltaje y convertidores CD/CA para la conversión de energía, y en conjunto trabajaran en un sistema real con más generadores aplicando estos modelos polinomiales. Así mismo se le pide a una computadora que emule el comportamiento de una granja de generación, es decir se trabajara con una parte real y una parte de software. El cual es un tipo de experimento en donde no solo se tiene la parte real, si no que se agrega una parte de manera virtual a todo el sistema y esta funcionara como si se tuviera físicamente.
- Estudio para realizar una interconexión con la red eléctrica, donde se involucren cálculos de eficiencia, diferentes tipos de perdidas, análisis de fallas en los sistemas de generación por corrientes marinas, estudio de protecciones eléctricas para la generación por corrientes marinas. Se hace evidente la importancia de una futura investigación basada en las afectaciones que podrían ocurrir a los dispositivos o a la red eléctrica cuando exista alguna perturbación en la red.
- Implementación: Desarrollar la ejecución del proyecto considerando aspectos como obra civil para desarrollar un sistema de energía por corrientes marinas en México, así se podrá conocer que impacto ocasiona en la red de Cozumel, donde se tiene considerado instalar nuevas energías renovables para un beneficio en común.
- Análisis de viabilidad: La implementación de cualquier proyecto debe tener una vital importancia en analizar la relación costo/beneficio, y así tener la información precisa de aspectos como son los económicos, técnicos, análisis ambiental y social, a fin de determinar sus ventajas y desventajas que implique el proyecto.

5.3 Impacto en el entorno

El impacto en el entorno donde se coloque este tipo de modelos matemáticos (detallado y polinomial) y la sincronización con la red eléctrica debe ser de lo más respetuosa y amigable posible con el ambiente y su entorno, haciendo a estos tipos de proyectos funcionales y multidisciplinarios.



Se deberán realizar los estudios necesarios vistos en el capítulo 1 para su implementación tratando de que la fauna y flora no se vean afectadas, implementando así alternativas eficaces para eliminar aspectos negativos de esta energía, y buscar que las nuevas tecnologías se lleven mejor con la naturaleza, especies y plantas. Algunos ejemplos de nuevas tecnologías son las turbinas marinas vistas en el capítulo 2.

Por otro lado, se tiene visto que no se producirá contaminantes a la atmosfera ayudando así al cambio climático, y generando un impacto positivo a mediano y largo plazo. El implementar estos nuevos modelos matemáticos se logrará un aprovechamiento de la energía por corrientes marinas ayudando a colaborar a los grandes retos y seguir en tendencia para la investigación de su producción de electricidad.

Además, estas instalaciones para la producción de electricidad no ponen en peligro las vidas o la salud de las personas ante fallas humanas o técnicas, como podría ser el caso de una central nuclear. En cuanto a su construcción se requieren estudios previos para no dañar la zona o ser invasivos para la flora y fauna.

5.4 Discusión

Para verificar la validez de la hipótesis, la implementación de la simulación se realizó en 2 fases. En la primera, se generó la simulación completa del modelo detallado a través del software Matlab-Simulink® considerando los cálculos pertinentes implementados en el modelo detallado.

A partir de los datos obtenidos de las variables internas de interés (voltajes, corrientes, potencias y variables de modulación) se desarrolló la segunda fase, la cual consiste en implementar la simulación completa de los modelos polinomiales de red, realizando las pertinentes comparaciones y mejorías para cada uno de los modelos (detallado y polinomiales), y así poder mantener su información, para que estos modelos estén enviando toda la energía posible a la red. Se puede corroborar el correcto funcionamiento del modelo matemático (modelo detallado) en el capítulo 3 donde se implementaron casos de estudio.

Por otro lado, se podrá verificar en el capítulo 4 como se obtienen los modelos polinomiales de red y en las tablas 4.2 y 4.3 la comparación de ambos modelos, manteniendo en niveles aceptables y con valores muy parecidos a las variables de interés. O también se puede apreciar su debida comparación y reducción de tiempo de simulación entre ambos modelos. Por lo tanto, se cumple la hipótesis de esta tesis.



5.5 Conclusión final

Uno de los principales aportes que puede dar este trabajo de tesis es el estudio y análisis de todo el proceso de un sistema de generación por corrientes marinas. Se puede observar que el análisis se realizó desde la turbina hasta la sincronización con la red eléctrica manteniendo al sistema en condiciones estables y conociendo, analizando y realizando cada una de las partes que lo incorpora.

Ahora bien, una planta de generación no contiene solamente un elemento de generación si no se extiende a muchas unidades de generación que operan en conjunto representando una tarea laboriosa, es por ello que al implementar estos modelos reducidos en este caso los modelos polinomiales de red, y lograra hacer una tarea más fácil de analizar sabiendo que esta información tan reducida viene de un análisis interno detallado.

En este trabajo de tesis se aprecia que se pudo obtener una potencia eléctrica sincronizada a la red empezando por una energía mecánica. Así mismo se logró también obtener el porcentaje de error o perdidas al usar el modelo detallado en comparación de usar los modelos polinomiales de red.

Por otro lado, en esta tesis se analizó cada uno de los procesos y variables de interés (corriente, voltaje, potencia activa y reactiva, torque, velocidad, ciclo de servicio, etc.) cuando involucra tener un perfil de oleaje alto o bajo, es decir, tener la velocidad de corriente marina más alta o más baja de los valores que se trabajaron en este proyecto.

Dicho lo anterior, se hace evidente que en esta tesis de Ingeniería Eléctrica se ha logrado obtener nuevos modelos matemáticos de un sistema de generación por corrientes marinas, útil para evaluar las respuestas en estado estable ante variaciones en su entrada con bajo costo computacional. Actualmente el concepto de modelos de red en la integración de fuentes de energías renovables es un tema de alto interés entre la comunidad científica y tecnológica, englobando diferentes temas a su vez.

Además, en este contexto el análisis de integración de energías renovables puede consumir mucho tiempo computacional cuando se requieran estudios a evaluar su integración a la red eléctrica, estudios de simulaciones repetitivas o para algún proyecto innovador que requiera la información de las variables de interés de este tipo de generación eléctrica, en tiempos de simulación cortos y así poder llegar a sus objetivos de una manera más rápida.

La generación de nuevos modelos matemáticos es útil donde se requiera de información detallada sobre su operación actual de un sistema de generación por corrientes marinas. La



validación de los modelos polinomiales de red obtenidos ha sido con respecto a la respuesta que se obtuvo en análisis del modelo detallado, obteniendo resultados con un alto nivel de semejanza.

Se espera que este aporte realizado en este trabajo de tesis sea una herramienta de utilidad para próximos proyectos a realizar en el diseño y análisis para los especialistas en el área eléctrica, para las nuevas generaciones que estén interesadas en lograr un objetivo en común, como es el ayudar a la integración de fuentes de energía renovable. Además, contribuir a la investigación e implementación de las diferentes formas de generar energía eléctrica a partir de generación marina a las redes eléctricas modernas e inteligentes.

Finalmente, se cumple un objetivo personal de ser parte del cambio, seguir en él y ayudar a las próximas generaciones para poder habitar y ayudar de una mejor manera este mundo que compartimos.



BIBLIOGRAFÍA

Capítulo 1

[1.1] Datacommons.org, “México – Place Explorer – Data Commons”. Recuperado de: https://datacommons.org/place/country/MEX?utm_medium=explore&prop=count&popt=Person&hl=es.

[1.2] Cemioceano.mx, “CEMIE-Océano” 2018. Recuperado de: <https://cemioceano.mx/energia-corrientes-mareomotriz.html> (accessed Nov. 29, 2021).

[1.3] “Prospectiva de Energías Renovables 2016-2030.” Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/177622/Prospectiva_de_Energias_Renovables_2016-2030.pdf

[1.4] SEMARNAT, 2016. “Costas y Mares de México Manejo integrado con amor.” CD002471.pdf. Recuperado de: (semarnat.gob.mx)

[1.5] Cemioceano.mx. Gabriela Athié, Tania Reyes-Jiménez, Mariana De la Miyar-Loza, Cecilia Enríquez, Julio Sheinbaum, Mark Marín e Ismael Mariño: “Variabilidad de la corriente de Yucatán en el Caribe de Mexicano y su efecto en la surgencia de Yucatán”.

[1.6] Cemioceano.mx, Ismael Mariño Tapia, “Línea Estratégica: Corrientes y Mareas”, Centro Mexicano de Innovación en Energía – Océano.

[1.7] L. M. Beard et al., "Key Technical Challenges for the Electric Power Industry and Climate Change," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 25, no. 2, pp. 465- 473, June 2010.

[1.8] B. Alnajjab and R. S. Blum, "Estimating Waveforms of Ocean Waves to Enhance the Efficiency of Ocean Energy Conversion," in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 8, no. 1, pp. 179-191, Jan. 2017.

[1.9] N. de, “Generación de energía a partir de la fuerza del mar,” gob.mx, 2022. Recuperado de: <https://www.gob.mx/ineel/prensa/generacion-de-energia-a-partir-de-la-fuerza-del-mar>



[1.10] Super User, “Energía oceánica, alternativa para generar electricidad en México,” *Ugto.mx*, 2020. Recuperado de: <https://www.ugto.mx/noticias/noticias/educativas-nacionales/13491-energia-oceanica-alternativa-para-generar-electricidad-en-mexico>

Capítulo 2

[2.1] Daniel W. Hart. Book: “Power Electronics”. First edition. Avenue of the Americas, New York, NY 10020. By The McGraw-Hill Companies, Inc. A., 2011, pp 1, 2.

[2.2] H. Rashid Muhammad. Libro: “Electrónica de Potencia”. Cuarta edición. Editorial: Prentice Hall, México, 2015, pp 1, 4.

[2.3] S.E. Ben Elghali, Student Member, IEEE, M.E.H. Benbouzid, Senior Member, IEEE, and J.F. Charpentier, Member, IEEE. “Marine Tidal Current Electric Power Generation Technology: State of the Art and Current Status”.

[2.4] Balazs Czech and Pavol Bauer: “Wave Energy Converter Concepts”, *EEE Industrial Electronics Magazine*, date of publication: 15 June 2012, pp 5.

[2.5] Secretaria de Energía e Instituto Mexicano del Petróleo: “Reporte de Inteligencia Tecnológica, “Energía del Océano”, 2017, IT_OCEANO_VERSION_311017.pdf. Recuperado de: (www.gob.mx), pp 28, 33, 35, 36, 38, 39.

[2.6] Centro Mario Molina, “Capítulo VII estado del arte de tecnologías para el a aprovechamiento de las energías renovables”, 2010, *Renovables final*. Recuperado de: (energia.gob.mx), pp 107-109.

[2.7] F. Triveri, “SeaGen, la turbina marina,” *Nuestroclima*, Jun. 02, 2008. Recuperado de: <https://nuestroclima.com/seagen-la-turbina-marina>.

[2.8] M. Power, “Orbital O2 2MW Tidal Turbine - World’s Most Powerful Tidal Turbine,” YouTube. Noviembre 16, 2018. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=9hN3dBpPu8Q>.

[2.9] “La turbina mareomotriz más potente del mundo comienza a suministrar energía a la red”, *Elperiodicodelaenergia.com*, 2021. Recuperado de: <https://elperiodicodelaenergia.com/la-turbina-mareomotriz-mas-potente-del-mundo-comienza-a-suministrar-energia-a-la-red/>

[2.10] “Un océano de energía,” *Evolution*, 2017. Recuperado de: <https://evolution.skf.com/es/un-oceano-de-energia>.



[2.11] Structuralia Blog, “Proyecto MeyGen: la mayor planta de energía mareomotriz del mundo,” Structuralia.com, 2015. Recuperado de: <https://blog.structuralia.com/proyecto-meygen-la-mayor-planta-de-energia-mareomotriz-del-mundo>

[2.12] CEMIE Océano, “Tecnologías para aprovechar las corrientes marinas” Cemioceano.mx, 2017. Recuperado de: <https://cemioceano.mx/infografias.html>

[2.13] CEMIE Océano, “Turbinas de corrientes marinas en el CEMIE-Océano” Cemioceano.mx, 2017. Recuperado de: <https://cemioceano.mx/infografias.html>

[2.14] CEMIE Océano, “Eficiencia de las turbinas de corrientes marinas” Cemioceano.mx, 2017. Recuperado de: <https://cemioceano.mx/infografias.html>

Capítulo 3

[3.1] Alejandro Tapia-Hernández, Mario Ponce-Silva, Nancy Mondragón-Escamilla, Leobardo Hernández González “Impacto de la Geometría en el Efecto Fin de los Generadores Lineales”, publicado en agosto 2016.

[3.2] León Viltre, Lesyani T, S. Neves, and Miriam, Vilaragut Llanes, “Análisis y modelado del generador de inducción doblemente alimentado,” Ingeniería Energética, 2014. Recuperado de: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012014000200003.

[3.3] N. G. Santini, Asesores: G. R. Catuogno G. Magaldi “Implementación de un control vectorial de una máquina síncrona de imanes permanentes”, publicado en octubre 2014.

[3.4] F. Behrouzi, M. Nakisa, A. Maimun, and Y. M. Ahmed, “Global renewable energy and its potential in Malaysia : A review of Hydrokinetic turbine technology,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 62, pp. 1270–1281, 2016.

[3.5] M. R. Colley G, “Computational flow field analysis of a vertical axis wind turbine,” in Proceedings of the International conference on renewable energies and power quality, 2011.

[3.6] Siegfried Heier, “Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems,” John Wiley & Sons Ltd, 1998, ISBN 0-471-97143-X.

[3.7] Simulink de MATLAB, Library: Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Renewables / Wind Generation.



- [3.8] M. H. Rashid, *Electrónica de Potencia*, 4th ed. México: PEARSON, 2015.
- [3.9] D. I. Brandão, R. Carnieletto, P. H. Nguyen, P. F. Ribeiro, M. G. Simões, and S. Suryanarayanan, *Power Electronics for Renewable and Distributed Energy Systems*, vol. 59. Springer, 2013.
- [3.10] R. Ayop and C. W. Tan, “Design of boost converter based on maximum power point resistance for photovoltaic applications,” *Sol. Energy*, vol. 160, no. August 2017, pp. 322– 335, 2018, Recuperado de: [10.1016/j.solener.2017.12.016](https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.12.016).
- [3.11] John J. Grainger, William D. Stevenson Jr. Book: “Análisis de sistemas de potencia”, primera edición en español por McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE MÉXICO, S. A. de C.V.
- [3.12] Daniel W. Hart, Book: “Power Electronics”, McGraw-Hill, a business unit of The McGraw-Hill Companies, Inc., 1221 Avenue of the Americas, New York, NY 10020.

Capítulo 4

- [4.1] *Energies* - MDPI. Vanesa Magar, Victor M. Godínez, Markus S. Gross, Manuel López-Mariscal, Anahí Bermúdez-Romero, Julio Candela and Luis Zamudio: “In-Stream Energy by Tidal and Wind-Driven Currents: An Analysis for the Gulf of California”, 2 March 2020.
- [4.2] *Cemioceano.mx*. Gabriela Athié, Tania Reyes-Jiménez, Mariana De la Miyar-Loza, Cecilia Enríquez, Julio Sheinbaum, Mark Marín e Ismael Mariño: “Variabilidad de la corriente de Yucatán en el Caribe de Mexicano y su efecto en la surgencia de Yucatán”.