



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

**Validación en Tiempo Real de un
Sistema de Conversión de
Energía Marina interconectado
en redes de Distribución**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Eléctrico-Electrónico

P R E S E N T A

Luis Alfredo Sánchez Conde

DIRECTOR(A) DE TESIS

Dra. Nadia María Salgado Herrera



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

Resumen

En esta tesis se presenta el modelado, diseño, análisis y simulación de un sistema de conversión de energía marina (MECS) basado en un arreglo de generadores magnetohidrodinámicos (MHD) interconectados a redes eléctricas de distribución.

La producción de energía por medio de los recursos marinos representa un alto impacto ambiental benéfico, una fuerte viabilidad económica además de contribuir a la transición de combustibles fósiles a renovables utilizando una energía que tiene un bajo porcentaje de integración a redes eléctricas, pero con un gran potencial. Hay muy pocos lugares en el mundo que aprovechan el potencial energético de cuerpos marinos a través de diferentes tecnologías de generación, que, como todas, tienen sus ventajas y desventajas.

La generación de energía eléctrica basada en generadores MHD presenta un futuro prometedor y tiene un menor impacto ambiental si se implementan en un arreglo tipo boya, porque solo depende de las fluctuaciones de las olas. En este trabajo se propone una estructura MECS, compuesta por: arreglo de generadores MHD aprovechando estas y su movimiento característico oscilatorio, convertidores de electrónica de potencia AC/DC, DC/DC y DC/AC, incluyendo un control robusto para transferir la potencia producida a un bus infinito AC, sin variaciones de voltaje.

Para verificar la funcionalidad de la metodología propuesta, la simulación DREA de basado en MECS en MATLAB-Simulink®

Para verificar la funcionalidad de la metodología propuesta, se simulan y analizan las características técnicas de un acceso de energía renovable distribuida (DREA, por sus siglas en inglés) basado en MECS a través de Matlab-Simulink® (MATLAB r2018a, MathWorks, Natick, MA, USA) y se validan en tiempo real utilizando el simulador OPAL-RT Technologies® (Montreal, QC, Canadá). Los resultados muestran un sistema robusto y eficaz que integra una potencia total de 390 kW desde el MECS hacia las redes eléctricas de distribución, mediante los dispositivos de electrónica de potencia que componen la estructura de estos.

Hay que considerar que la realización de esta simulación tiene la intención de permitir avanzar y ayudar a la elaboración de un modelo físico, permitiendo analizar y estudiar el comportamiento de este tipo de tecnología de generación eléctrica de manera más detallada, además, de dar a conocer el potencial que tiene la energía generada por cuerpos de agua y desarrollar mejores y nuevas tecnologías en el futuro.

Abstract

This thesis presents the modeling, design, analysis, and simulation of a marine energy conversion system (MECS) based on an array of magnetohydrodynamic (MHD) generators interconnected to electrical distribution networks.

The production of energy through marine resources represents a high beneficial environmental impact, a strong economic viability as well as contributing to the transition from fossil fuels to renewables using an energy that has a low percentage of integration into electrical networks, but with a great potential. There are very few places in the world that take advantage of the energy potential of marine bodies through different generation technologies, which, like all of them, have their advantages and disadvantages.

Electric power generation based on MHD generators has a promising future and has a lower environmental impact if implemented in a buoy-type arrangement, because it only depends on wave fluctuations. In this work, a MECS structure is proposed, composed of array of MHD generators taking advantage of these and their characteristic oscillatory movement, AC/DC, DC/DC and DC/AC power electronics converters, including a robust control to transfer the power produced to an infinite AC bus, without voltage variations.

To verify the functionality of the proposed methodology, the technical characteristics of a distributed renewable energy access (DREA) based on MECS are simulated and analyzed through Matlab-Simulink® (MATLAB r2018a, MathWorks, Natick, MA, USA) and validated in real time using the OPAL-RT Technologies® simulator (Montreal, QC, Canada). The results show a robust and effective system that integrates a total power of 390 kW from the MECS to the electrical distribution networks, through the power electronic devices that make up their structure.

This simulation is intended to allow progress and help in the development of a physical model, allowing the behavior of this type of electricity generation technology to be analyzed and studied in more detail, as well as to publicize the potential of the energy generated by bodies of water and to develop better and new technologies in the future.

Dedicatoria

Este escrito está dedicado a mi familia por siempre apoyarme sin importar la situación, mis papás mis tías, tíos, primos y en especial a mi hermana.

A mis amigos y compañeros que me acompañaron en este camino sin los cuales no estaría donde ahora estoy ni sería quien soy, en especial para Karen, Caro, Quique, Tavo, Vania, Miranda, Norma, Diandra, Miguel, Mafer, Andrea, Vico, Charly, Andi, Sam, Alfredo, Vane, Tere, Dulce, Rodrigo, Greta, Regi, y al equipo dinamita Sandy, José Luis y Dani. Además de mi novia Yle.

A mis profesoras y profesores que me marcaron, exigieron y enseñaron durante todos estos años y esta época con las dificultades que representó.

Por último, quiero dedicar este trabajo a todas las personas que estén interesadas en la ingeniería, en la eléctrica de potencia, en las energías renovables, que tengan el interés por desarrollar nuevas tecnologías y mejorar las actuales, que estén dispuestas a trabajar por un mundo mejor y sustentable para que pueda durarnos muchos miles de años más.

Agradecimientos

Agradezco a la UNAM por darme la oportunidad de aprovechar sus instalaciones, centros culturales, actividades deportivas y recreativas durante estos años.

Al Instituto de Energías Renovables por dejarme utilizar sus instalaciones y a la Dra. Nadia por el apoyo y asesorías constantes durante la elaboración de esta tesis.

Esta investigación fue apoyada en parte por el Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica PAPIIT-UNAM con número de proyecto DGAPA-PAPIIT-IA104522 y en parte por el Fondo de Sustentabilidad Energética SENER-CONACyT, con número de proyecto 272063.

Índice de contenido

Resumen.....	II
Abstract.....	III
Dedicatoria	IV
Agradecimientos.....	V
Índice de contenido.....	VI
Índice de figuras	VIII
Glosario de Términos	XI
Capítulo 1	13
1.1 Introducción	13
1.2 Concepto General de un sistema de energía marina	13
1.3 Estado del arte	14
1.4 Planteamiento del problema	18
1.5 Hipótesis	18
1.6 Propuesta de investigación	18
1.7 Objetivo General	19
1.7.1 Objetivos Específicos	19
1.8 Justificación	19
1.9 Metodología	20
1.10 Organización de la tesis	20
Capítulo 2. Modelado del sistema de conversión de energía marina	21
2.1 Datos de corriente marina en una localidad en la península de Yucatán	21
2.2 Unidad de Generación LMMHD	23
2.3 Convertidor AC/DC puente de diodos monofásico	27
2.4 Convertidor DC-DC elevador boost multinivel	28
2.5 Convertidor DC/AC VSC en modo inversor	33
2.5.1 Convertidor Monofásico	33
2.5.2 Modelo conmutado	35
2.5.3 Modelo Promediado	35
2.6 Conclusiones Particulares	44

Capítulo 3. Resultados de simulación: Matlab-Simulink®	45
3.1 Unidad de generación	45
3.2 Convertidor AC/DC puente de diodos monofásico	47
3.3 Convertidor DC/DC elevador multinivel	49
3.4 Convertidor DC/AC VSC	50
3.5 Comparación de Potencia Entrada/Salida	52
3.6 Conclusiones Particulares	54
Capítulo 4. Validación en Tiempo Real	55
4.1 Unidad De Generación	62
4.2 Convertidor AC/DC Puente De Diodos Monofásico	63
4.3 Convertidor DC/DC Elevador Multinivel	64
4.4 Convertidor DC/AC VSC En Modo Inversor	65
4.5 Comparación De Potencia Entrada Salida	67
4.6 Conclusiones Particulares	69
Capítulo 5. Conclusiones y trabajos a futuros	70
5.1 Aportes	70
5.2 Discusión	70
5.3 Conclusiones	70
5.4 Trabajos Futuros	71
Apéndice A	72
Bibliografía	76

Índice de figuras

Figura 1 Diagrama de un Generador LMMHD.....	16
Figura 2 Izquierda. Esquema de un sistema de generación con LMMHD del proyecto Etgar. Derecha. Esquema de un sistema LMMHD sin mezclador ni separador asistido por energía solar adoptado de [14].....	17
Figura 3 Diagrama general del MECS interconectado en redes eléctricas de distribución	19
Figura 4 Comportamiento de las corrientes marinas en Quintana Roo el 18 de junio de 2019 [20]	21
Figura 5 Comportamiento de las corrientes marinas en la zona de Quintana Roo el 31 de Julio de 2021 [20]	22
Figura 6 Caracterización de parámetros de una ola.	23
Figura 7 Generador MHD. a) Diagrama del diseño general; b) Prototipo experimental [28].....	25
Figura 8 Diagrama del transformador elevador y el sistema de conversión AC/DC en arreglo de puente de diodos	28
Figura 9 Diagrama del circuito convertidor Boost DC/DC de un solo nivel o simple	29
Figura 10 Diagrama del circuito convertidor DC/DC Boost multinivel.....	32
Figura 11 Diagrama del convertidor monofásico CD/CA	34
Figura 12 Diagrama del modelo promediado del convertidor monofásico CD/CA	35
Figura 13 Modelo de un VSC trifásico [40].....	37
Figura 14 Modelo promediado de un VSC trifásico	37
Figura 15 Modelo equivalente del sistema VSC en el marco de referencia dq	39
Figura 16 Representación de las ecuaciones 59(izquierda) y 60(derecha) a través de diagrama de bloques.....	41
Figura 17 Modelo de control implementado en el sistema.....	43
Figura 19 Voltaje de salida del Generador.....	45
Figura 20 Voltaje de salida en el devanado secundario del Transformador.....	46
Figura 21 Corriente en el Devanado primario del transformador	47
Figura 22 Corriente en el Devanado secundario del transformador	47
Figura 23 Voltaje de salida del Rectificador AC/DC con puente de diodos.....	48
Figura 24 Corriente de salida del Rectificador AC/DC con puente de diodos.....	48
Figura 25 Voltaje de salida del convertidor CD/CD Boost Multinivel	49
Figura 26 Corriente de salida del convertidor CD/CD Boost Multinivel.....	50
Figura 27 Voltaje trifásico en la impedancia de Interconexión.....	51
Figura 28 Voltaje trifásico en la red	51

Validación en Tiempo Real de un Sistema de Conversión de Energía Marina interconectado en
redes de Distribución

Figura 29 Corriente trifásica en la Red	52
Figura 30 Potencia entregada por el sistema de generadores LMMHD	52
Figura 31 Potencia de salida del Convertidor Boost Multinivel	53
Figura 32 Potencia en la red.....	53
Figura 33 Potencia Reactiva en la red	54
Figura 34 Comparativo de potencias del sistema	54
Figura 35 Adición del Bloque OpComm al programa principal	55
Figura 36 Bloques SM_Master, SC_Console	56
Figura 37 Esquema de señales de salida que se analizaron en tiempo real	56
Figura 38 Pantalla principal del programa RT-LAB®	57
Figura 39 Instrucción Rebuild All.....	58
Figura 40 Instrucción Edit.....	58
Figura 41 información del programa mostrada en la pantalla principal.....	59
Figura 42 Menú Assignment	59
Figura 43 Menú Simulation Tools.....	60
Figura 44 Comandos carga y orden en Matlab	60
Figura 45 Valores de la matriz resultante transpuesta.	61
Figura 46 Comandos para obtener las graficas	61
Figura 47 Voltaje de salida del generador en tiempo real	62
Figura 48 Voltaje de salida del rectificador puente de diodos en tiempo real	63
Figura 49 Voltaje de salida del rectificador Boost en tiempo real	64
Figura 50 Voltaje en la red en tiempo real.....	65
Figura 51 Corriente en la red en tiempo real	66
Figura 52 Voltaje en la impedancia de interconexión en tiempo real	66
Figura 53 Potencia de salida del Convertidor boost Multinivel en tiempo real	67
Figura 54 Potencia en la red en tiempo real	68
Figura 55 Comparación de potencias de entrada y salida en tiempo real.....	68
Figura 56 Etapa de Generación del sistema y bloques de medición (scopes).	72
Figura 57 Bloque de puente de diodos y bloques de medición (scopes, izda.) Circuito de puente de diodos (dcha.).....	72
Figura 58 Bloque de Convertidor boost Multinivel y bloques de medición (scopes)	73
Figura 59 Convertidor Boost Multinivel	73
Figura 60 Convertidor Boost Multinivel	74

Figura 61 Bloque de VSC e interconexión a la red y bloques de medición (scopes).....	74
Figura 62 VSC y sistema de interconexión a la red con bloques de medición (scopes).....	75
Figura 63 Sistema de interconexión a la red y bloque de control con bloques de medición (scopes)	75
Figura 64 Sistema de control y bloques de medición (scopes)	76

Glosario de Términos

MECS:	Marine Energy Conversion System
MHD:	Magnetohidrodinámico
AC:	Corriente Alterna
DC:	Corriente Directa
DREA:	Distributed Renewable Energies Access
OPC:	Columna de Agua Oscilante
AIE:	Agencia Internacional de Energía
LMMHD:	Magnetohidrodinámico con Metal Líquido
CMEMS:	Copernicus Marine Enviroment Monitoring
R_i :	Resistencia interna del generador
R_c :	Resistencia de la carga del generador
D1-D4:	Diodo 1 a Diodo 4.
PWM:	Pulse Width Modulation
D:	Duty Cycle
VSC:	Voltage Source Converter
SPWM:	Sinusoidal Pulse Width Modulation
IGBT:	Insulated Gate Bipolar Transistor
Q1-Q4:	Transistor 1 y 2.
T_p :	Tiempo de Retardo
V_t :	Voltaje en terminales
i_{AC} :	Corriente en AC
P_{DC} :	Potencia del lado de DC
PLL:	Phase Lock Loop
i_{dref}, i_{qre} :	Corriente de referencia en el marco de referencia d y q respectivamente
P_{dref}, Q_{qref} :	Potencia real y reactiva de referencia en el marco de referencia d y q respectivamente

Validación en Tiempo Real de un Sistema de Conversión de Energía Marina interconectado en redes de Distribución

m_d, m_q :	Índice de modulación en el marco de referencia d y q respectivamente
V_{DC} :	Voltaje en Corriente Directa
PI:	Proportional Integral

Capítulo 1

1.1 Introducción

El ser humano desde que ha tenido la necesidad de contar con energía eléctrica para sus hogares, escuelas, trabajos y actividades de la vida cotidiana, ha buscado cualquier recurso para obtenerla; durante muchos años, la generación de energía eléctrica fue gracias a recursos fósiles y el avance en las energías renovables ha crecido paulatinamente desde entonces, lo que hace que siga el crecimiento al daño ecológico [1].

En la actualidad la energía eléctrica es más que indispensable, pero los recursos fósiles para generarla, tales como: el gas natural, el carbón, el petróleo, entre otros, se acabarán. La ciencia y la tecnología han avanzado tanto que se tienen diversas formas de generación con recursos relativamente inagotables, conocidas como energías renovables, como lo son la energía eólica, geotérmica, con utilización de biomasa, solar y mareomotriz; que además no producen emisiones contaminantes que incrementan el efecto invernadero y calentamiento global procurando el cuidado del medio ambiente [1].

1.2 Concepto General de un sistema de energía marina

La energía marina aprovecha todo tipo de cuerpos de agua como los océanos, mares ríos y lagos, todos estos tienen un gran potencial energético, que se manifiesta principalmente en las olas, las mareas, las corrientes y en la diferencia de temperatura entre la superficie y el fondo marino por mencionar algunos ejemplos [2].

El aprovechamiento de la energía marina representa una transición hacia un recurso energético sustentable, sin embargo, las condiciones hostiles del mar, la fuerza del oleaje y de la corrosión marina, además de la instalación de equipo capaz de aprovechar estas condiciones y la necesidad de contar con mecanismos para trasladar la energía a tierra, hacen que esta tecnología requiera de grandes inversiones de dinero y que aún esté, en fase de diseño y planeación salvo ciertas excepciones que han logrado instalar plantas generadoras aprovechando este tipo de energía. [2]

Se han desarrollado diferentes tipos de tecnologías para aprovechar la energía marina algunas de estas son [2]:

- **Undimotriz:** esta tecnología aprovecha el movimiento de las olas y se han desarrollado diferentes sistemas de convertidores para aprovecharlas como:
 - Flotantes (pelamis y boyas flotantes)
 - Anclados a la costa (columna de agua oscilante – OPC)
 - Anclados al fondo marino.
- **Mareomotriz:** en lugares donde se utiliza este tipo de generación se utilizan embalses o diques con turbinas. Estas estructuras se llenan y vacían aprovechando el movimiento natural de ascenso y descenso de las mareas, permitiendo que las turbinas dentro de estas con el paso del agua se muevan de acuerdo con el flujo del agua.

Validación en Tiempo Real de un Sistema de Conversión de Energía Marina interconectado en redes de Distribución

- **Gradiente de salinidad:** la energía que se obtiene a partir del gradiente salino, también se origina en el aprovechamiento de un proceso de transporte de masa a través de membranas, usando aguas con diferente concentración de sal, cuyo resultado final es el equilibrio de las concentraciones.
- **Gradiente térmico:** convierte la energía térmica oceánica gracias a la diferencia de temperaturas entre la superficie calentada por el sol y las temperaturas bajas de las profundidades.
- **Corrientes marinas:** aprovecha la energía cinética contenida en las corrientes marinas, su origen entre otras causas es debido a diferencias de temperatura o de salinidad, a las que se añade la influencia de las mareas. Cuando las corrientes pasan por lugares estrechos se hace un embudo y por lo tanto están tienden a subir su velocidad.

1.3 Estado del arte

El planeta tierra a pesar de su nombre, en su mayor parte, 70%, está cubierto de aguas tanto dulces como saladas, los océanos son cuerpos inmensos de agua y en la actualidad desconocemos más de ellos de lo que sabemos, el fin de estos son los mares, que han sido aprovechados por todos los seres vivos para distintos fines incluido el tema energético.

Según un estudio de la Agencia Internacional de Energía (AIE) mostró que la energía mareomotriz representa la menor parte de la energía renovable en el mundo, con una presencia del 2% debido a que el principal desafío de este tipo de energía es el costo de construcción [3].

En el mundo países como Corea del Sur, Francia, Reino Unido y Canadá fueron de los primeros en apostar por esta energía mientras que otros como México, Argentina y Estados Unidos se encuentran desarrollando proyectos y estudios para implementarla en su sistema energético.

Existen muy pocas centrales de energía mareomotriz a gran escala, por ejemplo, Corea del Sur cuenta con la planta Sihwa la más grande del mundo con capacidad de 552.7 GWh/Año y Francia con la planta La Rance que tiene una capacidad de producción aproximada de 540 GWh/Año [4]. Canadá tiene la planta Annapolis Royal con capacidad de 30 GWh/Año. Gales cuenta con la planta Tidal Lagoon de 320 MW [5] mientras que Escocia genera energía mareomotriz con la planta MeyGen que al finalizar tendrá una capacidad instalada de 398 MW [6].

En México se han realizado diversos análisis para construir centrales de este tipo en el país; existen dos zonas clave donde puede ser viable; el Mar Caribe y el Golfo de California [7] donde se han hecho estudios con resultados positivos, pero se necesitan estudios de impacto ambiental y factibilidad económica ya que representaría una inversión fuerte y poco viable. Sin limitarse a esta zona la empresa Eco Wave Power México tenía en desarrollo una planta con tecnología undimotriz en Manzanillo, Colima, pero debido a la nueva política energética se detuvo el proyecto en 2020 [8] desde entonces no ha habido nuevas propuestas de esta tecnología dentro del territorio marino nacional.

Validación en Tiempo Real de un Sistema de Conversión de Energía Marina interconectado en redes de Distribución

Existen ventajas de utilizar los recursos marinos para generar energía eléctrica, por ejemplo, como se mencionó previamente aprovecha la energía de los océanos y mares que tienen un gran potencial energético, también se mencionó que no produce gases de efecto invernadero evitando contribuir al efecto de cambio climático y calentamiento global; respecto a otro tipo de contaminaciones, las plantas generadoras se deben de adaptar a la zona y características del recurso marino por lo que en cuanto a contaminación visual, de acuerdo al tipo de tecnología de generación que se utilice y que se abordará a detalle más adelante, no representan una gran molestia como por ejemplo las turbinas de la energía eólica además si se habla de contaminación acústica, esta no existe debido a que los mares, ríos y océanos tienen sonidos característicos que ocultan el ruido que pueden llegar a tener los elementos de generación eléctrica, siendo una gran ventaja sobre muchos tipos de energías.

Pero también, esta energía tiene ciertos inconvenientes considerables; uno de ellos puede ser un impacto visual y estructural sobre el paisaje costero afectando otras actividades de la zona, sólo es viable en zonas con alta intensidad de olas y corrientes, representa una alta inversión económica ya que es más cara incluso que las que se encuentran en tierra, y la más preocupante es, los efectos que puede tener sobre la vida vegetal y animal. Las turbinas o elementos generadores pueden perjudicar el hábitat de los animales marinos y alterar su estilo de vida como sus patrones de migración y reproducción. Sin embargo, se pueden construir nuevas plantas mareomotrices lejos de las zonas habitadas por flora y fauna marina o lejos de las reservas marinas; una solución a esto es tener generadores de corriente de marea que son más pequeños y con menos impacto ambiental que una planta o tener un generador magnetohidrodinámico sobre las olas aprovechando el movimiento de estas [9, 10].

La energía mareomotriz tiene diversas ramas en cuanto al equipo y tecnología de generación que utiliza, en su mayoría se asemeja a muchos sistemas energéticos que utilizan turbinas, pero uno completamente diferente es la que utiliza un generador magnetohidrodinámico que, a través de los años se ha renovado y evolucionado el interés por este debido a las diversas aplicaciones que tiene, además de utilizarse en procesos de generación de energía marina. Dentro de las que se pueden encontrar:

Sistemas de conversión de energía para plataformas de recarga submarina de energía undimotriz utilizando generadores magnetohidrodinámicos (MHD, por sus siglas en inglés) para suministrar a vehículos submarinos autónomos. Un diagrama del generador utilizado en esta aplicación se muestra en la Figura 1, este se compone de una varilla de empuje y pistón, una unidad hidráulica, el metal líquido, un canal de generación, imanes y un pistón [11].

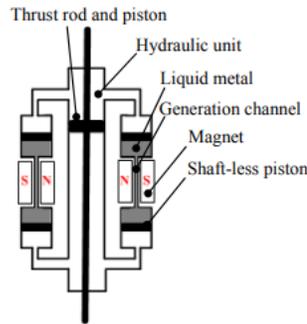


Figura 1 Diagrama de un Generador LMMHD

La salida de voltaje de cada generador es muy baja como para convertirla a través de dispositivos de electrónica de potencia por lo que es necesario diseñar un dispositivo donde varios generadores se puedan conectar en serie para incrementar el valor de salida de voltaje [12].

Una aplicación similar para el generador MHD es su uso en vehículos tanto terrestres, marítimos y aéreos funcionando como un generador a bordo autónomo alimentado de agua, este se compone de tres partes; un electrolizador de agua que produce un gas con una gran cantidad de iones y electrones libres, un acelerador de gas y un dispositivo MHD encargado de recolectar los iones y electrones para generar una corriente eléctrica. Una desventaja de esta aplicación es que se debe tener ya sea un depósito de agua dentro del vehículo o tener agua de alguna fuente externa para poder ponerlo en marcha [13].

Este tipo de tecnología se ha utilizado en el programa de plantas generadoras Etgar, que utiliza un generador MHD con un líquido metálico circulando en su interior, este consiste en dos tubos verticales, uno ascendente y uno descendente conectado en la parte inferior con un tubo cruzado y un dispositivo separador que los une en la parte superior, un mezclador de líquido-gas se encuentra en el fondo del tubo ascendente y el generador MHD monofásico se encuentra en la parte baja del tubo descendente. Su funcionamiento a grandes rasgos consiste en ingresar vapor o gas y el metal líquido a altas temperaturas al mezclador creando un fluido de dos elementos, mientras este se direcciona al separador pasa a un estado gaseoso que se somete a una expansión debido al diferencial de presión entre el mezclador y el separador; debido a la diferencia de densidad entre el metal líquido y el fluido, el metal líquido regresa al tubo descendente mientras que el otro se va por el tubo ascendente, por estos dos factores el metal líquido es capaz de circular por todo el sistema cruzando la zona del generador MHD donde se genera un potencial eléctrico del que se extrae energía [14].

Una adaptación de la aplicación anterior es un generador Magnetohidrodinámico con Metal Líquido (LMMHD, por sus siglas en inglés) asistido por energía solar pero este modelo no tiene ni mezclador ni separador. Se coloca un colector solar en lugar del mezclador donde el metal líquido se mezcla con burbujas de vapor para calentarlo y que también siga el flujo del diseño del dispositivo y al pasar

por el generador MHD genere potencial eléctrico; la energía que este sistema genera se utiliza para calefacción industrial o doméstica. [15]

Estos dos modelos se muestran a continuación en la Figura 2:

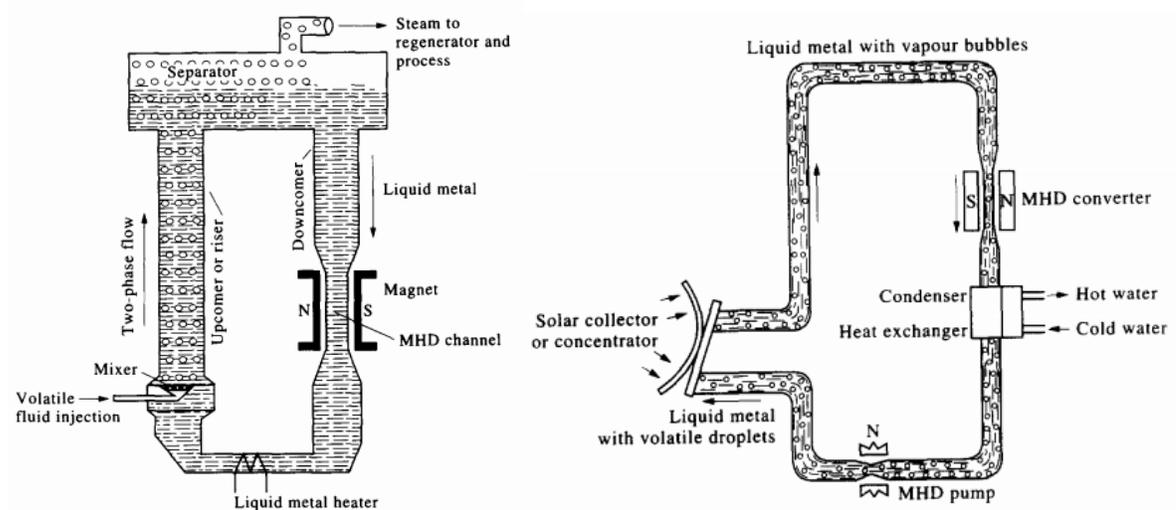


Figura 2 Izquierda. Esquema de un sistema de generación con LMMHD del proyecto Etgar. Derecha. Esquema de un sistema LMMHD sin mezclador ni separador asistido por energía solar adoptado de [14]

Más aplicaciones de este tipo de generadores pueden encontrarse en sistemas de conversión de energía con LMMHD para aplicaciones navales, donde se realizan experimentos para analizar el comportamiento de la turbulencia del metal líquido de estos generadores en fuertes campos magnéticos para determinar la capacidad de generación del metal para necesidades energéticas futuras de la Marina [16].

Existe también una investigación de un generador MHD de varios canales con tubo de descarga, donde se trató como tema principal la capacidad de conversión de energía magnetohidrodinámica en pruebas de ejecución corta y explicar los datos teóricos obtenidos, los resultados que ha alcanzado han sido de 750 kW [17] pero se subió ese rango hasta los 1000 kW [18].

En esta tesis se presenta un acceso de energía renovable distribuida (DREA, por sus siglas en inglés) mediante el modelado, diseño, análisis, simulación y validación de un sistema de conversión de energía marina (MECS) basado en un arreglo de generadores MHD interconectados a redes de distribución eléctrica. Este trabajo propone una estructura MECS, compuesta por: arreglo de generadores MHD, convertidores de electrónica de potencia AC/DC, DC/DC y DC/AC, incluyendo un control robusto para transferir la potencia generada sin variaciones de voltaje a un bus infinito AC. Para verificar la funcionalidad de la metodología propuesta, se simulan las características técnicas a través de Matlab-Simulink® (MATLAB r2018a, MathWorks, Natick, MA, USA) y se validan en tiempo real utilizando el simulador OPAL-RT Technologies® (Montreal, QC, Canadá). Los resultados muestran un sistema robusto y eficaz que integra una potencia total de 390 kW desde el MECS

hacia las redes eléctricas de distribución, mediante los dispositivos de electrónica de potencia que componen la estructura de estos.

1.4 Planteamiento del problema

A pesar de la preocupante situación climática y el esfuerzo que se está haciendo mundialmente para hacer una transición a energías limpias, como se mencionó, hay pocas plantas de generación marina de cualquier tipo en el mundo por los retos y costos que implica a pesar de su potencial, con varias propuestas en puerta y algunas otras más canceladas, es necesario seguir proponiendo nuevas ideas y tecnologías para aprovechar este tipo de generación de energía.

Tomando en cuenta que México cuenta con una extensión de 11,122 km [19] de litoral y además hay registros de iniciativas de proyectos cancelados, muestra el potencial que puede tener el país si decide aprovechar este tipo de energía, pero debido a las altas inversiones que representa junto con una mala organización y enfoque en cuanto a la política energética del país, la energía marina ha sido olvidada y se ha enfocado en energías no renovables marcando un incremento en niveles de contaminación e impacto ambiental.

1.5 Hipótesis

Conociendo el panorama internacional y nacional respecto a esta energía, las aplicaciones en las que se puede usar, sus ventajas y desventajas y la inversión costo beneficio que puede llegar a presentar en el tema ambiental es importante proponer nuevas ideas y/o tecnologías que puedan impulsar el desarrollo de la energía marina, puntualmente en cómo se puede hacer la conversión de alguno de los fenómenos que se presentan en los océanos en energía eléctrica, por ejemplo, el movimiento oscilatorio de las olas a través de una simulación de un generador magnetohidrodinámico con metal líquido y su interconexión a la red a través de elementos de electrónica de potencia innovando las propuestas clásicas de generación marina.

1.6 Propuesta de investigación

En este trabajo de investigación se propone el desarrollo de una estrategia de control para un MECS basado en un arreglo de generadores MHD interconectado a redes de distribución eléctrica trifásicas, que permita el correcto funcionamiento del MECS sin variaciones de voltaje.

Específicamente, se propone una estructura MECS (Figura 3) compuesta por un arreglo de generadores MHD, convertidores de electrónica de potencia AC/DC, DC/DC y DC/AC y una red de distribución (bus infinito trifásico de CA), que mediante un control robusto transfiere la potencia producida, sin variaciones de voltaje.

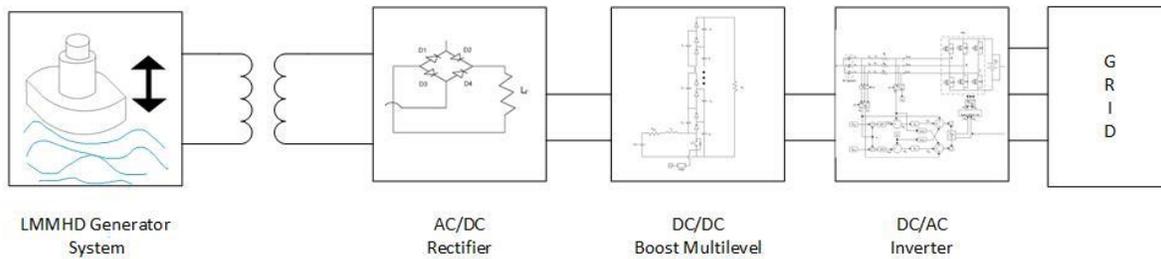


Figura 3 Diagrama general del MECS interconectado en redes eléctricas de distribución

1.7 Objetivo General

Proponer, analizar, modelar, diseñar e interconectar convertidores electrónicos de potencia para contribuir al desarrollo de una estrategia de control aplicable a un MECS interconectado a la red de distribución, que permita su operación sin variaciones de voltaje.

1.7.1 Objetivos Específicos

- Validar un control de lazo cerrado para las topologías de convertidores de electrónica de potencia, necesarias en la interconexión del MECS en redes eléctricas de distribución.
- Simular las ventajas de la estrategia de control propuesta en el software Matlab-Simulink® del MECS en tres etapas de conversión, transfiriendo una potencia nominal de 390kW a la red de distribución en un nivel de voltaje de 5500 [V] pico a pico.
- Validar los resultados en tiempo real mediante el simulador Opal-RT Technologies®.
- Verificar la funcionalidad y robustez de la metodología propuesta al interconectar los sistemas sin variaciones de voltaje.

1.8 Justificación

El estudio de una técnica de generación eléctrica renovable diferente a las más utilizadas (tales como: eólica y solar fotovoltaica) abre un abanico de posibilidades al futuro; actualmente la energía eléctrica aprovechada de mares y océanos no es tan comercial debido a los retos e impactos ambientales que presenta, pero opciones como la utilización de generadores MHD y sus diferentes variantes son una nueva oportunidad para profundizar en la utilización de los recursos marinos para generación eléctrica a gran escala.

Cada nueva tecnología representa un reto, no sólo en su implementación física debido a los desafíos que hay en cuanto a las energías renovables y su intermitencia, también en entender cómo funciona, su comportamiento, respuesta y diseño. Con la implementación de la estrategia de control desarrollada en el MECS, se puede transferir de forma eficiente la energía proveniente de los generadores MHD debido a su movimiento característico oscilatorio a redes trifásicas de distribución, sin variaciones de voltaje. Lo anterior adquiere una especial relevancia en un escenario en donde exista una mayor penetración de la generación distribuida.

1.9 Metodología

La metodología implementada consta de las siguientes partes: Análisis del estado del arte, modelado, simulación y validación en tiempo real. Éstas se realizan de forma secuencial.

En el análisis de estado del arte se lleva a cabo una consulta de la literatura especializada enfocada al desarrollo de estrategias de control aplicadas en los MECS, específicamente, basados en generadores MHD. Esto con la finalidad de conocer las tendencias e innovaciones recientes y comparar las ventajas y desventajas de las estrategias encontradas con la propuesta. Así mismo, se consultan diversas fuentes de información enfocadas en el diseño de los convertidores utilizados en las etapas de conversión.

En el modelado se realiza el diseño del MECS basado generadores MHD con base en la teoría recabada.

En un inicio, mediante una serie de simulaciones en el software Matlab-Simulink®, se evalúa de forma independiente el comportamiento de cada uno de los dispositivos de electrónica de potencia, es decir, el convertidor CA/CD rectificador monofásico, el CD/CD boost multinivel y el CD/CA VSC trifásico en el que se implementa la estrategia de control propuesta. Estos circuitos se acoplan una vez que los tres logran funcionar correctamente individualmente.

1.10 Organización de la tesis

Este trabajo se divide en 5 capítulos cada uno enfocado en diferentes etapas de la realización de esta tesis que son:

Capítulo 2: en este capítulo se realiza el modelado matemático del generador MHD y de las etapas de potencia necesarias para hacer la conexión con la red. Además de introducir información sobre datos de corrientes marinas en México útiles para entender el panorama nacional sobre este tipo de energía.

Capítulo 3: en este capítulo se describen los resultados de la simulación en Matlab-Simulink® de cada una de las etapas que conforman el sistema analizado.

Capítulo 4: este capítulo se devota a la metodología que se siguió para realizar el proceso de validación en tiempo real de este sistema de generación propuesto y sus principales resultados.

Capítulo 5: en este capítulo se expresan las conclusiones obtenidas al analizar los resultados de las simulaciones realizadas, también las aportaciones que representa la elaboración de esta tesis, además de algunas recomendaciones para trabajos futuros que este escrito pueda servir como inspiración y base para más investigaciones.

Capítulo 2. Modelado del sistema de conversión de energía marina

2.1 Datos de corriente marina en una localidad en la península de Yucatán

Con apoyo de la plataforma Globcurrent se puede obtener las velocidades de las corrientes marinas en puntos específicos del mundo; en México hay un análisis de datos puntual en la zona de Quintana Roo del cual se puede calcular la velocidad promedio de las corrientes marinas; esta plataforma tiene datos corrientes marinas que abarcan hasta 15 metros de profundidad y la dirección que lleva la corriente es hacia el oeste.

Los datos fueron registrados en un lapso de varios meses específicamente del 1 de enero de 2018 hasta el 18 de junio de 2019 cuya imagen de la corriente existente ese día se muestra en la Figura 4 [20].

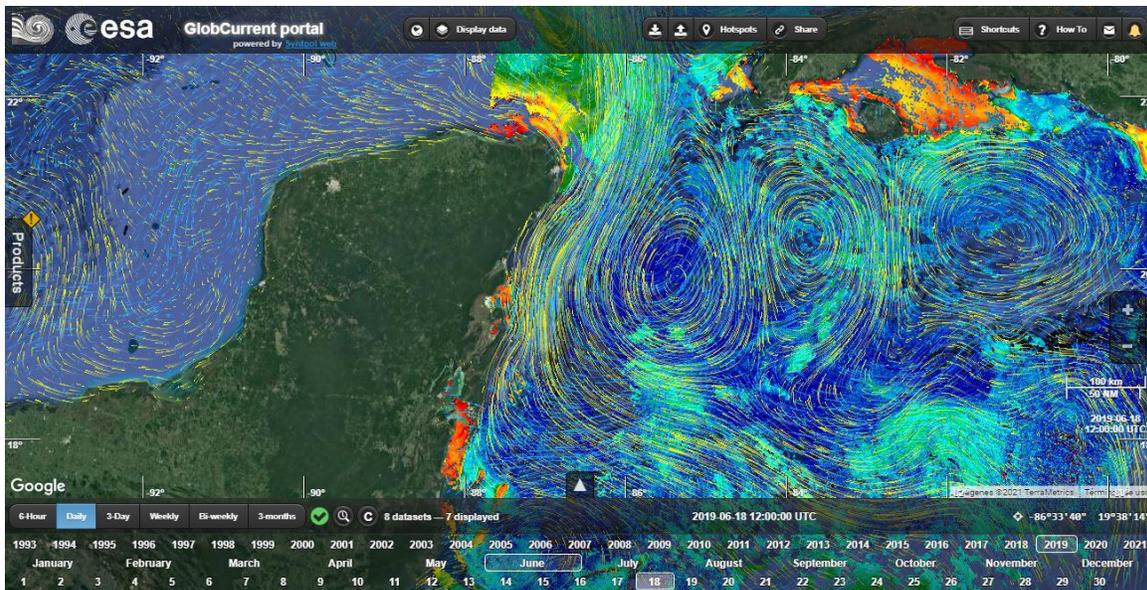


Figura 4 Comportamiento de las corrientes marinas en Quintana Roo el 18 de junio de 2019 [20]

La velocidad anual calculada de esta zona de las corrientes provenientes del mar Caribe es de 0.272 m/s y por esta razón ya existe tecnología de generación que utiliza turbinas SeaGen-S que podrían generar hasta 2391.19 [21].

En esta misma plataforma se puede observar que la lectura más recientes hasta este momento es del 31 de julio de 2021 que se aprecia en la Figura 5, naturalmente esta base de datos se actualiza diario por lo tanto la lectura más reciente también lo hará.

Validación en Tiempo Real de un Sistema de Conversión de Energía Marina interconectado en redes de Distribución

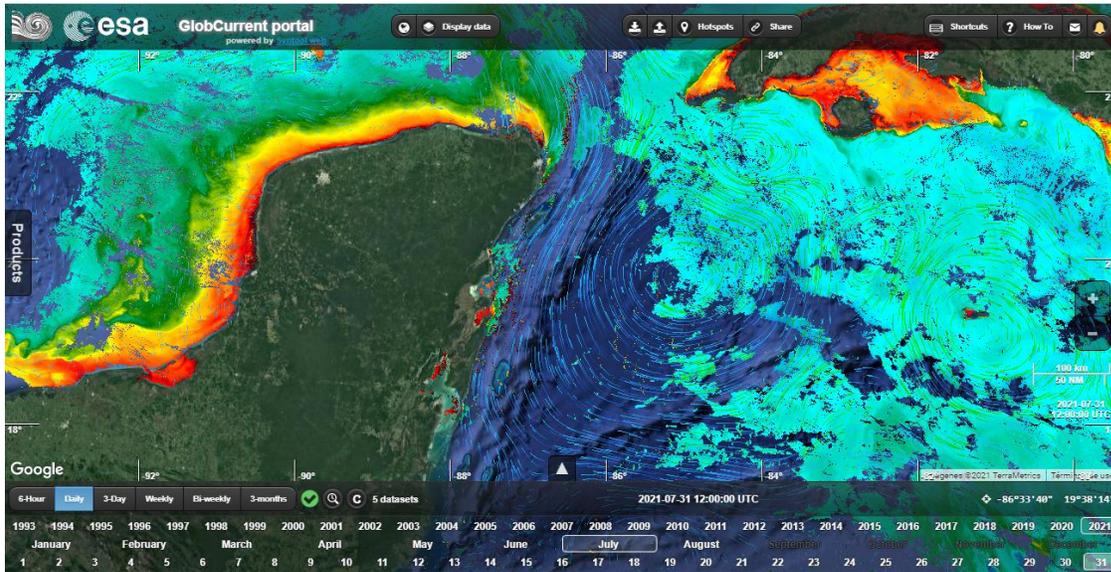


Figura 5 Comportamiento de las corrientes marinas en la zona de Quintana Roo el 31 de Julio de 2021 [20]

En las figuras previas los datos de las corrientes no sólo son proporcionados por Globcurrent también se apoyan de copernicus marine environment monitoring service, (CMEMS), un programa encargado de proporcionar servicios oceanográficos para la seguridad marítima, el medio ambiente costero y marino, el pronóstico del tiempo y el clima a los usuarios de recursos marinos a través de observación satelital o en sitio de forma gratuita [22]. Las manchas de colores en las Figuras 4 y 5 representan las temperaturas siendo el azul claro bajas temperaturas y en rojo las mas altas, dando un panorama más amplio de la información que se puede encontrar en este sitio.

En los océanos y mares existen turbulencias; la turbulencia es el movimiento desordenado de un fluido, sus moléculas no siguen trayectorias paralelas, sino que forman torbellinos. Está presente en una serie de eventos naturales como corrientes oceánicas y atmosféricas, tiene efectos en el clima, en los niveles de contaminación, en el cambio climático y en el diseño de dispositivos de propulsión y turbinas de energía eólica [23].

La turbulencia en la capa superior del océano es un procesos clave en la interacción entre el océano y la atmósfera, especialmente en la transferencia de energía. Al entender mejor como se originan las turbulencias en la capa superficial del mar, incluyendo el efecto de las olas, se podrá contar con los elementos necesarios para conocer la energía cinética turbulenta en ambos lados de la superficie. De los principales mecanismos que generan turbulencia en el océano existen el corte vertical de las corrientes superficiales provocadas por viento y al rompimiento del oleaje, sin embargo, también es posible que las olas que no rompen generan turbulencia en la capa superior del mar [24].

Un ejemplo de este fenomeno en las corrientes estudiadas cerca de la zona de Quinta Roo es el que se ubica en la parte norte de Isla Mujeres ya que en ocasiones se generan vórtices de corta duración con intensidades medias a bajas (50 cm/s) [25]

afectando la velocidad de las corrientes provocando un cambio en el potencial de generación eléctrica [21].

Las olas se pueden definir como todo tipo de oscilación en la superficie de agua que sea periódica. Estas son originadas por diferentes causas como el viento, las fuerzas de atracción gravitacionales, los maremotos, las tormentas, por ejemplo [26].

Las olas se caracterizan por su longitud de onda L , altura de onda H , y su periodo T siendo este el tiempo en segundos en que una ola recorre toda su longitud como se muestra en la Figura 6 [26].



Figura 6 Caracterización de parámetros de una ola.

En un oleaje idealizado, en el que la altura y el periodo de las olas es constante la energía de las olas se puede calcular utilizando la siguiente ecuación [27]:

$$P = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} \quad (1)$$

Con:

$P \rightarrow$ Potencia (W)

$\rho \rightarrow$ densidad del agua salada de mar (1.025 kg/m^3)

Sin embargo, el estado típico de las olas posee alturas, periodos y direcciones diferentes, por lo que el potencial de las olas puede calcularse con [27]:

$$P = kH^2T \quad (2)$$

Donde k es una constante que se representa como:

$$k = \frac{\rho g^2}{64\pi} \quad (3)$$

2.2 Unidad de Generación LMMHD

El generador eléctrico magnetohidrodinámico de metal líquido, LMMHD, parte de la rama de la física del mismo nombre que combina los temas de electromagnetismo Validación en Tiempo Real de un Sistema de Conversión de Energía Marina interconectado en redes de Distribución

y dinámica de fluidos con el objetivo de estudiar el comportamiento de fluidos eléctricamente conductores. Este generador es un sistema que convierte la energía cinética oscilatoria de un fluido conductor en energía eléctrica a través de la interacción con un campo magnético.

Un generador MHD común consta de un conducto de sección rectangular sumergido en un campo magnético estático transversal a un par de paredes aislantes. Las paredes paralelas al campo aplicado son conductores eléctricos (electrodos). Cuando un fluido conductor fluye dentro del conducto, su movimiento al estar en contacto con el campo magnético induce una corriente eléctrica perpendicular tanto al fluido en movimiento y el campo aplicado que, se puede extraer a través de los electrodos si estos, están conectados a una carga externa. Si el movimiento del fluido es unidireccional, se induce una corriente continua mientras, si el fluido se mueve en movimiento oscilatorio, se genera una corriente alterna. Por lo que, para una aplicación de generación marina, la señal de salida será una corriente alterna [28].

Para esta aplicación en particular, se realizó un modelo de generador MHD usando transductores de forma rectangular; se consideró un flujo completamente desarrollado, se despreciaron los efectos de borde y se usó la aproximación de campo magnético inducido despreciable. El generador fue estudiado para la condición de máxima entrega de potencia eléctrica disponible en una carga eléctrica resistiva, cuando la resistencia de carga es igual a la resistencia interna del generador. También se calculó la resistencia interna real, la cual, depende de parámetros geométricos y de la intensidad del campo magnético. Además, se calculó también, la velocidad del fluido, corriente eléctrica, voltaje inducido, potencia eléctrica, de flujo, de disipación viscosa, por efecto Joule [29]. Con los resultados del modelado del generador MHD rectangular se diseñó y construyó un prototipo con un sistema impulsor, un ducto de oscilación, un transductor MHD y una zona de medición.

Una descripción del generador se puede dividir en tres secciones, el sistema de impulso, el conducto de oscilación y el sistema de medición. La etapa de impulso genera un movimiento de oscilación que se transfiere al metal líquido, galinstan, simulando el movimiento de las olas; en el ducto de oscilación se encuentra el metal líquido que forma parte del generador MHD que transforma las oscilaciones en electricidad debido al efecto explicado previamente. El sistema de medición tiene el propósito de analizar cuantitativamente la dinámica del metal líquido, así como la caracterización eléctrica del equipo. Además, existen dispositivos adicionales que incluyen una terminal *drain* y un sistema de nivelación [30].

En la Figura 7, se presenta un diagrama del generador LMMHD de donde se basó la construcción del modelo real.

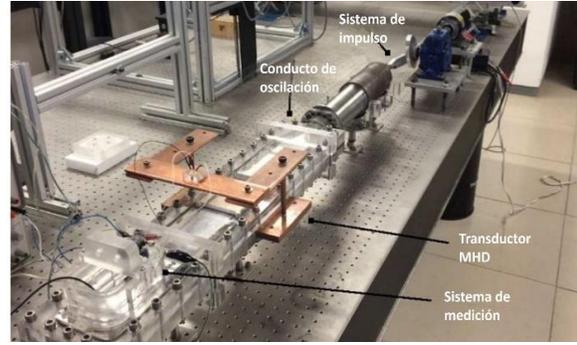
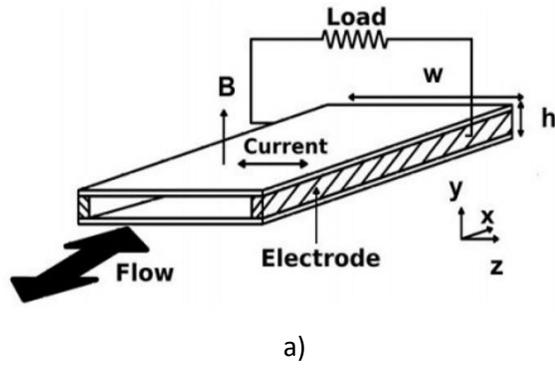


Figura 7 Generador MHD. a) Diagrama del diseño general; b) Prototipo experimental [28].

Este generador se describe a través de las ecuaciones que se enlistan a continuación, estas se basan en las leyes de Gauss de campo eléctrico y de campo magnético, ley de Faraday, de Ampere y de Ohm por mencionar algunas [30].

La corriente en el generador está dada por:

$$I_0 = (2D\sigma E_{z0} + 2HaU_m\sqrt{\sigma\mu})L \quad (4)$$

Con

- $L \rightarrow$ Unidad de Longitud
- $I_0 \rightarrow$ Corriente total
- $E_{z0} \rightarrow$ Campo Eléctrico
- $D \rightarrow$ Mitad de distancia entre placas aislantes

Sabiendo que, el número de Harman se define como:

$$Ha = B_0 D \sqrt{\frac{\sigma}{\mu}} \quad (5)$$

- $B_0 \rightarrow$ Campo Magnético
- $\sigma \rightarrow$ Conductividad eléctrica del fluido
- $\mu \rightarrow$ Viscosidad dinámica
- $U_m \rightarrow$ Velocidad promedio

El voltaje entre los electrodos está dado por:

$$\Phi_{T0} = -2bE_{z0} \quad (6)$$

Con

- $\Phi_{T0} \rightarrow$ Voltaje entre los electrodos
- $b \rightarrow$ Distancia entre electrodos
- $E_{z0} \rightarrow$ Campo Eléctrico

Tomando E_{z0} de la ecuación (1), el voltaje se representa como:

Validación en Tiempo Real de un Sistema de Conversión de Energía Marina interconectado en redes de Distribución

$$\Phi_{T0} = \left(-\frac{bI_0}{LD\sigma} + \frac{2HaU_m b \sqrt{\frac{\mu}{\sigma}}}{D} \right) \quad (7)$$

El voltaje en circuito abierto es:

$$\Phi_{00c} = \frac{2HaU_m b \sqrt{\frac{\mu}{\sigma}}}{D} \quad (8)$$

Si el voltaje de salida es 0 podemos obtener las corrientes de corto circuito, que son:

$$I_{0sc} = 2HaU_m L \sqrt{\mu\sigma} \quad (9)$$

La resistencia interna del generador se calcula a través de:

$$R_i = \frac{\phi_{00c}}{I_{0sc}} = \frac{b}{DL\sigma} \quad (10)$$

Aplicando ley de voltaje de Kirchhoff

$$\Phi_{00c} - I_0(R_i + R_c) = 0 \quad (11)$$

Con:

$$R_c \rightarrow \text{Resistencia de carga (Load)}$$

De la ecuación (8) se puede deducir que:

$$I_0 = \frac{2HaU_m b \sqrt{\frac{\mu}{\sigma}}}{DR_i} (1 - K) \quad (12)$$

$$E_{z0} = - \frac{2HaU_m b \sqrt{\frac{\mu}{\sigma}}}{D} K \quad (13)$$

$$K = \frac{1}{1 + \frac{R_i}{R_c}} \quad (14)$$

Con K como el factor de carga. Que expresa una comparación entre la resistencia interna del generador R_i , y la resistencia de la carga R_c .

Validación en Tiempo Real de un Sistema de Conversión de Energía Marina interconectado en redes de Distribución

Por lo que las ecuaciones finales que describen el voltaje y la corriente del generador son [30]:

$$V = 2bB_0UmK \quad (15)$$

$$I = 2DB_0UmL\sigma(1 - K) \quad (16)$$

Este generador tuvo pruebas experimentales en laboratorio al que se le aplicó una simulación de olas marinas, con esto se obtuvo una salida de voltaje de 6 [V] en CA monofásico. Se espera que el modelo implementado en campo consista en 10 generadores LMMHD que produzcan 60 [V] en CA monofásico.

2.3 Convertidor AC/DC puente de diodos monofásico

Un convertidor AC/DC es un dispositivo cuya función es convertir una señal de entrada AC a una señal de salida de DC; existen diversos medios para hacer este proceso, pero para esta aplicación se utilizará el rectificador de puente de diodos completo monofásico que se compone de un arreglo de cuatro diodos y una carga de tipo resistiva. El análisis de este convertidor se subdivide en dos partes, el análisis del semiciclo positivo de la señal de entrada y el análisis del semiciclo negativo. En el semiciclo positivo, la señal sinusoidal de entrada prende los diodos D2 y D3 debido a la polarización de estos, cerrando el circuito haciendo circular corriente hacia la carga; debido a la polarización inversa de los diodos D1 y D4 estos se mantienen apagadas y con el circuito abierto por lo que no hay circulación de corriente. En el semiciclo negativo debido al cambio de polaridad de la onda, también debe de haber un cambio de encendido en los diodos, ahora se prenden D1 y D4 que cierran el circuito permitiendo el flujo de corriente a la carga mientras que D2 y D3 están abiertos. Este proceso se repite tantas veces como dure la señal de entrada y debido a que el flujo de corriente en la carga siempre es el mismo, la tensión tendrá la misma polaridad completando el proceso de rectificación. Su comportamiento de salida se describe a través de las siguientes ecuaciones [31, 32]

$$V_o = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_p \text{sen } \omega t \, d(\omega t) = \frac{2V_p}{\pi} \quad (17)$$

Con:

$$V_o = \text{Voltaje de salida}; V_p = \text{Voltaje pico}$$

$$I_o = \frac{V_o}{L_r} = \frac{2V_p}{\pi L_r} \quad (18)$$

Con:

Validación en Tiempo Real de un Sistema de Conversión de Energía Marina interconectado en redes de Distribución

$I_o =$ Corriente de salida; $L_r =$ Impedancia de carga resistiva

El arreglo de este modelo necesita un transformador elevador antes de hacer la conversión AC/DC, ya que en etapas posteriores para lograr llegar a los niveles normados de interconexión a la red con la salida de 60 [V] es complicado. Si se desea trabajar con la señal de salida original del generador se necesitarían más etapas de elevación de las que ya se tienen por lo que un transformador que suba el nivel de voltaje diez veces, de 60[V] a 600 [V] es la mejor opción en un prototipo a escala. Este arreglo se muestra en la Figura 8.

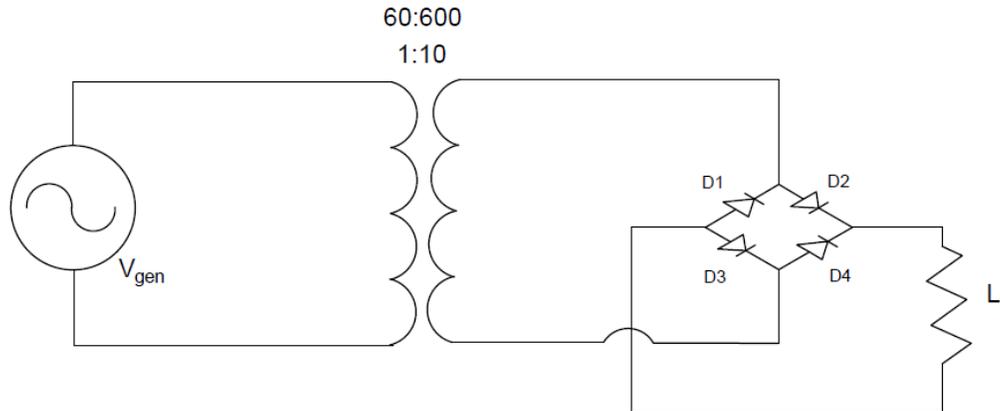


Figura 8 Diagrama del transformador elevador y el sistema de conversión AC/DC en arreglo de puente de diodos

2.4 Convertidor DC-DC elevador boost multinivel

Este convertidor combina el convertidor boost y la función de conmutación de los capacitores proporcionando diferentes valores en la salida de voltaje utilizando un solo interruptor, un inductor, diodos y capacitores, además, la salida de voltaje puede ser controlada a través de PWM.

Se aplica como enlace de DC en aplicaciones donde se requiere de varios niveles de voltaje controlado con un flujo unidireccional de corriente; las ventajas del uso de esta configuración son: una corriente continua de entrada, una amplia relación de conversión sin tener un ciclo de trabajo extremo además de que no es necesario utilizar un transformador lo que permite una alta frecuencia de conmutación.

En convertidores boost ideales la capacidad máxima a la que pueden convertir sería infinita, pero en este caso ese nivel de conversión se limita debido a las resistencias parásitas de los componentes pasivos dados por la resistencia equivalente en serie del convertidor que se compone de la resistencia y el inductor. Puede ser construido de manera modular, pero también se le pueden adicionar niveles sin cambiar la estructura principal del circuito; cada nivel consta de un diodo y un capacitor, por cada nivel que se tiene la salida del voltaje se duplica.

Un convertidor DC-DC boost simple, de un solo módulo, se compone de un inductor, un diodo, un capacitor, una carga resistiva y un interruptor ideal que es controlado a través de una modulación de ancho de pulso (PWM, por sus siglas en Validación en Tiempo Real de un Sistema de Conversión de Energía Marina interconectado en redes de Distribución

inglés), el ciclo de trabajo se especifica en la entrada D; este debe ser un valor entre 0 y 1 que determinará el porcentaje del periodo del pulso en el que está activa la señal de salida. Esta estructura se muestra en la Figura 9.

La entrada D es una constante de DC y para esta aplicación se toma como la señal moduladora, la señal portadora es una señal triangular interna que presenta el bloque de PWM [33].

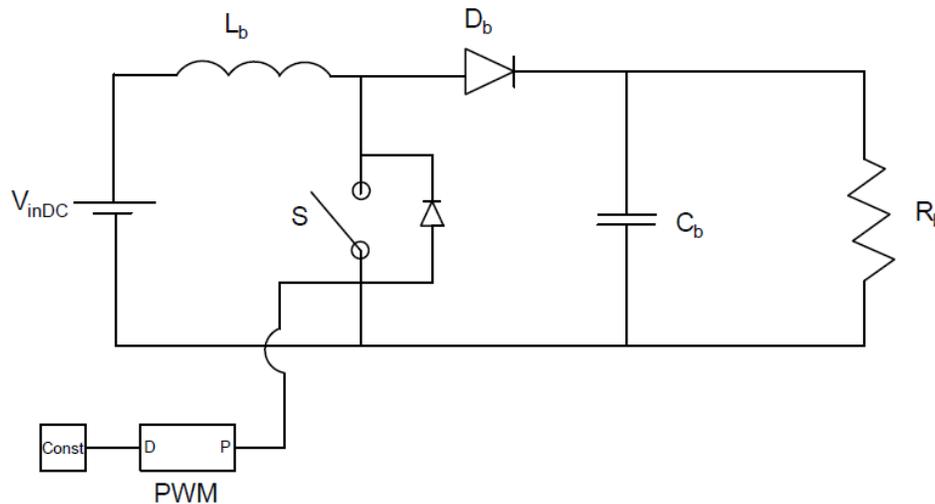


Figura 9 Diagrama del circuito convertidor Boost DC/DC de un solo nivel o simple

Para su diseño y comportamiento; se requiere de varias ecuaciones; se debe calcular la variable “ k ” de conmutación que se representa a través de [34]:

$$k = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} \quad (19)$$

Con:

$$V_{in} \rightarrow \text{Voltaje de entrada} \quad V_{out} \rightarrow \text{Voltaje de salida}$$

Para los intervalos de conmutación del interruptor, el ciclo de trabajo del PWM se define la ecuación:

$$t1 = kT \quad (20)$$

$$t1 \rightarrow \text{Tiempo encendido}$$

Con:

$$T = \frac{1}{f} \quad (21)$$

$$f \rightarrow \text{Frecuencia}$$

Cuando se encuentra apagado se describe [35]:

$$t_2 \rightarrow (1 - k)T \quad (22)$$

$t_2 \rightarrow$ Tiempo apagado

La caracterización de este circuito se describe a través de las siguientes ecuaciones:

Para el voltaje en el inductor:

$$V_L = D(V_{in}) - (1 - D)(V_{in} - V_c) \quad (23)$$

Con:

$V_c \rightarrow$ Voltaje en el capacitor

$D \rightarrow$ Duty cycle (Ciclo de trabajo)

$V_{in} \rightarrow$ Voltaje de entrada

De la ecuación (20) se puede obtener la relación de voltajes, de entrada y del capacitor siendo:

$$\frac{V_c}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D} \quad (24)$$

La corriente del inductor se puede obtener con las potencias de entrada y salida:

$$V_{in}I_{L_b} = V_c I_{out} = V_c \left(\frac{V_c}{R_b} \right) \quad (25)$$

Con:

$I_{L_b} \rightarrow$ Corriente en la inductancia del boost, $R_b \rightarrow$ Resistencia del Boost,

$I_{out} \rightarrow$ Corriente de salida.

$$I_{L_b} = \frac{V_c}{V_{in}} \frac{V_c}{R_b} \quad (26)$$

Sustituyendo (21) en (23) la corriente del inductor se puede expresar como:

$$I_{L_b} = \frac{V_c}{(1 - D)R_b} \quad (27)$$

Este comportamiento es ideal; a la inductancia del boost se le deben considerar ciertas perdidas en la resistencia en serie equivalente R_{esrL} que aparecen en el convertidor multinivel utilizado, para un boost modular su comportamiento se describe a continuación

$$V_{Lb} = D(V_{in} - I_L R_b) + (1 - D)(V_{in} - V_c - I_{Lb} R_{esrL}) \quad (28)$$

Simplificando la ecuación anterior:

$$V_{in} = (1 - D)V_c + I_{Lb} R_{esrL} \quad (29)$$

Tomando la ecuación (24) sustituyendo en (26) tomando en cuenta las pérdidas de del inductor se puede aproximar su comportamiento con la ecuación obtenida a partir de [36]:

$$V_{in} = (1 - D)V_c + \frac{V_c}{(1 - D)R_b} R_{esrL} \quad (30)$$

$$V_{in} = V_c \left[(1 - D) + \frac{R_{esrL}}{(1 - D)R_b} \right] \quad (31)$$

$$\frac{V_c}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D + \frac{R_{esrL}}{(1 - D)R_b}} \quad (32)$$

El boost multinivel se rige por este comportamiento, pero dependiendo de la cantidad de niveles con las que se diseñe es el valor de voltaje que tendrá a la salida. La cantidad de niveles puede ser aumentada al agregar capacitores y diodos teniendo implementaciones modulares por lo que no se modifica la base del circuito y se pueden agregar niveles necesarios de acuerdo con la necesidad de la aplicación.

La ecuación característica de este convertidor es:

$$V_{out} = nV_c = \frac{nV_{in}}{1 - D} \quad (33)$$

$n \rightarrow$ número de niveles

$V_c \rightarrow$ Voltaje en el capacitor

$D \rightarrow$ Duty cycle (Ciclo de trabajo)

El modelo estructural del convertidor boost multinivel se muestra a continuación en la Figura 10.

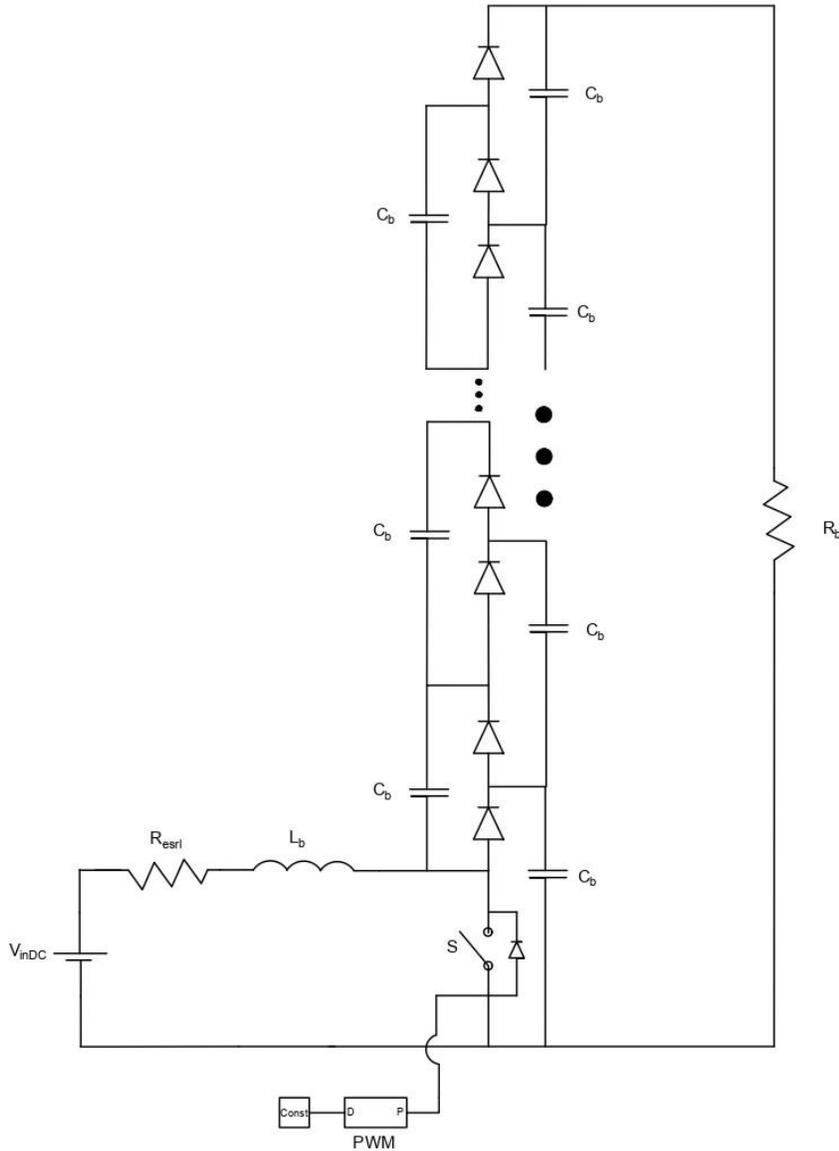


Figura 10 Diagrama del circuito convertidor DC/DC Boost multinivel

En esta aplicación se presenta un aumento de aproximadamente diez veces el valor del voltaje de entrada utilizando un convertidor de seis niveles. Hay que resaltar que la salida de voltaje tendrá un pequeño rizo que se puede minimizar con la selección adecuada de capacitores. Estos se utilizan para transferir la energía en el multiplicador de voltaje mientras alimenta la carga, por lo que su selección debe de ser minuciosas para evitar tener grandes rizo y mantener el nivel de la salida adecuada.

2.5 Convertidor DC/AC VSC en modo inversor

El fin de esta aplicación con generador LMMHD es la interconexión a la red, la salida del Boost Multinivel como se sabe es en DC, por lo que se tiene que hacer una conversión DC/AC, para esto se utilizó un convertidor fuente de voltaje, (VSC) por sus siglas en inglés, que pueden operar tanto en modo inversor o en modo rectificador; en esta aplicación será un inversor en configuración tipo puente capaz de convertir voltaje de DC a AC de amplitud y frecuencia variable [37].

Para la obtención de una señal sinusoidal de una frecuencia determinada con un reducido número de armónicos, se emplea la técnica de SPWM que se basa en la comparación constante de ondas una de alta frecuencia llamada portadora y otra de baja frecuencia llamada moduladora esta posee la información de la frecuencia, fase y amplitud deseadas, para esta aplicación es una señal sinusoidal mientras que la señal portadora determina el tipo de control que se hace sobre los flancos de la señal modulada en este caso una señal triangular, así como la frecuencia de conmutación de los transistores; esto se realiza cuando la tensión de entrada es fija y la tensión de salida será variable [38].

Los inversores se clasifican con base al número de fases correspondientes a la tensión de salida, las dos principales categorías corresponden a los inversores monofásicos y trifásicos.

2.5.1 Convertidor Monofásico

Este tipo de convertidor se muestra en la Figura 10, se compone de dos interruptores completamente controlables, generalmente transistores bipolares de puerta aislada, IGBT, cada uno de estos interruptores cuenta con su respectivo antiparalelo [39].

La corriente de los transistores Q_1 y Q_2 es positiva, si fluye del colector hacia el emisor, mientras que la corriente en los diodos D_1 y D_2 es positiva si fluye del ánodo al cátodo. La corriente de la parte superior y la de la parte inferior se denotan por i_p e i_{D2} respectivamente. La potencia instantánea del lado de DC y del lado de AC se denota por P_{DC} y P_{AC} respectivamente. El flujo de potencia se considera positivo si va de la fuente de DC hacia el lado de AC del convertidor.

El modelo típico de del inversor cuenta con dos fuentes idénticas de DC; el punto medio entre las fuentes se utiliza como nodo de referencia, una impedancia de acople compuesta por una resistencia R_{VSC} y un inductor L_{VSC} integran el convertidor. La terminal positiva de la carga se conecta al nodo O, mientras que la terminal se conecta al nodo de referencia. Además, la impedancia de acople funciona como un filtro, que permite eliminar gran parte del contenido armónico total, THD, correspondiente a la corriente del lado de AC del convertidor.

Durante el semiciclo positivo de la corriente i_{AC} solamente Q_1 y D_2 son capaces de conducir, y en el semiciclo negativo conducen Q_2 y D_1

La tensión de salida V_i del convertidor se caracteriza por presentar una forma de onda cuadrada cuyo valor alterna entre $\frac{V_{in}}{2}$ y $-\frac{V_{in}}{2}$, el voltaje RMS de V_i que se caracteriza por la ecuación:

$$V_t = \left(\frac{2}{T_0} \int_0^{\frac{T_0}{2}} \frac{V_{CD}^2}{4} dt \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{V_{CD}}{2} \quad (34)$$

Este valor de V_i depende del estado de conmutación de Q_1 y Q_2 . El estado de conmutación se obtiene a partir de la señal que se obtiene del proceso de PWM en este caso la señal se llamará SPWM. Cuando se envía una señal de activación Q_1 y Q_2 nunca deben conducir simultáneamente ya que esto produciría un corto circuito. En el diseño de cualquier tipo de inversor debe haber un tiempo de retardo T_p entre la apertura del interruptor activo y el cierre del otro de la misma rama que conducirá después. La SPWM no es suficiente para que el interruptor conduzca, también es necesario que el flujo de la corriente concuerde con el sentido positivo del interruptor. Un diagrama de este convertidor se puede observar en la Figura 11.

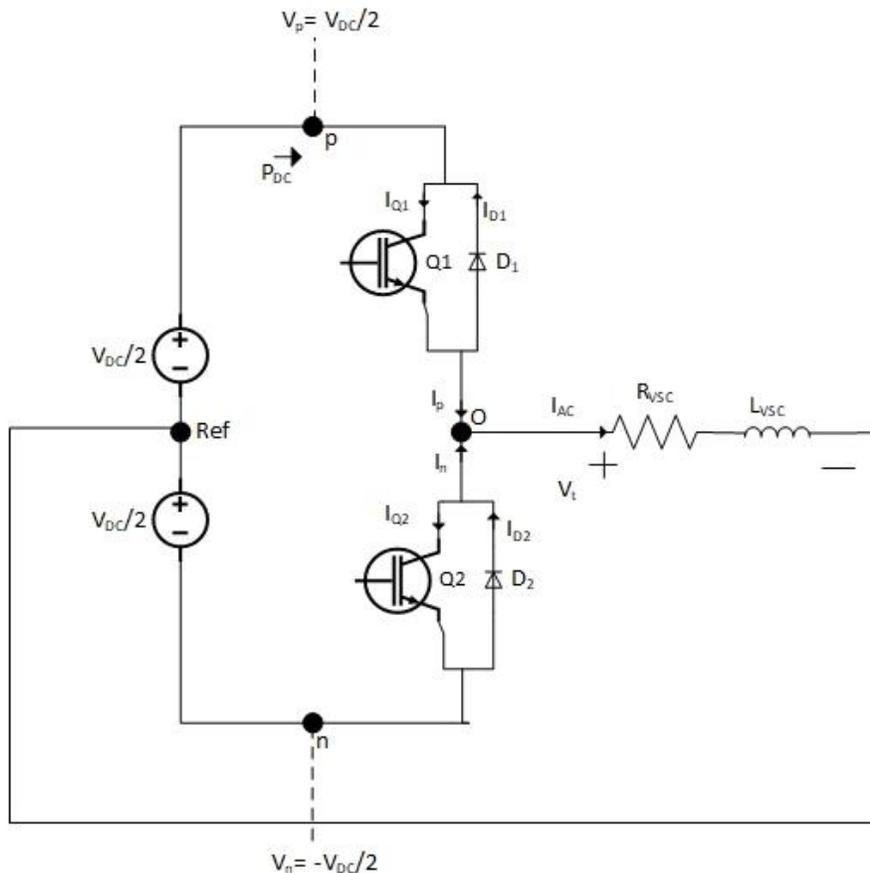


Figura 11 Diagrama del convertidor monofásico CD/CA

Validación en Tiempo Real de un Sistema de Conversión de Energía Marina interconectado en redes de Distribución

2.5.2 Modelo conmutado

Este modelo de convertidor conmutado la tensión V_t es independiente de la polaridad de i_{AC} y depende únicamente de $s_1(t)$ y de $s_2(t)$. Las siguientes ecuaciones describen el modelo sin considerar pérdidas en el proceso de conversión ya que en este caso $P_{DC} = P_t$. De esto se tiene:

$$s_1(t) + s_2(t) = 1 \quad (35)$$

$$V_t(t) = \frac{V_{DC}}{2} s_1(t) - \frac{V_{DC}}{2} s_2(t) \quad (36)$$

$$i_p(t) = i s_1(t) \quad (37)$$

$$i_n(t) = i s_4(t) \quad (38)$$

$$P_{DC} = V_p i_p + V_n i_n = \frac{V_{DC}}{2} [s_1(t) - s_4(t)] \quad (39)$$

2.5.3 Modelo Promediado

El convertidor VSC tiene varios modelos, pero el que se utilizará será el promediado; este modelo se enfoca en describir el comportamiento de las variables V_t e i_{AC} en función de la señal de modulación. Este modelo se conforma de dos fuentes de voltaje y de corriente controladas como se muestra en la Figura 12.

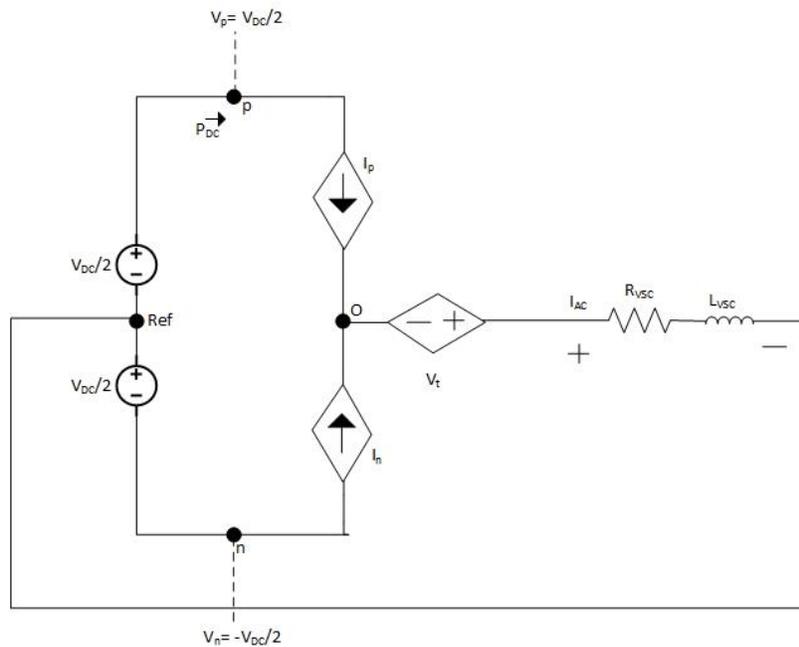


Figura 12 Diagrama del modelo promediado del convertidor monofásico CD/CA

Este convertidor requiere una señal portadora, cuya frecuencia sea suficientemente mayor a la frecuencia de la moduladora, esto es, al menos 10 veces mayor. El valor promediado de las funciones de conmutación se describe con las ecuaciones 37 y 38

$$\overline{s_1}(t) = D \quad (40)$$

$$\overline{s_4}(t) = 1 - D \quad (41)$$

Al utilizar SPWM la relación entre la magnitud de la señal moduladora cuya magnitud oscila entre -1 y 1, el ciclo de trabajo se comporta de la siguiente manera.

$$m = 2D - 1 \quad (42)$$

Para obtener el valor promediado de los voltajes, corrientes y potencias hay que sustituir (37) y (38) en (33) a (36), luego esto se sustituye en (39) en las ecuaciones que resultan de la sustitución. Las ecuaciones resultantes son [37, 39]:

$$\overline{V}_t = m \frac{\overline{V_{CD}}}{2} \quad (43)$$

$$\overline{i}_p = \left(\frac{1+m}{2} \right) \overline{i} \quad (44)$$

$$\overline{i}_n = \left(\frac{1+m}{2} \right) \overline{i} \quad (45)$$

$$\overline{P}_{CD} = m \left(\frac{\overline{V_{CD}}}{2} \right) \overline{i} \quad (46)$$

$$\overline{P}_t = m \left(\frac{\overline{V_{CD}}}{2} \right) \overline{i} \quad (47)$$

La técnica de control a través de PWM en la simulación pasó por diferentes etapas hasta la final; primero se hizo con la tecnología de transistores y con una sola fase para entender el comportamiento más simple del VSC, esto se realiza con una sola señal moduladora senoidal. Una vez que se ha probado con sólo una señal moduladora lo que se hizo fue poner tres de éstas desfasadas 120° para hacer el modelo trifásico que será conectado a la red a través de una impedancia de interconexión; al final se sustituyó todo esto por un bloque que realiza todo este procedimiento. En las Figuras 13 y 14 se muestran los modelos trifásicos de un VSC.

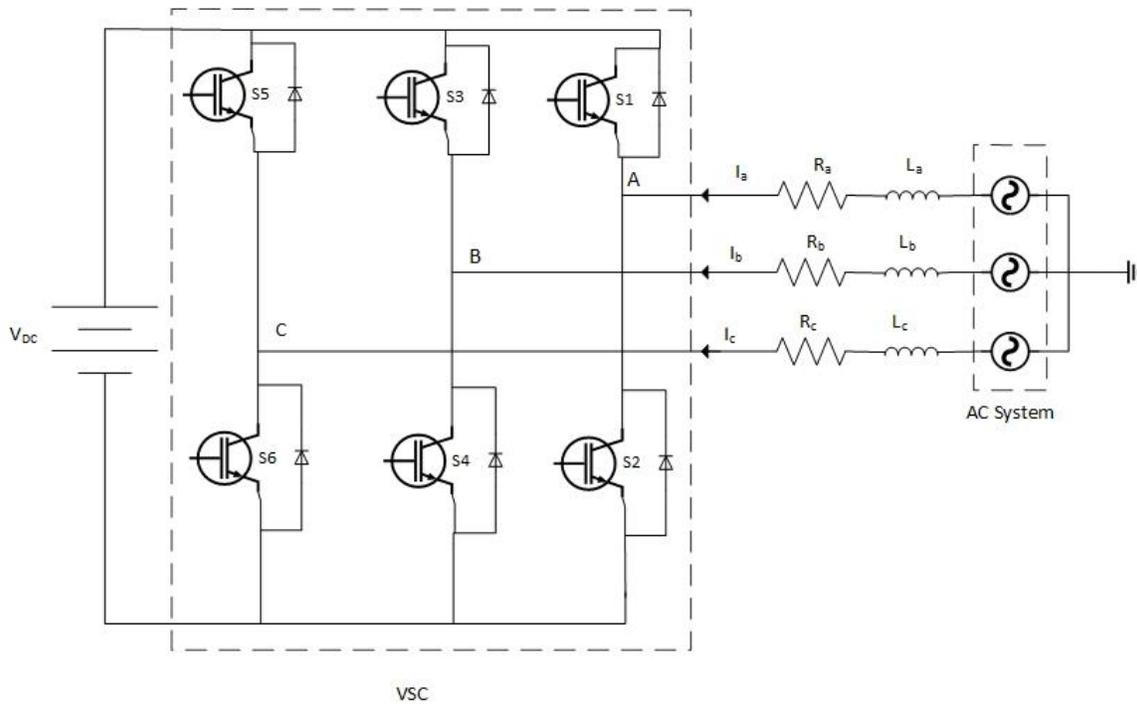


Figura 13 Modelo de un VSC trifásico [40]

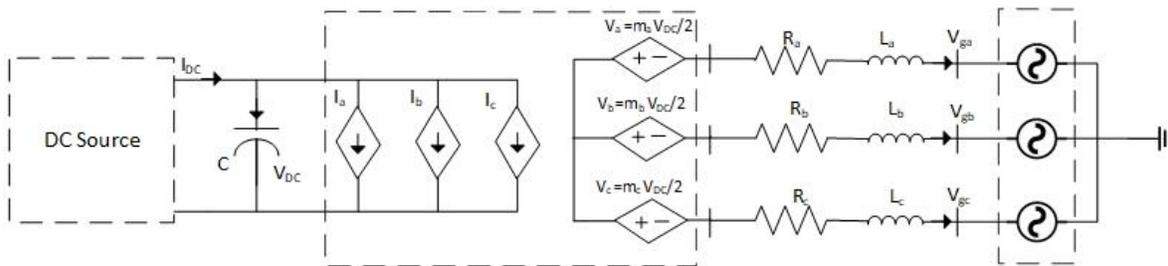


Figura 14 Modelo promediado de un VSC trifásico

Además de hacer el proceso a la interconexión a la red, es necesario tener un control de potencias, ya que en una situación real las potencias que demanda la red cambiar por lo que la potencia que se debe de generar debe cambiar conforme a la necesidad para esto se necesita de un sistema de control, que necesitará de las transformadas de Park y Clarke para llegar de un marco abc a $dq0$. Al ya tener ondas sinusoidales de voltaje y corriente después del VSC, estas se pueden representar como fasores de magnitud y fase facilitando su manejo.

Para llegar al marco de referencia $dq0$ se debe tener un sistema de señales ortogonales, que en el modelo de señales abc no lo son; aquí es donde entra la transformada de Clarke que transforma el vector de tres componentes abc a uno de dos componentes α y β válida para valores instantáneos; la transformación se hace a través de un operador espacial a través de:

$$\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (48)$$

La ecuación (45) representa el desfase de 120° de los sistemas trifásicos. Una vez definido esto el operador para la transformación es el siguiente [40].

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \quad (49)$$

Una vez que se hizo esta transformación, sigue hacer la transformación de Park para pasar de α y β a $dq0$. Esta transformación representa las magnitudes trifásicas en un sistema de referencia ortogonal móvil, también esta transformación permite ver magnitudes sinusoidales trifásicas que varían en el tiempo como constantes siempre y cuando la frecuencia de la señal coincida con la frecuencia de giro de los ejes del marco $dq0$. Este procedimiento se hace a través de operadores tanto para la corriente y voltajes, que son [41, 42]:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \text{sen}(\theta) & 0 \\ -\text{sen}(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (50)$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \text{sen}(\theta) & 0 \\ -\text{sen}(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (51)$$

Además de necesitar las señales de voltaje y corriente en el marco dq , para que funcione correctamente el sistema de control, se requiere la señal de entrada ωt , esta se obtiene de un bloque que tiene como señal de entrada el voltaje trifásico; este se identifica como PLL, que modela un sistema de control de lazo cerrado, Phase Lock Loop (PLL, por sus siglas en inglés), que rastrea la frecuencia y fase de una señal trifásica sinusoidal mediante el uso de un oscilador de frecuencia interno. El sistema de control ajusta la frecuencia del oscilador interno para mantener la diferencia de fases en 0. Y a la salida se obtiene la señal de frecuencia ωt siendo el ángulo en radianes que varía entre 0 y 2π [43].

Una vez con esto se procede a hacer el esquema de control, para esta aplicación se utilizará un control basado en corrientes de potencia real/reactiva que se basa en las ecuaciones:

$$P_s(t) = \frac{3}{2} [v_{sd}(t)i_d(t) + v_{sq}(t)i_q(t)] \quad (52)$$

$$Q_s(t) = \frac{3}{2} [-v_{sd}(t)i_q(t) + v_{sq}(t)i_d(t)] \quad (53)$$

En estas ecuaciones se supone que si $v_{sq} = 0$, las potencias, real y reactiva son directamente proporcionales a i_d e i_q , por lo que las ecuaciones (50) y (51) se reescriben como [37]:

$$P_s(t) = \frac{3}{2} V_{sd}(t)i_d(t) \quad (54)$$

$$Q_s(t) = -\frac{3}{2} V_{sd}(t)i_q(t) \quad (55)$$

De estas últimas expresiones, se puede apreciar que ambas potencias se pueden controlar a través de i_d e i_q lo que nos lleva a:

$$i_{dref}(t) = \frac{2}{3V_{sd}} P_{sref}(t) \quad (56)$$

$$i_{qref}(t) = -\frac{2}{3V_{sd}} Q_{sref}(t) \quad (57)$$

Con estas ecuaciones sabemos que tanto $P_s(t)$ y $Q_s(t)$ se pueden controlar de una manera independiente a través de i_{dref} e i_{qref} siempre y cuando el valor de éstas sean aproximadamente i_d e i_q respectivamente. Para regular i_d e i_q , como se mencionó previamente se utiliza un compensador *PI*. [44]

Una representación equivalente del sistema VSC en el marco de referencia *dq* se muestra a continuación en la Figura 15.

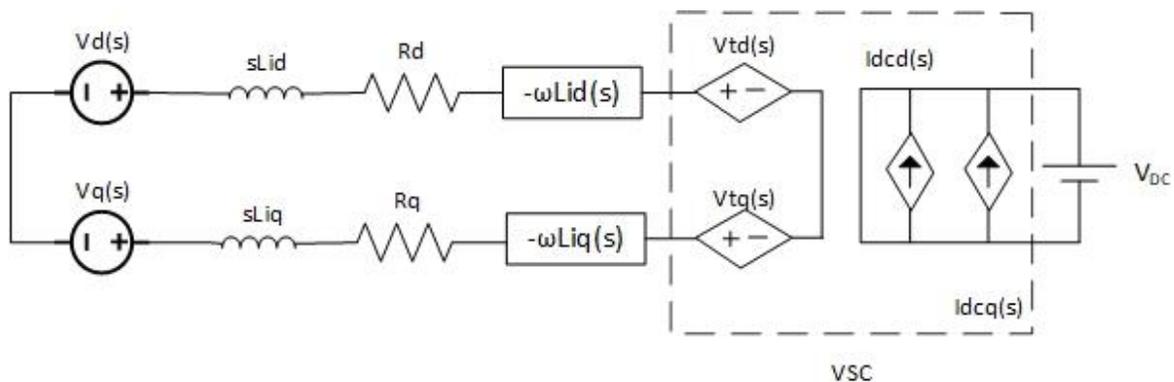


Figura 15 Modelo equivalente del sistema VSC en el marco de referencia *dq*

En este modelo el voltaje se expresa como [45]:

$$V_d(s) = sL + Ri_d(s) - i_q(s)\omega L + V_{td}(s) \quad (58)$$

$$V_q(s) = sL + Ri_q(s) + i_d(s)\omega L + V_{tq}(s) \quad (59)$$

Donde $-I_q(s)\omega L$ y $I_d(s)\omega L$ representan el acoplamiento cruzado de inductancias y V_{td} y V_{tq} son los voltajes de salida del VSC que se expresan como:

$$V_{td}(s) = \frac{V_{DC}}{2} m_d(s) \quad (60)$$

$$V_{tq}(s) = \frac{V_{DC}}{2} m_q(s) \quad (61)$$

De aquí m_d y m_q representan el índice de modulación y V_{DC} el voltaje en DC de la etapa previa, el convertidor boost multinivel; m_d y m_q se expresan mediante:

$$m_d(s) = \frac{2}{V_{DC}} \left(u_d(s) - L\omega i_q(s) + V_{sd}(s) \right) \quad (62)$$

$$m_q(s) = \frac{2}{V_{DC}} \left(u_q(s) + L\omega i_d(s) + V_{sq}(s) \right) \quad (63)$$

Estas señales m_d y m_q pasan a ser las nuevas señales de entrada de control. Sustituyendo estos valores en las ecuaciones (58) y (59) resulta en:

$$V_{td}(s) = \frac{V_{DC}}{2} \left[\frac{2}{V_{DC}} \left(u_d(s) - L\omega i_q(s) + V_{sd}(s) \right) \right] \quad (64)$$

$$V_{tq}(s) = \frac{V_{DC}}{2} \left[\frac{2}{V_{DC}} \left(u_q(s) + L\omega i_d(s) + V_{sq}(s) \right) \right] \quad (65)$$

Simplificando, sustituyendo y despejando las ecuaciones (62) y (63) en (58) y (59) se puede obtener dos sistemas lineales de primer orden donde se obtiene el valor de $u_d(s)$ y $u_q(s)$ que representan la salida del compensador *PI* que se utilizará posteriormente. Estas ecuaciones son:

$$u_d(s) = -(sL + R)i_d(s) \quad (66)$$

$$u_q(s) = -(sL + R)i_q(s) \quad (67)$$

Reescribiendo las ecuaciones (57) y (58) para representar la planta del VSC en el marco de referencia dq resulta en:

$$\frac{i_d(s)}{u_d(s)} = \frac{1}{sL_d + R_d} \quad (68)$$

$$\frac{i_q(s)}{u_q(s)} = \frac{1}{sL_q + R_q} \quad (69)$$

Estas ecuaciones se pueden representar a través de diagramas de bloques utilizados en la implementación del control. Estos diagramas de bloques se representan en la Figura 16 [46]:

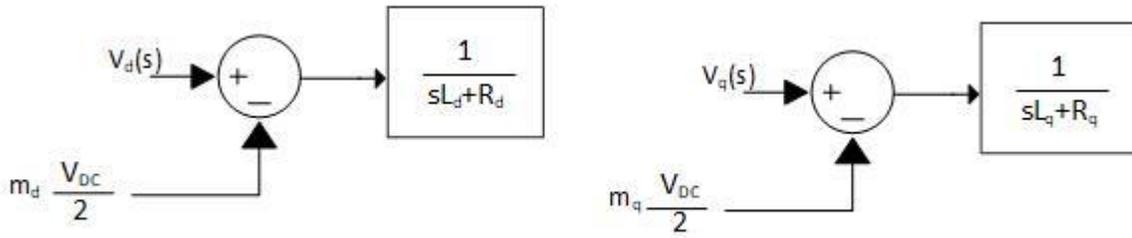


Figura 16 Representación de las ecuaciones 59(izquierda) y 60(derecha) a través de diagrama de bloques

Para seguir el control en DC en lazo cerrado se utiliza un control proporcional integral (PI) como se había mencionado previamente, como en todo tipo de control PI se requiere de los valores k_i y k_p , para obtenerlos se tienen que definir $k_d(s)$ y $k_q(s)$ como [47] [48]:

$$k_d(s) = (i_{dref} - i_d(s)) \left[k_p \left(\frac{s + \frac{k_i}{k_p}}{s} \right) \right] \quad (70)$$

$$k_q(s) = (i_{qref} - i_q(s)) \left[k_p \left(\frac{s + \frac{k_i}{k_p}}{s} \right) \right] \quad (71)$$

Teniendo k_p y k_i como las ganancias proporcional e integral, los lazos de control $l_d(s)$ y $l_q(s)$ son:

$$l_d(s) = K_d(s)I_d(s) = \frac{k_p}{sL_i} \left(\frac{s + \frac{k_i}{k_p}}{s + \frac{r_i}{L_i}} \right) \quad (72)$$

$$l_q(s) = K_q(s)I_q(s) = \frac{k_p}{sL_i} \left(\frac{s + \frac{k_i}{k_p}}{s + \frac{r_i}{L_i}} \right) \quad (73)$$

Los polos en las ecuaciones anteriores serían $s = -\frac{r_i}{L_i}$ que se encuentra cerca del origen, esto deriva que la magnitud y la fase de la ganancia del lazo cerrado caería desde una frecuencia baja; para cambiar este aspecto el polo se elimina por un cero del compensador PI esto es $s = -\frac{k_i}{k_p}$. Con esto se obtiene una nueva relación entre el polo y el cero del PI siendo:

$$\frac{\frac{k_p}{\tau_i}}{\frac{k_i}{\tau_i}} = \frac{r_i}{L_i} \quad (74)$$

Siendo τ_i el tiempo de respuesta de la función de transferencia de lazo cerrado de primer orden donde la ganancia se expresa como:

$$l_d(s) = \frac{k_p}{sL_i} \quad (75)$$

La función de transferencia completa es:

$$\frac{l_d(s)}{l_d(s) + 1} \quad (76)$$

Siguiendo la referencia de DC que se ha establecido durante todo el control se tiene:

$$\frac{i_d(s)}{i_{dref}} = \frac{l_d(s)}{l_d(s) + 1} = \frac{\frac{k_p}{sL_i}}{\frac{k_p}{sL_i} + 1} \approx \frac{1}{\tau_i s + 1} \quad (77)$$

$$\frac{i_q(s)}{i_{qref}} = \frac{l_q(s)}{l_q(s) + 1} = \frac{\frac{k_p}{sL_i}}{\frac{k_p}{sL_i} + 1} \approx \frac{1}{\tau_i s + 1} \quad (78)$$

De acuerdo con (70) las ganancias k_p y k_i se definirán como:

$$k_p = \frac{L_i}{\tau_i} \quad (79)$$

$$k_i = \frac{\tau_i}{\tau_i} \quad (80)$$

La salida del sistema de control será la señal de referencia nueva del VSC y conforme vaya cambiando este se adapta a este nueva señal de igual forma, el sistema de control se adapta a los valores trifásicos que se obtienen del VSC conectado a la red a través de una impedancia RL de interconexión que, como su nombre lo dice está conectada a la red, de aquí se obtienen las señales trifásicas de voltaje y corriente que son la entra del sistema de control junto con la salida en DC del convertidor DC/DC como se muestra en la Figura 17 [49, 50].

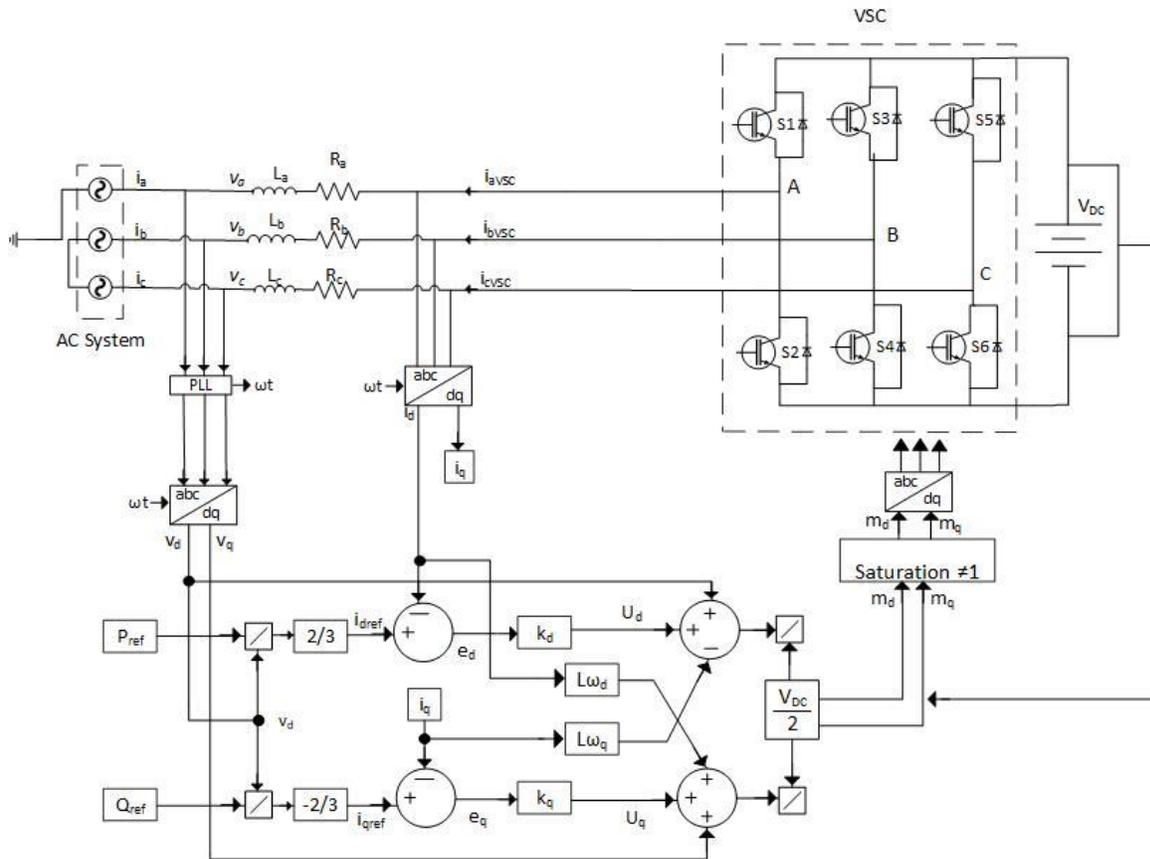


Figura 17 Modelo de control implementado en el sistema

Una vez agregado el sistema de control y hecha la interconexión a la red, se pueden obtener los valores finales de voltajes, corrientes y potencias real y reactiva en la red. Todos estos resultados se muestran en el siguiente capítulo.

2.6 Conclusiones Particulares

El modelado por separado de cada etapa del sistema permite entender el comportamiento y tener una idea de la respuesta de cada una de ellas; como todos los resultados teóricos, son una aproximación cercana pero no real, aunque hacer este análisis también es una guía para resolver riesgos potenciales prácticos donde ciertos componentes no están dentro de sus valores ideales o simplemente no responde de la misma manera que se esperaba, y al tener un análisis como el que se hizo en este capítulo, existe la opción de hacer un nuevo modelado con otro valor de componente y analizar si los resultados van de acuerdo a lo que se necesita. Esto sucede en todas las simulaciones y experimentos, donde el modelado teórico es perfecto pero el resultado físico no, por lo que se tiene que modificar y volver a analizar la respuesta, en esta aplicación se siguió este procedimiento hasta el punto de las simulaciones de cada una de las etapas del sistema y posteriormente una validación en tiempo real del sistema completo, mostrado en la Figura 18, de la que se hablará en el Capítulo 4.

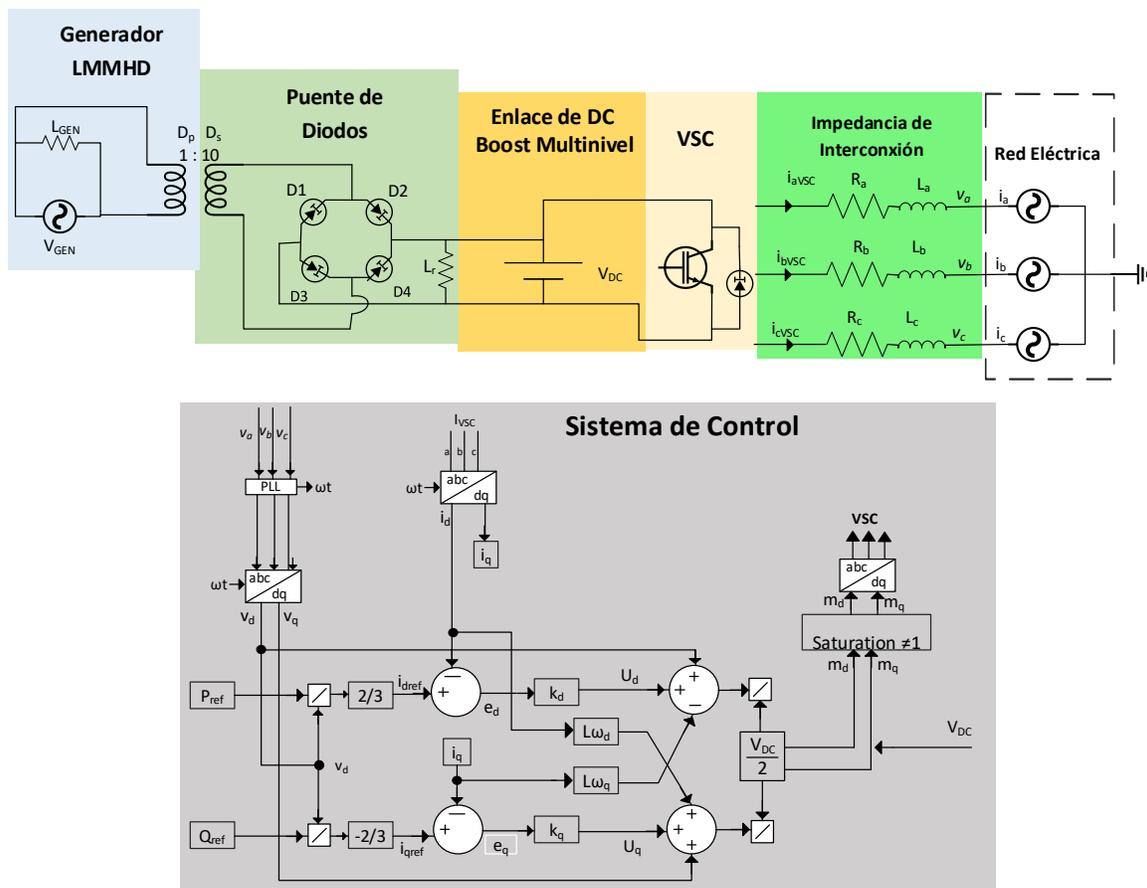


Figura 18 Topología general del sistema

Capítulo 3. Resultados de simulación: Matlab-Simulink®

En el capítulo anterior se mencionó todo el modelado del sistema propuesto, una vez teniendo estos conceptos, se hizo una simulación de este para observar la respuesta de cada elemento que compone el sistema en el entorno MATLAB-Simulink®. El programa correspondiente se muestra en el Apéndice a través de diferentes etapas y bloques. Los resultados fueron los siguientes:

3.1 Unidad de generación

En la primera etapa de cuatro, en la Figura 19 se puede observar la señal obtenida del generador simulando el movimiento de las olas del mar, como se mencionó, el modelo que se implementará dispondrá de un arreglo de 10 generadores LMMHD que tendrán una salida de 60 Volts y 230 kW cuando este alcance su máxima capacidad; se consideró tener una salida de 40 a 60 Volts variable en esta simulación y validación ya que las olas son un movimiento muy variable e impredecible y de acuerdo a estas varía el voltaje de salida.

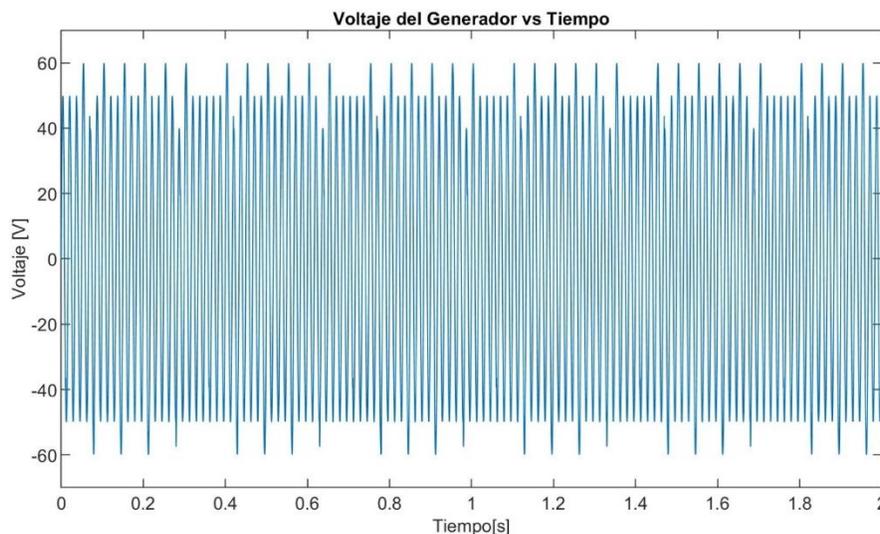


Figura 19 Voltaje de salida del Generador

En la Figura 20 se puede observar el mismo comportamiento de salida de voltaje, simulando un movimiento de olas variando los niveles de este, pero pasa por el transformador elevador subiendo el nivel 10 veces de 40-60 Volts a 400-600 V en el devanado secundario del transformador.

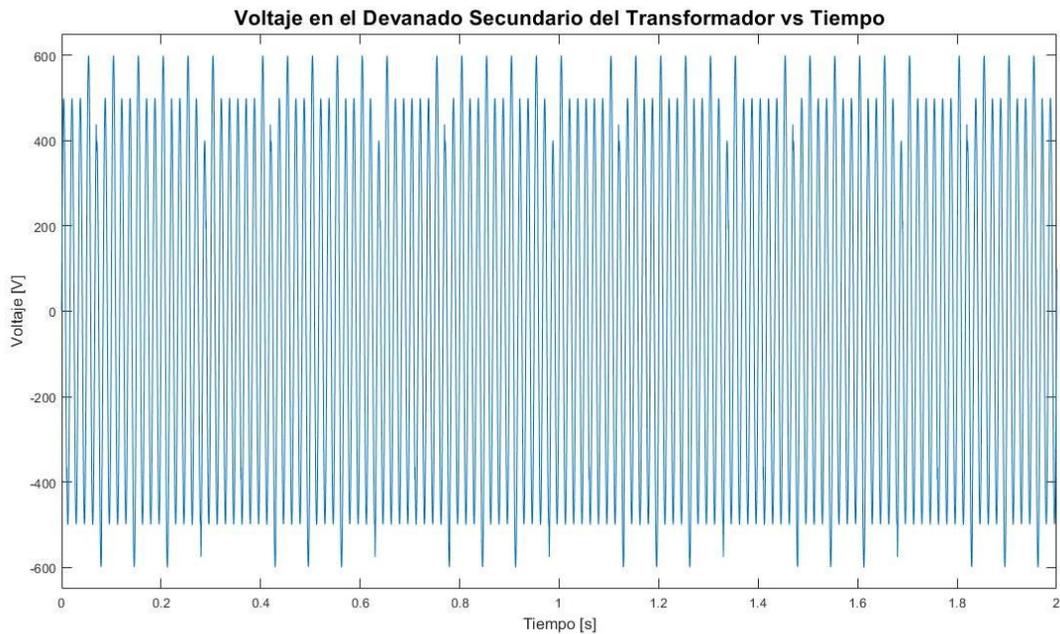


Figura 20 Voltaje de salida en el devanado secundario del Transformador

La Figura 21 muestra el nivel de corriente de salida del generador que es la entrada del devanado primario del transformador que está en un nivel alrededor de los 40000 Amperes. Mientras que en la Figura 22 se aprecia el nivel de corriente en el devanado secundario disminuida alrededor de 4000 Amperes; este transformador tiene una relación de 1:10 y una potencia nominal de 90 kVA. De igual manera, hay una relación directa entre el voltaje y la corriente por lo que esta, también tiene un comportamiento aleatorio de acuerdo con las olas del mar, aunque no se puede percibir tan claro comparado con las señales de voltajes.

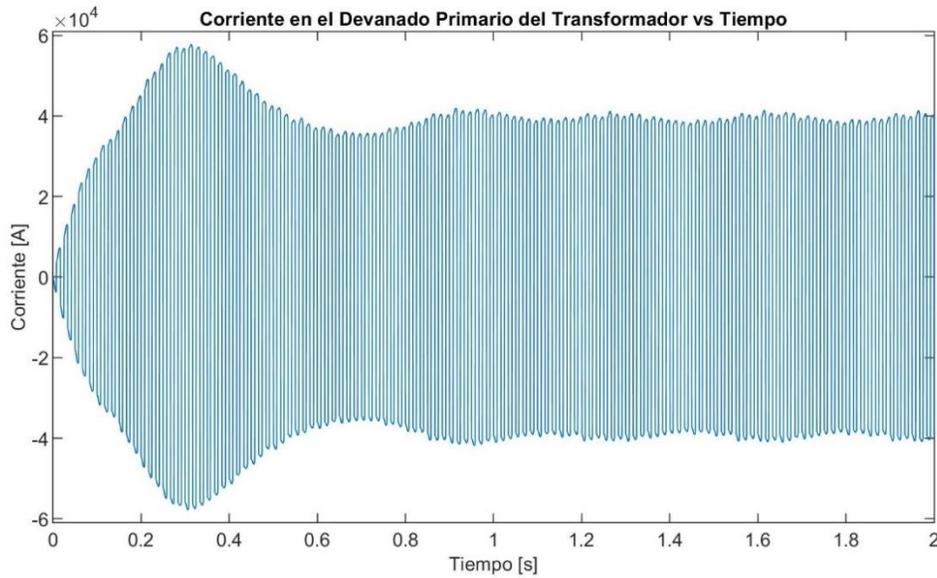


Figura 21 Corriente en el Devanado primario del transformador

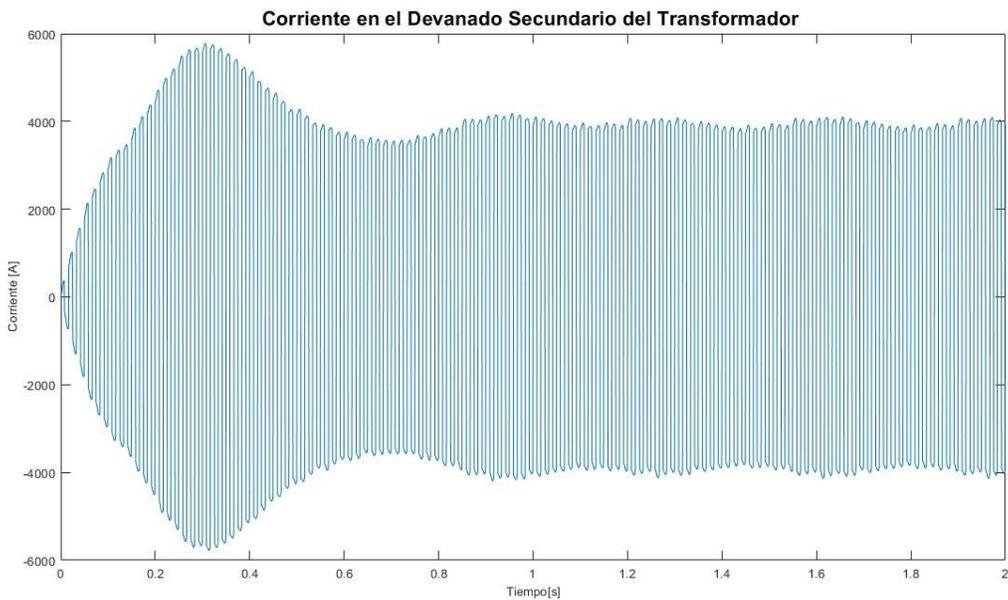


Figura 22 Corriente en el Devanado secundario del transformador

3.2 Convertidor AC/DC puente de diodos monofásico

Las señales de salida del puente de diodos se muestran a continuación en la Figura 23. Primero se observa el voltaje de salida del rectificador, en este caso ya es una señal de CD; esto se confirma observando que, el límite inferior de esta señal está en cero, de igual manera se mantiene el comportamiento aleatorio de la señal.

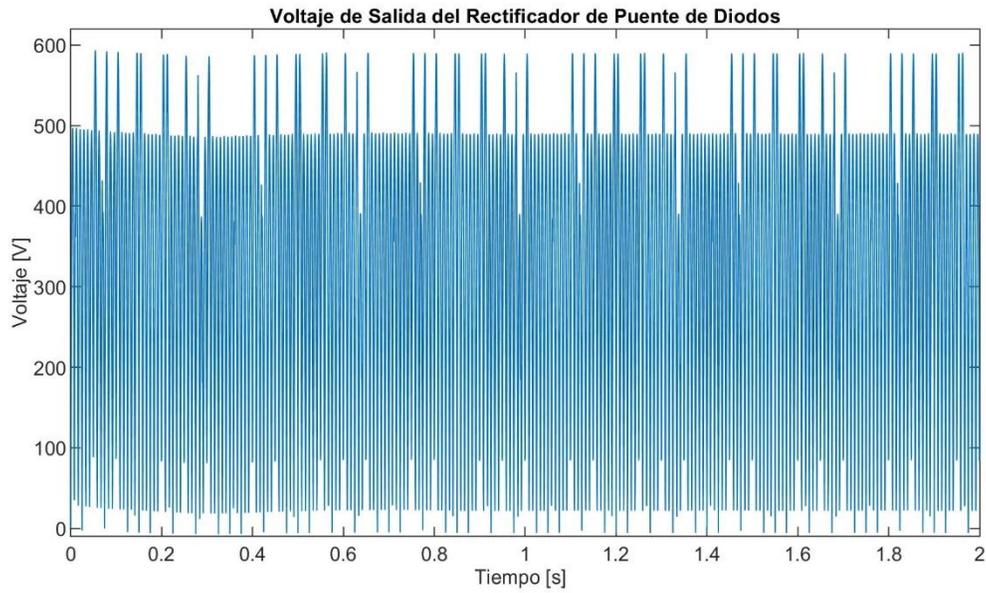


Figura 23 Voltaje de salida del Rectificador AC/DC con puente de diodos

Por otra parte, en la Figura 24 se observa la señal de salida de la corriente del convertidor, esta también ya se encuentra en un tipo de señal de DC, pero su nivel ha disminuido que era uno de los objetivos al inicio de estas etapas debido los niveles de corrientes que se manejan en la interconexión a la red y comparando con el nivel original de 40000 Amperes que se tenía en la etapa de generación ahora tener un valor alrededor de 80-100 Amperes siendo más manejable.

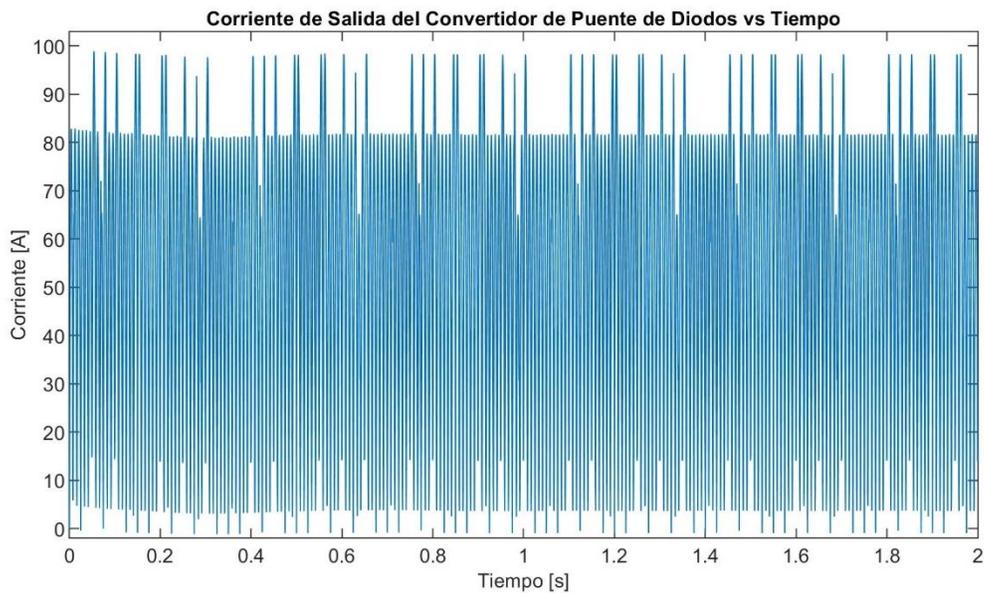


Figura 24 Corriente de salida del Rectificador AC/DC con puente de diodos

3.3 Convertidor DC/DC elevador multinivel

Dentro de la segunda etapa de conversión de todo este sistema, el convertidor Boost multinivel se encarga de elevar el nivel de la señal de DC proveniente del puente rectificador de diodos, pero manteniéndola en DC. Los resultados de esta etapa se muestran a continuación.

En la Figura 25 se aprecia el voltaje de salida del convertidor Boost multinivel, además de quitar la oscilación notoria del movimiento de olas, se logra elevar el voltaje que se obtuvo de rectificador de puente de diodos de alrededor de 500 Volts a 5500 Volts y estabilizarse en este valor.

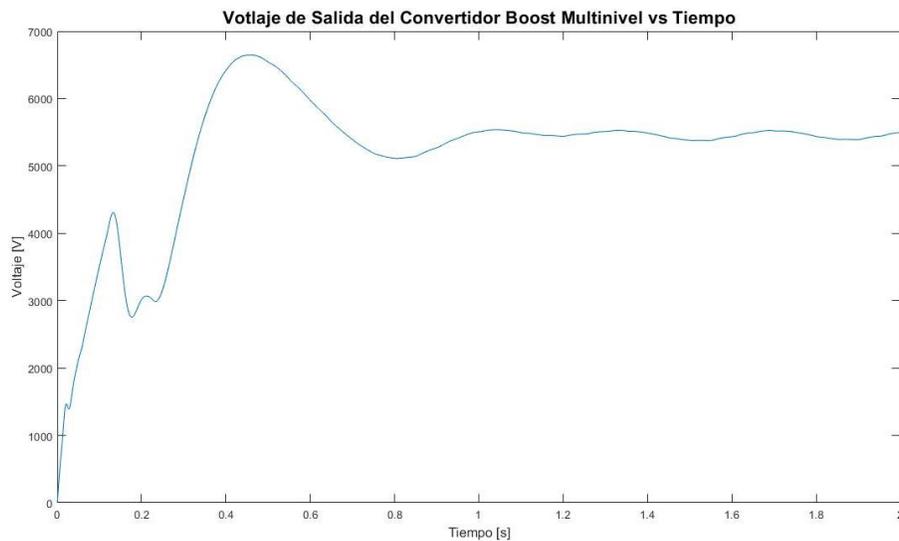


Figura 25 Voltaje de salida del convertidor CD/CD Boost Multinivel

De igual manera en la Figura 26, se puede observar que la corriente una vez que pasa por el convertidor Boost Multinivel tiene un comportamiento de CD con un valor en los 200 Amperes por lo que el aumento de una etapa a otra no fue mucho ya que en la salida del puente de diodos se tenía un valor máximo de 100 Amperes demostrando que, esta puede tener un aumento significativo en voltaje sin un gran impacto en el valor de la corriente.

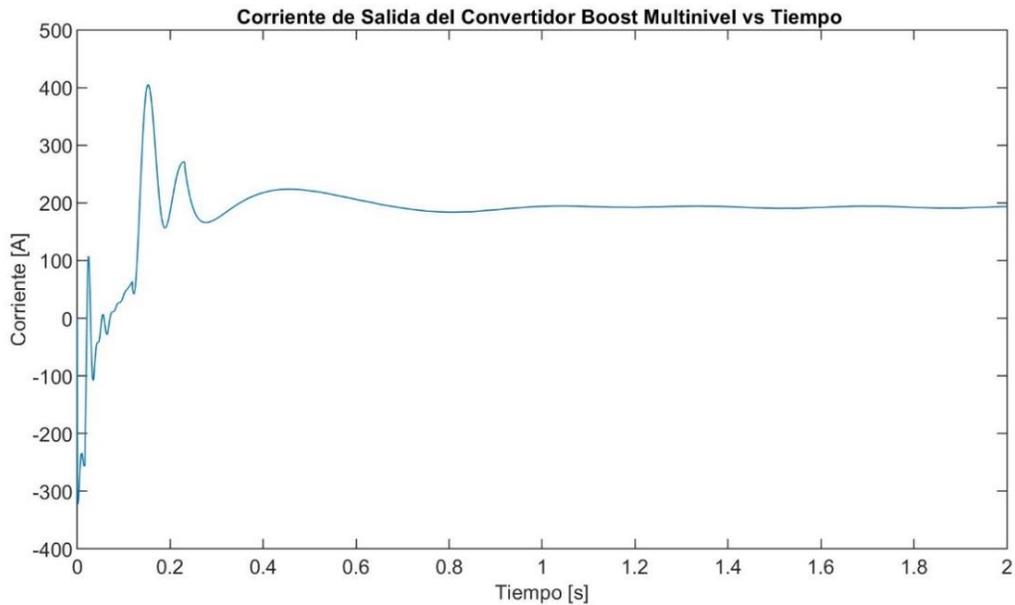


Figura 26 Corriente de salida del convertidor CD/CD Boost Multinivel

3.4 Convertidor DC/AC VSC

Una vez elevado el valor de voltaje en DC, antes de hacer la interconexión a la red, es necesario hacer una conversión más a través de un VSC que convertirá la señal a AC, además, al hacer la sincronización con la red es necesario que esta señal se vuelva trifásica, este proceso se hace en esta etapa de conversión.

Como se observó en el capítulo anterior para hacer la interconexión a la red se necesita de una impedancia de interconexión, donde se hizo la medición de voltajes y corrientes trifásicas que se obtienen de la conversión DC/AC; estos resultados se muestran en las Figuras 27-29.

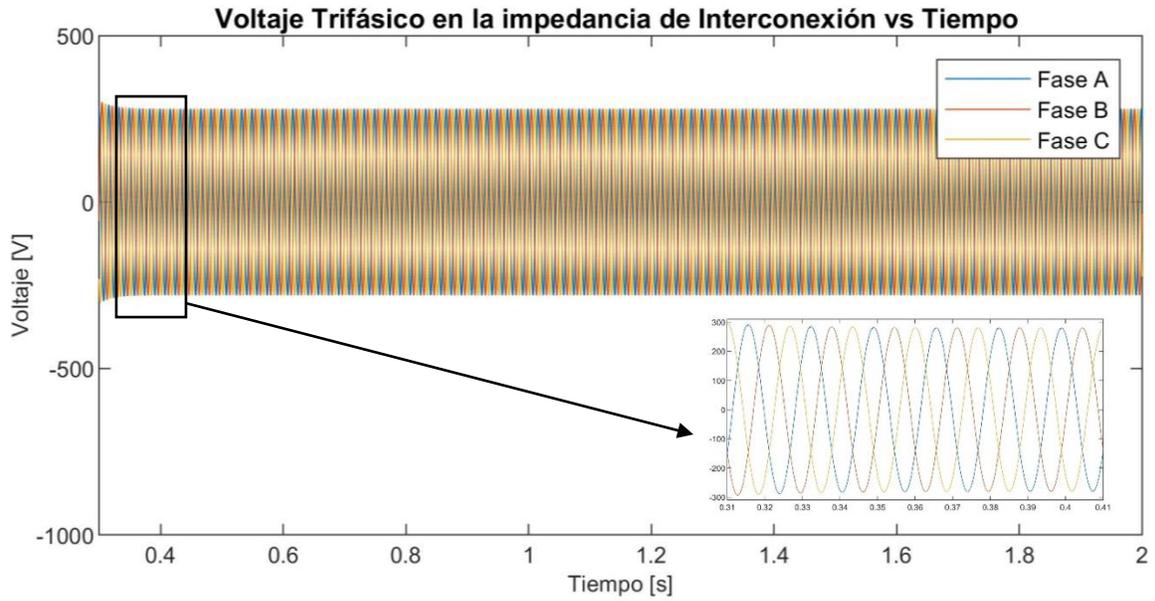


Figura 27 Voltaje trifásico en la impedancia de Interconexión

Además, se muestran los valores de voltajes y corrientes que emulan la red eléctrica mediante un bus infinito de magnitud y frecuencia ideales. El voltaje de la red se aprecia que tiene un valor de entre ± 2700 Volts pico a pico, mientras que la corriente se encuentra entre ± 100 Amperes pico a pico.

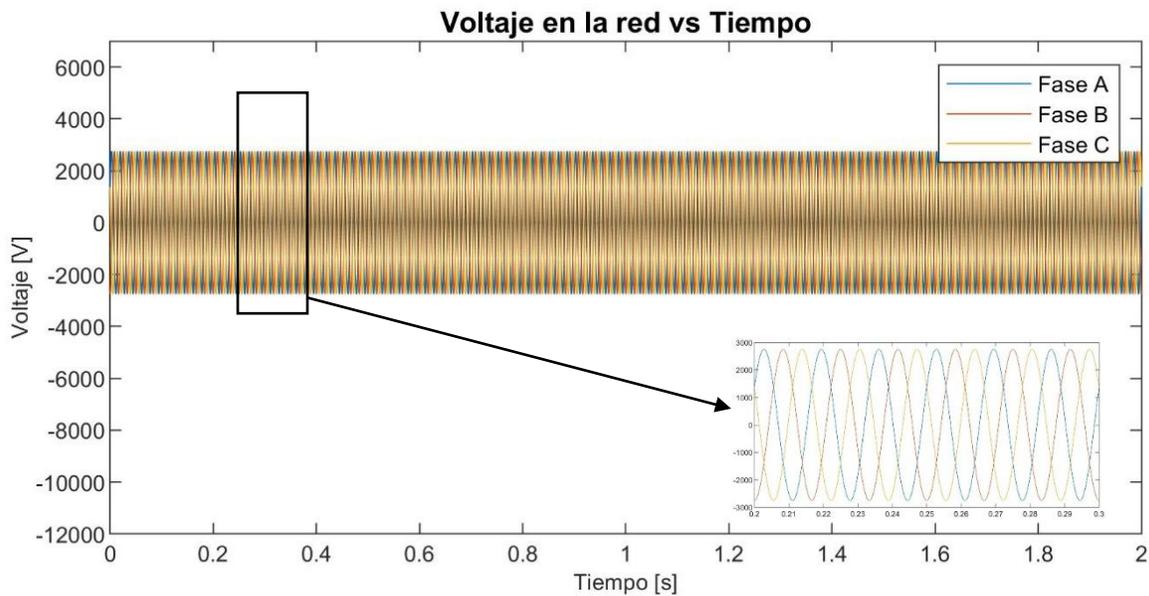


Figura 28 Voltaje trifásico en la red

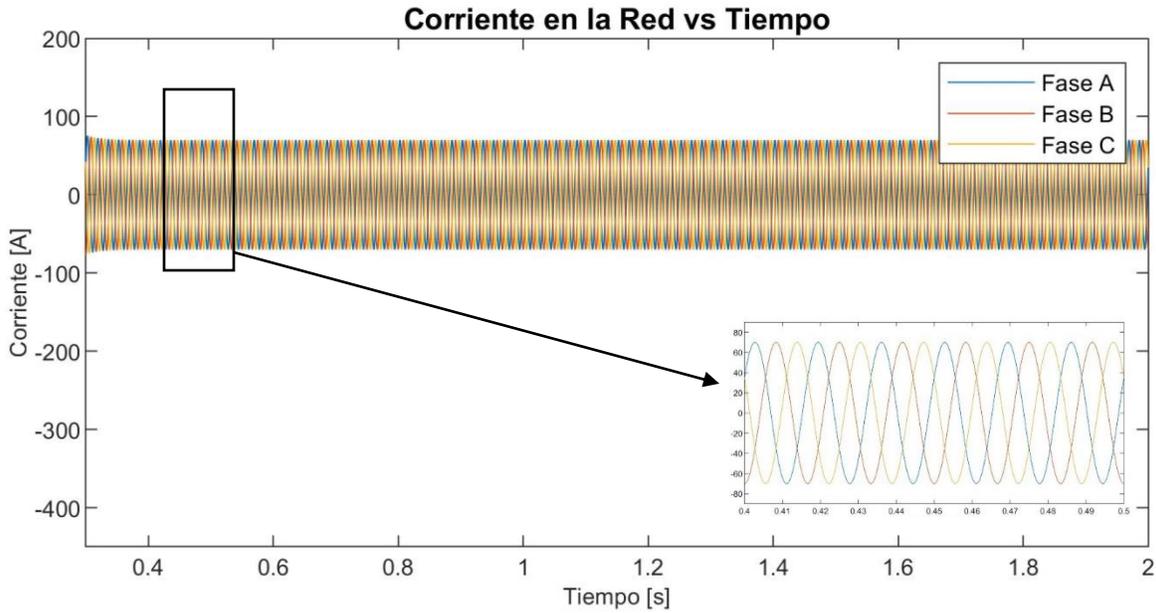


Figura 29 Corriente trifásica en la Red

3.5 Comparación de Potencia Entrada/Salida

Para tener un sistema de generación funcional interconectado a la red, es importante analizar la eficiencia que tiene, esto se puede hacer a través de las potencias, que a continuación se muestran cómo se fueron comportando en las diferentes etapas del sistema y si cumple con un 90% mínimo de eficiencia al final. A continuación, se muestran los resultados iniciando con la potencia que entrega el generador como se muestra en la Figura 30.

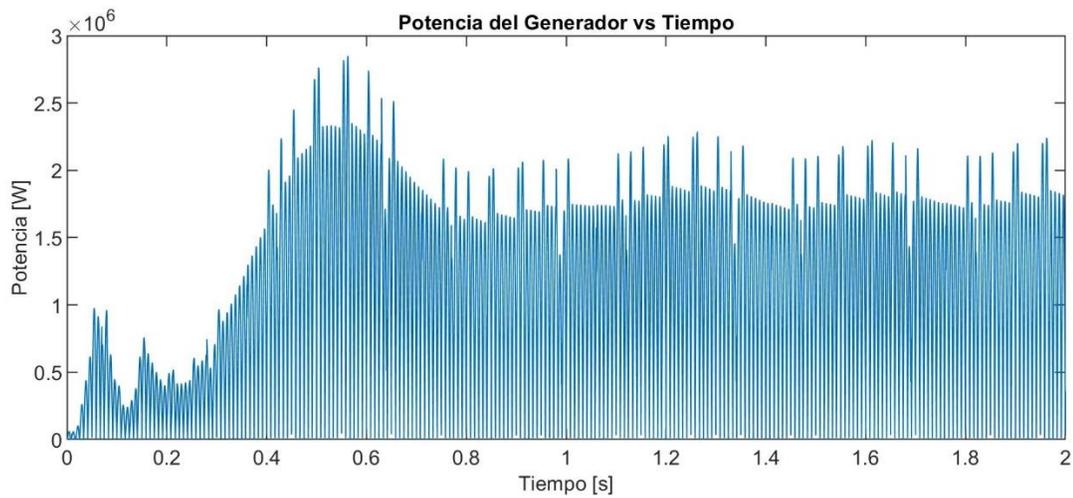


Figura 30 Potencia entregada por el sistema de generadores LMMHD

Posteriormente de la etapa de elevación con el transformador y rectificación, en la etapa del Convertidor Boost Multinivel la potencia de salida que este presenta se muestra en la Figura 31.

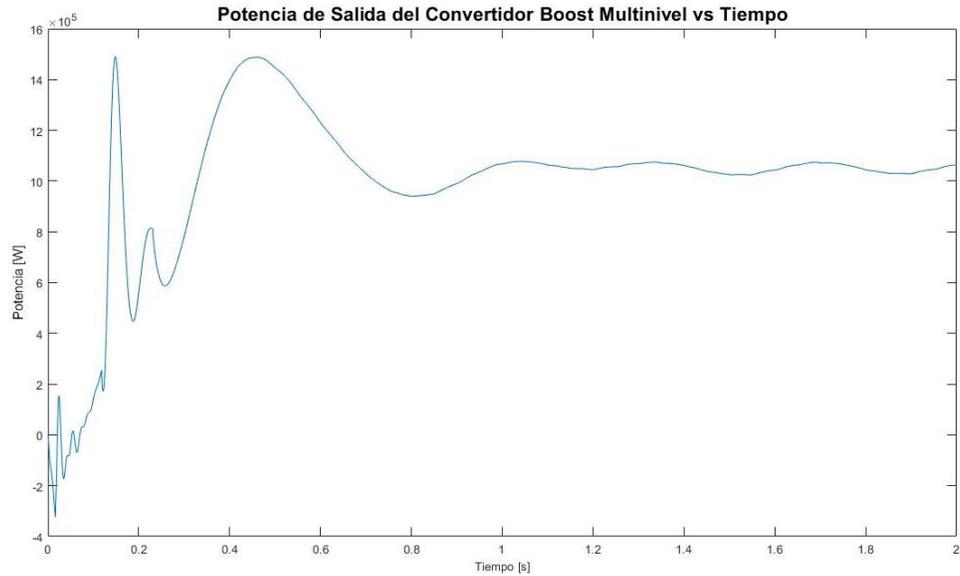


Figura 31 Potencia de salida del Convertidor Boost Multinivel

En la última etapa, conversión DC/AC y conexión a la red, las potencias se muestran a continuación en las Figuras 32 y 33, como el VSC está funcionando en modo inversor, se observa una potencia negativa ya que es la que se está integrando a la red en cuanto a la potencia real que ingresa a la red se tiene un aproximado de 390 kW constantes, mientras que de potencia reactiva se logra llevar la magnitud de esta a un valor de 0 VAR

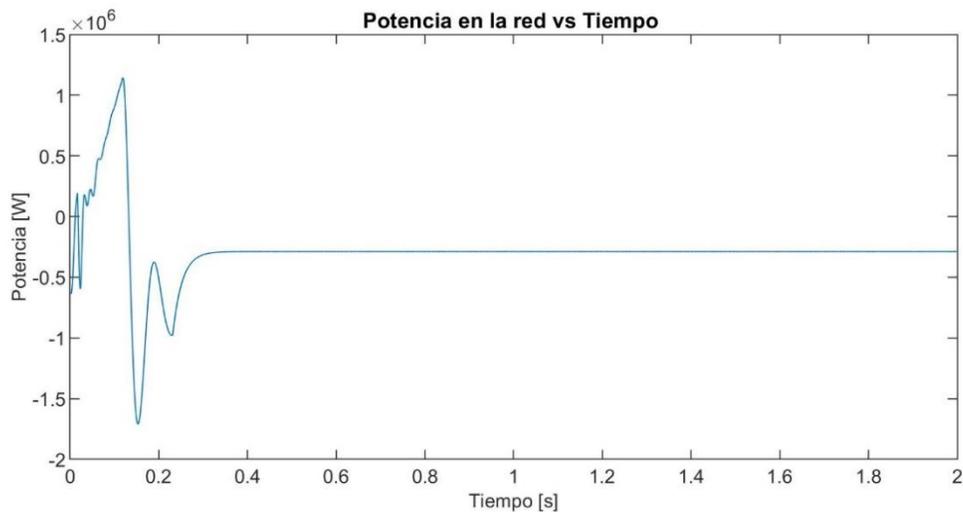


Figura 32 Potencia en la red

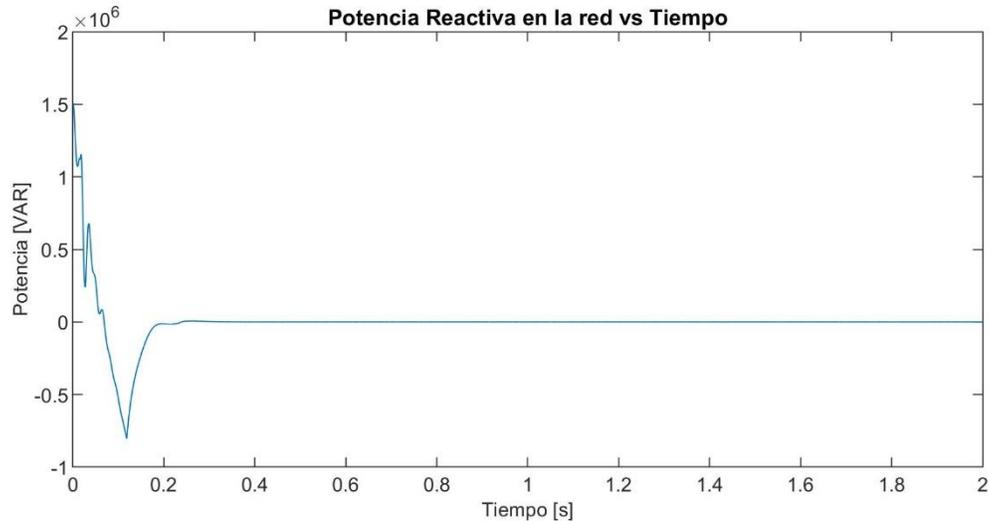


Figura 33 Potencia Reactiva en la red

Para finalizar se muestra un comparativo de potencias entre la que está entregando el sistema y la que se ve desde la red en la Figura 34, confirmando así que se tiene una eficiencia de mínimo 90%. Es importante mencionar que con el control de corriente realizado esta eficiencia se mantiene sin importar la demanda que se necesite siempre y cuando no sobrepase su límite.

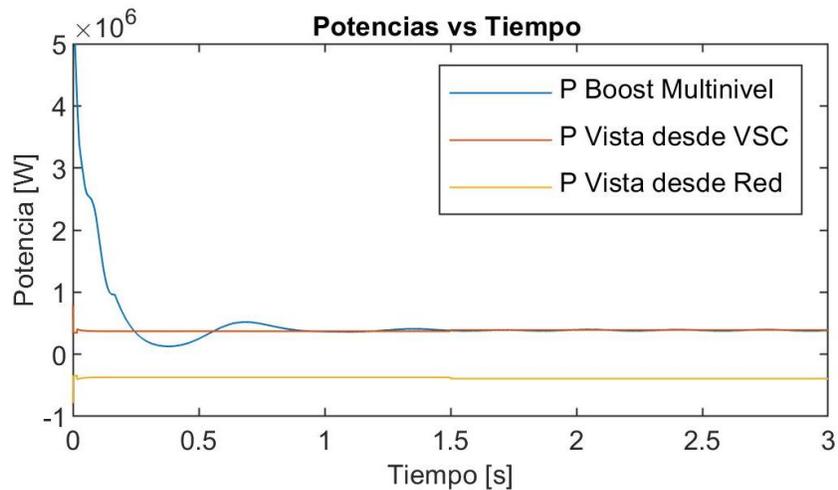


Figura 34 Comparativo de potencias del sistema

3.6 Conclusiones Particulares

La simulación del sistema permite observar el comportamiento de este sometándolo a diferentes condiciones que pueden presentarse una vez que se implemente de manera física, así, se puede analizar a través de los resultados obtenidos si este sistema es la mejor opción para la aplicación que se quiere realizar, además de que puede servir como una referencia a los resultados que se obtendrán de una implementación física real en campo y de igual manera saber si la respuesta coincide tanto con en el modelo matemático, la simulación y la validación del sistema.

Validación en Tiempo Real de un Sistema de Conversión de Energía Marina interconectado en redes de Distribución

Capítulo 4. Validación en Tiempo Real

Para corroborar la funcionalidad del sistema se hizo una validación en tiempo real, el esquema realizado en Matlab-Simulink® y mostrado anteriormente, se tuvo que adaptar para que fuera posible correrlo en el sistema OPAL-RT Technologies® a través del programa LAB-RT®, para esto se hicieron varias modificaciones al programa principal, se le agregó el bloque OpComm necesario para la simulación con OPAL-RT Technologies® como se aprecia en la Figura 35, una vez que se hizo esto, en el mismo programa principal se agregó un elemento llamado Bus Creator donde se dirigieron las salidas de variables que se deseaban ver en esta simulación.

Una vez hechas las modificaciones al programa principal, se redujo a un bloque que se llamó SM_Master y se creó un bloque completamente nuevo llamado SC_Console, mostrado en la Figura 36, donde se observarán las señales de salida, mostradas en la Figura 37, además, el bloque Powegui que se encuentra en el programa principal se trasladó con estos dos bloques.

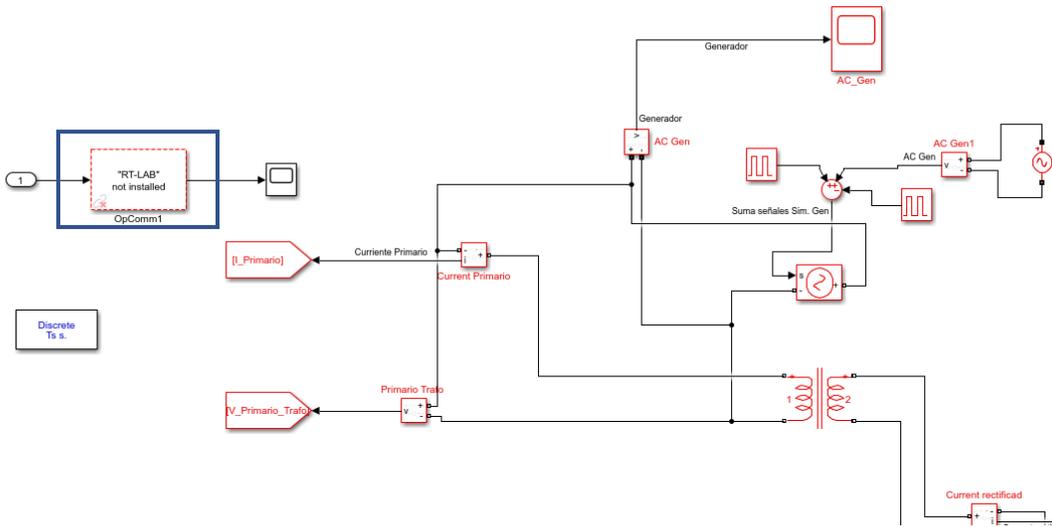


Figura 35 Adición del Bloque OpComm al programa principal

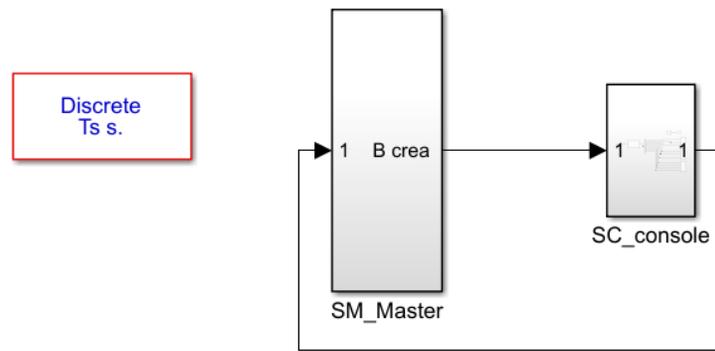


Figura 36 Bloques SM_Master, SC_Console

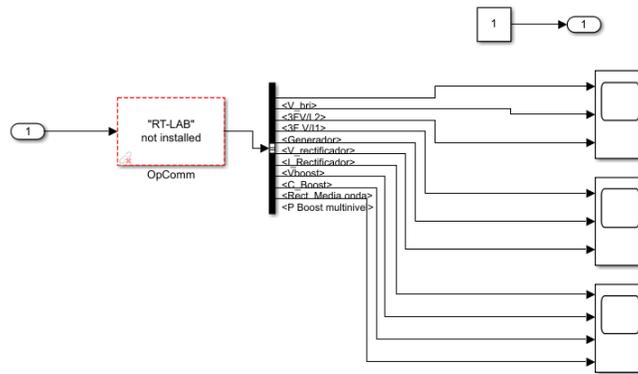


Figura 37 Esquema de señales de salida que se analizaron en tiempo real

Con esta adaptación del modelo en Simulink se procedió a utilizar y preparar el programa RT-LAB® donde se tenía que configurar los parámetros necesarios para la simulación, por ejemplo, habilitar el monitoreo, pero que no se mostrara en la interfaz del programa de Simulink previamente cargado en RT-LAB®, el proceso de cargar el programa, prepararlo con la configuración y parámetros correctos, se realizó en la pantalla principal del programa que se aprecia en la Figura 38.

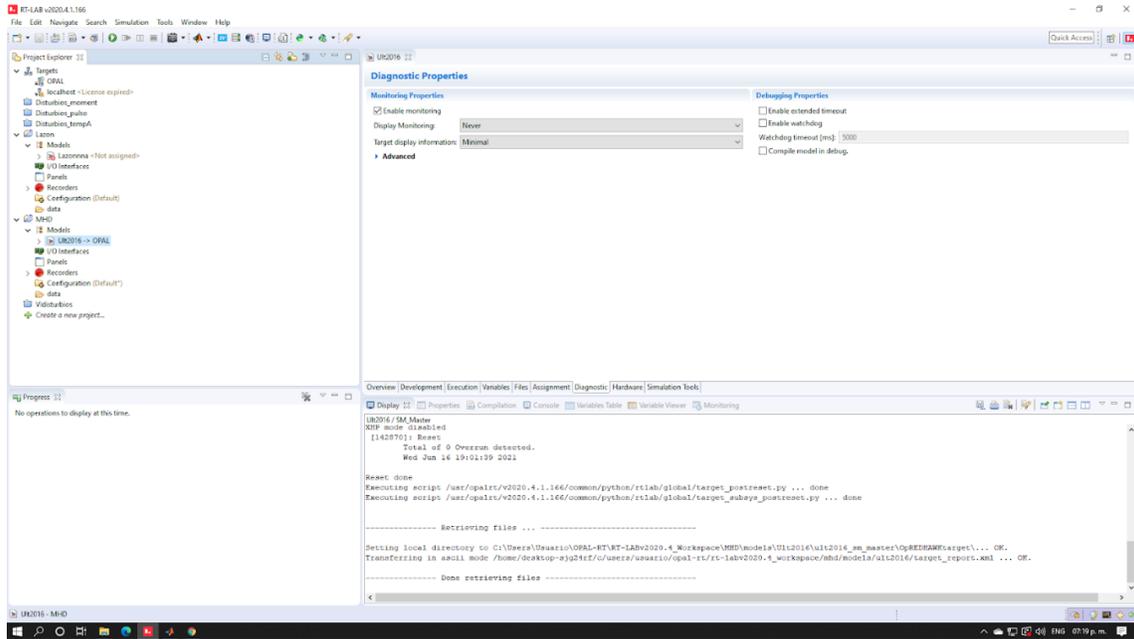


Figura 38 Pantalla principal del programa RT-LAB®

Después, se tiene que utilizar la instrucción de Rebuild All para poder correr el programa, en el nombre del programa, se procede a utilizar el comando Edit que desplegará la información del programa en la pantalla principal, en la parte inferior de esta, en el menú de Assignment se configuran las características de simulación del programa elegido, además, en el mismo menú Simulation Tools se termina de configurar las características de la simulación y a continuación se corre la simulación con los parámetros establecidos. Este proceso se muestra en las Figuras 39-43.

Capítulo 4 Validación en Tiempo Real

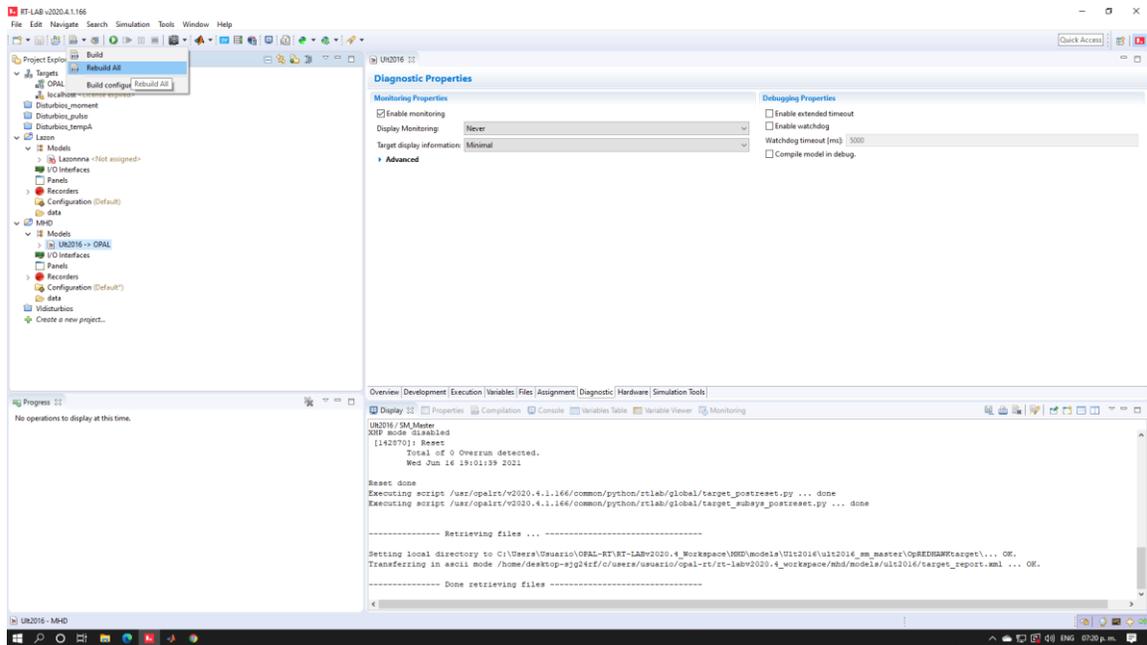


Figura 39 Instrucción Rebuild All

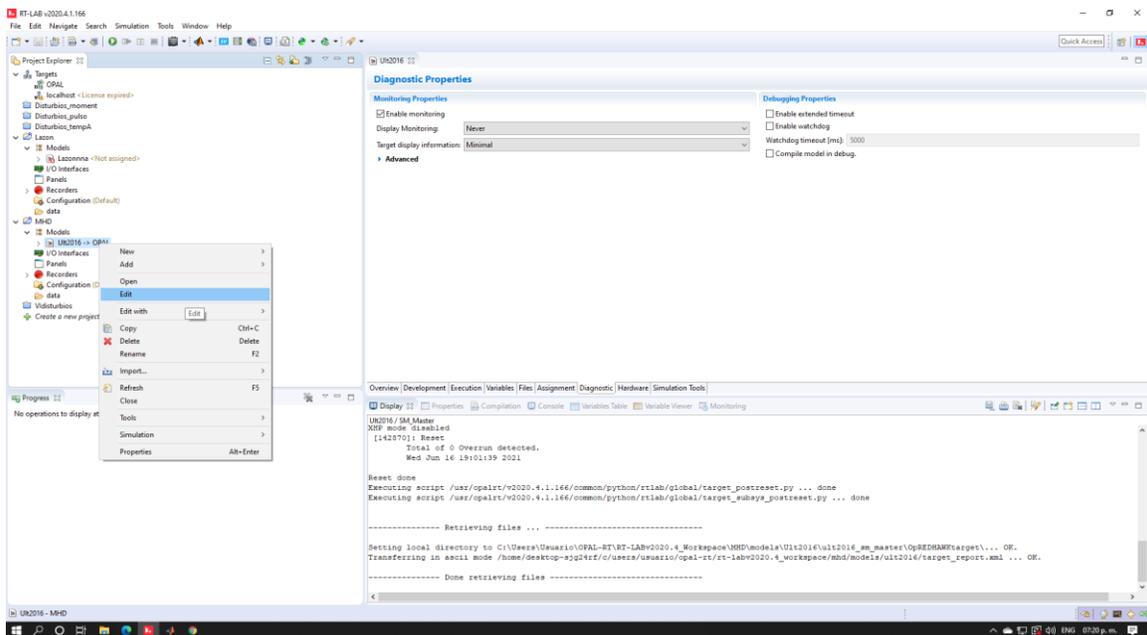


Figura 40 Instrucción Edit

Validación en Tiempo Real de un Sistema de Conversión de Energía Marina interconectado en redes de Distribución

Capítulo 4 Validación en Tiempo Real

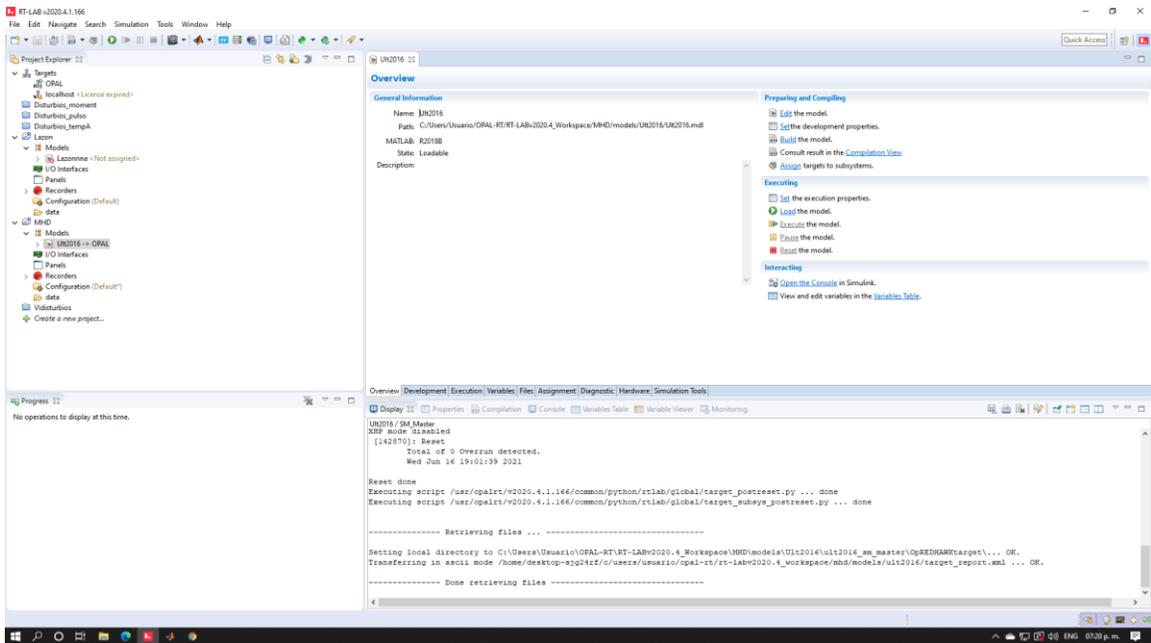


Figura 41 información del programa mostrada en la pantalla principal

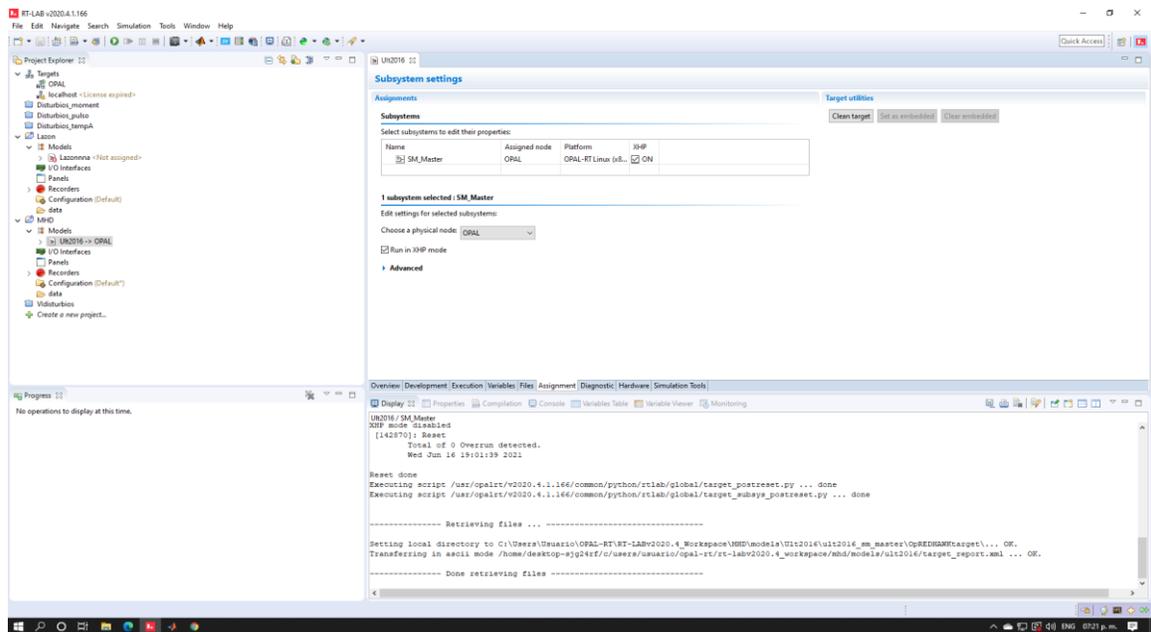


Figura 42 Menú Assignment

Capítulo 4 Validación en Tiempo Real

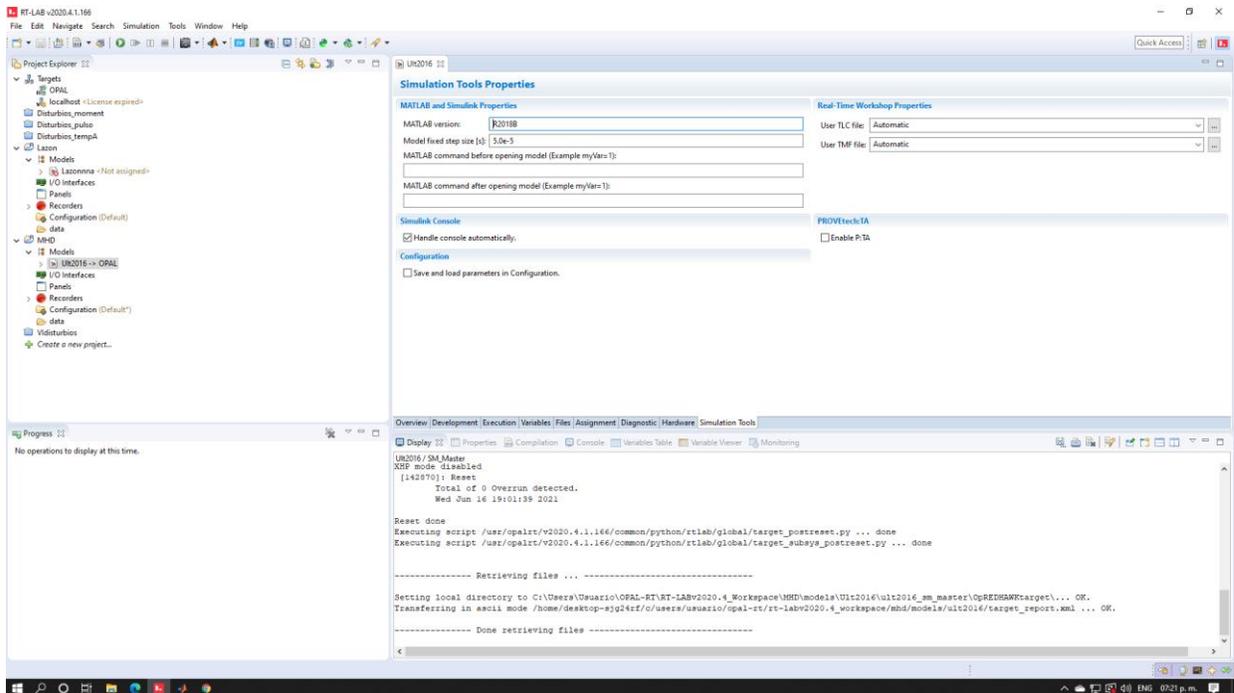


Figura 43 Menú Simulation Tools

Al detener la simulación después de un tiempo deseado, en los osciloscopios del bloque SC_Console se verán las señales de salida obtenidas de esta, que serán exportadas como datos a la pantalla principal de Matlab en donde serán cargados y ordenados con los comandos mostrados en la Figura 44 En donde se cargan los datos de obtenidos a través del comando “load”; estos datos están en forma de matriz y por conveniencia para poder graficarlos se obtuvo su transpuesta.

```
box1 ► Desktop ► Tiempo real ►  
Command Window  
>> load('Outs.mat')  
>> load('Outs.mat', 'opvar')  
>> Y = opvar';
```

Figura 44 Comandos carga y orden en Matlab

Una vez hecho esto los valores de la matriz resultante se encuentran ordenados como los muestra la Figura 45.

Capítulo 4 Validación en Tiempo Real

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	0	9.3421e-11	1.5570e-11	1.1359e-08	-9.9966e-07	-1.3750e+03	-394.0722	154.0102	240.0620	6.3529e+05	1.3750e+03	-2.7500e+03	1.3750e+03	-1.1356e-14
2	5.0000e-03	0.9424	7.8215	1.3036	2.1082e-08	6.3884e-10	-1.3598e+03	-393.0309	147.0690	245.9619	6.3523e+05	1.4196e+03	-2.7495e+03	1.3299e+03	1.3468e-17
3	1.0000e-04	1.8845	17.2391	2.8732	0.0426	-3.7484	-1.3441e+03	-391.9204	140.1063	251.8141	6.3531e+05	1.4638e+03	-2.7480e+03	1.2843e+03	-0.1597
4	1.5000e-04	2.8259	26.6498	4.4416	0.1636	-6.9000	-1.3279e+03	-390.6350	133.0764	257.5586	6.3531e+05	1.5074e+03	-2.7456e+03	1.2382e+03	-1.1288
5	2.0000e-04	3.7663	36.0503	6.0084	3.0809	-168.7154	-1.3112e+03	-389.1760	125.9878	263.1882	6.3525e+05	1.5505e+03	-2.7422e+03	1.1917e+03	-519.7903
6	2.5000e-04	4.7054	45.4373	7.5729	4.5353	-193.9211	-1.2920e+03	-387.6092	118.8711	268.7380	6.3527e+05	1.5930e+03	-2.7378e+03	1.1448e+03	-879.4808
7	3.0000e-04	5.6428	54.8076	9.1346	7.0230	-173.1812	-1.2735e+03	-385.9383	111.7277	274.2107	6.3536e+05	1.6350e+03	-2.7324e+03	1.0974e+03	-1.2162e+03
8	3.5000e-04	6.5782	64.1576	10.6929	11.9859	-255.2583	-1.2537e+03	-384.0536	104.5219	279.5316	6.3532e+05	1.6764e+03	-2.7261e+03	1.0497e+03	-3.0595e+03
9	4.0000e-04	7.5113	73.4841	12.2474	13.7286	-248.8354	-1.2317e+03	-382.0599	97.2965	284.7634	6.3536e+05	1.7172e+03	-2.7188e+03	1.0016e+03	-3.4162e+03
10	4.5000e-04	8.4417	82.7839	13.7973	17.1426	-238.1571	-1.2116e+03	-379.9629	90.0515	289.9114	6.3548e+05	1.7573e+03	-2.7105e+03	953.1709	-4.0826e+03
11	5.0000e-04	9.3691	92.0535	15.3422	20.9785	-298.8389	-1.1898e+03	-377.6883	82.7650	294.9232	6.3552e+05	1.7969e+03	-2.7013e+03	904.3816	-6.2692e+03
12	5.5000e-04	10.2931	101.2897	16.8816	25.0962	-280.6326	-1.1673e+03	-375.2734	75.4553	299.8181	6.3557e+05	1.8358e+03	-2.6911e+03	855.2710	-7.0428e+03
13	6.0000e-04	11.2135	110.4892	18.4149	29.1011	-284.3330	-1.1442e+03	-372.7189	68.1257	304.5932	6.3562e+05	1.8741e+03	-2.6799e+03	805.8565	-8.2744e+03
14	6.5000e-04	12.1300	119.6487	19.9415	33.1814	-288.7389	-1.1208e+03	-370.0258	60.7794	309.2464	6.3569e+05	1.9117e+03	-2.6678e+03	756.1556	-9.5808e+03
15	7.0000e-04	13.0421	128.7651	21.4608	39.2521	-295.2085	-1.0969e+03	-367.1616	53.4165	313.7451	6.3570e+05	1.9486e+03	-2.6548e+03	706.1862	-1.1588e+04
16	7.5000e-04	13.9496	137.8350	22.9725	41.6560	-298.8749	-1.0712e+03	-364.1946	46.0516	318.1430	6.3579e+05	1.9848e+03	-2.6408e+03	655.9658	-1.2450e+04
17	8.0000e-04	14.8521	146.8552	24.4759	45.7529	-290.4007	-1.0477e+03	-361.1299	38.6836	322.4463	6.3595e+05	2.0204e+03	-2.6259e+03	605.5123	-1.3287e+04
18	8.5000e-04	15.7493	155.8226	25.9704	52.2107	-316.8454	-1.0226e+03	-357.8639	31.3011	326.5628	6.3597e+05	2.0552e+03	-2.6100e+03	554.8438	-1.6543e+04
19	9.0000e-04	16.6410	164.7339	27.4557	54.5753	-307.2984	-995.5439	-354.4985	23.9241	330.5744	6.3607e+05	2.0892e+03	-2.5932e+03	503.9780	-1.6771e+04
20	9.5000e-04	17.5267	173.5860	28.9310	58.8262	-297.6266	-971.0055	-351.0393	16.5509	334.4885	6.3623e+05	2.1226e+03	-2.5755e+03	452.9333	-1.7508e+04
21	1.0000e-03	18.4062	182.3757	30.3959	63.2199	-320.4069	-944.7992	-347.4173	9.1754	338.2419	6.3632e+05	2.1552e+03	-2.5569e+03	401.7276	-2.0256e+04
22	0.0011	19.2792	191.0998	31.8500	67.7108	-311.3886	-918.1679	-343.6692	1.8082	341.8610	6.3640e+05	2.1870e+03	-2.5373e+03	350.3791	-2.1084e+04
23	0.0011	20.1453	199.7554	33.2926	72.1316	-311.8672	-891.1556	-339.7967	-5.5475	345.3442	6.3648e+05	2.2180e+03	-2.5169e+03	298.9062	-2.2495e+04

Figura 45 Valores de la matriz resultante transpuesta.

Estos datos obtenidos se graficaron a través de los comandos mostrados en la Figura 46 para obtener una respuesta visual y entendible de la simulación que se hizo en tiempo real. En la imagen se muestra sólo el ejemplo para las primeras tres columnas de datos; para las demás se hizo lo mismo sólo cambiando el número de la columna respectiva que se deseaba graficar.

```
>> plot(Y(:,2))
>> plot(Y(:,3))
>> plot(Y(:,4))
fx >> |
```

Figura 46 Comandos para obtener las graficas

Debido al tiempo de simulación al extraer ciertos datos algunas señales de salida no son tan claras en su información, esto es similar a cuando se hacen simulaciones de mucha duración y se tiene que hacer un acercamiento a la señal para poder apreciar su comportamiento. Las señales de salida obtenidas después de un tiempo de simulación se muestran en muestras por segundo, que es la forma como se extraen estos datos al validarlo en tiempo real mediante el simulador OPAL-RT Technologies®, a su vez estos pueden pasarse a una representación en el tiempo, pero serían idénticos a los del capítulo pasado, a continuación se muestran los resultados de la validación en tiempo real de los resultados más importantes:

4.1 Unidad De Generación

Como se mencionó en el capítulo anterior la salida de voltaje de esta etapa de generación tiene valores máximos de ± 60 V. Como se muestra en la Figura 47.

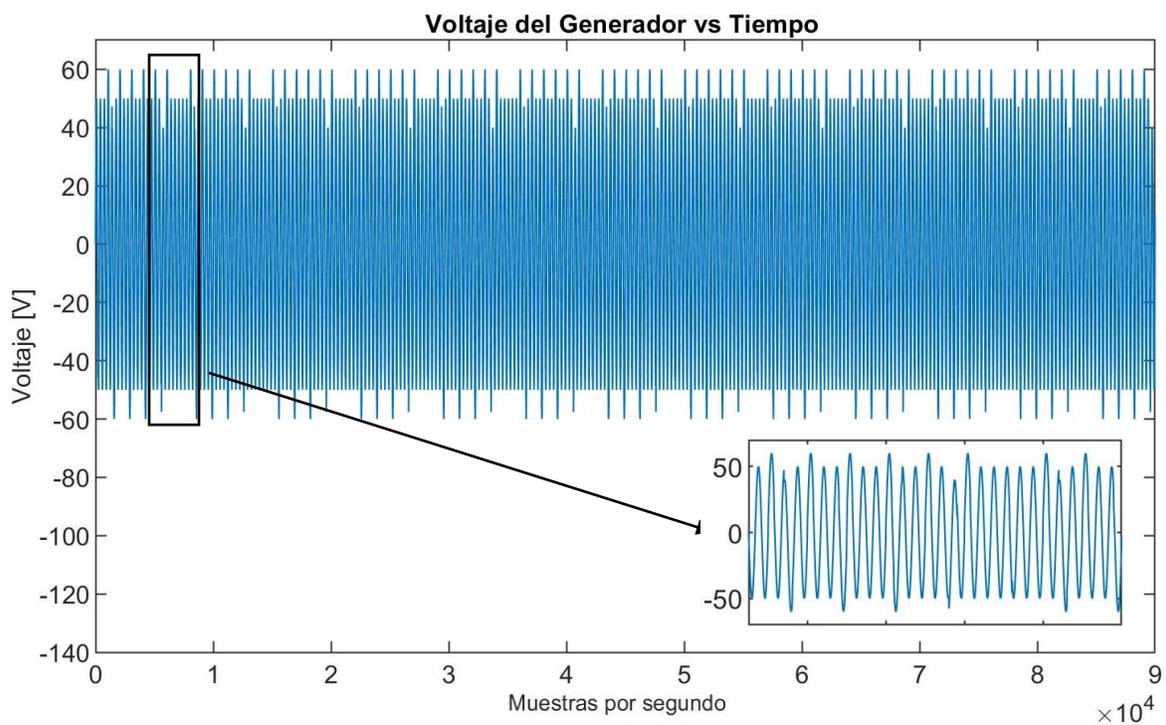


Figura 47 Voltaje de salida del generador en tiempo real

4.2 Convertidor AC/DC Puente De Diodos Monofásico

Después de pasar por el transformador elevador y la etapa de rectificación la señal de salida de voltaje se muestra en la Figura 48.

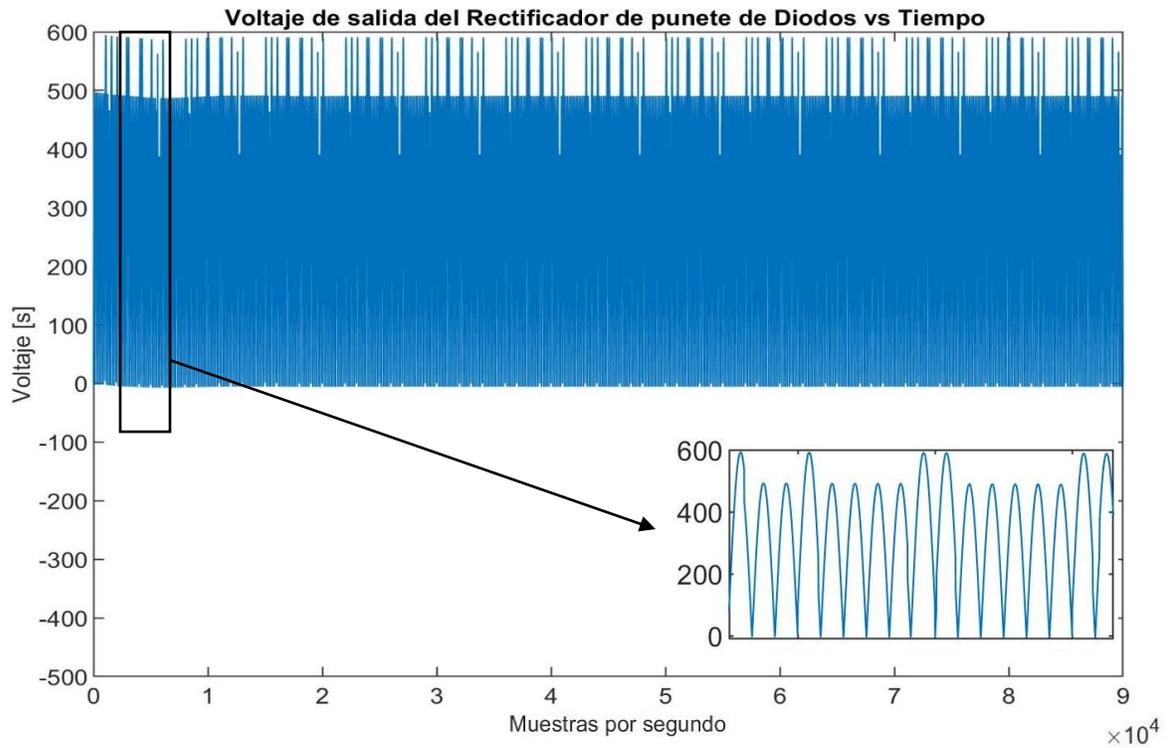


Figura 48 Voltaje de salida del rectificador puente de diodos en tiempo real

4.3 Convertidor DC/DC Elevador Multinivel

También el voltaje del convertidor boost Multinivel se muestra en la Figura 49, al igual que la corriente, estos valores se mantienen como en la simulación de Matlab-Simulink® pero en tiempo real se muestra que se mantienen aun después de cierto tiempo. En esta aplicación fueron nueve segundos.

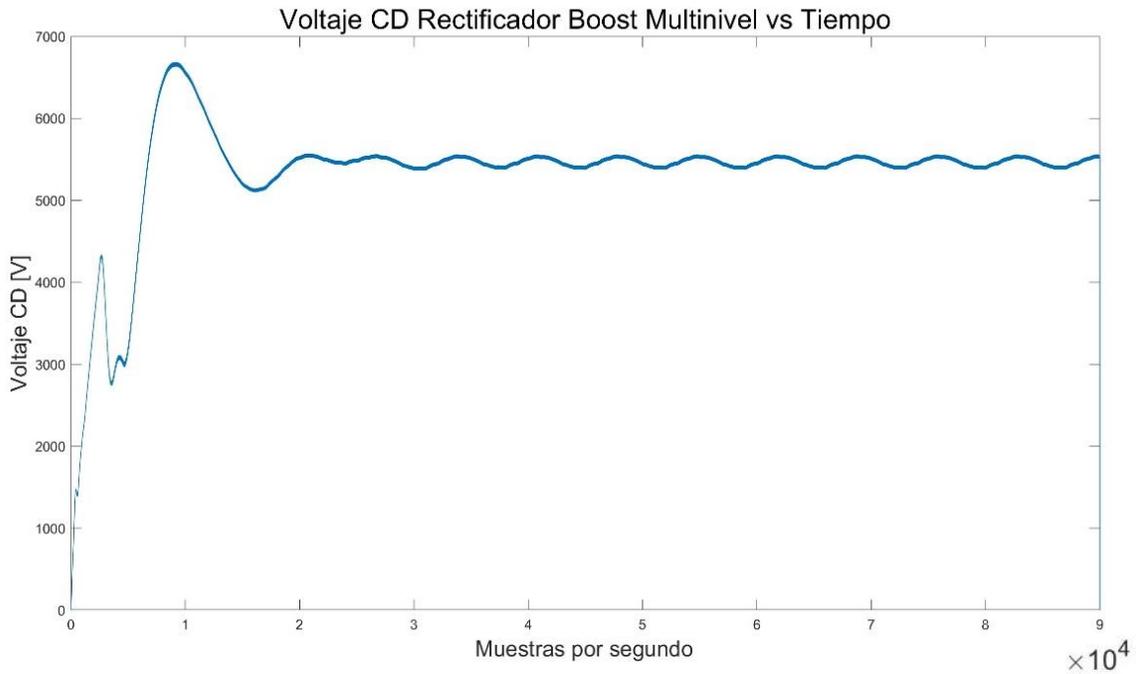


Figura 49 Voltaje de salida del rectificador Boost en tiempo real

4.4 Convertidor DC/AC VSC En Modo Inversor

En esta sección se puede apreciar los valores de voltaje tanto en la red como en la impedancia de interconexión a la red, como también la corriente que se tiene en la red una vez hecha la interconexión en las Figuras 50-52. En la validación sólo se muestra una fase por la manera en cómo se realizó el armado del programa para el RT-LAB®.

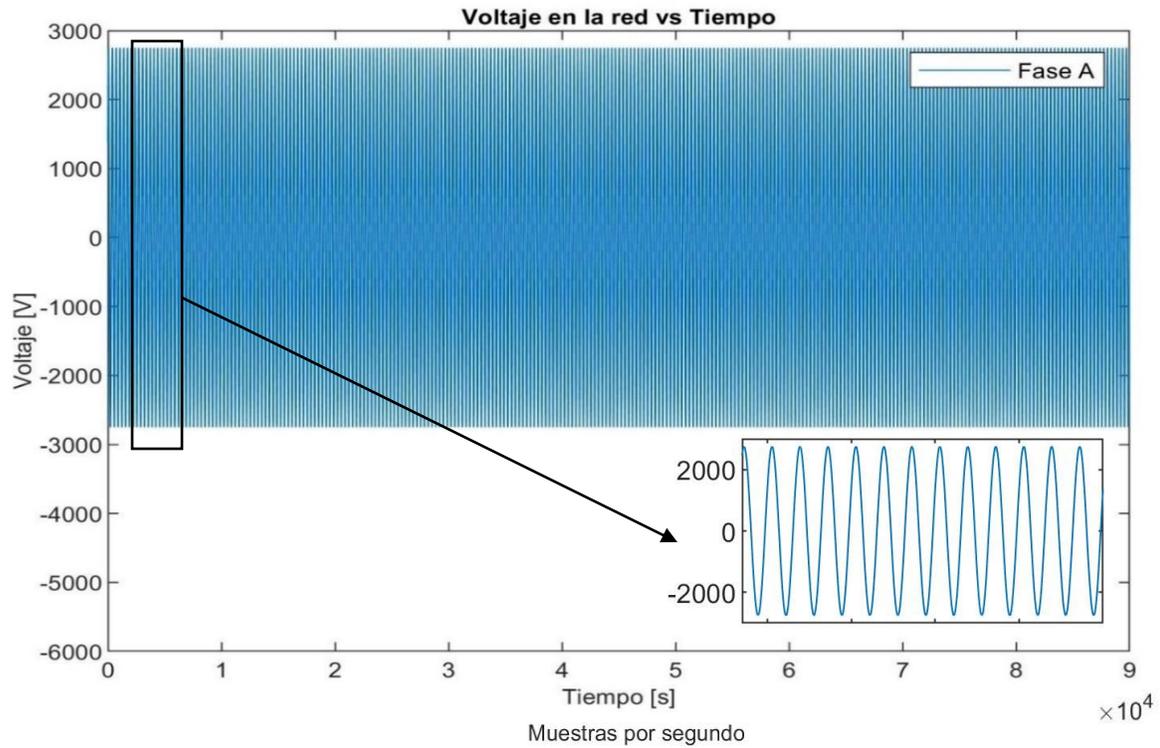


Figura 50 Voltaje en la red en tiempo real

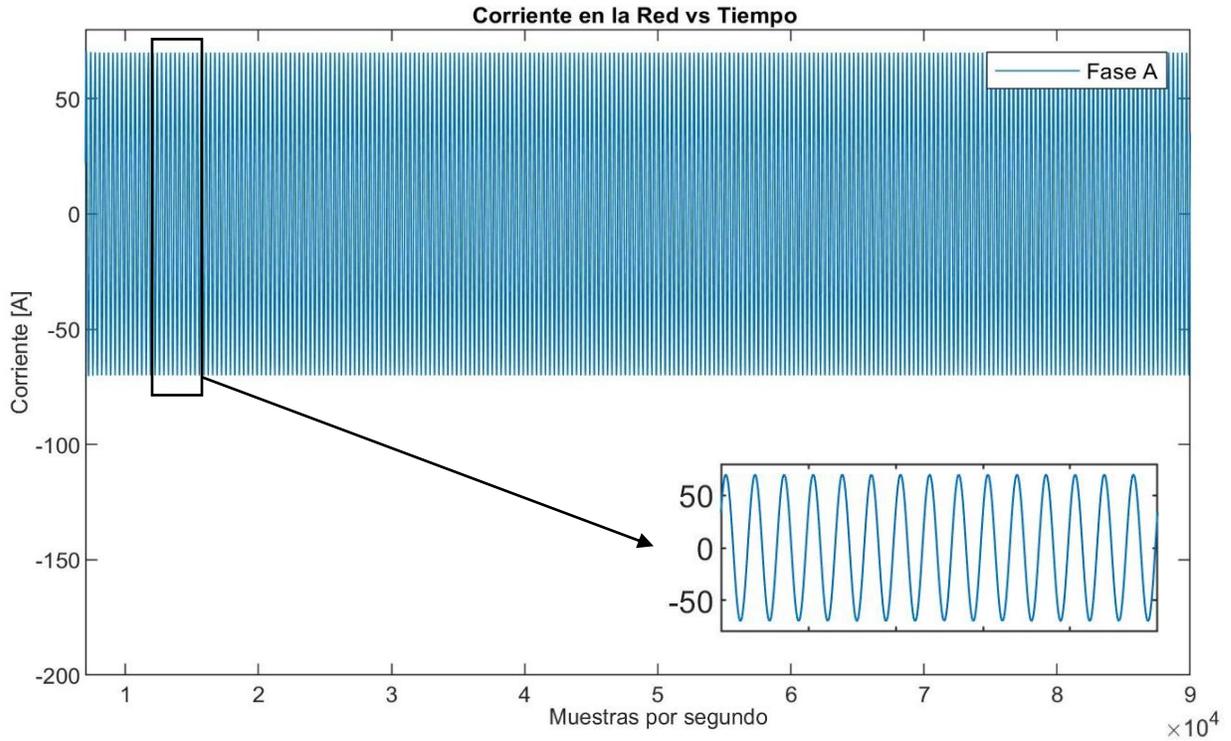


Figura 51 Corriente en la red en tiempo real

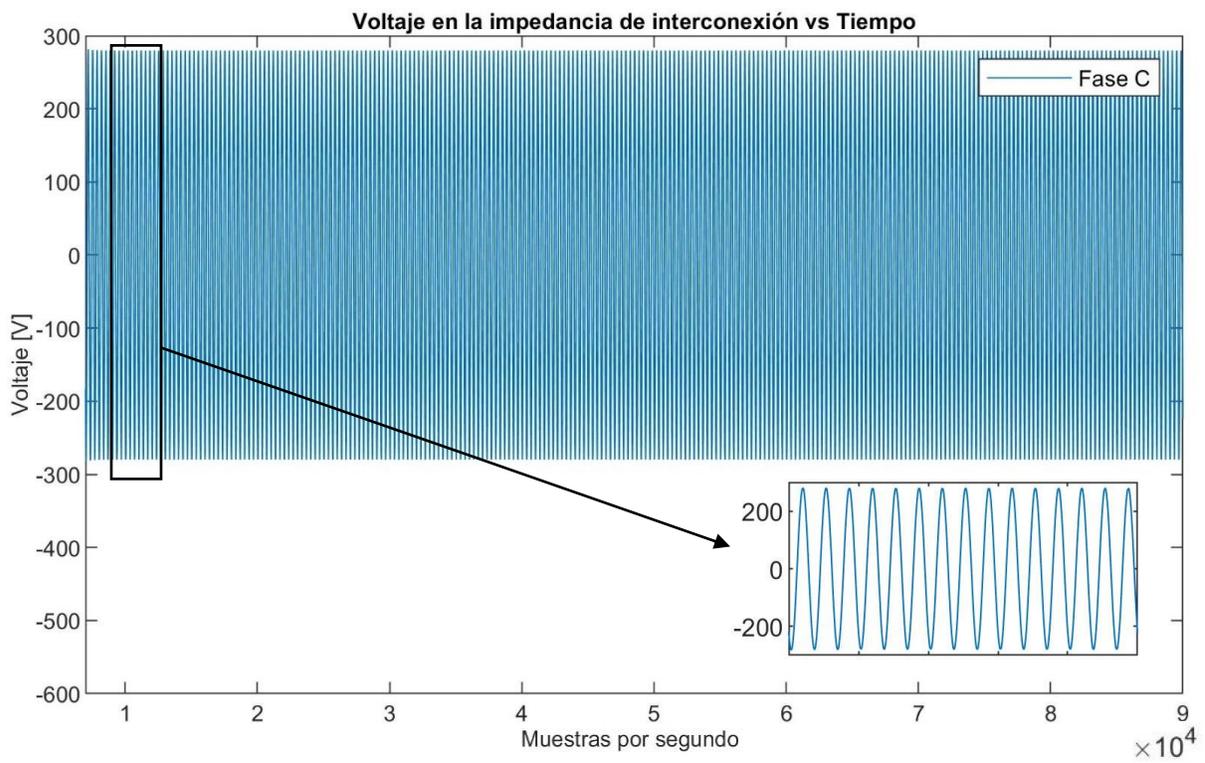


Figura 52 Voltaje en la impedancia de interconexión en tiempo real

4.5 Comparación De Potencia Entrada Salida

Para finalizar se muestra el resultado obtenido de las potencias en el sistema, además de hacer un análisis comparativo de la potencia de entrada y salida para tener una aproximación gráfica de la eficiencia, esto se muestra en las Figuras 53-55.

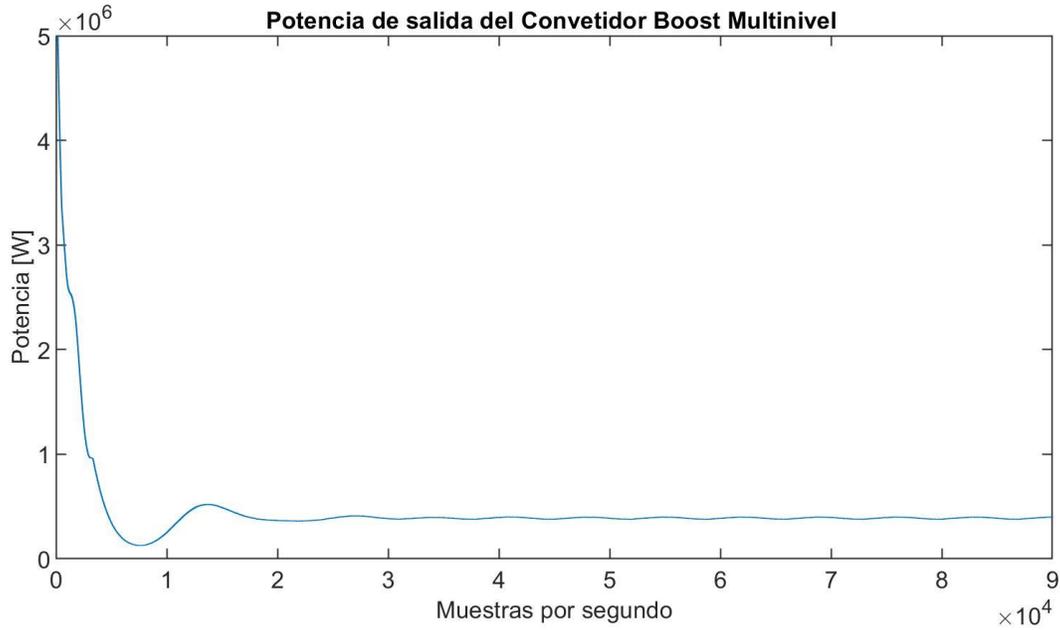


Figura 53 Potencia de salida del Convertidor boost Multinivel en tiempo real

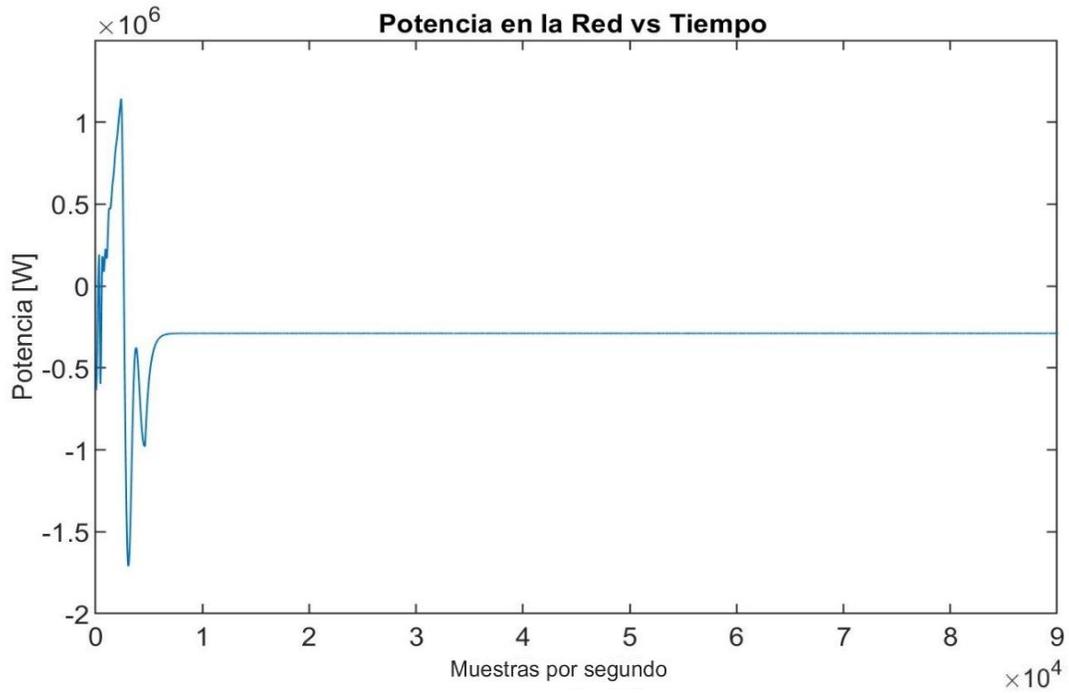


Figura 54 Potencia en la red en tiempo real

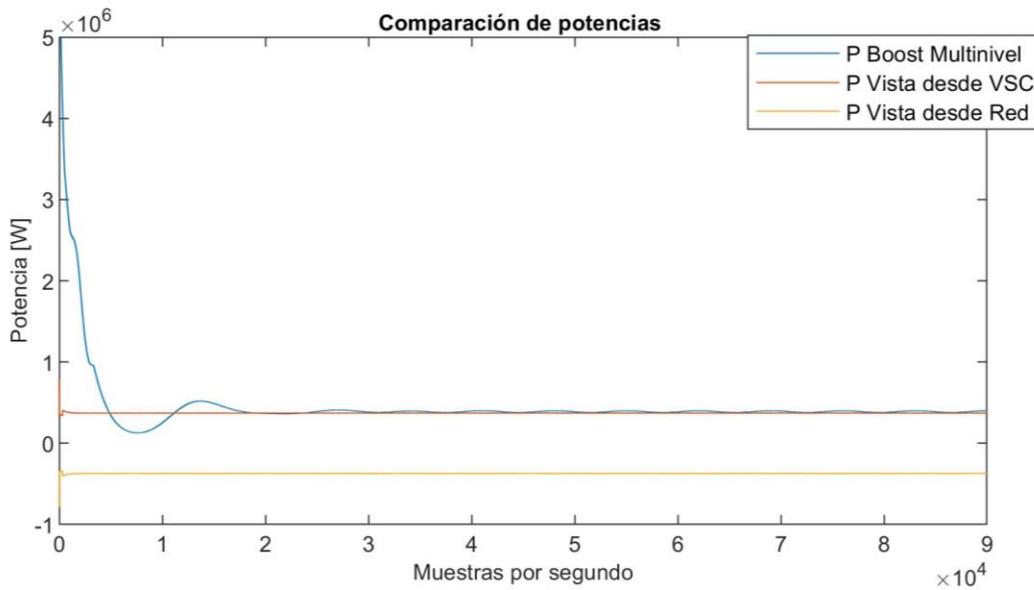


Figura 55 Comparación de potencias de entrada y salida en tiempo real

4.6 Conclusiones Particulares

Es importante realizar simulaciones de los programas, circuitos, modelos y sistemas para tener una idea de su comportamiento, como se mencionó anteriormente, pero el poder hacer una validación en tiempo real, para verificar la funcionalidad de este durante más tiempo y en otro tipo de entorno como lo fue en el LAB-RT® permite poder dar los siguientes pasos de este proyecto, ya que en mi experiencia cuando realicé esta validación, pude observar la funcionalidad de otro programa de mayor complejidad al que en tiempo real se le modificaban valores y el sistema respondía, dando información de que es lo que se podía mejorar para tener un sistema funcionando correctamente y sería interesante estudiar la aplicación abordada en esta tesis al siguiente nivel.

Capítulo 5. Conclusiones y trabajos a futuros

5.1 Aportes

Los aportes realizados con la tesis son:

- Publicación del artículo “*Marine Energy Conversion System based on Magnetohydrodynamic Generators array Interconnected into Distribution Electrical Networks*” para el congreso XXIII ROPEC 2021.
- Creación de una propuesta para la interconexión a la red eléctrica por medio de la electrónica de potencia a través de diferentes convertidores AC/DC/AC para este sistema propuesto.

5.2 Discusión

Durante la realización de la simulación y validación en tiempo real hubo ciertos aspectos a tener en consideración con el funcionamiento del sistema, por ejemplo:

La aportación de esta tesis consiste en una propuesta de estrategia de control aplicada a la interconexión de sistemas de conversión de energía marina fácil de implementar, eficaz y robusta.

Además, la integración del sistema marino genera forma de onda de voltaje y corriente sin deformaciones. Se consideró la frecuencia de las olas del mar a 60 Hz y se propuso un comportamiento aleatorio de la señal que el generador proporcionaría al sistema.

La simulación del MECS en tiempo real se utiliza como método de validación, creando un escenario operativo más realista. Es decir, se logró disminuir un rizo considerable existente en la salida del convertidor Boost Multinivel, este es un punto importante para considerar cuando se desee implementar un prototipo. Para ello, se implementa una comunicación con el simulador en tiempo real Opal-RT Technologies®, representando en laboratorio un comportamiento real. De esta forma, se valida estrictamente la eficiencia y robustez de la regla de control implementada.

5.3 Conclusiones

Estudiar nuevas maneras de generar energía eléctrica sin tener un considerable impacto ambiental utilizando los recursos renovables presentan nuevos retos para convertir energía mecánica en energía eléctrica desarrollando nuevas tecnologías por lo tanto se deben de desarrollar de igual manera nuevas propuestas para aprovechar el potencial energético que tienen.

En México la utilización de recursos marinos para generación eléctrica no tiene más que el precedente del que se habló en el capítulo 1, considerando el gran potencial

energético que tiene México es importante que se le de difusión, por ejemplo, a este tipo de trabajos para concientizar a la gente de que hay más tipos de energía renovable más allá de la solar y eólica.

También, en este trabajo se desarrolló y modeló una primera propuesta para aprovechar la energía de un generador MHD dentro de una red eléctrica aprovechando el oleaje del mar, esta se diseñó y desarrolló en un entorno de simulación para observar y analizar el comportamiento de este expuesto a diferentes condiciones; utilizando convertidores de electrónica de potencia y un sistema de control de corrientes con la técnica dq0 con técnicas de modulación SPWM.

En esta tesis se ha presentado un acceso de energía renovable distribuida (DREA, por sus siglas en inglés) mediante el modelado, diseño, análisis, simulación y validación de un sistema de conversión de energía marina (MECS) basado en un arreglo de generadores MHD interconectados a redes de distribución eléctrica.

Este trabajo ha propuesto una estructura MECS, compuesta por: arreglo de generadores MHD, convertidores de electrónica de potencia AC/DC, DC/DC y DC/AC, incluyendo un control robusto para transferir la potencia generada sin variaciones de voltaje a un bus infinito AC.

La funcionalidad de la metodología propuesta se ha simulado a través de Matlab-Simulink® (MATLAB r2018a, MathWorks, Natick, MA, USA) y se ha validado en tiempo real utilizando el simulador OPAL-RT Technologies®. Los resultados han mostrado un sistema robusto y eficaz que integra una potencia total de 390 kW desde el MECS hacia las redes eléctricas de distribución, mediante los dispositivos de electrónica de potencia que componen la estructura de estos.

Por último, se espera que esta tesis sea una guía, y se tome como una inspiración para seguir realizando investigaciones y trabajos relacionadas al área de energía eléctrica específicamente energía marina y renovable.

5.4 Trabajos Futuros

A continuación, se mencionan diferentes propuestas respecto a trabajos futuros respecto al generador LMMHD y cómo hacer la interconexión a la red.

- ❖ Elaboración e implementación física de los circuitos de electrónica de potencia con el fin de analizar el comportamiento de estos y tener en consideración los inconvenientes que siempre se presentan en el armado de estos.
- ❖ Realizar un análisis de contenido armónico.
- ❖ Realizar un estudio de frecuencia que existe en las olas del mar.
- ❖ Análisis de nuevos casos de estudio y propuestas de aplicaciones con este tipo de generador.
- ❖ Realizar la implementación física desde el generador hasta la interconexión a la red, analizar su comportamiento y mejorar los elementos ya propuesto y definir la incorporación, de ser necesario, de nuevos con el fin cumplir el objetivo de interconectarse a la red eléctrica.

Apéndice A

En esta sección se muestra a través de las Figuras 56-64, el esquema que se realizó para hacer la simulación del sistema de generación marino en el entorno Matlab-Simulink®.

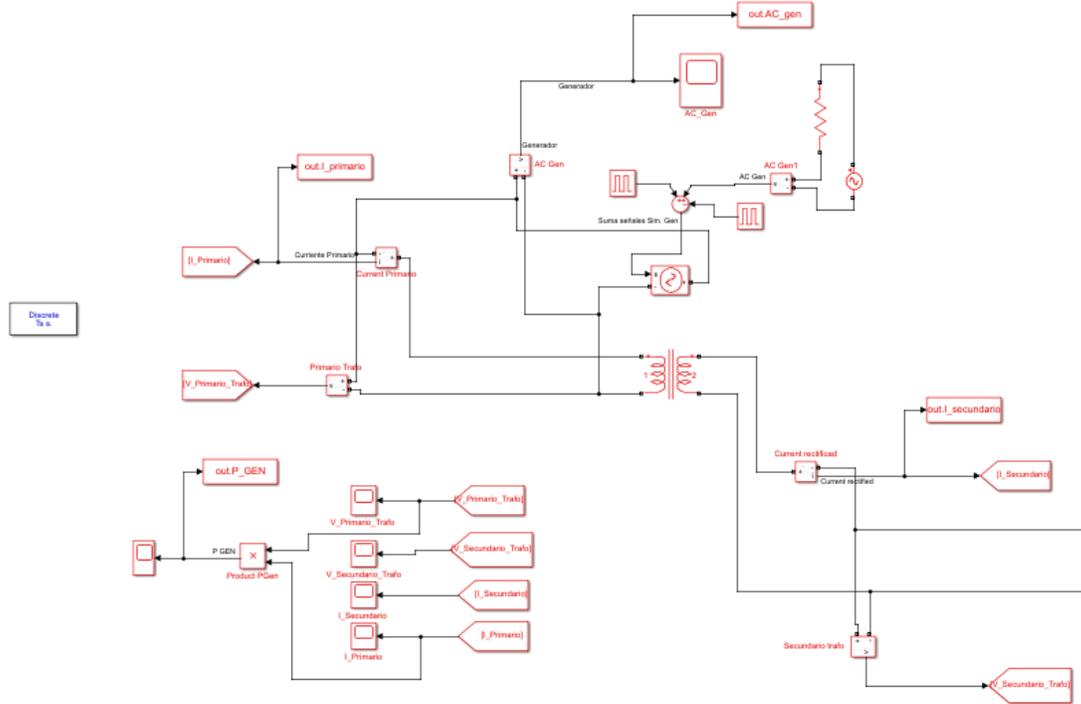


Figura 56 Etapa de Generación del sistema y bloques de medición (scopes).

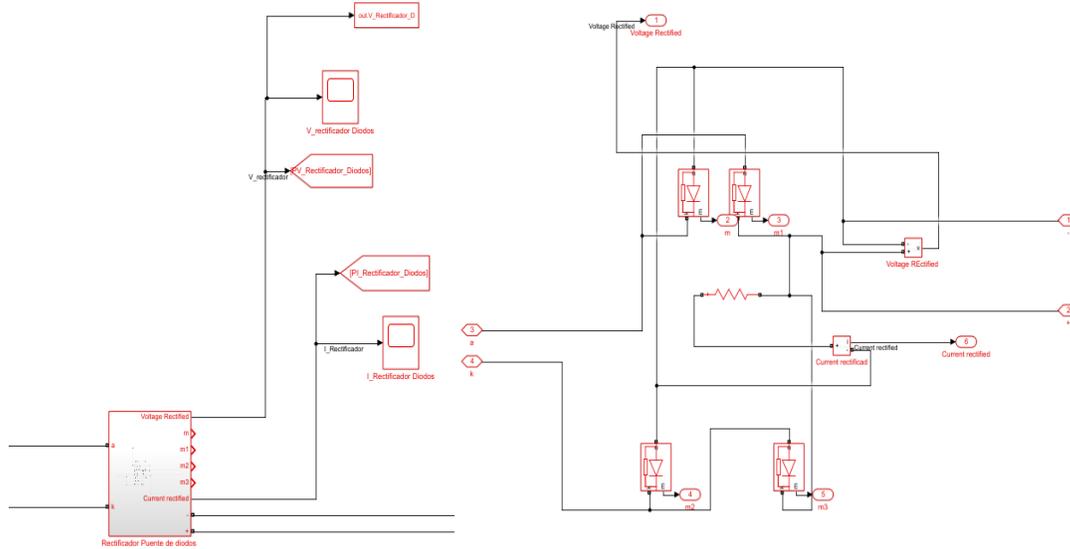


Figura 57 Bloque de puente de diodos y bloques de medición (scopes, izda.) Circuito de puente de diodos (dcha.)

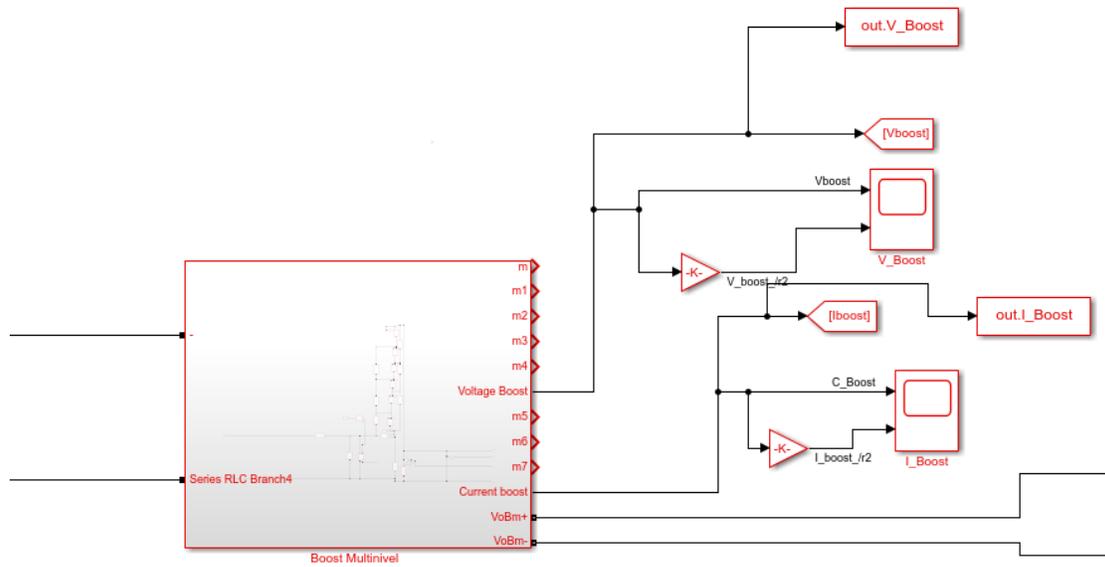


Figura 58 Bloque de Convertidor boost Multinivel y bloques de medición (scopes)

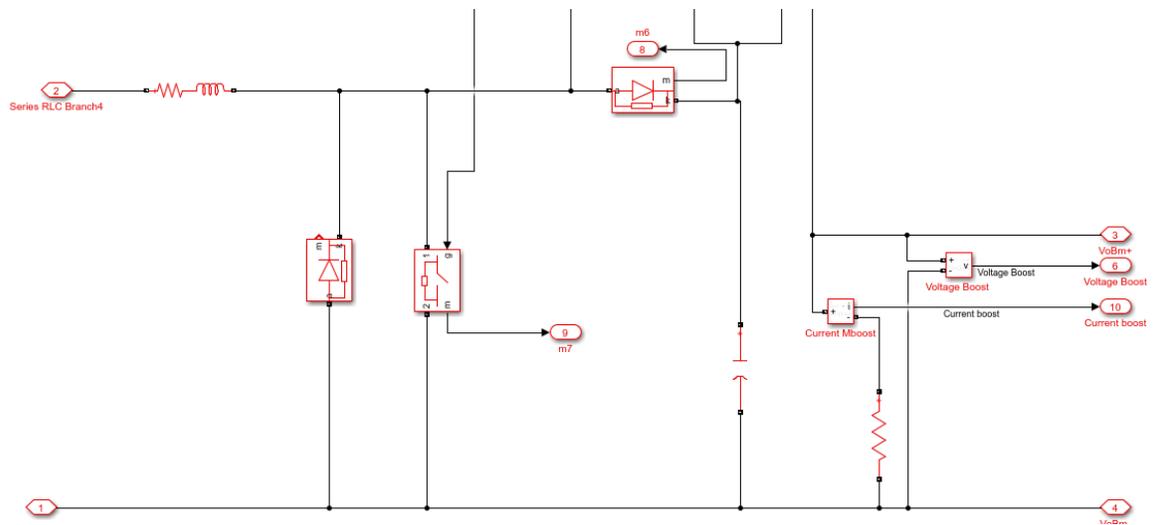


Figura 59 Convertidor Boost Multinivel

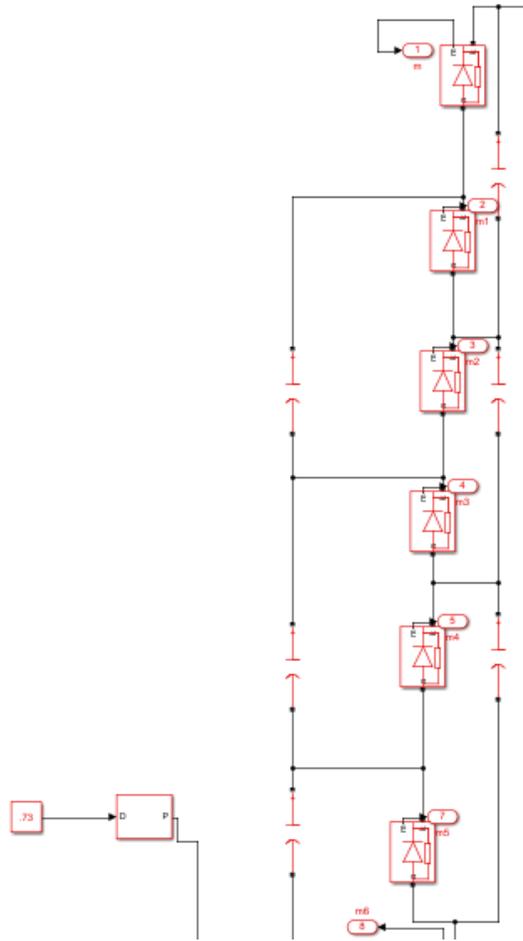


Figura 60 Convertidor Boost Multinivel

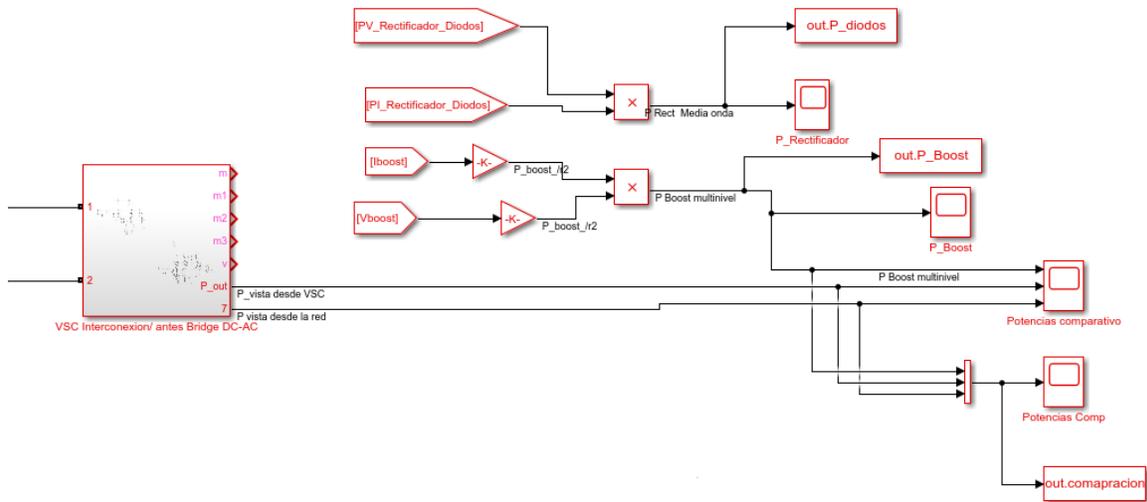


Figura 61 Bloque de VSC e interconexión a la red y bloques de medición (scopes)

Validación en Tiempo Real de un Sistema de Conversión de Energía Marina interconectado en redes de Distribución

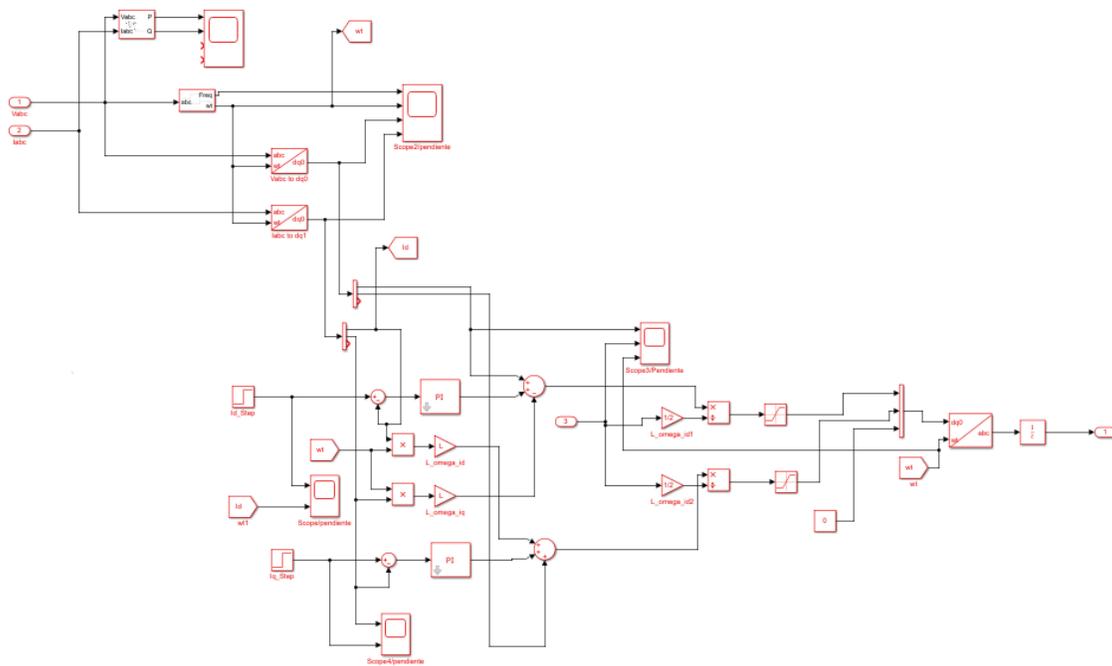


Figura 64 Sistema de control y bloques de medición (scopes)

Bibliografía

- [1] J. C. S. Rodríguez, G. P. Izquierdo y C. H. Rodríguez, Energías renovables y eficiencia energética, Instituto Tecnológico de Canarias, S.A., 2008.
- [2] “appa renovables,” APPA Renovables, 2021. [En línea]. Available: <https://www.appa.es/appa-marina/que-es-la-energia-marina/>. [Último acceso: Marzo 2020].
- [3] A. S. Alonso, “Energy & Commerce,” 2 Enero 2020. [En línea]. Available: <https://energyandcommerce.com.mx/energia-mareomotriz/>. [Último acceso: 2021].
- [4] H.-L. B. G. S. C. R. López-Gonzalez J, “Tidal Power Plant Energy Estimation,” *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. XI, n° 2, p. 13, 2009.
- [5] “Tidal Lagoon Plc and Tidal Lagoon (Swansea Bay) Plc,” Spindogs, 2020. [En línea]. Available: <http://www.tidallagoonpower.com/projects/swansea-bay/>. [Último acceso: 30 Julio 2021].
- [6] “SIMEC ATLANTIS ENERGY,” Meygen, [En línea]. Available: <https://simecatlantis.com/projects/meygen/>. [Último acceso: Julio 2021].
- [7] “CEMIE-Oceáno,” 2018. [En línea]. Available: <https://cemioceano.mx/energia-corrientes-mareomotriz.html>. [Último acceso: Julio 2021].
- [8] E. Zamora, “COLIMA NOTICIAS,” 19 Mayo 2020. [En línea]. Available: <https://www.colimanoticias.com/por-nuevas-disposiciones-de-gobierno-federal-se-detiene-en-colima-proyecto-para-generar-energia-por-medio-de-olas-del-mar/>. [Último acceso: Noviembre 2020].
- [9] S. H. Mote, *Análisis y Aprovechamiento de la Energía Mareomotriz para la Generación Eléctrica en México*, Ciudad de México, 2005.
- [10] TWENERGY, “twenergy,” 12 Diciembre 2019. [En línea]. Available: <https://twenergy.com/ecologia-y-reciclaje/curiosidades/desventajas-de-la-energia-mareomotriz-563/>. [Último acceso: Julio 2021].

Validación en Tiempo Real de un Sistema de Conversión de Energía Marina interconectado en redes de Distribución

- [11] Q. Zhang, Q. Xia y A. P. a. L. Zhao, "Design of PCS for MHD Wave Energy Underwater Recharging Platforms," de *International Ocean and Polar Engineering Conference*, Rodas, 2016.
- [12] L. Zhao, H. L. Ye, A. Peng, Q. H. Zhang, Q. Xia, B. Liu, J. Li y F. W. a. R. Li, "MHD Wave Energy Underwater Recharging Platforms for AUVs," de *Twenty-sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference*, Rhodes, Greece, 2016.
- [13] D. F. Camille, "Generateur d'électricité autonome embarque a bord de vehicules terrestres, maritimes ou ariens ou fixe pour tout usage ou de l'energie electrique et necessaire". Paris, Francia Patente 13 02047, 06 Marzo 2013.
- [14] H. Branover, "Liquid metal MHD research and development in Israel," Beer-Sheva.
- [15] S. S. V. a. A. C. S. C. KAUSHIK, "SOLAR-ASSISTED LIQUID METAL MHD POWER GENERATION: A STATE OF THE ART STUDY," 1 Marzo 1994. [En línea]. Available: <http://eprint.iitd.ac.in/bitstream/handle/2074/297/kausol95.pdf;jsessionid=D11C40E5FFE42DE44B3FEDF0C53F6462?sequence=1>. [Último acceso: Junio 2021].
- [16] B. G. H. BRANOVER, "ENERGY CONVERSION - LIQUID METAL MAGNETOHYDRODYNAMICS (MHD) POWER GENERATION FOR NAVAL APPLICATIONS," Univ. of The Negev, Beersheba.
- [17] J. BLOM, "SHOCKTUBE MHD-GENERATOR EG3," Eindhoven Univ. of Technology, Eindhoven, Netherlands.
- [18] J. BLOM, "MHD-GENERATOR, DESIGN STAGE EG 7," Eindhoven Univ. of Technology, Eindhoven, Netherlands.
- [19] G. d. México, "Mares Mexicanos," 2015. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/mares-mexicanos>. [Último acceso: Julio 2021].
- [20] "GLOBCURRENT," 2013. [En línea]. Available: <http://www.globcurrent.org/>. [Último acceso: Junio 2021].
- [21] C. S. D. X. G. R. Brian Raphael Conde Ortiz, "Análisis de datos de corrientes marinas para cálculo de potencial energético," *Jóvenes en la Ciencia*, vol. 5, 2019.
- [22] "Copernicus Marine Service," Mercator Ocean International, [En línea]. Available: <https://marine.copernicus.eu/>. [Último acceso: 1 Agosto 2021].
- [23] B. N. Mundo, "Por qué la turbulencia es uno de los más grandes misterios irresueltos de la Física," 16 Diciembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-42371054>. [Último acceso: Agosto 2021].
- [24] A. H. Olivares y F. O. Torres, "La turbulencia asociada con las velocidades orbitales de olas que aún no rompen," *Revista mexicana de física*, vol. 64, n° 6, 2018.
- [25] D. A. B. C. Recaséns, "ESTUDIO DE LA VULNERABILIDAD Y PROGRAMA DE ADAPTACIÓN ANTE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y EL CAMBIO CLIMÁTICO EN DIEZ DESTINOS TURÍSTICOS ESTRATÉGICOS, ASÍ COMO PROPUESTA DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA A EVENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS EXTREMOS," Academia Nacional de Investigación y Desarrollo A.C., Cuernavaca, 2009.
- [26] "Energía del oleaje," [En línea]. Available: <https://www.kimerius.com/Energía%20del%20oleaje.pdf>. [Último acceso: 3 marzo 2022].
- [27] J. P. Zapata, "Cuantificación del potencial energético undimotriz en las costas del Caribe colombiano," *ESPACIOS*, vol. 39, n° 03, p. 17, 2018.
- [28] H. P. a. S. C. J. C. Domínguez-Lozoya, "Analysis of the oscillatory liquid metal flow in an alternate MHD generator," *Revista Mexicana de Física*, 2019.

- [29] J. A. P. Orozco, "Estudio teórico-experimental de un generador magnetohidrodinámico de metal líquido acoplable a un convertidor de energía de olas," 2020.
- [30] J. C. D. LOZOYA, "GENERADOR ELÉCTRICO MAGNETOHIDRODINÁMICO," CIUDAD DE MÉXICO, 2019.
- [31] S. Sedra, Circuitos microelectrónicos, Oxford University Press, 1999.
- [32] A. P. Malvino, Principios de Electrónica, Madrid : McGRAW-HILY/INTERAMERICANA DE ESPANA, S. A. U., 2000.
- [33] L. G. G. R. O. C. L. A. D'Alessio, "Design and Construction of Small Power Boost Converter with Educational and Research Purposes," *Avances en Ciencias e Ingenierías*, vol. 6, nº 2, pp. C15-C20, 2014.
- [34] J. J. O. L. F. M. M. Jesser James Marulanda Durango, "Diseño y construcción de un convertidor dc/dc tipo Boost con PWM ajustable," *Scientia et Technica Año XXII*, vol. 22, nº 1, 2017.
- [35] xdastrorxd, "steemit," 2018. [En línea]. Available: <https://steemit.com/technology/@xdastrorxd/electronica-de-potencia-convertidores-de-voltaje-dc-dc-boost-converter>. [Último acceso: Mayo 2021].
- [36] J. M. R. P. M. G.-V. Julio C. Rosas-Caro, "Novel DC-DC Multilevel Boost Converter," de *PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, 2008.
- [37] R. I. Yazdani, VOLTAGE-SOURCED CONVERTERS IN POWER SYSTEMS, New Jersey: WILEY, 2010.
- [38] R. A. P. Suesca y C. L. T. Rodríguez, "Análisis y simulación de VSC's con modulación PWM para uso en sistemas HVDC," *REVISTA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS*, vol. 11, nº 2, 2007.
- [39] V. C. Sanchez y C. C. C. Bedoya, "CONTROL DE UN CONVERTIDOR DC-AC PARA LA INTEGRACIÓN DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA A LA RED ELECTRICA EN CONDICIÓN DE DESBALANCE," Pereira, 2016.
- [40] "Diseño e implementación de controladores lineales para regulación del bus DC en convertidores VSC para HVDC," *Tecnura*, vol. 18, nº 40, pp. 48-61, 2014.
- [41] P. Almeida, "Three-phase representations: abc-frame, $\alpha\beta$ -frame and dq-frame," 14 Febrero 2017. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=vdeVVTltr1M>. [Último acceso: Agosto 2021].
- [42] J. V. Saritha Natesan, "A SRF-PLL Control Scheme for DVR to Achieve Grid Synchronization and PQ Issues Mitigation in PV Fed Grid Connected System," *Circuits and Systems*, vol. 7, nº 10, 2016.
- [43] "POWERSIM," Abril 2020. [En línea]. Available: <https://powersimtech.com/resources/tutorials/implementation-and-design-of-pll-and-enhanced-pll-blocks/>. [Último acceso: 08 Agosto 2021].
- [44] E. G. a. H. Ç. Yüksel OLuz, "Power Quality Control and Design of Power Converter for Variable-Speed Wind Energy Conversion System with Permanent-Magnet Synchronous Generator," *The ScientificWorld Journal*, p. 14, 2013.
- [45] V. R. O. G.-M. O. R.-H. N. S.-H. H.-S. J. R.-R. S. F. Rodriguez, "Real time simulation of Distributed Renewable Energy Access based on Photovoltaic Energy Conversion System".
- [46] L. C. ., Y. G. ., W. W. ., B. Z. a. X. S. Tianwen Zheng, "A VSG-Based Coordinated DC Voltage Control for VSC-HVDC to Participate in Frequency Regulation," *Energies*, vol. 14, nº 2712, 2021.
- [47] D. C.-G. ., O. A.-L. ., R. O. R.-H. a. J. R. R.-R. Nadia Maria Salgado-Herrera, "THD Reduction in Distributed Renewables Energy Access through Wind Energy Conversion System Integration under Wind Speed Conditions in Tamaulipas, Mexico," *Energies*, vol. 12, nº 3550, 2019.
- [48] E. C. W. (. d. J. X. W. D. Y. F. B. V. C. a. J. F. G. (. C. Yin Sun, "The Impact of PLL Dynamics on the Low Inertia Power Grid: A Case Study of Bonaire Island Power System," *Energies*, vol. 12, nº 1259, 2019.

Validación en Tiempo Real de un Sistema de Conversión de Energía Marina interconectado en redes de Distribución

- [49] J. C. N. G. P. A. G. K. R. P.-G. K. Nieradzinska, "North Sea Offshore Modelling Schemes with VSC-HVDC Technology: Control and Dynamic Performance Assessment," *Energy Procedia* , n° 35, 2013.
- [50] G. O. Rodríguez, "Diseño y construcción a escala de un hidrogenerador interconectado a la red eléctrica a través de un convertidor VSC-Back to Back," Ciudad de México , 2019.
- [51] J. L. D. G. Luis Octavio Jáquez Legarda, "DISEÑO Y PRUEBAS EXPERIMENTALES DE UN PROTOTIPO DE INTERFAZ DE POTENCIA CD-CA PARA UNA TURBINA EÓLICA," 2016.