



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis de pérdidas en cable eléctrico
submarino en un sistema de generación
por corrientes marinas de 1.5[MW]**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Eléctrico Electrónico

P R E S E N T A

Diego Isaí Carmona Vega

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Juan Ramón Rodríguez Rodríguez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023

Resumen

La energía oceánica es una fuente de energía renovable aprovechable que con el paso del tiempo se está volviendo una opción viable para la generación de energía eléctrica dado que nos encontramos en un proceso de transición energética. Es por esto por lo que surgen ideas para desarrollar tecnologías para aprovechar la energía proveniente del mar.

Sin embargo, se debe estudiar a fondo si un proyecto de este tipo puede funcionar de manera eficiente y la mejor forma de analizarlo es viendo su comportamiento a través de algún software, en este caso se empleará MATLAB Simulink.

En la presente tesis de Ingeniería Eléctrica se presenta el desarrollo de propuestas de modelos de transmisión de potencia en CD y CA: a) Modelo de 1 línea de CD; b) Modelo de 10 líneas de CD; c) Modelo de 1 línea de CA. Las máquinas PMSG utilizadas en estos modelos son interconectadas en unidades de 10 y posteriormente se almacena su potencia generada en una estación convertidora en altamar, la cual se encargará de transmitir dicha potencia obtenida a través de un cable eléctrico submarino a la costa. Algunos modelos requerirán de una estación convertidora adicional.

Después de estudiar y analizar las corrientes simuladas a través de MATLAB Simulink, junto con los parámetros correspondientes al cable eléctrico submarino proporcionados por el fabricante, nos enfocamos en las pérdidas eléctricas por efecto Joule que se presentan en el cable eléctrico submarino.

Seleccionaremos el modelo de transmisión que minimice las pérdidas eléctricas principalmente a través del cable eléctrico submarino donde también se considera el aspecto técnico-económico del posible proyecto.

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado a mis padres **María Graciela** y **Gabriel**, por haberme apoyado durante todo este largo proceso y tener confianza en mí para terminar mis estudios.

A mi hermana **Mary** por decirme que siempre podré con todo lo que me proponga, a mi sobrina **Julieta** que la quiero como si fuera mía y que nunca tendrá un tío ausente.

A mi amigo **Israel** por ser uno de mis mejores amigos en la carrera con el que metía casi todas las materias y apoyarnos mutuamente en ellas, a **Jorge, Rodrigo, Eber, Susana** por los momentos alegres que pasamos en esta etapa.

Agradecimientos

A mis padres, por ser mi principal motor y motivarme con sus palabras para no rendirme en momentos difíciles.

Agradezco al **Dr. Juan Ramón Rodríguez Rodríguez** por la oportunidad y paciencia para realizar este trabajo, brindarme su ayuda cuando lo necesitaba y ser la principal guía para culminarlo.

Agradezco al **Dr. Mario Roberto Arrieta Paternina** por su apoyo para presentar este trabajo de tesis.

Contenido

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. Concepto general de un sistema de energía marina | 4 |
| 1.2. Planteamiento del problema..... | 4 |
| 1.3. Justificación | 4 |
| 1.4. Motivación | 5 |
| 1.5. Hipótesis | 5 |
| 1.6. Objetivos | 6 |
| 1.7. Metodología | 6 |
| 1.8. Organización de la tesis | 8 |
| 2. ESTADO DEL ARTE | 9 |
| 2.1. Sistemas de energía marina en el mundo | 9 |
| 2.1.1. Planta de Energía Mareomotriz Sihwa Lake, Corea del Sur..... | 12 |
| 2.1.2. Planta de Energía Mareomotriz La Rance, Francia | 14 |
| 2.1.3. Planta de Energía Mareomotriz Tidal Lagoon, Reino Unido..... | 15 |
| 2.1.4. Proyecto de Energía Mareomotriz MeyGen, Escocia | 16 |
| 2.1.5. Planta de Energía Mareomotriz Annapolis Royal, Canadá..... | 18 |
| 2.2. Tipos de cables eléctricos submarinos | 19 |
| 2.2.1. Cables de CA | 20 |
| 2.2.2. Cables de CD | 23 |
| 3. OPERACIÓN BÁSICA..... | 24 |
| 3.1. Unidad de generación: Máquina PMSG | 24 |
| 3.1.1. Eficiencia | 26 |
| 3.1.2. Modelo Turbina-Generador | 27 |
| 3.2. Convertidor Elevador CD/CD..... | 30 |
| 3.2.1. Descripción | 30 |
| 3.2.2. Modelo promediado | 35 |
| 3.3. Convertidor CD/CA Trifásico (VSC) | 41 |
| 3.3.1. Descripción | 41 |
| 3.3.2. Modelo promediado | 43 |
| 3.3.3. Eficiencia en convertidores | 44 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.4. | Modelos de Líneas de Transmisión..... | 44 |
| 3.4.1. | Modelo de línea corta..... | 45 |
| 3.4.2. | Modelo de línea media..... | 47 |
| 4. | PROPUESTA DE MODELOS DE RED | 49 |
| 4.1. | Distribución total de la granja..... | 52 |
| 4.1.1. | Dimensión y acomodo de las turbinas | 53 |
| 4.1.2. | Estimación por 100 unidades de generación..... | 53 |
| 4.1.3. | Cálculo de conductores y distancias | 54 |
| 4.1.4. | Modelos ideales para la transmisión de potencia..... | 54 |
| 4.1.5. | Selección de cable eléctrico submarino | 60 |
| 4.2. | Análisis total de pérdidas | 62 |
| 4.2.1. | Análisis detallado de pérdidas en CD (1 línea)..... | 62 |
| 4.2.2. | Análisis detallado de pérdidas en CD (10 líneas) | 65 |
| 4.2.3. | Análisis detallado de pérdidas 1 línea CA | 68 |
| 5. | CONCLUSIONES..... | 72 |
| 5.1. | Aportes..... | 72 |
| 5.2. | Trabajos Futuros | 72 |
| 5.3. | Impactos en el entorno | 73 |
| 5.4. | Discusión..... | 73 |
| 5.5. | Conclusiones | 74 |

Índice de figuras

| | |
|---|-----------|
| <i>Figura 1. Etapas de conversión de energía oceánica.....</i> | <i>3</i> |
| <i>Figura 1.1. Estructura básica de un PHIL..</i> | <i>3</i> |
| <i>Figura 2. Turbina Mareomotriz.....</i> | <i>10</i> |
| <i>Figura 2-1. Presa mareomotriz..</i> | <i>11</i> |
| <i>Figura 2-2. Funcionamiento de lago artificial..</i> | <i>11</i> |
| <i>Figura 2-3. Turbina O2.</i> | <i>12</i> |
| <i>Figura 2-4. Planta de Energía Mareomotriz Sihwa Lake, Corea del Sur</i> | <i>13</i> |
| <i>Figura 2-5 . Planta de Energía Mareomotriz La Rance, Francia.</i> | <i>15</i> |
| <i>Figura 2-6. Localización de Planta de Energía Mareomotriz Tidal Lagoon, Reino Unido.....</i> | <i>16</i> |
| <i>Figura 2-7. Proyecto de Energía Mareomotriz MeyGen.....</i> | <i>18</i> |
| <i>Figura 2-8. Planta de Energía Mareomotriz Annapolis Royal, Canadá.</i> | <i>19</i> |
| <i>Figura 2-9. Cable eléctrico submarino CA con fibra óptica</i> | <i>20</i> |
| <i>Figura 2-10. Cable eléctrico submarino CA.</i> | <i>21</i> |
| <i>Figura 2-11. Cable eléctrico submarino CA.</i> | <i>22</i> |
| <i>Figura 2-12. Cable eléctrico submarino CD.</i> | <i>23</i> |
| <i>Figura 3. Aspecto constructivo de generador síncrono de imanes permanentes..</i> | <i>24</i> |
| <i>Figura 3-1. Vista de sección transversal en dirección radial y dirección axial respectivamente, Máquina PMSG flujo radial.....</i> | <i>25</i> |
| <i>Figura 3-2. Vista de sección transversal en dirección radial y dirección axial , Máquina PMSG flujo axial.</i> | <i>25</i> |
| <i>Figura 3-3. Fracción de una maquina PMSG transversal.</i> | <i>26</i> |
| <i>Figura 3-4. Gráfica de coeficiente de desempeño contra la relación de velocidad</i> | <i>29</i> |
| <i>Figura 3-5. Gráfica de la potencia de salida en función de la velocidad de la turbina.</i> | <i>29</i> |
| <i>Figura 3-6. Posicionamientos de la turbina.</i> | <i>30</i> |
| <i>Figura 3-7. Circuito de un convertidor elevador CD/CD</i> | <i>31</i> |
| <i>Figura 3-8. Circuito simplificado de un convertidor elevador CD/CD.....</i> | <i>31</i> |
| <i>Figura 3-9. Convertidor elevador CD/CD Modo 1.</i> | <i>32</i> |
| <i>Figura 3-10. Convertidor elevador CD/CD Modo 2.</i> | <i>32</i> |
| <i>Figura 3-11. Formas de onda. Tomado de</i> | <i>32</i> |
| <i>Figura 3-12. Bipuerto general de convertidor boost de CD.....</i> | <i>36</i> |
| <i>Figura 3-13. Red de interruptor dependiente. Tomado de</i> | <i>37</i> |
| <i>Figura 3-14. Formas de onda de las fuentes dependientes de voltaje y corriente.</i> | <i>37</i> |
| <i>Figura 3-15. Modelo promedio del interruptor</i> | <i>38</i> |

| | |
|--|----|
| <i>Figura 3-16. Modelo de circuito convertidor boost con pequeña perturbación alrededor de una señal grande.</i> | 39 |
| <i>Figura 3-17. Modelo promediado final de convertidor de CD.</i> | 40 |
| <i>Figura 3-18. Modelo de Convertidor CD/CA Trifásico (VSC)</i> | 41 |
| <i>Figura 3-19. PWM Trifásico utilizando comparación de señal triangular.</i> | 42 |
| <i>Figura 3-20. Modelo Promediado de Convertidor CD/CA Trifásico (VSC).</i> | 43 |
| <i>Figura 3-21. Modelo de Línea Corta</i> | 45 |
| <i>Figura 3-22. Representación de bipuertos Línea Corta</i> | 46 |
| <i>Figura 3-23. Modelo de Línea Media</i> | 47 |
| <i>Figura 4-1. Modelo de turbina implementada en Simulink.</i> | 49 |
| <i>Figura 4-2. Modelo de máquina PMSG implementada en Simulink.</i> | 49 |
| <i>Figura 4-3. Curva característica para par mecánico</i> | 50 |
| <i>Figura 4-4. Curva característica para velocidad.</i> | 51 |
| <i>Figura 4-5. Curva característica para velocidad.</i> | 51 |
| <i>Figura 4-6. Diagrama de bloque para la inyección de corriente a través de los polinomios.</i> | 52 |
| <i>Figura 4-7. Localización del Canal de Cozumel</i> | 53 |
| <i>Figura 4-8. Acomodo de las turbinas.</i> | 53 |
| <i>Figura 4-9. Modelo de 1 línea de CD.</i> | 54 |
| <i>Figura 4-10. Modelo ideal de 1 línea de CD implementado en Simulink.</i> | 55 |
| <i>Figura 4-11. Medición de voltaje y corriente para la potencia generada.</i> | 56 |
| <i>Figura 4-12. Potencia generada por la granja.</i> | 56 |
| <i>Figura 4-13. Modelo de 10 líneas de CD.</i> | 57 |
| <i>Figura 4-14. Modelo ideal de 10 líneas de CD implementado en Simulink.</i> | 57 |
| <i>Figura 4-15. Medición de voltaje y corriente para la potencia generada.</i> | 58 |
| <i>Figura 4-16. Modelo de 1 línea de CA.</i> | 58 |
| <i>Figura 4-17. Modelo ideal de 1 línea de CA implementado en Simulink.</i> | 59 |
| <i>Figura 4-18. Medición de corriente modelo ideal 1 línea de CA.</i> | 60 |
| <i>Figura 4-19. Medición de corriente modelo 1 línea de CD con cable submarino seleccionado.</i> | 62 |
| <i>Figura 4-20. Comportamiento del cable respecto a la corriente.</i> | 63 |
| <i>Figura 4-21. Comportamiento del cable submarino respecto al voltaje.</i> | 64 |
| <i>Figura 4-22. Comportamiento del cable submarino respecto las pérdidas.</i> | 64 |
| <i>Figura 4-23. Comportamiento del cable submarino respecto a la eficiencia.</i> | 65 |
| <i>Figura 4-24. Medición de corriente modelo de 10 líneas de CD con cable seleccionado.</i> | 65 |
| <i>Figura 4-25. Comportamiento del cable submarino respecto a la corriente.</i> | 66 |
| <i>Figura 4-26. Comportamiento del cable submarino respecto al voltaje.</i> | 67 |

| | |
|--|-----------|
| <i>Figura 4-27. Comportamiento del cable submarino respecto al voltaje.</i> | <i>67</i> |
| <i>Figura 4-28. Comportamiento del cable submarino respecto al voltaje.</i> | <i>68</i> |
| <i>Figura 4-29. Medición de corriente modelo de 1 línea de CA con cable seleccionado.</i> | <i>68</i> |
| <i>Figura 4-30. Comportamiento del cable submarino respecto a la corriente.</i> | <i>69</i> |
| <i>Figura 4-31. Comportamiento del cable submarino respecto al voltaje.</i> | <i>70</i> |
| <i>Figura 4-32. Comportamiento del cable submarino respecto a las pérdidas.</i> | <i>70</i> |
| <i>Figura 4-33. Comportamiento del cable submarino respecto a la eficiencia.</i> | <i>71</i> |

Índice de tablas

| | |
|---|-----------|
| <i>Tabla 1. Reserva de energía oceánica teórica.....</i> | <i>2</i> |
| <i>Tabla 2.1. Datos de planta de energía mareomotriz Sihwa Lake, Corea del Sur.....</i> | <i>12</i> |
| <i>Tabla 2.2. Datos de planta de energía mareomotriz La Rance, Francia.</i> | <i>14</i> |
| <i>Tabla 2.3. Datos de planta de energía mareomotriz Tidal Lagoon, Reino Unido.....</i> | <i>15</i> |
| <i>Tabla 2.4. Datos de Proyecto de Energía Mareomotriz MeyGen, Escocia.</i> | <i>16</i> |
| <i>Tabla 2.5. Datos de Planta de Energía Mareomotriz Annapolis Royal, Canadá.....</i> | <i>18</i> |
| <i>Tabla 4.1. Datos obtenidos de la máquina PMSG por medio de Simulink.....</i> | <i>50</i> |
| <i>Tabla 4. Comparativa de corrientes para los modelos de transmisión.</i> | <i>60</i> |
| <i>Tabla 4.1. Parámetros de cable submarino eléctrico 1 línea CD.</i> | <i>61</i> |
| <i>Tabla 4.2. Parámetros de cable submarino eléctrico 10 líneas CD.....</i> | <i>61</i> |
| <i>Tabla 4.3. Parámetros de cable submarino eléctrico 1 línea CA.....</i> | <i>62</i> |
| <i>Tabla 4.4. Datos obtenidos del cable eléctrico submarino para el modelo de 1 línea de CD.....</i> | <i>63</i> |
| <i>Tabla 4.5. Datos obtenidos del cable eléctrico submarino para el modelo de 10 líneas de CD.....</i> | <i>66</i> |
| <i>Tabla 4.6. Datos obtenidos del cable eléctrico submarino para el modelo de 1 línea de CA.....</i> | <i>69</i> |
| <i>Tabla 4.7. Comparación de pérdidas eléctricas en el cable submarino para los modelos propuestos.....</i> | <i>71</i> |
| <i>Tabla 4.8. Comparación de la eficiencia en el cable submarino para los modelos propuestos.....</i> | <i>71</i> |

Acrónimos

| | |
|----------------|--|
| <i>CD:</i> | Corriente Directa |
| <i>CA:</i> | Corriente alterna |
| <i>PMSG:</i> | Permanent Magnet Synchronous Generator (Generador síncrono de imán permanente) |
| <i>WRSG:</i> | Wound Rotor Synchronous Generator (Generador síncrono de rotor devanado) |
| <i>OTEC:</i> | Ocean Thermal Energy Conversion (Conversión de energía térmica oceánica) |
| <i>PTO:</i> | Power Take Off (Toma de fuerza) |
| <i>WEC:</i> | Wave Energy Converter (Convertidor de energía de las olas) |
| <i>MW:</i> | Megawatts |
| <i>GW:</i> | Gigawatts |
| <i>MWh:</i> | Megawatts por hora |
| <i>TWh:</i> | Terawatts por hora |
| <i>PHIL:</i> | Power Hardware In the Loop |
| <i>EMEC:</i> | European Marine Energy Centre (Centro de Energía Marino Europeo) |
| <i>kV:</i> | Kilovolts |
| <i>XLPE:</i> | Polietileno reticulano |
| <i>EPR:</i> | Etileno propileno |
| P_i : | Potencia de entrada |
| P_o : | Potencia de salida |
| η : | Eficiencia |
| P_m : | Potencia extraída del aire/marea |
| ρ : | Densidad del aire |
| C_p : | Coeficiente de desempeño |
| v_w : | Velocidad del viento |
| r : | Radio de barrido de las cuchillas del rotor |
| λ : | Relación de velocidad entre las hélices de la turbina y el viento |
| ω_r : | Velocidad mecánica del rotor |
| <i>TBJ:</i> | Transistor de unión bipolar |
| <i>MOSFET:</i> | Transistor de efecto de campo |
| <i>VSC:</i> | Voltage Source Converter (Convertidor de fuente de voltaje) |

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la generación de energía eléctrica por el método convencional ha ido al alza en el aspecto económico debido a que los recursos como los combustibles fósiles se han ido agotando con el tiempo. Los países compiten por desarrollar un negocio energético y con desarrollo sustentable ecológico.

Existen alternativas cuando nos referimos a la generación de energía eléctrica, por ejemplo, la generación eólica, generación por biomasa, generación geotérmica, etc. Sin embargo, existe una generación que puede aprovecharse y ser más rentable que las mencionadas anteriormente, nos referimos a la energía oceánica.

La energía oceánica es una fuente de energía renovable que es aprovechable mediante el uso de tecnología para generar energía eléctrica.

En [1], los autores clasifican a la energía oceánica en categorías:

- Energía por marea y corrientes marinas

Para el caso de corrientes de corrientes marinas surge de la disminución periódica y flujo de las aguas de la marea costera acompañado del incremento y decremento de las olas conducidas por las fuerzas gravitacionales de la luna y el sol, combinado con la energía cinética producida por la rotación de la tierra.

- Energía oceánica térmica

Esta energía, conocida por sus siglas en inglés OTEC (Ocean thermal energy conversion) es un proceso donde se produce la potencia utilizando diferentes temperaturas entre los niveles de agua de la superficie caliente y la profundidad fría del océano de 800 a 1000 [m] aproximadamente. La energía solar se almacena como calor dentro del nivel de la superficie del océano y mezclado por el movimiento de las olas hacia aguas profundas de unos 100 [m] aproximadamente.

- Energía por oleaje

Un calor desigual de la superficie de la tierra conduce viento, el cual atraviesa el agua para crear las olas. Las olas son creadas por aguas profundas principalmente. Las olas que se propagan por este proceso presentan ligeras pérdidas a través del océano, debido a que experimentan una pequeña atenuación o fricción en aguas profundas.

- Energía gradiente salino

En el artículo [3] el autor indica que la energía de gradiente salino, también conocida como energía azul o energía osmótica, genera energía electromecánica mediante la mezcla de agua dulce proveniente de un río y agua salada proveniente del mar. Su funcionamiento se basa en la electrodiálisis y la ósmosis retardada por presión.

Acorde con [2], se estima que la reserva de la energía oceánica queda dividida tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Reserva de energía oceánica teórica, traducción propia [2].

| Fuente | Capacidad [GW] | Generación Anual [TWh] |
|--------------------|----------------|------------------------|
| Corrientes marinas | 5000 | 50000 |
| Osmótica | 20 | 2000 |
| Oceánica térmica | 1000 | 10000 |
| Por marea | 90 | 800 |
| Por oleaje | 1000 – 9000 | 8000 - 80000 |

En el artículo [2] los autores mencionan que la conversión de energía oceánica consta de tres etapas:

Primera etapa: Consiste en la conversión de la energía oceánica a energía mecánica o neumática.

Segunda etapa: La energía absorbida que proviene de la primera etapa se convierte en energía mecánica útil mediante el uso de PTO (Power Take Off).

Tercera etapa: Es una conversión adicional que proviene de la energía mecánica de la segunda etapa para obtener la energía eléctrica por medio del uso de un WEC, esto con el objetivo de mejorar la eficiencia. En el capítulo 3 se dará más detalle sobre la eficiencia de un WEC.

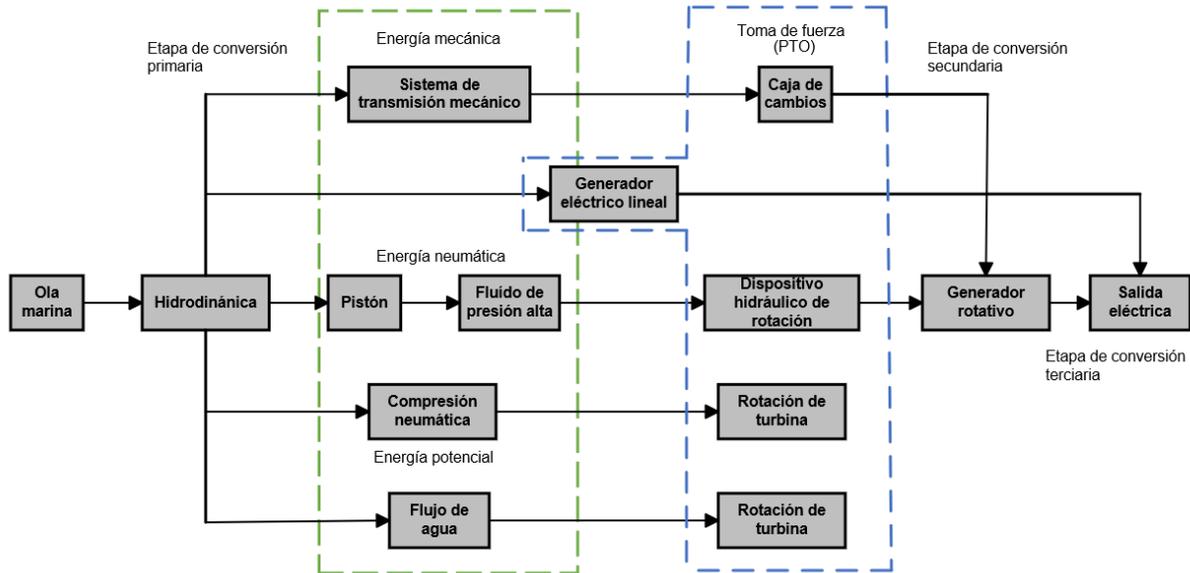


Figura 1. Etapas de conversión de energía oceánica. Tomado de [2].

El modelado y simulación son muy útiles al momento de plantearse una posible instalación o comercialización de algún proyecto. En [4] se dice que la utilización de PHIL (Power Hardware In The Loop) es una herramienta para reducir riesgos y principalmente verificar la eficacia de la metodología del modelado.

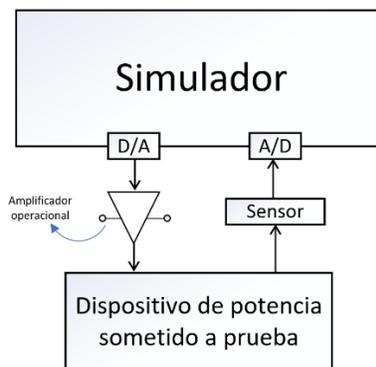


Figura 1.1. Estructura básica de un PHIL. Tomado de [4].

En el artículo [5] se menciona que previo a la comercialización de la energía eléctrica generada a través de la energía oceánica se utilizan campos de prueba, con el fin de examinar el desempeño en la conversión de los dispositivos y tecnologías relacionadas a la energía por oleaje, por corrientes marinas y otros tipos de energía.

1.1. Concepto general de un sistema de energía marina

Un sistema de energía marina es un conjunto de tecnologías que aprovechan los movimientos que se presentan en el océano , esto puede ser al incremento y decremento de las olas, mediante una turbina.

1.2. Planteamiento del problema

Se debe analizar a detalle las diferentes alternativas de transmisión de energía en corriente directa (CD), corriente alterna (CA) y generación por módulos distribuidos de forma híbrida desde altamar hasta la costa, con el fin de seleccionar el método más eficiente con base en las pérdidas presentadas en las simulaciones.

1.3. Justificación

La generación eléctrica distribuida con fuentes locales de energía representa hoy en día una opción viable a mediano y largo plazo para la electrificación de sitios remotos o descentralizados incrementando así sus oportunidades de crecimiento económico y social. Dentro de las potenciales formas de generación de energía renovable, es posible mencionar a los recursos energéticos como solar, eólico y marino. La energía marina se ha proyectado como una gran promesa energética para su futura implementación y aprovechamiento en las actividades humanas en zonas costeras.

Es evidente que, en el contexto de fuentes de energía renovable para la producción de potencia eléctrica a partir del océano, indiscutiblemente, se requiere de etapas de conversión de energía mecánica y eléctrica, los cuales tienen como objetivo de gestionar de forma óptima la energía desde los transductores o generadores eléctricos hasta su dócil integración a las redes eléctricas y microredes.

1.4. Motivación

Estamos en un proceso de transición energética, podemos hablar de que alguna energía como la solar o eólica se aprovechan con regularidad. Actualmente en México el aprovechamiento de energía oceánica es casi nulo y se observa que, en otros países principalmente europeos, ya cuentan con el uso de esta energía. En el área de energía oceánica aún queda demasiado por analizar para hacer buen uso y hacerla aprovechable. Es por esto por lo que se espera contribuir con este trabajo para impulsar y facilitar a proyectos que se puedan planear a futuro cuando se use la generación por corrientes marinas.

1.5. Hipótesis

A partir del análisis de pérdidas en los procesos de transmisión de energía eléctrica por corriente directa (CD) y corriente alterna (CA) será posible especificar la forma óptima de interconexión de una granja por corrientes marinas.

La transmisión de energía generada por una planta marina de 1.5 [MW] es factible basándonos en las pérdidas que se presentarán en un cable eléctrico submarino.

1.6. Objetivos

En la presente investigación se realiza una evaluación para tres opciones de transmisión de energía eléctrica de una planta de energía marina. De manera concreta se analizarán las pérdidas en la transmisión por corriente directa (CD) y corriente alterna (CA), donde de manera secundaria se consideran las ventajas y desventajas en los métodos dentro de los modelos que se proponen.

Se espera que el análisis sirva como herramienta para futuras plantas de generación a partir de corrientes marinas en México.

Es evidente que, en el contexto de fuentes de energía renovable para la producción de potencia eléctrica a partir del océano, indiscutiblemente se requiere de etapas de conversión de energía mecánica y eléctrica, los cuales tienen como objetivo de gestionar de forma óptima la energía desde los transductores o generadores eléctricos hasta su integración a las redes eléctricas y microredes.

1.7. Metodología

I. Recolección de información y fuentes bibliográficas

En esta etapa se pretende recabar información sobre el funcionamiento de sistemas de energía marina por medio de artículos científicos, libros, videos, etc. Esto tiene como objetivo conocer a detalle el funcionamiento en conjunto y cada una de las partes que los componen.

II. Análisis por etapas de una granja por energía marina

El análisis de las etapas consistirá en el estudio de modelos computacionales por medio de Matlab Simulink que emulen el comportamiento de la unidad de generación, convertidores, así como la del cable eléctrico submarino con el objetivo de conocer sus curvas de operación, modelo matemático y características de operación.

III. Operación en conjunto

Se unirán los componentes del sistema de generación estudiados en el punto 1, con el objetivo de observar el funcionamiento y comportamiento de un sistema de energía marino interconectado a la red eléctrica, realizando simulaciones en el software Matlab Simulink.

IV. Casos de estudio (Modelos) para transmisión de energía marina

Estudiar el comportamiento de un sistema de energía marina interconectado a la red eléctrica cuando se presentan distintos modelos de transmisión: a) Transmisión de potencia por medio de una línea de corriente directa (CD) a una subestación a la costa, b) Transmisión de potencia por medio de 10 líneas de corriente directa (CD) conectadas a una subestación en altamar, c) Transmisión de potencia por medio de una línea de corriente alterna (CA) conectada directamente a la red.

V. Análisis de datos obtenidos

Con las observaciones y los resultados obtenidos en la etapa anterior se realizará una comparación cualitativa donde se presenten las ventajas y desventajas técnico-económicas de cada método de transmisión de energía.

1.8. Organización de la tesis

En el capítulo 1 (Introducción) de la presente tesis se da la introducción sobre la generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento de la energía oceánica y sus tipos, así como las capacidades teóricas de generación para cada tipo de energía oceánica. Se finaliza con la definición de un sistema de energía marina.

En el capítulo 2 (Estado del Arte) se presentan los métodos para la generación de energía eléctrica por medio de energía oceánica. Con el conocimiento de estos métodos damos paso a los sistemas de energía marina que ya han sido instalados alrededor del mundo, destacando su capacidad de generación, ubicación y el tipo de turbina que se implementaron en estos sistemas. Se finaliza con una descripción de cables eléctricos submarinos que se utilizan tanto en la transmisión de CA y CD.

En el capítulo 3 (Operación Básica) se muestra la teoría y los elementos fundamentales que se utilizarán para construir los modelos de transmisión que se proponen en el capítulo 4. Los elementos que se describirán son: Unidad de generación (Máquina PMSG), Convertidor elevador CD/CD, Convertidor CD/CA Trifásico.

En el capítulo 4 (Propuesta de modelos de red) se presentan las propuestas para la transmisión de 1.5 [MW] de la granja por medio de corrientes marinas, partiendo de modelos ideales. Se hace una descripción de cada modelo, detallando el acomodo de las turbinas para la granja, la conexión del cable eléctrico submarino y la cantidad de estaciones convertidoras necesarias para su funcionamiento. Con el resultado de esta prueba se realiza el cálculo de los cables y distancias para elegir un cable eléctrico submarino que sea capaz de soportar las pruebas para los modelos reales. Se finaliza con un análisis total detallado de las pérdidas en la transmisión de corriente directa (CD) y corriente alterna (CA) que se presentan en el cable eléctrico submarino seleccionado.

Se presenta con el capítulo 5 (Conclusiones) los aportes hechos, futuros proyectos o trabajos, el impacto en el entorno. Se finaliza con la elección del método más eficaz para la transmisión de energía en base a los resultados obtenidos de las pérdidas eléctricas mediante el software Matlab Simulink, cuidando el aspecto económico para la construcción del proyecto.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Sistemas de energía marina en el mundo

Alrededor del mundo existen sistemas que se adaptan a su localización, y esto puede variar a la hora de montar el equipo necesario para aprovechar la energía proveniente del agua.

Con base en [6], los autores mencionan algunos de los elementos que se usan para en los sistemas de energía marina son:

- Turbina en altamar

Es evidente que existe similitud entre una turbina mareomotriz y una turbina eólica debido a que usan palas para su funcionamiento. En el artículo [7] nos dice que una turbina mareomotriz puede generar más energía con palas iguales en tamaño, sólo que su costo de construcción es elevado.

Colocar turbinas resulta un poco complicado ya que interrumpen el oleaje que se intenta aprovechar. Este método suele ser más efectivo en aguas de poca profundidad ya que produce más energía y permite la navegación de barcos alrededor de las turbinas.

Puesto que las palas de la turbina no son lo suficientemente rápidas, se considera que es una ventaja porque la vida marina no corre riesgo de quedar atrapadas en ellas.

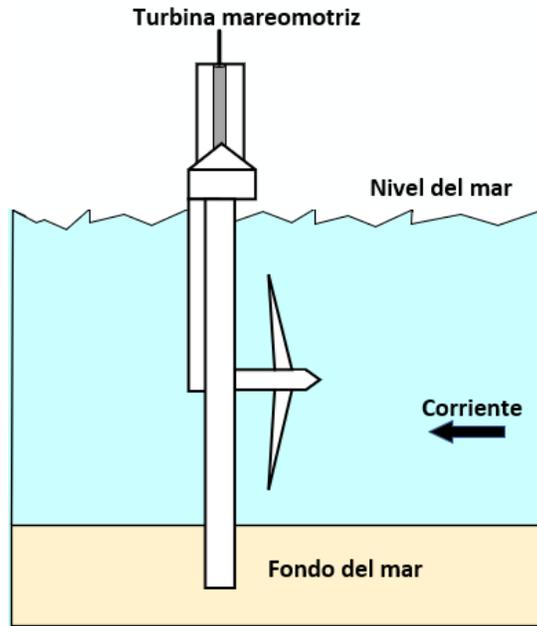


Figura 2. Turbina Mareomotriz. Tomado de [7].

- Por presa

Este método utiliza una presa de longitud grande. El agua puede pasar por encima de ella o por las turbinas debido a la baja altura de la presa. Cuando la marea comienza a incrementar las compuertas de la presa se abren hasta que la marea se encuentra en un nivel alto, en ese momento las compuertas se cierran y el agua es liberada a través de las turbinas en la presa.

Este proceso es controlado por ingenieros para generar energía cuando se requiera. Este método es más caro comparándolo con el que solo se ocupa la turbina, ya que se requiere el uso de más turbinas y por consecuencia la revisión constante de la presa.

Las presas incrementan los niveles de sedimento, lo cual tiene un efecto negativo en las plantas acuáticas y puede llevar a la extinción de peces en el área.

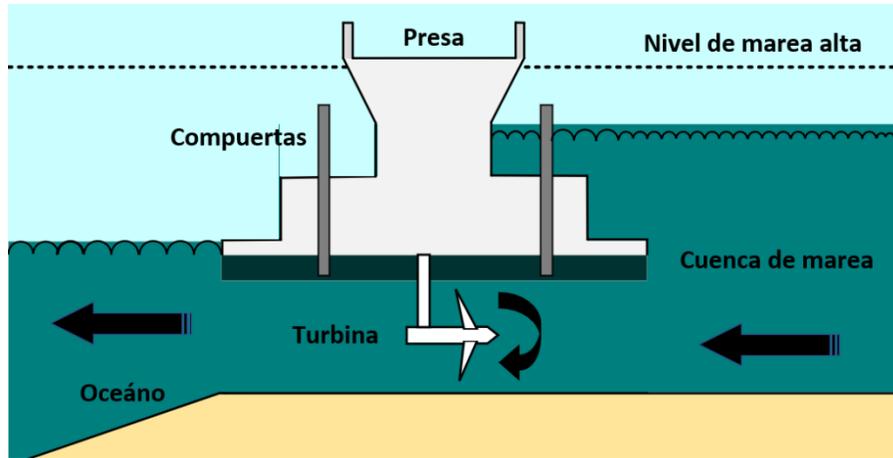


Figura 2-1. Presa mareomotriz. Tomado de [8].

- Por lagunas mareales

Este método consiste en la construcción de un lago artificial, que viene a partir de tomar una parte del agua del océano que se encierra en una barrera hecha por el hombre. Su funcionamiento es similar a una presa, sin embargo, los lagos artificiales pueden ser construidos a lo largo de la costa.

El funcionamiento de las turbinas dependerá de los niveles del agua del lago, el cual se ilustra en la Figura 2-2. El lago artificial puede generar energía de manera constante.

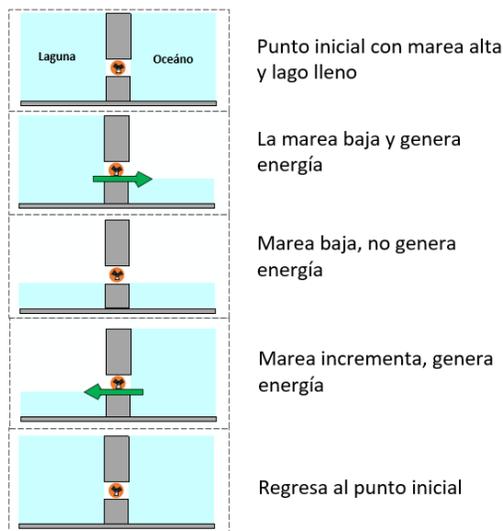


Figura 2-2. Funcionamiento de lago artificial. Tomado de [9].

Como podemos observar, una parte fundamental de un sistema de energía marina es la turbina, ya que a través de ella se realiza el proceso de convertir la energía mecánica en energía eléctrica. Un ejemplo de una turbina moderna es la turbina O2, que tiene la capacidad de generar hasta 2 [MW].



Figura 2-3. Turbina O2. Tomado de [10].

Está ubicada actualmente en EMEC (Centro de Energía Marino Europeo), donde la velocidad del agua alcanza hasta 3 [m/s]. Se encuentra conectada a través de un cable submarino a la red eléctrica que ayuda a alimentar a las comunidades de Orkney de manera limpia y sustentable [11].

Los mares son una amplia fuente de energía renovable y esto se puede observar en proyectos instalados en otros países, los cuales se describirán a continuación.

2.1.1. Planta de Energía Mareomotriz Sihwa Lake, Corea del Sur

Tabla 2.1. Datos de planta de energía mareomotriz Sihwa Lake, Corea del Sur.

| Ubicación | Potencia | Tipo de turbina |
|------------------|-----------------|------------------------------|
| Corea del Sur | 254 [MW] | Turbina de bulbo 25.4[MW] |

La costa oeste de corea del sur cuenta con una gran variedad de tamaños y amplio rango de mareas, lo cual es fundamental para el desarrollo de recursos marítimos para la producción de energía. Esto

conlleva a presentar la planta de energía con una capacidad de 254 [MW], nos referimos al proyecto Sihwa Lake.

De acuerdo con [12], Sihwa Lake es un lago artificial con 43.8 km que fue construido en 1994, usando 12.7 [km] de longitud de rompeolas en la bahía de Gyeonggi. Fue creado para mitigar inundaciones y agua de riego segura al convertir la reserva costera en agua dulce.

Aunque el rompeolas y la corriente natural de la marea fue cortada, la calidad del agua fue deteriorada. Esto fue como consecuencia de diversos factores, incluyendo el incremento del desperdicio de agua proveniente de complejos industriales.

La autoridad de agua del gobierno de Corea estudió la viabilidad para la construcción de una planta de energía marina en el lugar donde se mejoraría la circulación del agua del mar en un 200 por ciento. La aprobación fue recibida en 2002 y su construcción entre 2003 y 2010 con un presupuesto de 256,8 millones de euros, siendo la compañía Daewoo Engineering & Construction la responsable de la ingeniería, suministro y construcción (EPC) para el proyecto.

La planta de energía mareomotriz Sihwa Lake genera, en una sola dirección, energía dos veces al día cuando hay mareas altas. Las compuertas son cerradas cada que la marea viene, la cual aísla la reserva en su nivel más bajo. Cuando la marea es alta, el agua fluye del este del mar hacia el lago Sihwa a través de diez turbinas de bulbo, generando electricidad. Las turbinas cuentan con una capacidad de 25.4 [MW] [13].

Las turbinas operan las 24 horas del día, generando 552 [GWh] de electricidad, los cuales son suficientes para desplazar casi 300, 000 toneladas de emisiones de CO2 cada año [14].



Figura 2-4. Planta de Energía Mareomotriz Sihwa Lake, Corea del Sur.
Tomado de [15]

2.1.2. Planta de Energía Mareomotriz La Rance, Francia

Tabla 2.2. Datos de planta de energía mareomotriz La Rance, Francia.

| Ubicación | Potencia | Tipo de turbina |
|------------------|-----------------|------------------------------------|
| Francia | 240[MW] | Turbina de bulbo reversible [10MW] |

Después de un largo periodo de construcción, específicamente 5 años, la estación de energía mareomotriz Rance fue inaugurada el 26 de noviembre de 1966. Fue la primera planta de energía que aprovecha el flujo del agua de la marea para producir electricidad. [16]

Para construir la estructura de la planta se tuvo que construir dos represas para bloquear el río Rance durante los primeros dos años con el objetivo de asegurar que la desembocadura del mar fuera totalmente drenada.

La razón por la cual se eligió la desembocadura del río Rance es debido a su largo rango de marea, que es el más alto en cuanto a mareas altas en Francia. De acuerdo con el artículo [17] el promedio de marea baja se encuentra alrededor de 8.2 [m] y hasta 13.5 [m] para mareas altas.

Cuando la marea va entrando, el agua de la presa del lado del mar es más grande que la del lado de la desembocadura. Cuando la marea va saliendo, ocurre exactamente lo contrario. Las turbinas instaladas en la planta de energía Rance son capaces de producir energía en cualquier dirección.

La presa de la planta cuenta con una longitud de 750 [m] y una altura de 13 [m]. Opera con 24 turbinas de bulbo reversibles con una capacidad de 10 [MW] cada una, por lo que la máxima capacidad de generación de la planta es de 240 [MW]. Realmente en la práctica genera un aproximado de 96 [MW], proporcionando un total de 600 [GWh] a la red y alimentando alrededor de 130,000 casas por año. [16]



Figura 2-5 . Planta de Energía Mareomotriz La Rance, Francia.
Tomado de [18].

2.1.3. Planta de Energía Mareomotriz Tidal Lagoon, Reino Unido

Tabla 2.3. Datos de planta de energía mareomotriz Tidal Lagoon, Reino Unido.

| Ubicación | Potencia | Tipo de turbina |
|------------------|-----------------|-----------------------------|
| Reino Unido | 320[MW] | Turbina de bulbo reversible |

La laguna mareal de la bahía de Swansea es el primer proyecto con el propósito de generar energía a partir de una laguna. Se proyecta una capacidad de 320 [MW]. El proyecto está situado en el puerto de Swansea, aproximadamente a 2.2 [km] del centro de la ciudad de Swansea. El lago contendrá una parte de la bahía de Swansea, desde el este del río Tawe hacia el borde del campus de la universidad de la bahía de Swansea.

Las turbinas ubicadas dentro de las compuertas son bidireccionales, es decir, serán capaces de generar electricidad con el flujo del agua en cualquier dirección (ya sea sin entra o sale el agua de la marea). Hay un total de 16 turbinas de 20 [MW] y colocadas bajo el agua permanentemente. Cuenta con 8 compuertas, que serán capaces de permitir la entrada o salida del agua, por lo que se controla el agua requerida por las turbinas.

Para generar electricidad, tan pronto el agua del mar empiece a incrementar desde un nivel bajo de marea, el agua entrante al lago dura aproximadamente 2.5 horas, lo cual crea una diferencia en los

niveles del agua llamada “cabeza”. Una vez alcanzada esta diferencia empieza el flujo del agua a través de las turbinas [19].

El costo aproximado para el desarrollo de este proyecto fue de 35 millones de euros y en 2020 se proyectó su inicio. La construcción total del proyecto tomará aproximadamente 4 años, generando energía eléctrica a partir del tercer año. Se estima que su generación será para 155,000 casas por los siguientes 120 años. Los principales socios en este proyecto son algunas empresas como Atkins, General Electric, Andritz Hydro, Laing O’Rourke y Alun Griffiths Ltd [20].

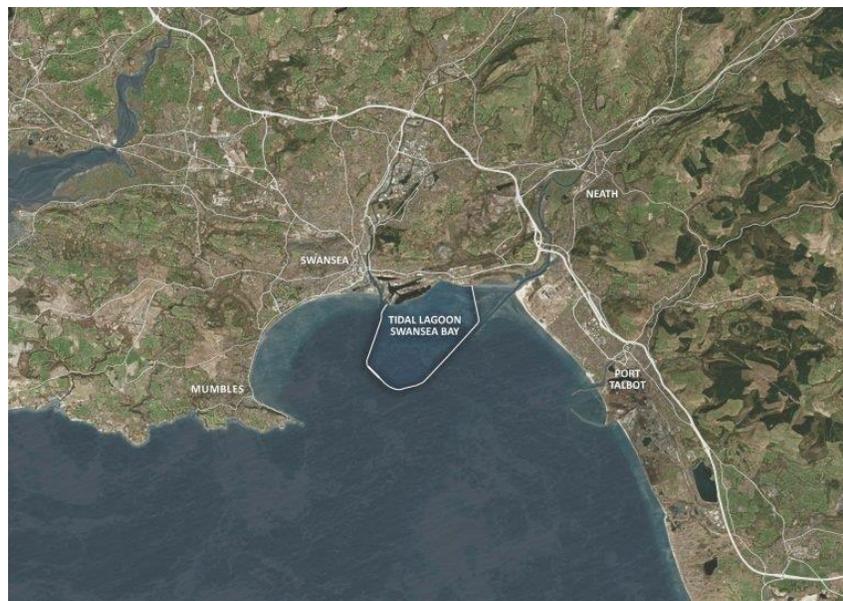


Figura 2-6. Localización de Planta de Energía Mareomotriz Tidal Lagoon, Reino Unido.
Tomado de [20]

2.1.4. Proyecto de Energía Mareomotriz MeyGen, Escocia

Tabla 2.4. Datos de Proyecto de Energía Mareomotriz MeyGen, Escocia.

| Ubicación | Potencia | Tipo de turbina |
|------------------|--|--|
| Escocia | Primera fase - 86 [MW] Segunda fase - 166[MW] Tercera fase – 398[MW] | AR1500 Andritz Hydro Hammerfest AH1000 MK1 |

El proyecto Meygen es el proyecto más grande en cuanto a generación por corriente de marea y es el único que tiene un acomodo de múltiples turbinas que ha comenzado a construirse. El sitio del proyecto tiene 3.5 [km] de longitud y cubre los flujos de corriente de agua más grandes en el Reino Unido, justo a 2 [km] del extremo noreste de Escocia. Hacia el norte del sitio se encuentra la isla de Stroma (Inhabitada), la cual crea un canal natural con la tierra firme para acelerar los millones de toneladas del flujo de agua entre el mar norte y el océano atlántico cada día.

Con base en [21] y [22], el proyecto se encuentra separado en tres fases, las cuales se mencionan a continuación:

Fase 1, Estado: Operacional

La primera fase del proyecto Meygen consta de 4 turbinas con una capacidad de 1.5 [MW]. El arreglo proviene del desarrollo de un proyecto de 86 [MW] y con ello se demostrará que el desarrollo de arreglos de turbinas marinas es viable tanto en el aspecto comercial y económico. Esta fase opera desde marzo de 2018, por lo que a partir de su instalación, operación y mantenimiento servirá para proceder con las fases subsecuentes.

Las turbinas están situadas en una cimentación individualmente que pesa 350 toneladas aproximadamente, junto con bloques que pesan 1200 toneladas que sirven para proporcionar estabilidad durante el ciclo de vida de las turbinas. Las turbinas alimentan a una estación convertidora (en esta fase son tres unidades) en tierra en Ness of Quoys, donde el suministro de 4[kV] se eleva a 33[kV] para exportarse a la red de distribución local. Esta fase genera electricidad suficiente para alimentar 2,600 hogares.

Fase 2, Estado: En desarrollo

También conocida como proyecto Stroma consta de una central submarina en septiembre del 2020, la cual permite conectar múltiples turbinas en un solo cable de exportación. Con este método se reducirán costos asociados a la conexión de red

SIMEC Atlantis Energy Ltd, la cual es la empresa dueña del proyecto cuenta con los permisos necesarios y una red capaz con la capacidad de añadir 80 [MW] a los 86 [MW] instalados en la Fase 1.

Fase 3, Estado: En desarrollo

Actualmente el contrato de arrendamiento marítimo de MeyGen permite instalar la capacidad hasta 398 [MW] con la generación por corrientes marinas dentro del sitio. Por el momento, MeyGen tiene una red para 252 [MW] y el sitio es capaz de construir el proyecto en su totalidad.



Figura 2-7. Proyecto de Energía Mareomotriz MeyGen.
Tomado de [22].

2.1.5. Planta de Energía Mareomotriz Annapolis Royal, Canadá

Tabla 2.5. Datos de Planta de Energía Mareomotriz Annapolis Royal, Canadá.

| Ubicación | Potencia | Tipo de turbina |
|------------------|-----------------|------------------------|
| Canadá | 20[MW] | Turbina de 4 palas |

La planta de energía marítima Annapolis entró en operación en 1984. Se encuentra localizada en el río de Annapolis y la bahía de Fundy, no muy lejos del transbordador de Granville y Annapolis Royal, Canadá.

Cuenta con una sola turbina, la cual tiene una capacidad de 20 [MW] y genera electricidad cuando la reserva de agua de la planta es baja. Dependiendo del oleaje, puede generar entre 80 a 100 [MWh] diarios [23].

En 2018 se planteó un análisis de la viabilidad de la planta, ya que se puso en duda si la inversión hecha para el proyecto cumplía con los intereses de los clientes, aparte de que era más evidente los altos costos capitales en la planta y su escasa generación de electricidad.

En 2019, cuando la revisión se encontraba en proceso, la planta detuvo su generación debido a que un componente fundamental dentro de la misma ocasionó una falla.

Nova Scotia Power, la cual operaba la planta, concluyó que el proyecto no era viable económicamente y se encuentra en proceso de una amortización de los bienes incluyendo el valor de la planta de aproximadamente 25.8 millones de dólares [24].



Figura 2-8. Planta de Energía Mareomotriz Annapolis Royal, Canadá.
Tomado de [25].

2.2. Tipos de cables eléctricos submarinos

El objetivo de un cable eléctrico submarino es transportar grandes cantidades de energía por debajo del agua, esto no está limitado si a océanos nos referimos, puede ser también a ríos y lagos. El tipo de cable depende del tipo de uso como por ejemplo al tipo de transmisión, esta puede ser de transmisión en CA o transmisión en CD, niveles de voltaje, etc. Para la descripción de los cables eléctricos submarinos utilizaremos como base el catálogo de Nexans [26].

2.2.1. Cables de CA

Se mostrará a continuación algunos modelos de cables de CA con sus respectivas características.

- a) Cable submarino para nivel de voltaje medio, incluyendo cable de fibra óptica. Diseño típico de cable submarino para nivel de voltaje medio, con voltaje máximo arriba de 36 [kV], incluye cable de fibra óptica. Modelo 2XS(FL)2YRAA.

1. **Conductor:** cobre, circular trenzado compacto.
2. **Blindaje de conductor:** semiconductor extruido compuesto.
3. **Aislamiento:** XLPE.
4. **Blindaje de aislamiento:** semiconductor extruido compuesto.
5. **Blindaje:** cintas de cobre, hélice de cobre, pólvora de crecimiento
6. **Recubrimiento laminado:** cinta de aluminio adherida al cubrimiento de PE
7. **Cable de fibra óptica.**
8. **Relleno:** cadena de polipropileno.
9. **Cintas de cubierta.**
10. **Recubrimiento:** cadena de polipropileno.
11. **Blindaje:** Alambres redondos de acero galvanizado.
12. **Servicio:** Cintas de arpillera, compuesto bituminoso.



Figura 2-9. Cable eléctrico submarino CA con fibra óptica. Tomado de [26].

b) Cable submarino para nivel de voltaje medio, XLPE aislado. Diseño típico de cable submarino para nivel de voltaje medio, con voltaje máximo arriba de 36 [kV]. Modelo 2XS2YRA.

1. **Conductor:** cobre, circular trenzado compacto, longitudinal.
2. **Blindaje de conductor:** semiconductor extruido compuesto.
3. **Aislamiento:** XLPE
4. **Blindaje de aislamiento:** semiconductor extruido compuesto.
5. **Blindaje:** cintas de cobre.
6. **Separador:** lámina de plástico.
7. **Recubrimiento:** PE.
8. **Relleno:** cadena de polipropileno
9. **Cinta de cubierta.**
10. **Recubrimiento:** cadenas de polipropileno
11. **Blindaje:** conductor de acero galvanizado.
12. **Cubierta:** cintas de arpillera, compuesto bituminoso, cadenas de polipropileno, capa de lima.

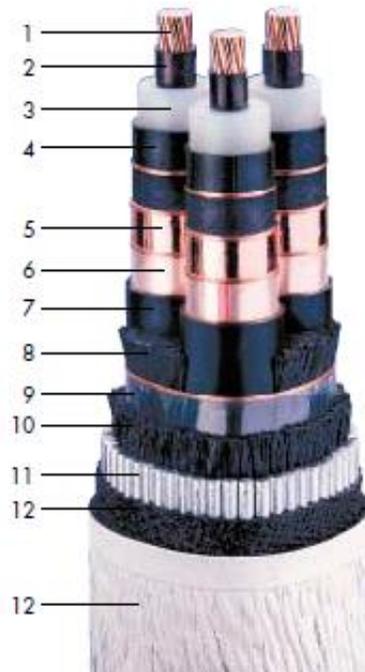


Figura 2-10. Cable eléctrico submarino CA. Tomado de [26].

c) Cable submarino para nivel de voltaje medio, EPR aislado. Diseño típico, modelo 3GSERAA.

1. **Conductor:** cobre, circular trenzado compacto.
2. **Blindaje de conductor:** semiconductor extruido compuesto.
3. **Aislamiento:** EPR.
4. **Blindaje de aislamiento:** semiconductor extruido compuesto.
5. **Blindaje:** cintas de cobre.
6. **Relleno:** polipropileno.
7. **Cinta de cubierta**
8. **Recubrimiento:** cadenas de polipropileno.
9. **Blindaje:** alambres redondos de acero galvanizado
10. **Cubierta:** cintas de arpillera, compuesto bituminoso, cadenas de polipropileno, capa de lima.



Figura 2-11. Cable eléctrico submarino CA. Tomado de [26].

2.2.2. Cables de CD

- d) Con base en [27], los cables submarinos se han usado desde 1954. Los cables son enterrados aproximadamente de 1 a 1.5 metros por debajo del mar. Cuentan con una protección de concreto para evitar el contacto con cosas externas, además de collares protectores para minimizar la fricción entre la capa exterior del cable y la arena del mar.

Conductor: hecho de materiales eléctricos conductivos por donde pasa la corriente.

Sistema aislante: hecho de poliuretano (XLPE) para evitar el contacto entre el conductor con la atmósfera.

Semiconductor: con las capas de aislamiento y el conductor se forma una superficie dieléctrica estable.

Cubierta de plástico y plomo: protege el sistema de aislamiento y previene el ingreso del agua al conductor.

Capa de blindaje: brinda resistencia a la tracción del cable gracias a que está hecho de alambres de acero.

Cubierta protectora: Se encarga de proteger contra elementos peligrosos o nocivos externos.

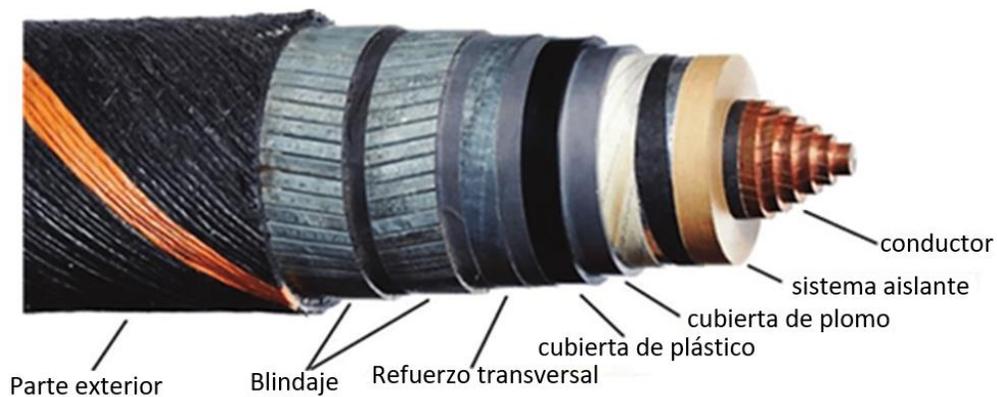


Figura 2-12. Cable eléctrico submarino CD. Tomado de [27].

3. OPERACIÓN BÁSICA

3.1. Unidad de generación: Máquina PMSG

En [28] el autor menciona que, a través de una excitatriz de CD ,un generador síncrono de imanes permanentes (PMSG) es capaz de producir energía eléctrica debido a la presencia de un campo magnético. La máquina PMSG es capaz de formar su propio campo magnético de excitación a través de los imanes permanentes que son puestos en espacios hechos en el rotor, también conocidos como polos.

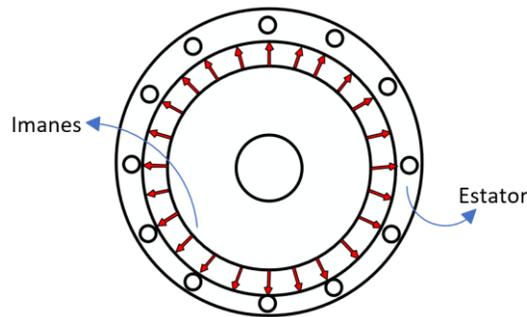


Figura 3. Aspecto constructivo de generador síncrono de imanes permanentes. Tomado de [29].

La ecuación que caracteriza la relación directa entre la frecuencia eléctrica y la velocidad de rotación de cualquier máquina síncrona, con base en [29], es

$$S_r = \frac{60f_e}{N_p} \quad (3)$$

Donde:

S_r : Velocidad de rotación

f_e : Frecuencia eléctrica

N_p : Número de pares de polos de la máquina

Con la dirección de las líneas de flujo, la máquina PMSG se puede dividir en categorías : Máquinas de flujo radial, máquinas de flujo axial y máquinas de flujo transversal. Una de las desventajas con las máquinas de flujo axial es que no son balanceados cuando hay un estator y un rotor. Para mejor desempeño el rotor se encuentra en medio de dos estatores o viceversa. A diferencia de las máquinas de flujo radial, los devanados del estator están en dirección radial. En máquinas de flujo transversal, el plano del camino del flujo es perpendicular a la dirección del movimiento del rotor.

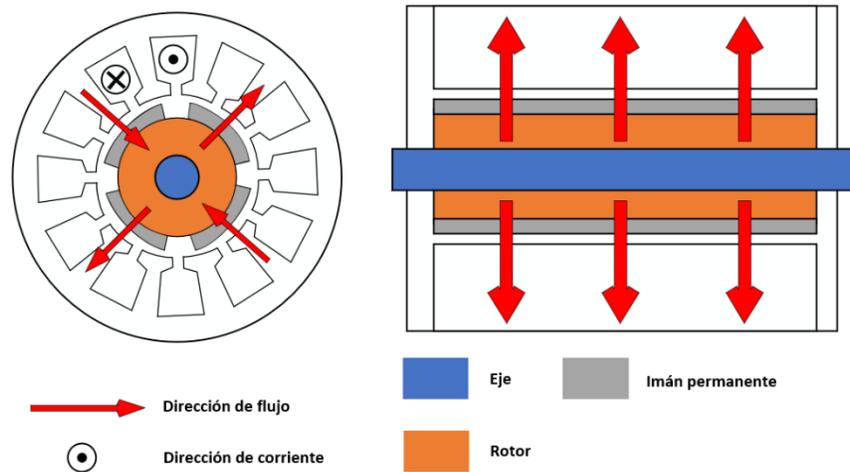


Figura 3-1. Vista de sección transversal en dirección radial y dirección axial respectivamente, Máquina PMSG flujo radial.

Tomado de [30].

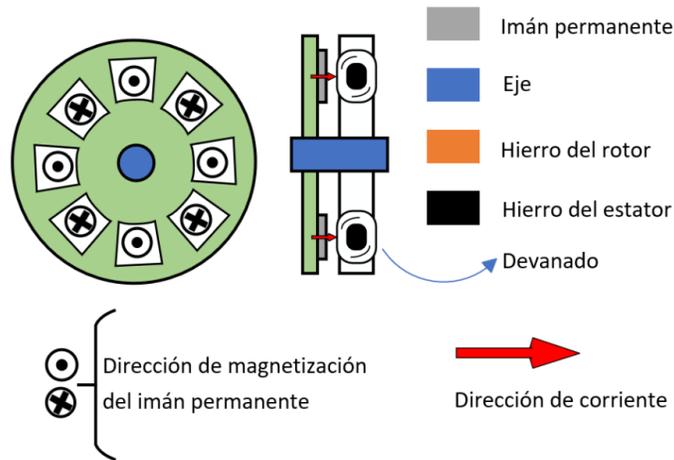


Figura 3-2. Vista de sección transversal en dirección radial y dirección axial , Máquina PMSG flujo axial.

Tomado de [30].

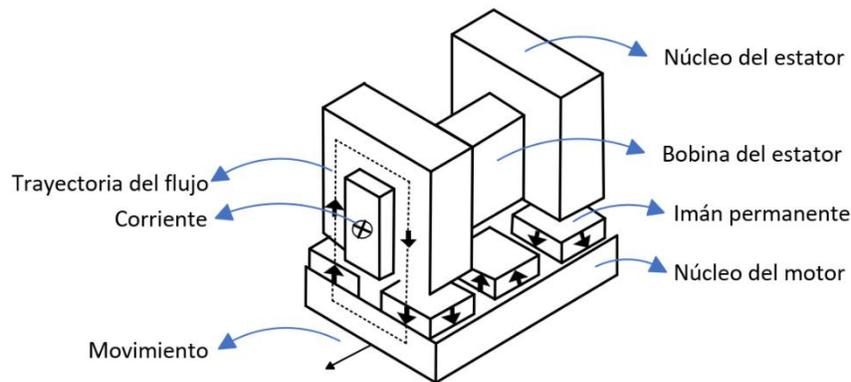


Figura 3-3. Fracción de una máquina PMSG transversal.

Tomado de [30].

En [30] mencionan que, uno de varios beneficios de usar una máquina PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator) es la eliminación de las pérdidas en el cobre del rotor debido a la autoexcitación presente en este generador. A diferencia de otro tipo de generadores como un WRSG (Wound Rotor Synchronous Generator), este no necesita una fuente de alimentación externa. El mantenimiento es eliminado debido a que las escobillas y anillos deslizantes son removidos.

En aplicaciones de velocidad variable es muy común usar este tipo de generador dado que es conectado a la red a través de un convertidor que adaptará la frecuencia del voltaje inducido a la frecuencia de la red.

El bajo mantenimiento requerido y bajo costo son las principales razones por el cual las máquinas PMSG son propuestas en sistemas de velocidad variable.

3.1.1. Eficiencia

La eficiencia en una máquina está sujeta a su tamaño real, pero no solo a este parámetro, sino que también a su salida de potencia y elevación en su temperatura.

Conocemos teóricamente que el cálculo de la eficiencia está definido como

$$\eta = \frac{P_i}{P_o} \times 100 \quad (3.1)$$

Donde P_i es la potencia de entrada, y P_o es la potencia de salida. En la potencia de salida se incluyen las pérdidas por efecto Joule (I^2R), las pérdidas por rozamiento, pérdidas por fricción de aire, pérdidas por corrientes parásitas y pérdidas por histéresis.

3.1.2. Modelo Turbina-Generador

Tomando como base [32], se describe que la potencia mecánica que es extraída de la turbina es una función compleja de la velocidad del viento/marea, del ángulo de inclinación de las hélices y el eje de velocidad. De manera teórica, la ecuación que describe el comportamiento de la potencia extraída es la siguiente:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho v_w^3 \pi r^2 C_p(\lambda) \quad (3.11)$$

Donde:

P_m = Potencia extraída del aire/marea, en [W]

ρ = Densidad del aire, en [kg/m^3]

C_p = Coeficiente de desempeño

v_w = Velocidad del viento, en [m/s]

r = Radio de barrido de las cuchillas del rotor, en [m]

λ = Relación entre la velocidad de las hélices de la turbina y el viento

$$\lambda = \frac{\omega_r r}{v_w} \quad (3.12)$$

Donde ω_r es la velocidad mecánica del rotor, en $[rad/s]$

De la ecuación (3.11) podemos observar que hay variables que no se pueden controlar, tal es el caso del radio de barrido, la velocidad del viento y la densidad del aire. EL único parámetro que se puede controlar es el coeficiente de desempeño C_p ya que dicho parámetro puede maximizar la energía de salida proveniente del viento/marea.

El coeficiente de desempeño C_p para un dado ángulo de inclinación y velocidad de rotación es no lineal relacionado a la velocidad del viento. El C_p alcanza un punto máximo dada una velocidad de la turbina hacia el radio de velocidad del aire y cae de nuevo a cero en relaciones de velocidad mayores. Este parámetro es especificado y diferente dependiendo el fabricante. En la Figura 3-1.2. se muestra la curva característica del coeficiente de desempeño C_p y la relación de velocidad λ .

En un periodo de velocidad de viento bajo a medio el ángulo de inclinación es controlado para permitir que la turbina opere en condiciones óptimas. En una región de alta velocidad, el ángulo de inclinación es ajustado para desaprovechar un poco de la energía aerodinámica. Una turbina es diseñada para extraer la máxima cantidad de viento/agua posible en un rango de velocidad de 10 a 15 [m/s]. Ante una velocidad mayor de 15 [m/s], las turbinas modernas derraman o cortan el exceso de energía. Esto se debe a que utilizan una hélice dinámica con inclinación controlada. Como resultado de este control la velocidad de la turbina es ajustada en función de la velocidad del viento para maximizar la potencia eléctrica de salida.

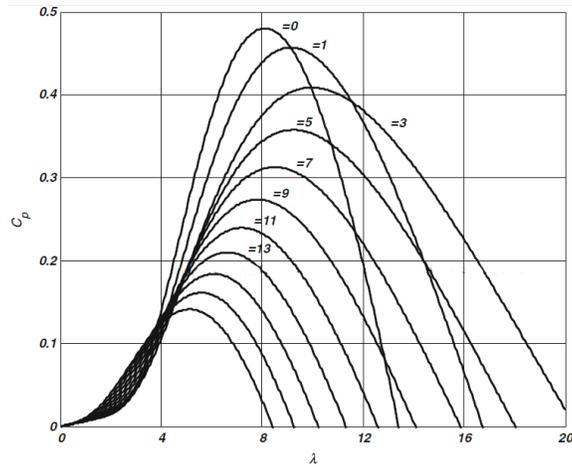


Figura 3-4. Gráfica de coeficiente de desempeño contra la relación de velocidad,
Tomado de [32].

La operación en el máximo punto de potencia es realizada sobre un amplio rango de potencia. Un típico ajuste de la salida de potencia de las curvas de velocidad en función de la velocidad de la turbina y la velocidad del viento se muestra en la Figura 3-1.3. En esta figura se aprecia que la potencia eléctrica y la velocidad del viento se encuentran normalizadas.

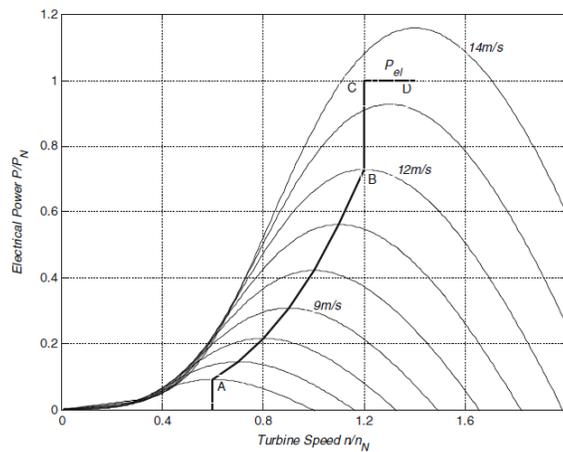


Figura 3-5. Gráfica de la potencia de salida en función de la velocidad de la turbina.
Tomado de [32].

De la ecuación (3.12) observamos que la relación de velocidad para una dada velocidad de turbina varía sobre un amplio rango dependiendo la velocidad del fluido. De la ecuación (3.11) podemos observar que la producción de la potencia se maximiza si la turbina opera con su coeficiente de desempeño C_p al máximo. Para lograr dicho objetivo, la velocidad del rotor se debe ajustar para

seguir el cambio en la velocidad del fluido. La variable de velocidad máquina PMSG es capaz de realizar esta tarea. La velocidad del rotor puede controlarse mediante la diferencia entre la potencia eléctrica de salida y la potencia extraída del fluido. Con un control dinámico para el ángulo de inclinación, la potencia obtenida del viento/marea puede ser controlada, y con ayuda de un convertidor electrónico de potencia, la potencia eléctrica de salida también se puede controlar.

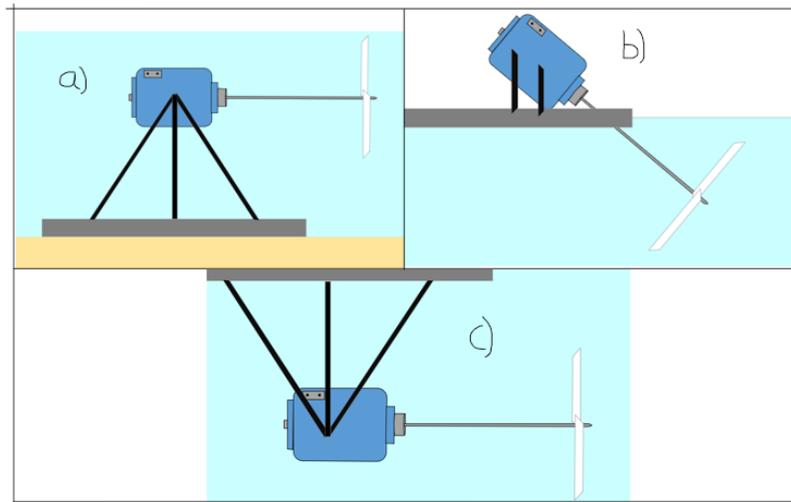


Figura 3-6. Posicionamientos de la turbina.

3.2. Convertidor Elevador CD/CD

3.2.1. Descripción

Con base en [33], el convertidor elevador CD/CD también conocido como convertidor boost es un circuito que, tal como implica su nombre, eleva el voltaje de entrada a un voltaje de salida más grande. Su aplicación principal es en fuentes de energía regulada y el frenado regenerativo en motores.

El switch contiene dos componentes: 1. dispositivo electrónico de conmutación rápida, por ejemplo, un transistor de unión bipolar (TBJ) o un transistor de efecto de campo (MOSFET), el otro dispositivo es un diodo que impida que la corriente de descarga del capacitor regrese, debido a que se requiere que se suministre corriente a la carga a través de la descarga del capacitor.

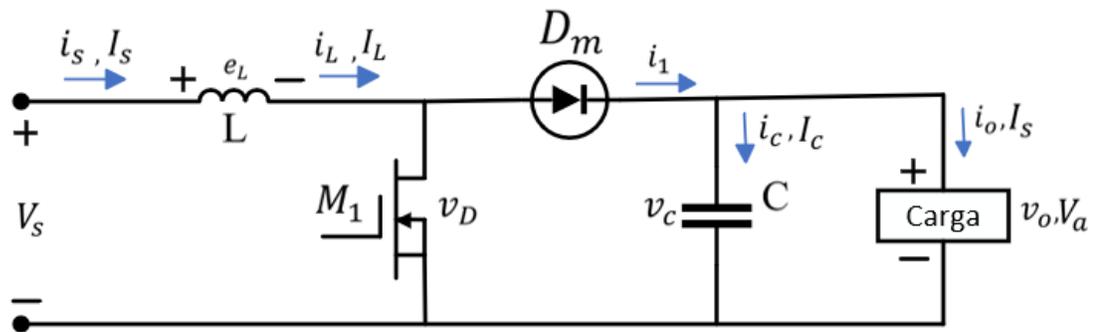


Figura 3-7. Circuito de un convertidor elevador CD/CD.
Tomado de [33].

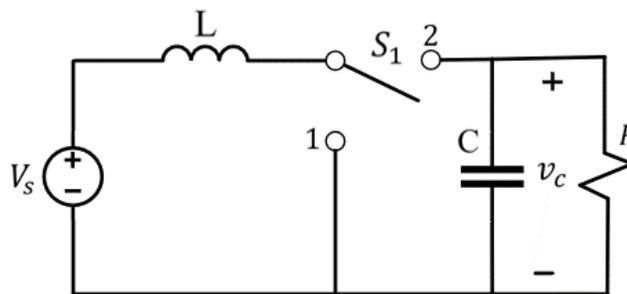


Figura 3-8. Circuito simplificado de un convertidor elevador CD/CD.
Tomado de [33].

La operación del circuito está dividida en dos modos. El modo 1 inicia cuando el transistor M_1 opera en un tiempo $t = 0$.

El modo 2 comienza cuando el transistor se apaga en un tiempo $t = t_1$. La corriente que fluía a través del transistor ahora fluirá hacia el inductor L , el capacitor C , al diodo D_m y a la carga. La corriente del inductor cae hasta que el transistor M_1 opera de nuevo en el ciclo siguiente. La energía que se encuentra almacenada en el inductor va hacia la carga. Los circuitos equivalentes que representan los modos se ilustran en las Figuras 3-9 y 3-10.

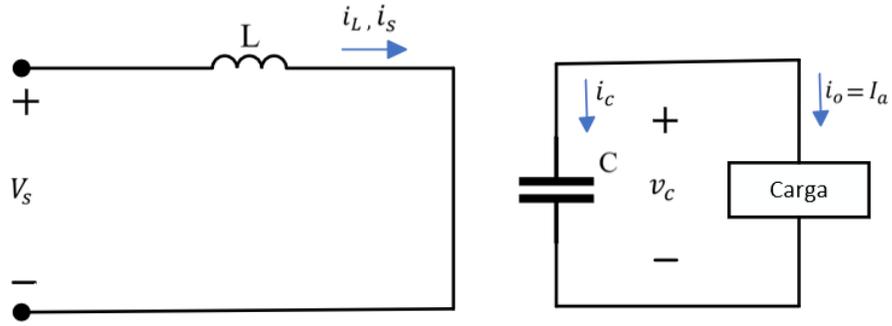


Figura 3-9. Convertidor elevador CD/CD Modo 1. Tomado de [33].

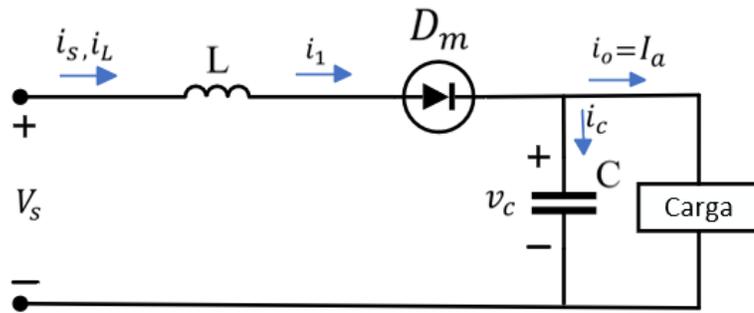


Figura 3-10. Convertidor elevador CD/CD Modo 2. Tomado de [33].

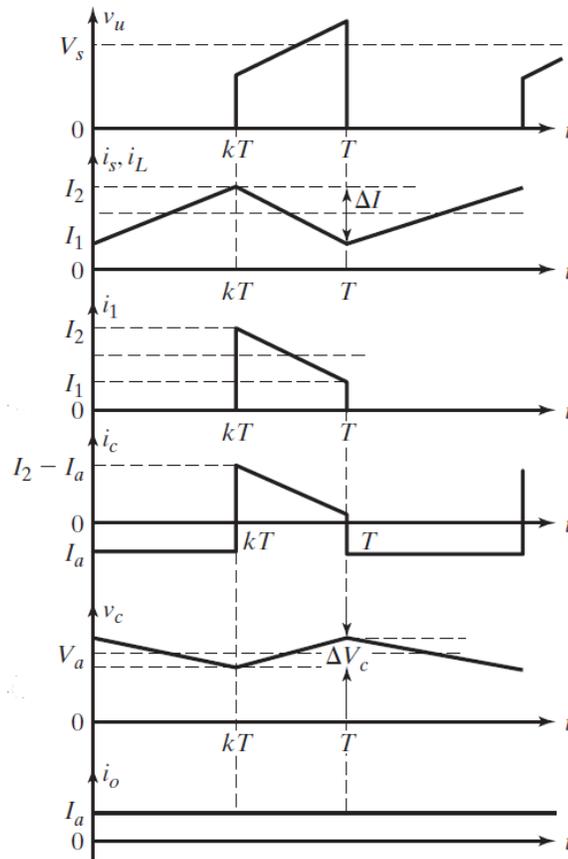


Figura 3-11. Formas de onda. Tomado de [33].

Si se asume que el comportamiento de la corriente del inductor crece de manera lineal de una corriente I_1 a I_2 en un tiempo t_1 podemos expresar el voltaje de entrada

$$V_s = L \frac{I_2 - I_1}{t_1} \quad (3.21)$$

En un tiempo t_2 , la corriente en el inductor cae de I_2 a I_1

$$V_s - V_a = -L \frac{I_2 - I_1}{t_2} \quad (3.22)$$

La diferencia de corriente es la corriente pico-pico de rizo del inductor. Retomando las ecuaciones (3.21) y (3.22), obtenemos t_1 y t_2 respectivamente

$$t_1 = L \frac{I_2 - I_1}{V_s}$$

$$t_2 = L \frac{I_2 - I_1}{V_a - V_s}$$

Reemplazamos $I_2 - I_1 = \Delta I$

$$\Delta I = \frac{V_s t_1}{L} = \frac{(V_a - V_s) t_2}{L}$$

Si reemplazamos $t_1 = kT$ y $t_2 = (1 - k)T$ se genera el voltaje promedio en la salida

$$V_a = V_s \frac{T}{t_2} = \frac{V_s}{1 - k} \quad (3.23)$$

De manera simplificada se obtiene

$$(1 - k) = \frac{V_s}{V_a} \quad (3.24)$$

Sustituyendo $t_1/T = k$

$$t_1 = \frac{(V_a - V_s)}{V_{af}} \quad (3.25)$$

Suponiendo que el circuito es ideal, es decir, no tiene pérdidas se consideran las siguientes expresiones

$$\begin{aligned} V_s I_s &= V_a I_a \\ &= V_s I_s / (1 - k) \end{aligned}$$

Para obtener la corriente promedio de entrada

$$I_s = \frac{I_a}{1 - k} \quad (3.26)$$

- Rizo de corriente pico del inductor

El periodo se puede encontrar por la siguiente expresión

$$T = \frac{1}{f} = t_1 + t_2$$

Previamente se obtuvieron los valores de t_1 y t_2 de las ecuaciones (3.21) y (3.22), por lo tanto

$$t_1 + t_2 = \frac{\Delta I L}{V_s} + \frac{\Delta I L}{V_a - V_s}$$

$$= \frac{\Delta I L V_a}{(V_a - V_s) V_s}$$

Despejando ΔI obtenemos la corriente pico de rizo

$$\Delta I = \frac{(V_a - V_s) V_s}{f L V_a}$$

- Rizo de voltaje pico del capacitor

Cuando el transistor se encuentra en operación, el capacitor provee una corriente de carga en un tiempo $t=t_1$. El rizo de voltaje pico se obtiene de la siguiente expresión

$$\begin{aligned} \Delta V_c &= v_c - v_c(t = 0) \\ &= \frac{1}{C} \int_0^{t_1} I_c dt \\ &= \frac{1}{C} \int_0^{t_1} I_a dt \\ &= \frac{t_1 I_a}{C} \end{aligned}$$

Al sustituir t_1 de la ecuación (3.25) obtenemos

$$\Delta V_c = \frac{(V_a - V_s) I_a}{f C V_a}$$

3.2.2. Modelo promediado

Para obtener el modelo promediado, en [33] el autor indica que es necesario realizar un análisis de señal pequeña en CA al circuito del convertidor boost CD/CD. A continuación, se muestran una serie de pasos para desarrollar el modelo promediado, el cual es usado para la corrección del factor de potencia y ajustes de voltaje en aplicaciones de energía renovable. El modelo promediado puede

ser aplicado a rectificadores, inversores, convertidores resonantes y a controladores rectificadores de fase.

Paso 1. Se identifican las terminales en el bipuerto tal como se ilustra en la Figura 3-12.

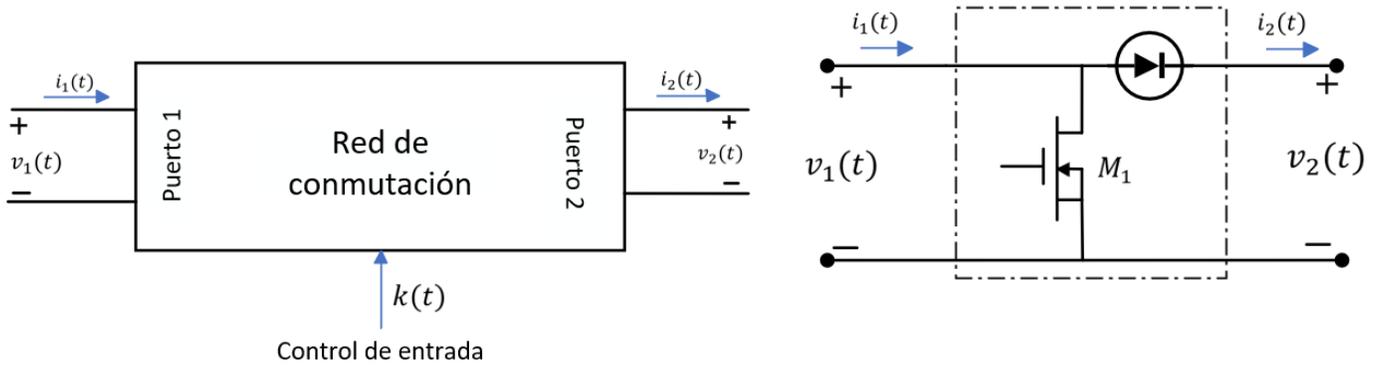


Figura 3-12. Bipuerto general de convertidor boost de CD.
Tomado de [33].

Paso 2. Se eligen las variables dependientes e independientes. Cuando el interruptor está encendido, la corriente i_1 y el voltaje v_2 no varían y las definimos como las variables independientes. La corriente $i_1(t)$ va hacia el interruptor, después hacia el puerto 2. La corriente $i_1(t)$ y el voltaje $v_2(t)$ son dependientes de las condiciones de operación del circuito.

Por lo tanto

$$v_1 = f_1(i_1, v_2) \quad (3.27)$$

$$i_2 = f_2(i_1, v_2) \quad (3.28)$$

Si se reemplaza el interruptor por estas dos fuentes dependientes, se llega al siguiente circuito de la Figura 3-12.

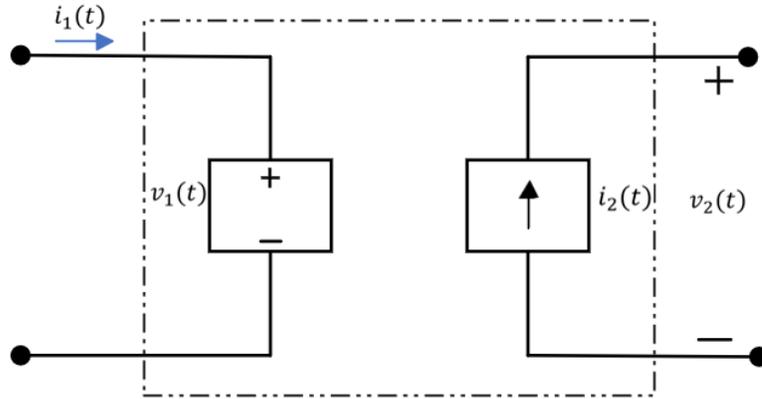


Figura 3-13. Red de interruptor dependiente. Tomado de [33].

Paso 3. Se dibujan las formas de onda de las variables dependientes en términos de las variables independientes. Cuando el interruptor se encuentre encendido en un tiempo $t_1 = kT_S$, la corriente $i_2(t)$ y el voltaje $v_2(t)$ se convierten en cero, tal como se muestra en la Figura 3-14.

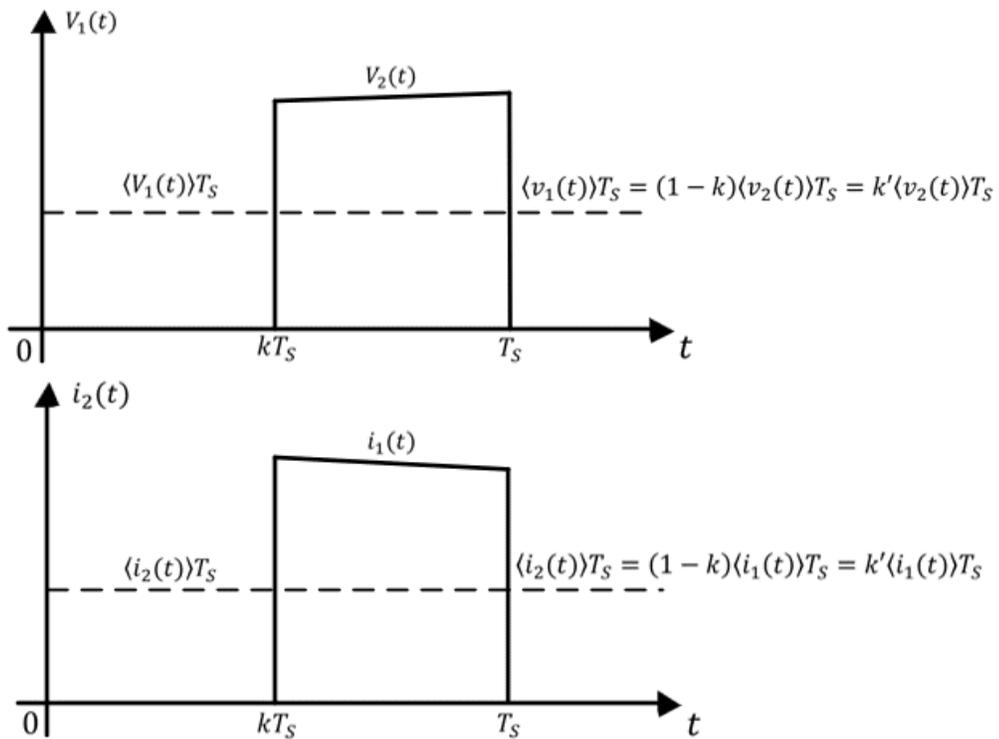


Figura 3-14. Formas de onda de las fuentes dependientes de voltaje y corriente. Tomado de [33].

Cuando el interruptor se encuentra apagado para un tiempo $t_2 = (1 - k)T_S$, los voltajes $v_1(t)$ y $v_2(t)$, así como las corrientes $i_1(t)$ e $i_2(t)$ se vuelven iguales. Durante el tiempo de apagado, el voltaje $v_2(t)$, y la corriente $i_2(t)$, caen en un rango que depende de la impedancia de carga (resistiva o inductiva).

Paso 4. Se toma el promedio de los valores de las variables dependientes sobre el tiempo de cambio. En lugar de promediar el tiempo variante complejo de las formas de onda, se puede encontrar el valor promedio de una variable asumiendo que las constantes de tiempo del convertidor son más grandes que las del periodo T_S .

El rizo en el voltaje $v_2(t)$, y la corriente $i_1(t)$ son despreciables. Suponiendo que la constante de tiempo $RC \gg T_S$ y $L/R \gg T_S$, los valores promedios son dados por:

$$\langle v_1(t) \rangle T_S = (1 - k) \langle v_1(t) \rangle T_S = k' \langle v_1(t) \rangle T_S \quad (3.29)$$

$$\langle i_2(t) \rangle T_S = (1 - k) \langle i_1(t) \rangle T_S = k' \langle i_1(t) \rangle T_S \quad (3.30)$$

Donde $k' = 1 - k$. Sustituyendo los valores promedio de señal larga para las variables dependientes obtenemos el modelo promedio del interruptor, tal como se ilustra en la Figura 3-15.

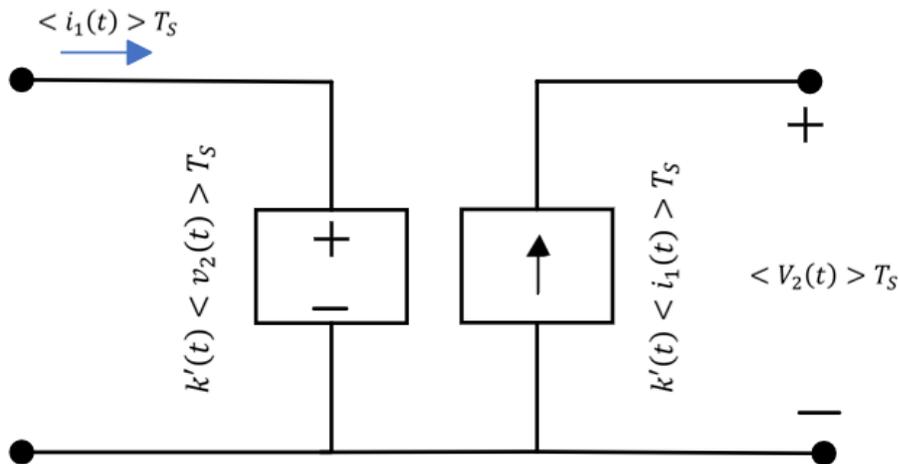


Figura 3-15. Modelo promedio del interruptor. Tomado de [33].

Paso 5. Dada una pequeña perturbación en los valores promedio de señal larga. El ciclo de trabajo k es la variable controlada. Asumimos que $k(t)$ cambia una pequeña cantidad $\delta(t)$ alrededor de la señal k y la entrada de la fuente de voltaje V_S puede también cambiar por una pequeña cantidad $\tilde{v}_s(t)$. Estos fenómenos ocasionarán pequeños cambios tales que

$$\begin{aligned} v_s(t) &= V_S + \tilde{v}_s(t) \\ k(t) &= k + \delta(t) \\ k'(t) &= k' - \delta'(t) \\ \langle i(t) \rangle_{T_S} &= \langle i_1(t) \rangle_{T_S} = I + \tilde{i}(t) \\ \langle v(t) \rangle_{T_S} &= \langle v_2(t) \rangle_{T_S} = V + \tilde{v}(t) \\ \langle v_1(t) \rangle_{T_S} &= V_1 + \tilde{v}_1(t) \\ \langle i_2(t) \rangle_{T_S} &= I_2 + \tilde{i}_1(t) \end{aligned}$$

Incluyendo el efecto de las fuentes dependientes, nos da como resultado el modelo completo del convertidor boost, tal como se ilustra en la Figura 3-16.

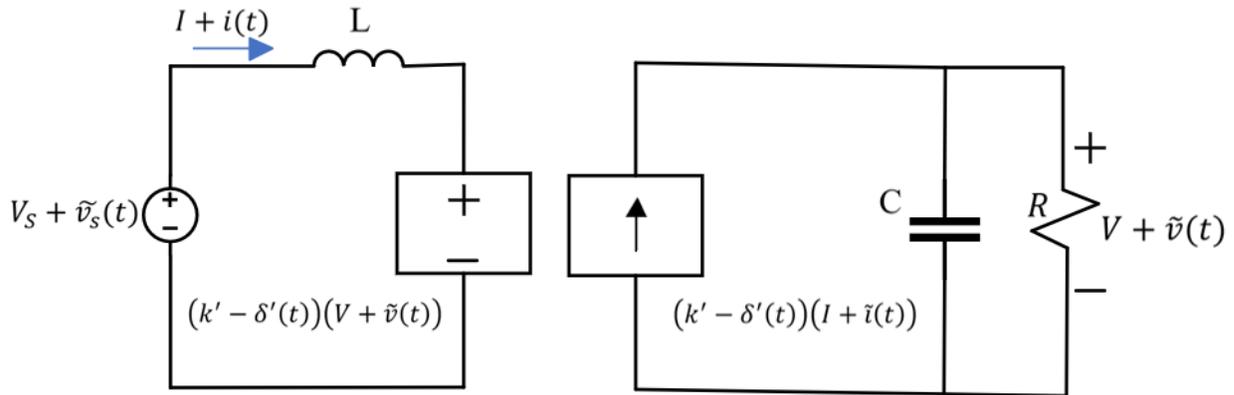


Figura 3-16. Modelo de circuito convertidor boost con pequeña perturbación alrededor de una señal grande. Tomado de [33].

Paso 6. Se determina un modelo lineal de señal pequeña. Las fuentes dependientes de la Figura 3-15 contienen términos no lineales surgiendo del producto de dos cantidades variantes en el tiempo. Se puede simplificar expandiendo y removiendo los términos de segundo orden que contienen el producto de las cantidades pequeñas. Para la entrada de la fuente de voltaje dependiente se expande como

$$(k' - \delta'(t))(V + \tilde{v}(t)) = k'(V + \tilde{v}(t)) - V\delta'(t) - \tilde{v}(t)\delta'(t) \quad (3.31)$$

Aproximando

$$(k' - \delta'(t))(V + \tilde{v}(t)) \approx k'(V + \tilde{v}(t)) - V\delta'(t) \quad (3.32)$$

Similarmente, expandimos las fuentes de corriente dependientes en la salida

$$(k' - \delta'(t))(I + \tilde{i}(t)) = k'(I + \tilde{i}(t)) - I\delta'(t) - \tilde{i}(t)\delta'(t) \quad (3.33)$$

Aproximando

$$(k' - \delta'(t))(I + \tilde{i}(t)) \approx k'(I + \tilde{i}(t)) - I\delta'(t) \quad (3.34)$$

El primer término en la ecuación (3.32) se debe a la transformación de la salida de voltaje hacia la entrada.

El primer término de la ecuación (3.34) es debido a la transformación de la entrada de corriente hacia la salida. Si se combinan las ecuaciones (3.32) y (3.33) obtenemos el modelo promediado final en CD y señal pequeña CA para el convertidor boost, tal como se muestra en la Figura 3-17.

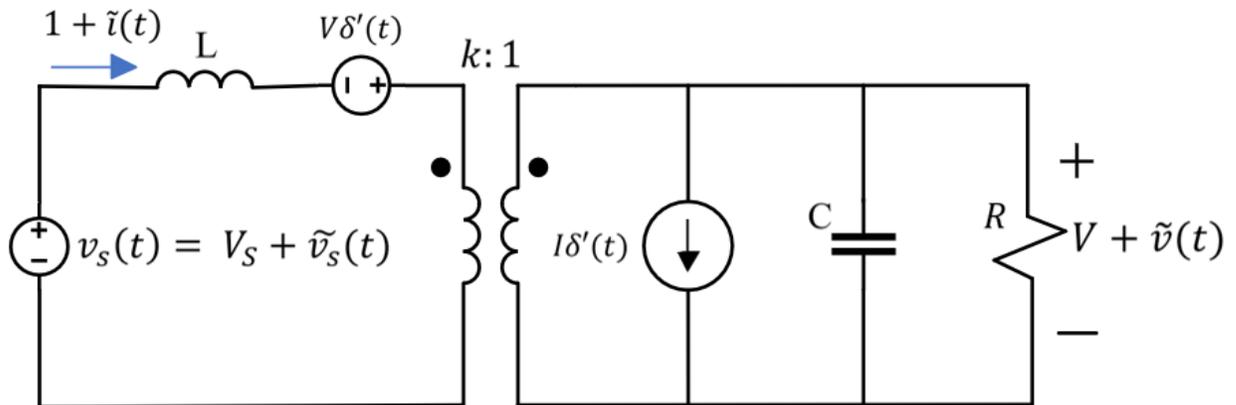


Figura 3-17. Modelo promediado final de convertidor de CD.
Tomado de [33].

3.3. Convertidor CD/CA Trifásico (VSC)

3.3.1. Descripción

Con base en [32], un convertidor CD/CA es un dispositivo electrónico que tiene como función principal cambiar el voltaje de CD que entra a un voltaje simétrico con magnitud y frecuencia deseada.

Si se mueve a conveniencia el voltaje de entrada de CD se obtiene el control del voltaje de salida, manteniendo la ganancia del convertidor CD/CA. De no poder ser controlado el voltaje CD aún se puede manipular la ganancia, que puede ser realizado por un modulador de pulsos (PWM) que se encuentra dentro del convertidor, para seguir obteniendo un voltaje de salida variable.

La forma de onda de la salida del inversor es senoidal idealmente, sin embargo, esto no sucede debido a la presencia de armónicos. Para aplicaciones de potencia se requiere que haya la más mínima distorsión posible en la forma de onda senoidal.

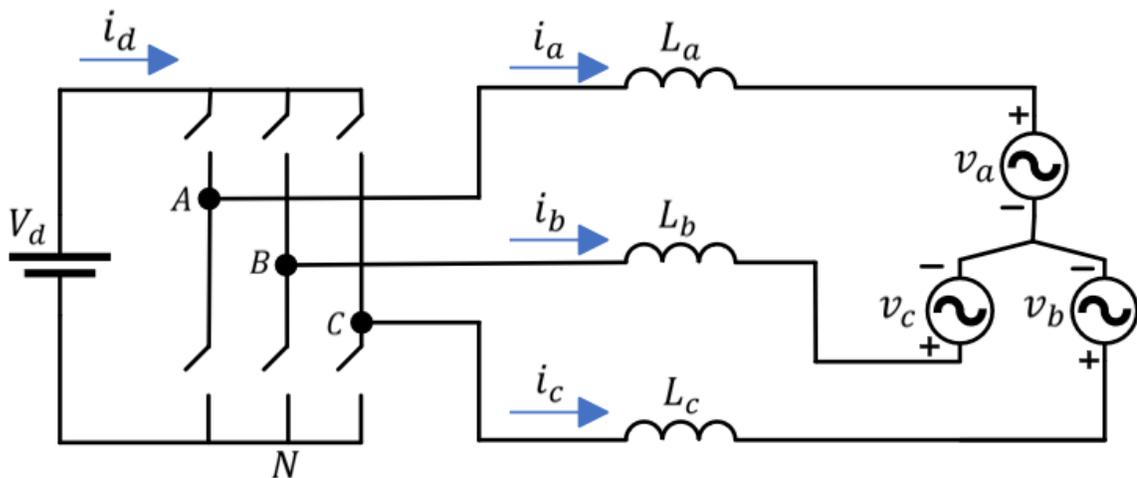


Figura 3-18. Modelo de Convertidor CD/CA Trifásico (VSC). Tomado de [32].

Usando un método tradicional de comparación basada en PWM, un controlador genera las tres señales moduladas para cada fase en la frecuencia fundamental requerida, con un desfase de 120° ; siempre y cuando se trate de un sistema balanceado y en condiciones de estado estable.

Estas señales se comparan con una forma de onda triangular en frecuencia variable para obtener el pulso para cada fase. El proceso de generación de pulsos para el convertidor trifásico, los voltajes de fase y voltajes de línea son representados en la Figura 3-19, donde la frecuencia fundamental es representada como ω .

$$v_{cA}(t) = V_c \cos(\omega t) [V] \quad (3.35)$$

$$v_{cB}(t) = V_c \cos(\omega t - 120^\circ) [V] \quad (3.36)$$

$$v_{cC}(t) = V_c \cos(\omega t - 240^\circ) [V] \quad (3.37)$$

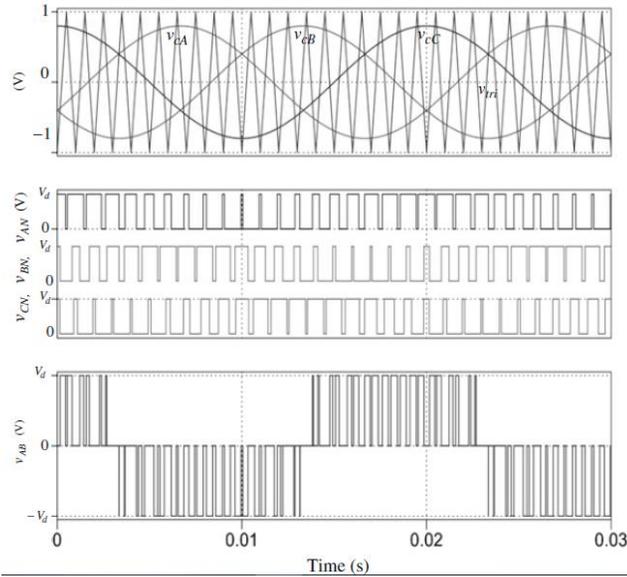


Figura 3-19. PWM Trifásico utilizando comparación de señal triangular.
Tomado de [32].

Los voltajes promedio de línea pueden ser directamente obtenidos mediante las siguientes ecuaciones.

$$\bar{v}_{AN}(t) = \frac{V_d}{2} + \frac{V_d}{2} V_c \cos(\omega t) [V] \quad (3.38)$$

$$\bar{v}_{BN}(t) = \frac{V_d}{2} + \frac{V_d}{2} V_c \cos(\omega t - 120^\circ) [V] \quad (3.39)$$

$$\bar{v}_{CN}(t) = \frac{V_d}{2} + \frac{V_d}{2} V_c \cos(\omega t - 240^\circ) [V] \quad (3.40)$$

3.3.2. Modelo promediado

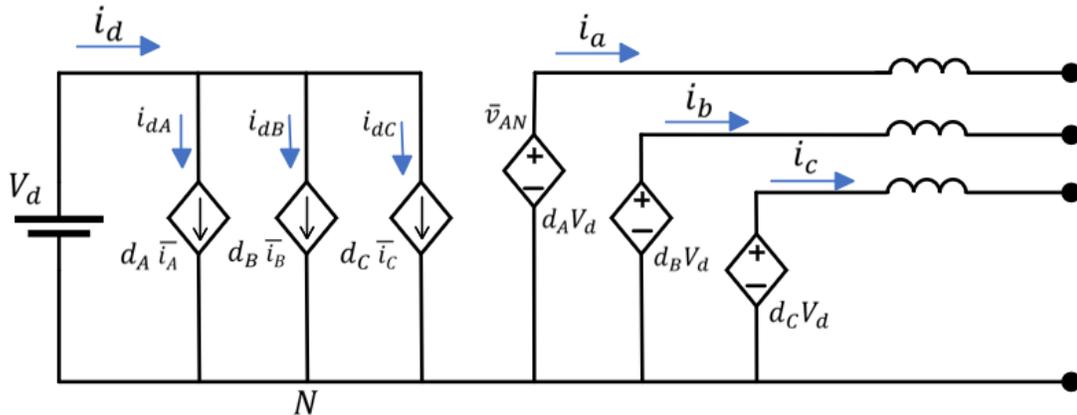


Figura 3-20. Modelo Promediado de Convertidor CD/CA Trifásico (VSC).
Tomado de [32].

Para obtener el modelo promediado se usa la misma metodología aplicada al Convertidor Boost, por lo que la deducción para el convertidor CD/CA trifásico no será necesaria. En este modelo observamos que la corriente que proviene del enlace de CD es la suma de las corrientes de las tres fases. También contiene armónicos, frecuencia variable y una componente de CD.

La forma de onda de CA que viene de la corriente de CD tiene un solo valor de magnitud de CD el cual es equivalente a la potencia procesada dividida por la magnitud del enlace de voltaje CD. Es por esto por lo que, el capacitor en el enlace de CD necesario para filtrar es más pequeño a comparación de un convertidor monofásico.

En un sistema trifásico balanceado, el voltaje neutral promedio por ciclo v_{nN} respecto al voltaje negativo de CD puede ser calculado si se suman las corrientes $i_a(t) + i_b(t) + i_c(t) = 0$

$$\bar{v}_{nN}(t) = \frac{V_d}{2}$$

El voltaje neutral es igual al voltaje de offset que se presenta en las fases. Bajo condiciones balanceadas se pueden calcular varios parámetros empleando solamente las componentes fundamentales de frecuencia.

En un sistema trifásico que no está conectado a neutro, el voltaje neutral puede variar V_d , $V_d/2$ y cero.

3.3.3. Eficiencia en convertidores

La eficiencia y la potencia disipada en los inversores de potencia son parámetros de diseño primordiales para la determinación de los sistemas de disipación de calor y del consumo de energía en general en los inversores. En este sentido, es necesario un modelo matemático que permita calcular las pérdidas de potencia. Las pérdidas de potencia en inversores se dividen en las pérdidas dinámicas debidas a la conmutación de los interruptores y en las pérdidas por conducción.

Las pérdidas por conmutación dependen principalmente de la frecuencia de conmutación y de características físicas de los semiconductores. Mientras que las pérdidas por conducción dependen de la carga del inversor y de las caídas de voltaje en régimen estático en los semiconductores de los interruptores de potencia. En el presente artículo se presentarán las ecuaciones que modelan las pérdidas de potencia por conducción en semiconductores para la modulación SPWM presentada en Gallego et al. (2014) en inversores monofásicos. Las pérdidas por conducción para otras modulaciones pueden deducirse fácilmente a partir del procedimiento utilizado en este artículo. Los resultados pueden extrapolarse fácilmente a convertidores trifásicos.

3.4. Modelos de Líneas de Transmisión

Con base en [32], las líneas de transmisión suelen ser representadas por un modelo equivalente con los parámetros base por fase. Los buses de voltaje se dibujan en una línea al neutro, la corriente para una fase, y de esta manera el sistema trifásico se reduce a un sistema equivalente monofásico.

En el modelo equivalente usado se calculan parámetros como lo son los voltajes, corrientes y flujos de potencia, en base a la longitud de las líneas de transmisión. Existen tres modelos de líneas, los cuales se describirán a continuación.

3.4.1. Modelo de línea corta

Las características principales en este modelo es que el estudio puede realizarse a líneas de transmisión menores a 80[km] de longitud o si el voltaje no supera una magnitud de [69 kV]. El efecto de la capacitancia es despreciable dadas las ya mencionadas características.

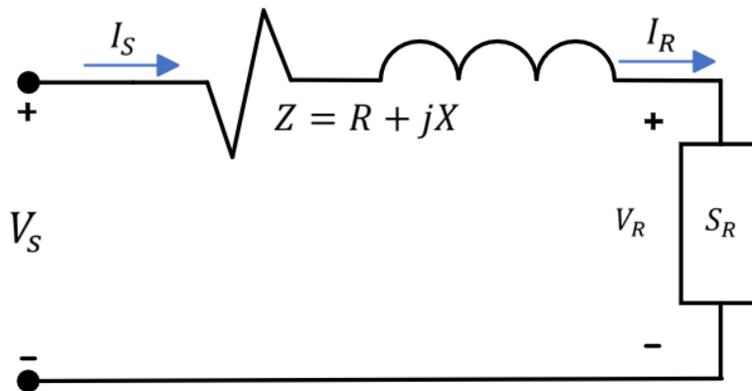


Figura 3-21. Modelo de Línea Corta. Tomado de [34].

El modelo de línea corta es mostrado en la Figura 3-20 donde se observa tanto la voltaje y corriente de envío (V_S e I_S), así como la corriente y voltaje de recepción (V_R e I_R).

La ecuación característica en este modelo se obtiene cuando se multiplica la longitud de la línea con su respectiva impedancia en serie.

$$Z = (r + j\omega L)\ell = R + jX [\Omega]$$

Donde:

$$r = \text{resistencia por fase} \left[\frac{\Omega}{km} \right]$$

$$L = \text{inductancia por fase} \left[\frac{H}{km} \right]$$

$$\ell = \text{longitud de la línea} [km]$$

El voltaje de fase en el nodo de envío es

$$V_S = V_R + ZI_R \quad (3.41)$$

Debido a que la capacitancia en derivación es despreciable, se asume que las corrientes de envío y la de recepción son iguales, es decir:

$$I_S = I_R \quad (3.42)$$

La línea de transmisión puede representarse por medio de una red de bipuertos, donde las ecuaciones descritas previamente pueden ser generalizadas como parámetros ABCD.

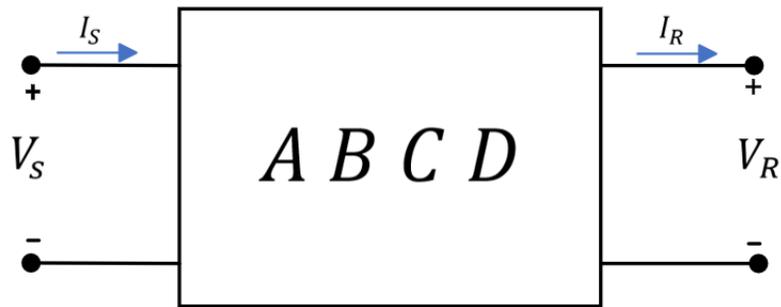


Figura 3-22. Representación de bipuertos Línea Corta. Tomado de [34].

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (3.43)$$

$$I_S = CV_R + DI_R \quad (3.44)$$

De manera matricial:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

Considerando las ecuaciones (3.43) y (3.44), el valor de los parámetros ABCD para un modelo de línea corta quedan de la siguiente manera

$$A = 1, \quad B = Z, \quad C = 0, \quad D = 1$$

3.4.2. Modelo de línea media

Conforme la longitud de la línea de transmisión va en aumento, el efecto de la capacitancia debe ser sometido a estudio. Se considera un modelo de línea media a aquellas que su longitud se encuentra en un rango de arriba de 80 [km] y debajo de 250 [km]. En este modelo, la mitad de la capacitancia en derivación se agrupa tanto en inicio de la línea, así como en el final de esta.

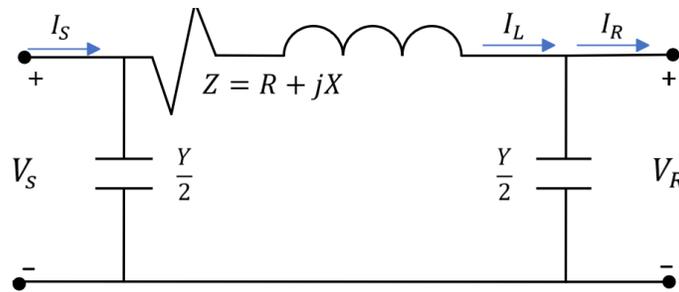


Figura 3-23. Modelo de Línea Media. Tomado de [34].

A esta representación se le conoce como el modelo π nominal. La admitancia en derivación total para este modelo está dada por

$$Y = (g + j\omega C)\ell = G + jB [S]$$

Bajo condiciones normales, la conductancia por unidad de longitud representa la corriente de fuga sobre los aisladores y al efecto corona, es despreciable, entonces

$$g = 0$$

A partir de la Figura 3-22 se obtienen la corriente y voltaje de envío final por medio de las leyes de corrientes y voltajes de Kirchoff

$$I_L = I_R + \frac{Y}{2} V_R \quad (3.46)$$

$$V_S = V_R + Z I_L \quad (3.47)$$

Se sustituye la ecuación (3.46) en (3.47)

$$V_S = V_R + Z \left[I_R + \frac{Y}{2} V_R \right] \quad (3.48)$$

Simplificando

$$V_S = Z I_R + \left[1 + \frac{ZY}{2} \right] V_R \quad (3.49)$$

La corriente de envío queda como

$$I_S = I_L + \frac{Y}{2} V_S \quad (3.50)$$

Sustituyendo para la corriente I_L y el voltaje de envío V_S

$$I_S = \left[1 + \frac{ZY}{4} \right] Y V_R + \left[1 + \frac{ZY}{2} \right] V_R \quad (3.51)$$

Si se comparan las ecuaciones (3.49) y (3.51) con las ecuaciones expresadas en el modelo de línea corta (3.43) y (3.44) obtenemos los parámetros ABCD para el modelo nominal π

$$A = \left[1 + \frac{ZY}{2} \right], \quad B = Z, \quad C = Y \left[1 + \frac{ZY}{4} \right], \quad D = \left[1 + \frac{ZY}{2} \right]$$

Los parámetros ABCD para el modelo π normalmente son de naturaleza compleja y debido al uso de bipuertos podemos observar que $A = D$. Resolviendo la ecuación (3.49) se obtienen las variables de recepción y de envío siendo expresadas de la siguiente manera

$$\begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D & -B \\ -C & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

4. PROPUESTA DE MODELOS DE RED

Antes de abordar de manera concreta los modelos de red es necesario explicar un modelo base, el cual se utilizará para ir de un modelo general a uno particular.

Mediante nuestro software de apoyo MATLAB Simulink utilizaremos el bloque que simulará el comportamiento de la turbina en función del fluido entrante, en este caso la corriente marina (CM). En la Figura 4-1 observamos el par mecánico resultante (T_m), el cual proporcionará el funcionamiento a la máquina PMSG. Se considera que la turbina no tiene ángulo de inclinación.

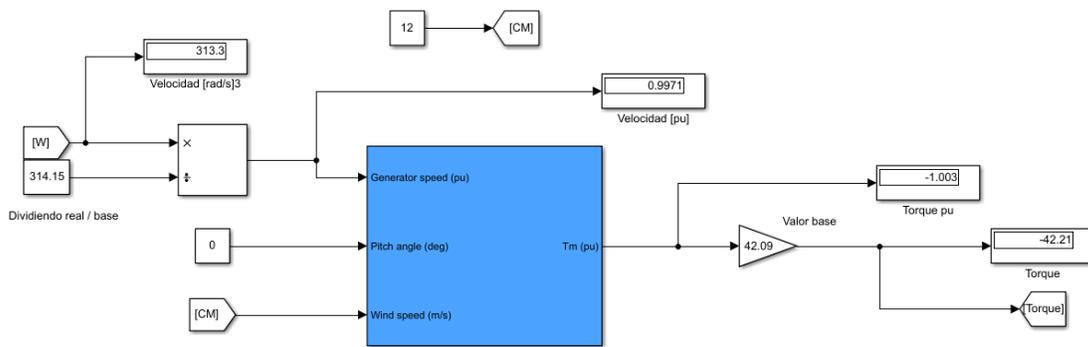


Figura 4-1. Modelo de turbina implementada en Simulink.

Es necesario realizar un análisis a nuestra máquina PMSG para encontrar su máximo punto de operación sin exceder los parámetros nominales. En la Figura 4-2 se ilustra las mediciones de corriente, voltaje y potencia eléctrica.

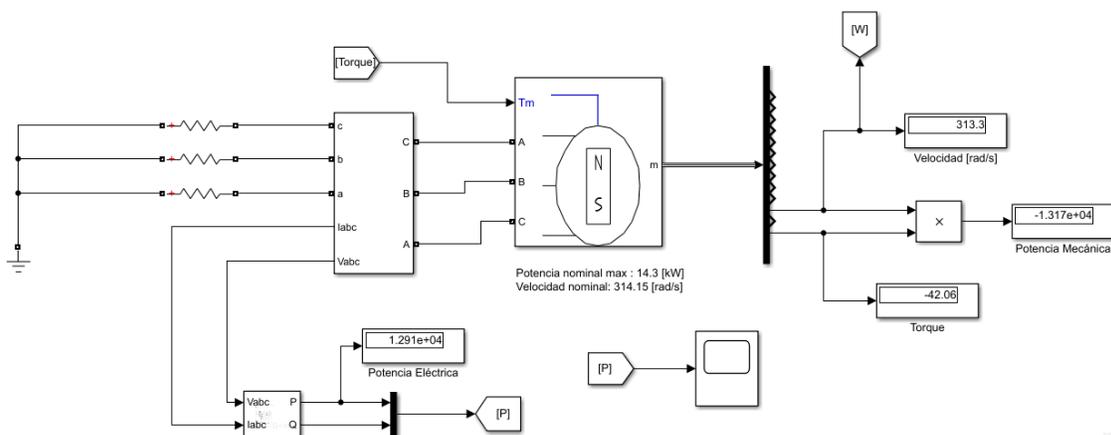


Figura 4-2. Modelo de máquina PMSG implementada en Simulink.

En la Tabla 4.1 se presentan los resultados obtenidos para la máquina PMSG.

Tabla 4.1. Datos obtenidos de la máquina PMSG por medio de Simulink.

| Corriente Marina [m/s] | Torque [Nm] | Par Mecánico [pu] | Velocidad [rad/s] | Velocidad [pu] | Resistencias [ohms] | Potencia Mecánica [W] | Potencia Eléctrica [W] | Corriente [pu] |
|------------------------|-------------|-------------------|-------------------|----------------|---------------------|-----------------------|------------------------|----------------|
| 5 | 6.417 | 0.1524 | 144.3 | 0.4543 | 7.5 | 942.9 | 936.9 | 0.105 |
| 6 | 10.46 | 0.2485 | 158 | 0.5029 | 5.1 | 1655 | 1639 | 0.1832 |
| 7 | 13.72 | 0.326 | 190.4 | 0.606 | 4.7 | 2601 | 2575 | 0.2922 |
| 8 | 18.88 | 0.4485 | 207.5 | 0.6605 | 3.7 | 3900 | 3849 | 0.4368 |
| 9 | 23.78 | 0.565 | 234.5 | 0.7466 | 3.3 | 5553 | 5472 | 0.6218 |
| 10 | 28.63 | 0.6802 | 267 | 0.8498 | 3.1 | 7608 | 7491 | 0.8519 |
| 11 | 35.19 | 0.8362 | 289.4 | 0.9211 | 2.7 | 10,140 | 9964 | 1.132 |
| 12 | 42.21 | 1.003 | 313.3 | 0.9971 | 2.4 | 13,170 | 12,910 | 1.467 |
| 13 | 48.23 | 1.108 | 348 | 1.108 | 2.3 | 16,720 | 16,380 | 1.861 |
| 14 | 55.77 | 1.325 | 375.7 | 1.196 | 2.1 | 20,890 | 20,410 | 2.32 |
| 15 | 64.06 | 1.522 | 402.4 | 1.281 | 1.9 | 25,700 | 25,060 | 2.847 |

Con base a los resultados presentados en la Tabla 4.1, obtendremos los polinomios que caracterizan a la potencia eléctrica, velocidad y par mecánico de la máquina PMSG. Por medio del software Graph se obtiene, por medio de las relaciones de las variables de interés y la corriente marina, los puntos que serán fundamentales para obtener los polinomios. Los polinomios con su curva característica se muestran a continuación.

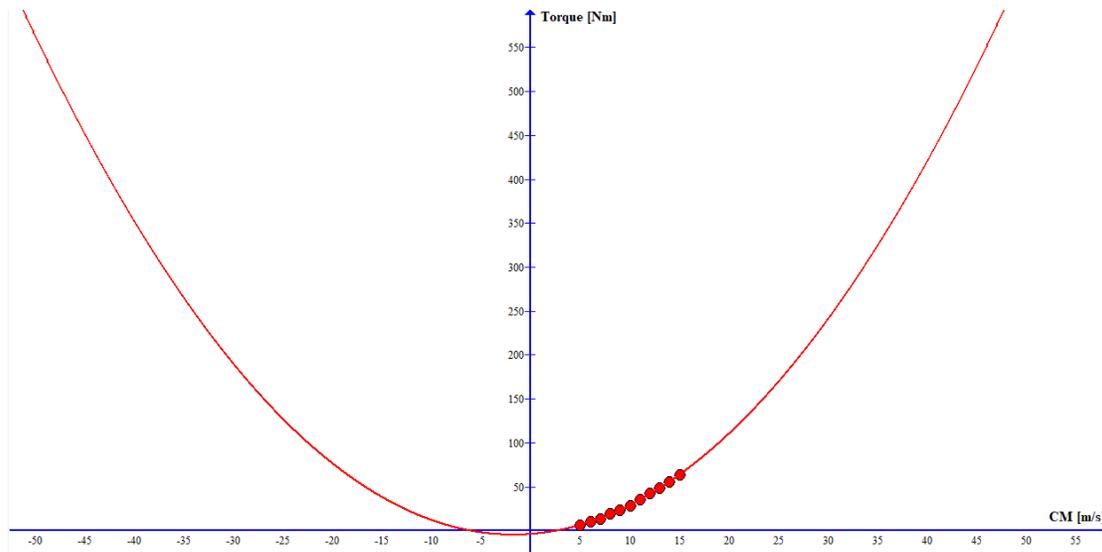


Figura 4-3. Curva característica para par mecánico.

$$f(x) = 0.2436x^2 + 0.864x - 3.867$$

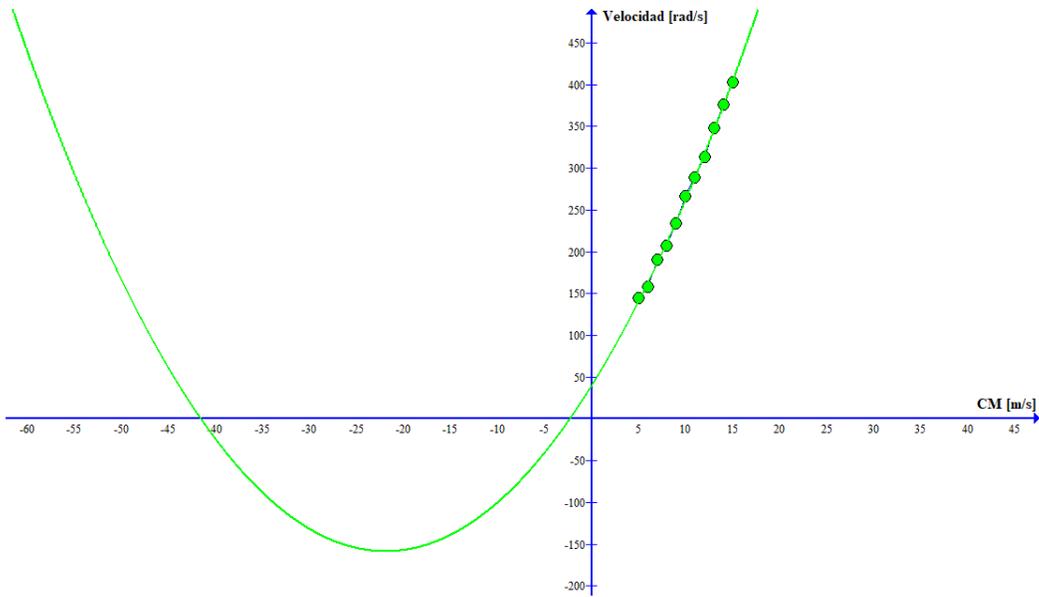


Figura 4-4. Curva característica para velocidad.

$$f(x) = 0.4131x^2 + 18.108x + 39.893$$

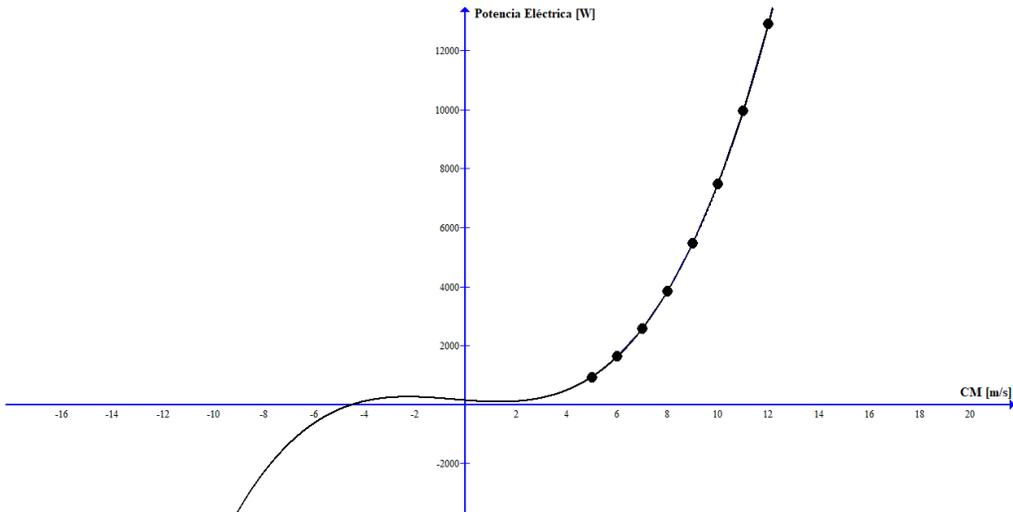


Figura 4-5. Curva característica para velocidad.

$$f(x) = 7.0058x^3 + 9.9936x^2 - 65.1556x + 143.4944$$

Nótese que la interpretación física del eje de las abscisas es referente a la corriente marina CM [m/s] y el eje de las ordenadas como Par mecánico [Nm] , Velocidad [rad/s] y Potencia eléctrica [W] respectivamente.

El software de apoyo Graph nos permite elegir el orden de los polinomios, sin embargo, se eligió el polinomio que aproximara el resultado que se obtuvo en la simulación del análisis de la máquina PMSG. Este proceso ya ha sido realizado en [36].

Posteriormente en la Figura 4-6 se procede con relacionar, específicamente, la magnitud de la potencia eléctrica para conseguir la corriente que será inyectada a fuentes de corriente y comenzar con el análisis correspondiente para cada modelo que se presentará. Se utilizará como referencia la corriente marina (CM) como variable de entrada para los polinomios.

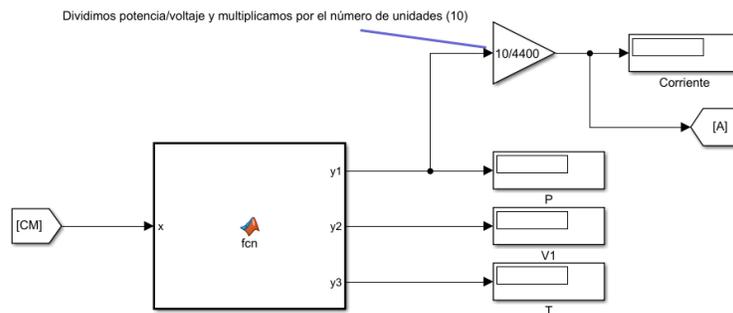


Figura 4-6. Diagrama de bloque para la inyección de corriente a través de los polinomios.

4.1. Distribución total de la granja

Una vez simulado el comportamiento de la máquina PMSG, supondremos una posible localización para implementar la granja. En este caso se tratará de la isla de Cozumel. Los estudios realizados en [35], sugieren que el flujo de velocidad desarrollada en la sección media del canal de Cozumel es de 2[m/s] aproximadamente, sin embargo, estos estudios no se enfocan en aguas poco profundas.

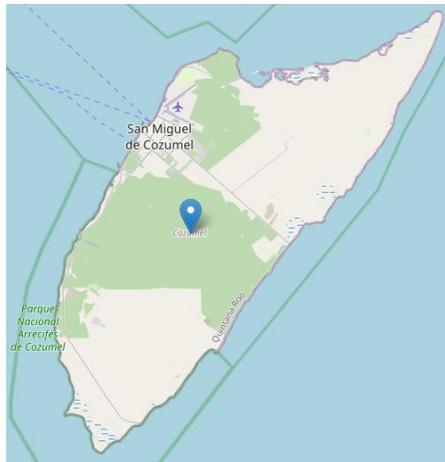


Figura 4-7. Localización del Canal de Cozumel. Tomado de [31].

4.1.1. Dimensión y acomodo de las turbinas

Las turbinas serán agrupadas en 10 unidades para formar un arreglo total de la granja de 100 unidades, el cual se muestra en la Figura 4-8.

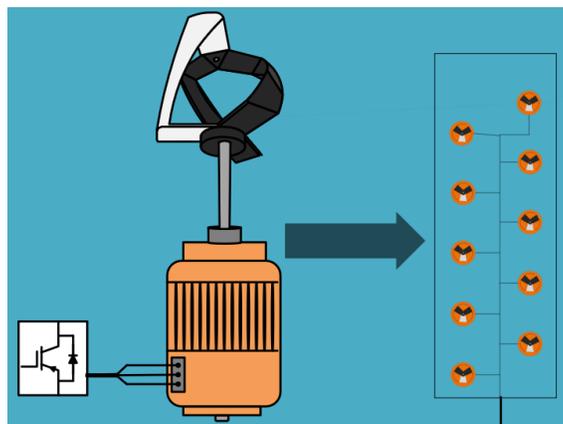


Figura 4-8. Acomodo de las turbinas.

4.1.2. Estimación por 100 unidades de generación

El valor esperado de la generación total de la granja es de 1.5 [MW], esto se considera de manera ideal puesto que habrá pérdidas en la conversión de la energía mecánica a eléctrica de la turbina y el cable eléctrico submarino que será elegido para las pruebas.

4.1.3. Cálculo de conductores y distancias

La distancia estimada entre la granja de generación y la costa es de 5 kilómetros, con lo que únicamente debemos considerar los resultados obtenidos en la simulación para los modelos propuestos para seleccionar el cable con base a la corriente máxima que soportará partiendo de un modelo ideal de la línea de transmisión.

4.1.4. Modelos ideales para la transmisión de potencia

Para las simulaciones se supondrá que las máquinas trabajarán en el punto de máxima potencia eléctrica, a una velocidad de oleaje 12[m/s].

La generación de potencia esperada depende directamente de la corriente marina la cual es variable, donde la máquina PMSG se encargará de convertir la energía mecánica a eléctrica y generar la potencia esperada.

Modelo de 1 línea de CD (ideal)

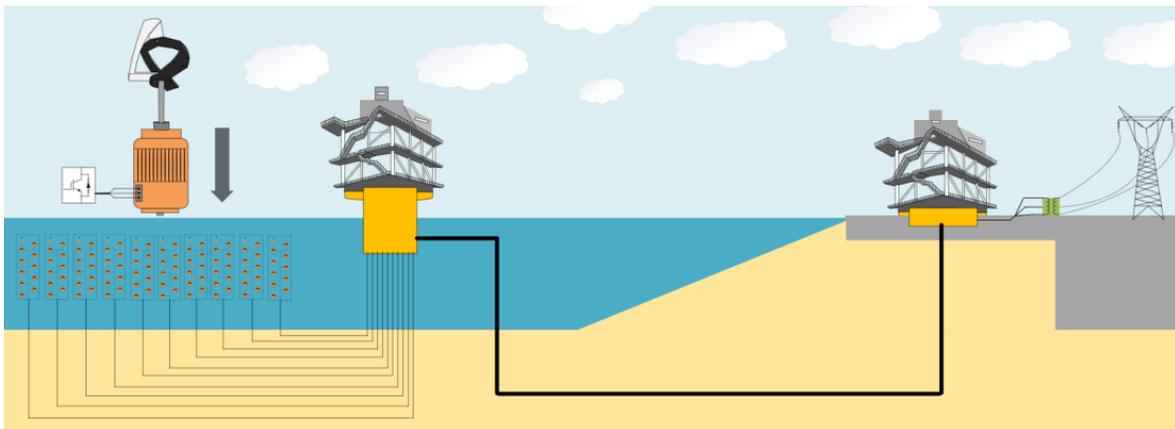


Figura 4-9. Modelo de 1 línea de CD.

Este modelo está conformado por una granja con un total de 100 Máquinas PMSG, agrupadas en 10 unidades las cuales irán conectadas a una subestación elevadora de voltaje de CD.

Una vez conectadas las unidades de generación a la subestación, se transmite en una sola línea de CD, con los parámetros de impedancia utilizados en el conductor propuesto una potencia de 1.5

[MW] aproximadamente, que se encuentra a 5 [km] de distancia entre la subestación en altamar y la subestación en la costa.

Como parte final en el modelo de transmisión, el cable de CD que transmite la potencia generada se conecta a una subestación inversora para llevarla a una red trifásica de 13.8[kV]. El transformador conectado a la red cuenta con un factor de potencia unitario y una capacidad de 1.5[MW], con relación de transformación 10:1.

En la Figura 4-10 se muestra el agrupamiento de las 10 máquinas, representado por una fuente de corriente en cada línea implementada en el simulador MATLAB Simulink, las cuales se conectan directamente a una línea donde se desea analizar las pérdidas en la transmisión de la potencia, en la cual se encuentra un medidor de corriente.

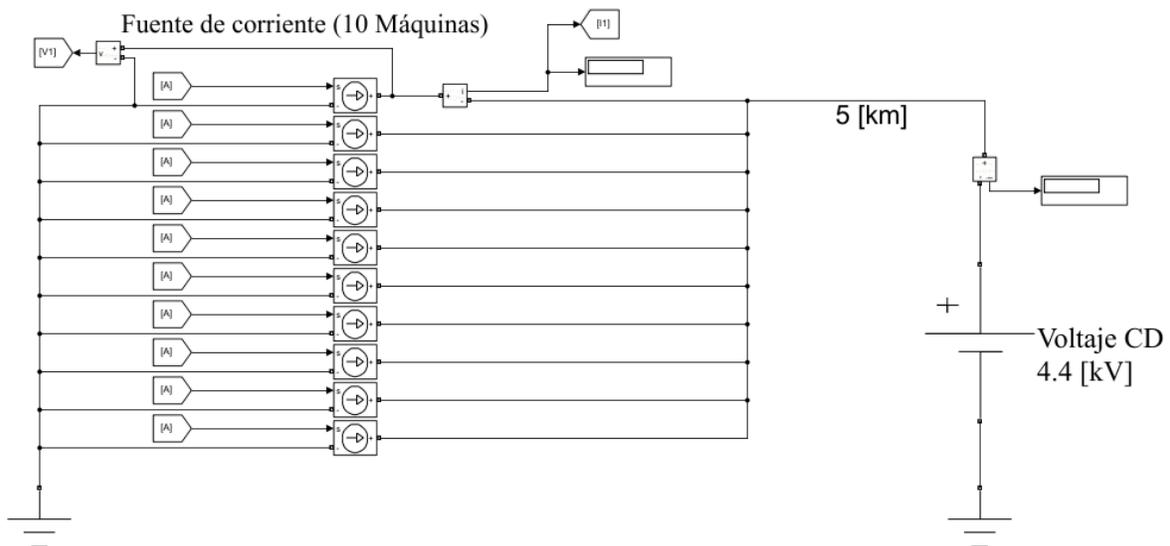


Figura 4-10. Modelo ideal de 1 línea de CD implementado en Simulink.

La prueba para obtener el valor simulado en la corriente que atraviesa por las líneas conectadas a la línea de CD es de 29.29 [A]. Dado que las líneas del agrupamiento de las máquinas están en paralelo, la corriente total que debe soportar la línea de CD es de 292.9 [A].

La potencia generada por la granja la podemos determinar midiendo la diferencia de potencial en las terminales de la fuente de corriente y la corriente que sale de la mencionada fuente, tal como se ilustra en la Figura 4-10.

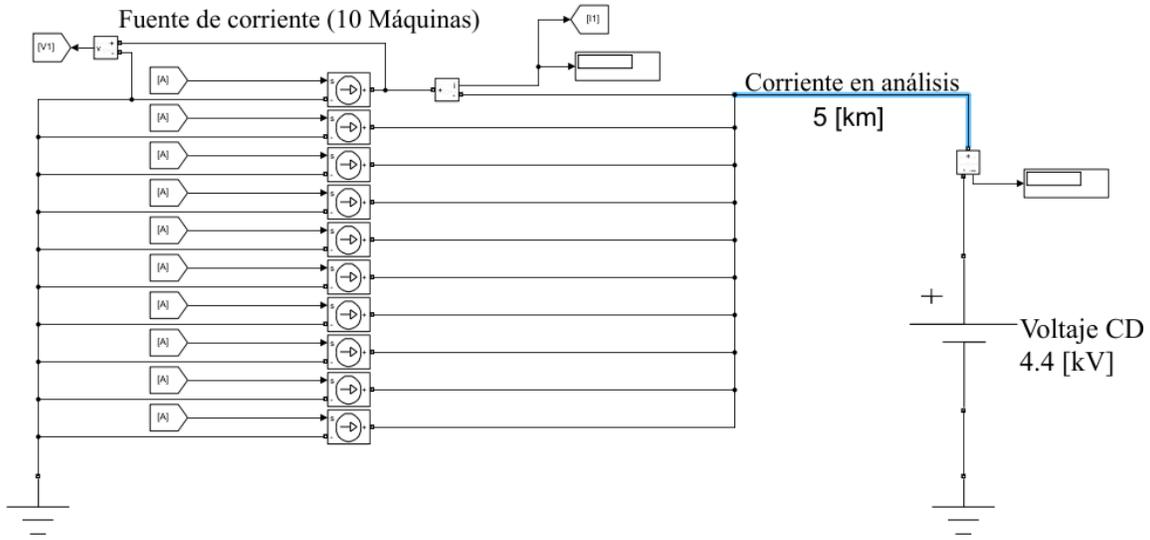


Figura 4-11. Medición de voltaje y corriente para la potencia generada.

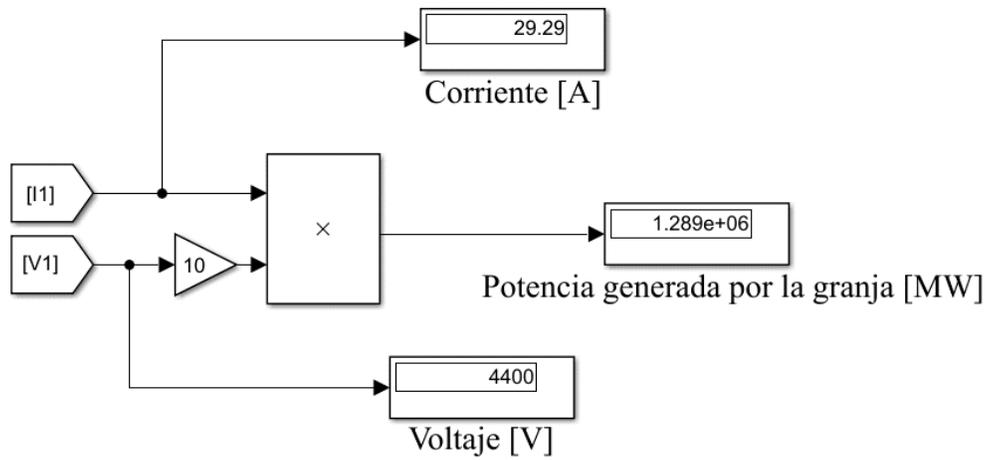


Figura 4-12. Potencia generada por la granja.

En la Figura 4-12 se muestra la corriente que corre a través de una línea, el voltaje es multiplicado por una ganancia de 10 para considerar todas las fuentes de corriente en el modelo propuesto. El resultado de la potencia generada por la granja de generación es de 1.289 [MW].

Modelo de 10 líneas de CD (ideal)

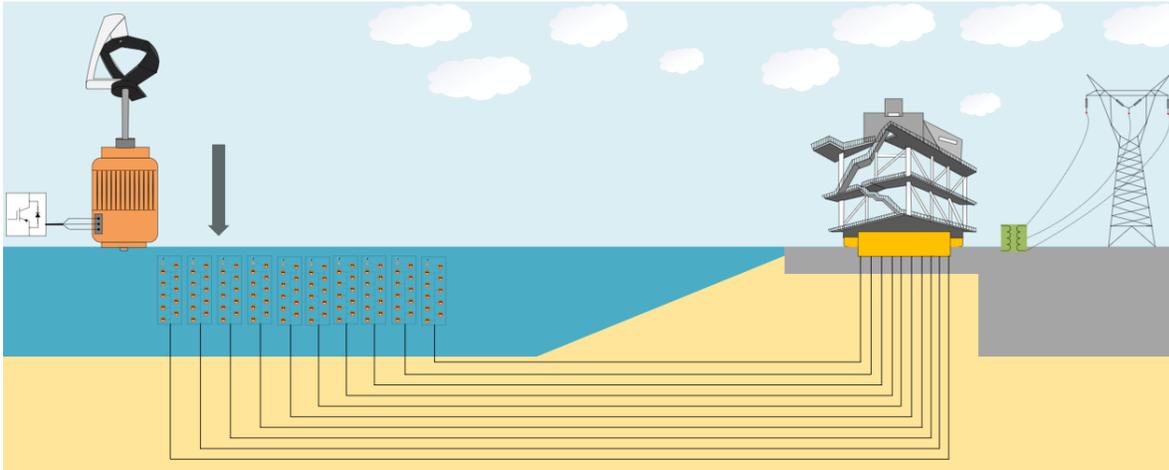


Figura 4-13. Modelo de 10 líneas de CD.

En la Figura 4-14 se observa que el acomodo de las máquinas es el mismo que en modelo ideal de 1 línea de CD. La diferencia se ve reflejada en que cada arreglo de 10 máquinas va de manera directa a la estación convertidora en la costa y se acopla a la red de distribución por medio de un transformador que supondremos que tiene los mismos parámetros que en el modelo anterior.

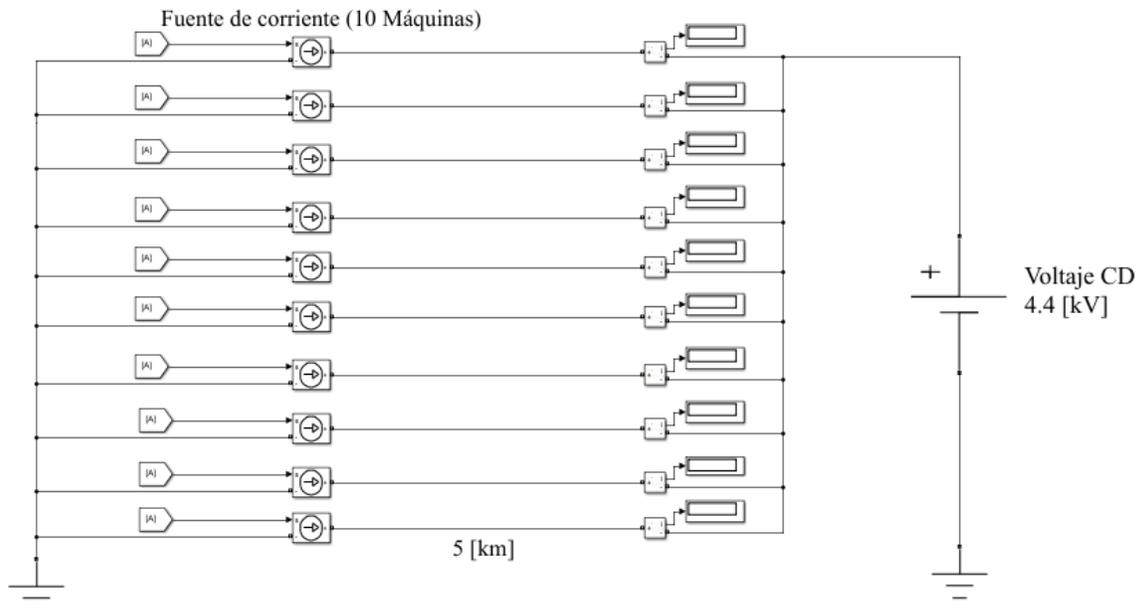


Figura 4-14. Modelo ideal de 10 líneas de CD implementado en Simulink..

La prueba para obtener el valor simulado en la corriente que atraviesa por las líneas de CD es de 29.29 [A]. Para este modelo sólo se requiere una corriente como la previamente calculada.

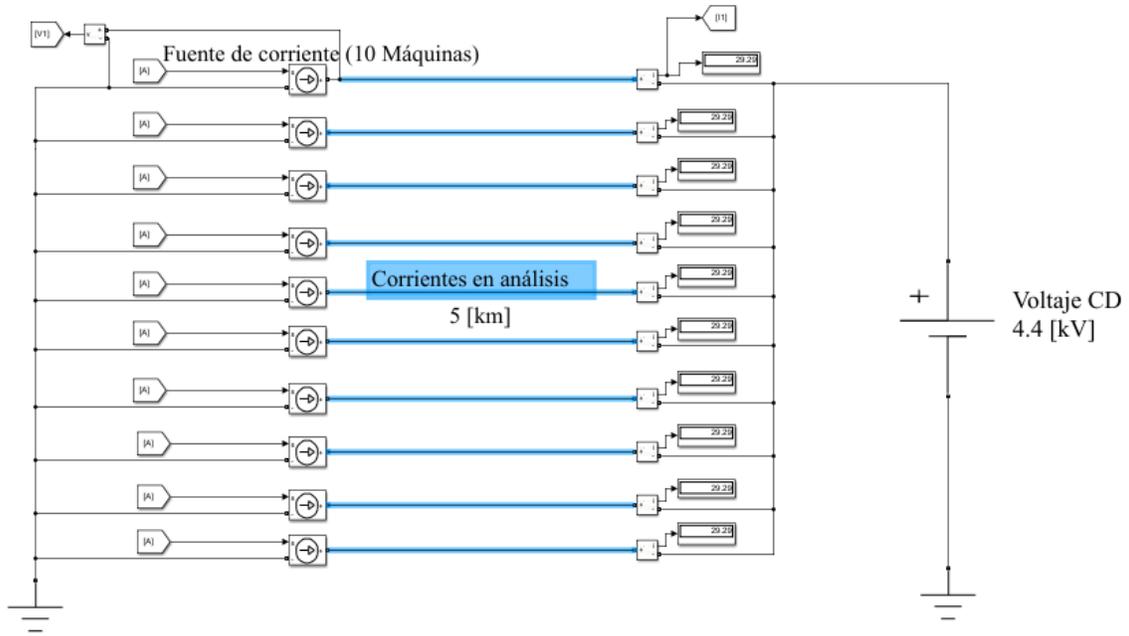


Figura 4-15. Medición de voltaje y corriente para la potencia generada.

Modelo de 1 línea de CA (ideal)

En este modelo se conectan los generadores en grupos de 10 a una línea de CD, formando en total 10 líneas para poder transmitir 1.5 [MW] aproximadamente a la subestación. Una vez conectadas las 10 líneas de CD a la estación convertidora se analiza la corriente, voltaje y potencia que se transmite por medio del cable de CA, el cual tiene una longitud aproximada de 5 [km]. Se conecta la subestación directamente una red trifásica de 23 [kV].

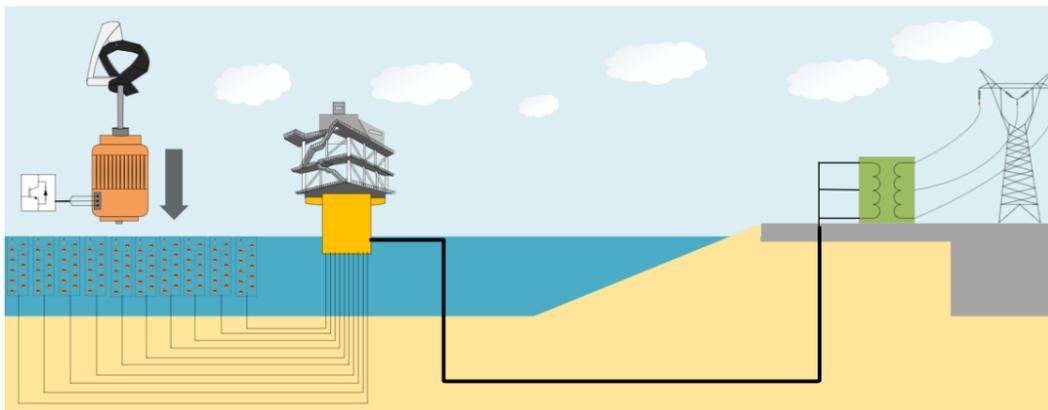


Figura 4-16. Modelo de 1 línea de CA.

Se requiere analizar la potencia, corriente y voltaje que va desde la estación convertidora hasta la red eléctrica. Esto se medirá mediante las señales senoidales de voltaje proporcionadas por el convertidor trifásico CD/CA, tal como se ilustra en la Figura 4-17.

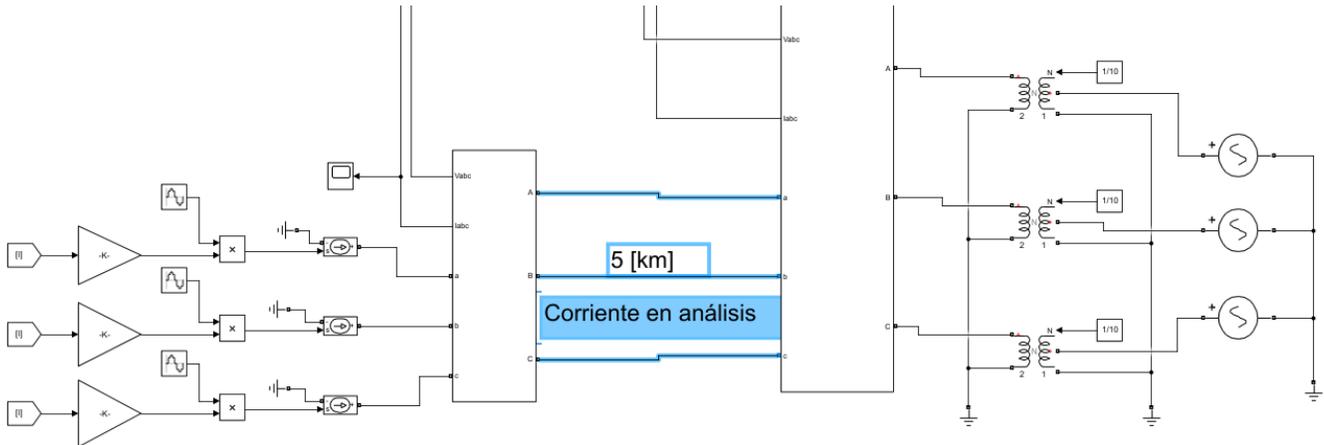


Figura 4-17. Modelo ideal de 1 línea de CA implementado en Simulink.

Las ganancias K definen una constante que representa el comportamiento físico del convertidor CD/AC. En la fuente de corriente se inyecta la constante K multiplicada por una señal senoidal y así simular la conversión de CD a CA. De lado derecho se representada la red trifásica por medio de tres fuentes senoidales.

En este modelo se requiere analizar la potencia, corriente y voltaje que va desde la subestación inversora hasta la red. Esto se medirá mediante las señales senoidales de voltaje proporcionadas por el convertidor CD/CA.

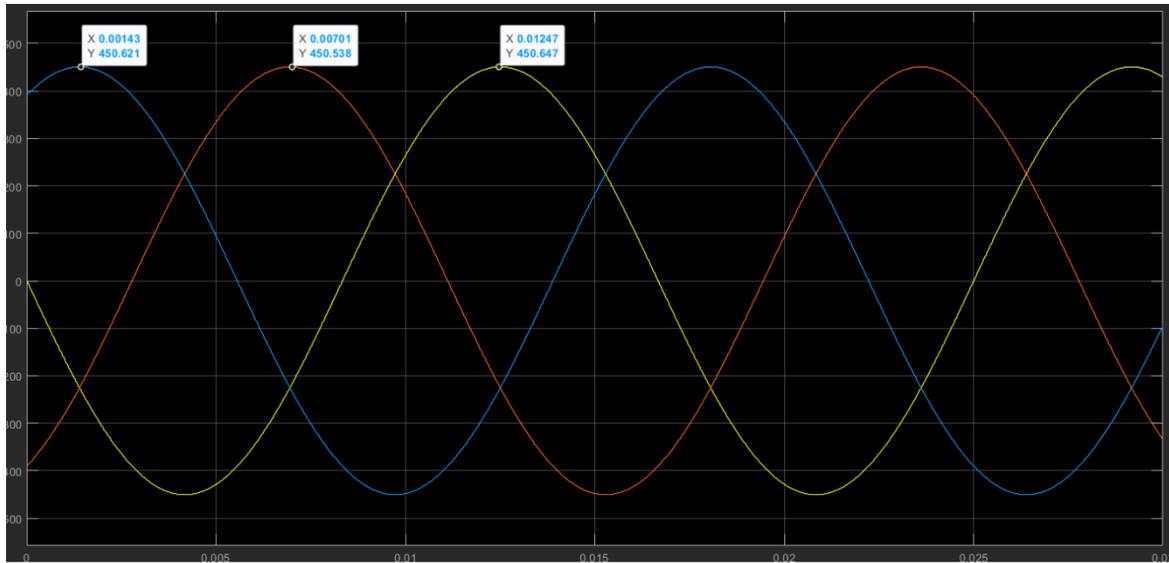


Figura 4-18. Medición de corriente modelo ideal 1 línea de CA.

La medición en la corriente por medio de la línea de CA es de aproximadamente 450 [A].

Una vez realizadas las simulaciones y mediciones para los modelos de transmisión de forma ideal se realizará una tabla comparativa de los resultados obtenidos en las corrientes.

Tabla 4. Comparativa de corrientes para los modelos de transmisión.

| Modelo | Corriente [A] |
|-------------------------|---------------|
| 1 línea de CD | 292.9 |
| 10 líneas de CD | 29.29 |
| 1 línea trifásica de CA | 450 |

4.1.5. Selección de cable eléctrico submarino

Cable para modelo 1 línea CD

Dado el resultado obtenido en la simulación para el modelo, se propone usar un conductor 2XS2YRAA del catálogo de Nexans [26] que cuenta con los parámetros señalados en color amarillo.

Tabla 4.1. Parámetros de cable submarino eléctrico 1 línea CD. Tomado de [26].

2XS2YRAA 6/10(12) kV

Electrical Data

| 1 | | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
|------------------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------|-------------|------------|----------------|--------|--|-------------|
| Nominal cross sectional area | | Conductor resistance DC 20°C | Conductor resistance AC 90°C | Screen resistance 20°C | Capacitance | Inductance | Current rating | Losses | 1s short circuit current after full load at 90°C conductor temperature | |
| conductor (mm ²) | screen (mm ²) | (Ω/km) | (Ω/km) | (Ω/km) | (μF/mm) | (mH/km) | (A) | (W/m) | conductor (kA) | screen (kA) |
| 35 | 16 | 0.524 | 0.67 | 1.15 | 0.23 | 0.41 | 166 | 56 | 5.0 | 0.72 |
| 50 | 16 | 0.387 | 0.49 | 1.15 | 0.26 | 0.39 | 196 | 58 | 7.1 | 0.72 |
| 70 | 16 | 0.268 | 0.34 | 1.15 | 0.29 | 0.37 | 240 | 61 | 10.0 | 0.98 |
| 95 | 16 | 0.193 | 0.25 | 1.15 | 0.32 | 0.35 | 287 | 63 | 13.6 | 0.98 |
| 120 | 16 | 0.153 | 0.20 | 1.15 | 0.35 | 0.34 | 325 | 65 | 17.1 | 0.98 |
| 150 | 25 | 0.124 | 0.16 | 0.73 | 0.38 | 0.33 | 364 | 66 | 21.4 | 1.1 |
| 185 | 25 | 0.0991 | 0.13 | 0.73 | 0.42 | 0.32 | 408 | 68 | 26.5 | 1.1 |
| 240 | 25 | 0.0754 | 0.10 | 0.73 | 0.47 | 0.30 | 471 | 72 | 34.3 | 1.1 |

Cable para modelo 10 líneas CD

Dado el resultado obtenido en la simulación para el modelo, se propone usar un conductor 2XS2YRAA del catálogo de Nexans [25] que cuenta con los parámetros señalados en color amarillo.

Tabla 4.2. Parámetros de cable submarino eléctrico 10 líneas CD. Tomado de [26].

2XS2YRAA 6/10(12) kV

Electrical Data

| 1 | | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
|------------------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------|-------------|------------|----------------|--------|--|-------------|
| Nominal cross sectional area | | Conductor resistance DC 20°C | Conductor resistance AC 90°C | Screen resistance 20°C | Capacitance | Inductance | Current rating | Losses | 1s short circuit current after full load at 90°C conductor temperature | |
| conductor (mm ²) | screen (mm ²) | (Ω/km) | (Ω/km) | (Ω/km) | (μF/mm) | (mH/km) | (A) | (W/m) | conductor (kA) | screen (kA) |
| 35 | 16 | 0.524 | 0.67 | 1.15 | 0.23 | 0.41 | 166 | 56 | 5.0 | 0.72 |
| 50 | 16 | 0.387 | 0.49 | 1.15 | 0.26 | 0.39 | 196 | 58 | 7.1 | 0.72 |
| 70 | 16 | 0.268 | 0.34 | 1.15 | 0.29 | 0.37 | 240 | 61 | 10.0 | 0.98 |
| 95 | 16 | 0.193 | 0.25 | 1.15 | 0.32 | 0.35 | 287 | 63 | 13.6 | 0.98 |
| 120 | 16 | 0.153 | 0.20 | 1.15 | 0.35 | 0.34 | 325 | 65 | 17.1 | 0.98 |
| 150 | 25 | 0.124 | 0.16 | 0.73 | 0.38 | 0.33 | 364 | 66 | 21.4 | 1.1 |
| 185 | 25 | 0.0991 | 0.13 | 0.73 | 0.42 | 0.32 | 408 | 68 | 26.5 | 1.1 |
| 240 | 25 | 0.0754 | 0.10 | 0.73 | 0.47 | 0.30 | 471 | 72 | 34.3 | 1.1 |

La elección de este cable es debido a que no se encontró un cable con capacidad de corriente obtenida en las simulaciones.

Cable para modelo 1 línea CA

Dado el resultado obtenido en la simulación para el modelo, se propone usar un conductor 2XS2YRAA del catálogo de Nexans [26] que cuenta con los parámetros señalados en color amarillo.

Tabla 4.3. Parámetros de cable submarino eléctrico 1 línea CA. Tomado de [26].

| 2XS2YRAA 12/20(24) kV | | | | | | | | | | Electrical Data | | | | | | | |
|------------------------------|---------------------------|------------------------------|--|------------------------------|--|------------------------|--|-------------|---------|-----------------|--|----------------|--|----------------|--|--|--|
| 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | 6 | | 7 | | 8 | | 9 | |
| Nominal cross sectional area | | Conductor resistance DC 20°C | | Conductor resistance AC 90°C | | Screen resistance 20°C | | Capacitance | | Inductance | | Current rating | | Losses | | 1s short circuit current after full load at 90°C conductor temperature | |
| conductor (mm ²) | screen (mm ²) | (Ω/km) | | (Ω/km) | | (Ω/km) | | (μF/mm) | (mH/km) | (A) | | (W/m) | | conductor (kA) | | screen (kA) | |
| 35 | 16 | 0.524 | | 0.67 | | 1.15 | | 0.17 | 0.45 | 168 | | 58 | | 5.0 | | 0.98 | |
| 50 | 16 | 0.387 | | 0.49 | | 1.15 | | 0.18 | 0.43 | 199 | | 59 | | 7.1 | | 0.98 | |
| 70 | 16 | 0.268 | | 0.34 | | 1.15 | | 0.20 | 0.40 | 243 | | 62 | | 10.0 | | 0.98 | |
| 95 | 16 | 0.193 | | 0.25 | | 1.15 | | 0.22 | 0.38 | 290 | | 64 | | 13.6 | | 1.09 | |
| 120 | 16 | 0.153 | | 0.20 | | 1.15 | | 0.24 | 0.37 | 329 | | 66 | | 17.1 | | 1.09 | |
| 150 | 25 | 0.124 | | 0.16 | | 0.73 | | 0.26 | 0.35 | 368 | | 68 | | 21.4 | | 1.09 | |
| 185 | 25 | 0.0991 | | 0.13 | | 0.73 | | 0.28 | 0.34 | 412 | | 71 | | 26.5 | | 1.09 | |
| 240 | 25 | 0.0754 | | 0.10 | | 0.73 | | 0.31 | 0.33 | 472 | | 74 | | 34.3 | | 1.45 | |

La selección de los cables es en función de la corriente, puesto que deben soportar el valor simulado medido para los tres casos propuestos. Por lo tanto, se elegirá un cable con más capacidad respecto a las magnitudes obtenidas.

4.2. Análisis total de pérdidas

4.2.1. Análisis detallado de pérdidas en CD (1 línea)

Se inserta el cable seleccionado en donde se analizó la corriente previamente en el modelo ideal propuesto.

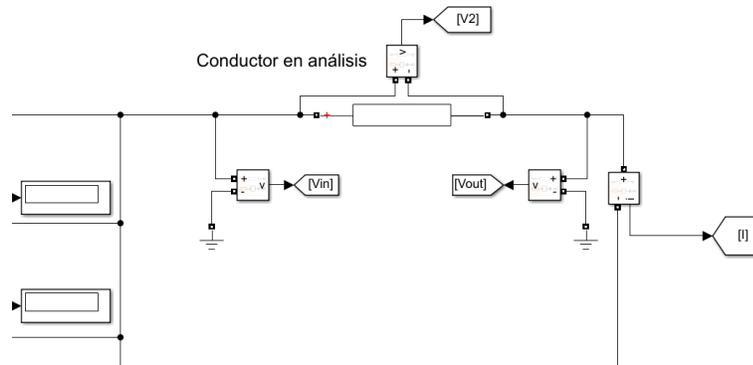


Figura 4-19. Medición de corriente modelo 1 línea de CD con cable submarino seleccionado.

Tabla 4.4. Datos obtenidos del cable eléctrico submarino para el modelo de 1 línea de CD.

| Corriente Marina [m/s] | Corriente [A] | Voltaje [V] | Pérdidas [W] | Eficiencia [%] |
|------------------------|---------------|-------------|--------------|----------------|
| 5 | 20.95 | 16.03 | 335.9 | 99.63 |
| 6 | 36.58 | 27.98 | 1023 | 99.36 |
| 7 | 58.34 | 44.63 | 2604 | 98.98 |
| 8 | 87.22 | 66.73 | 5820 | 98.50 |
| 9 | 124.2 | 94.99 | 11,790 | 97.88 |
| 10 | 170.1 | 130.1 | 22,140 | 97.13 |
| 11 | 226.1 | 172.9 | 39,100 | 96.21 |
| 12 | 292.9 | 224.1 | 65,650 | 95.13 |
| 13 | 371.7 | 284.4 | 105,700 | 93.93 |
| 14 | 463.3 | 354.5 | 164,200 | 92.55 |
| 15 | 568.8 | 435.1 | 247,500 | 91 |

Realizamos curvas del conductor respecto a las variables de interés de corriente, voltaje, eficiencia y pérdidas en el conductor por medio del software MATLAB.

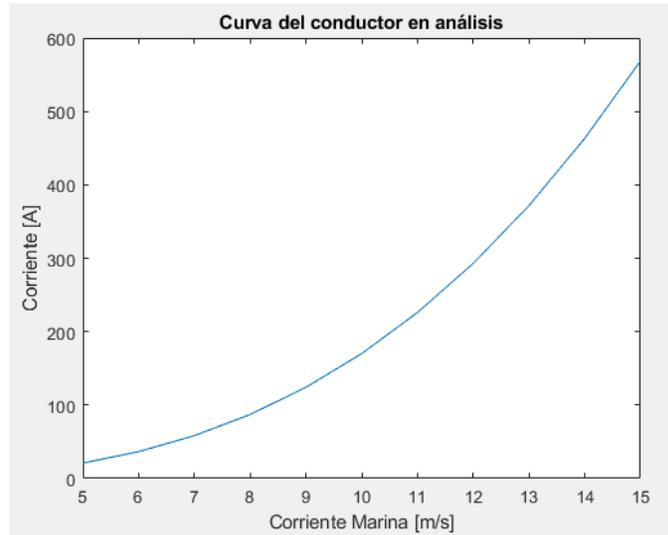


Figura 4-20. Comportamiento del cable respecto a la corriente.

Se observa que la corriente crece de manera exponencial mientras la corriente marina aumenta.

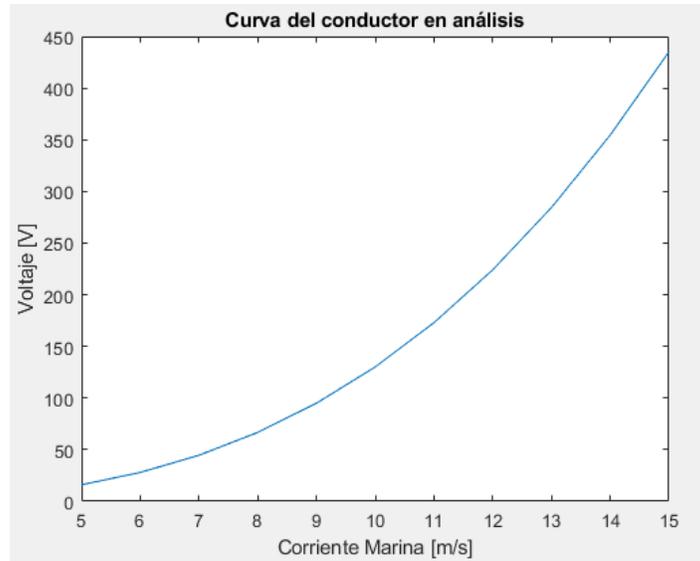


Figura 4-21. Comportamiento del cable submarino respecto al voltaje.

El comportamiento del voltaje en el conductor es similar a la corriente, crece de manera exponencial conforme la corriente marina aumenta.

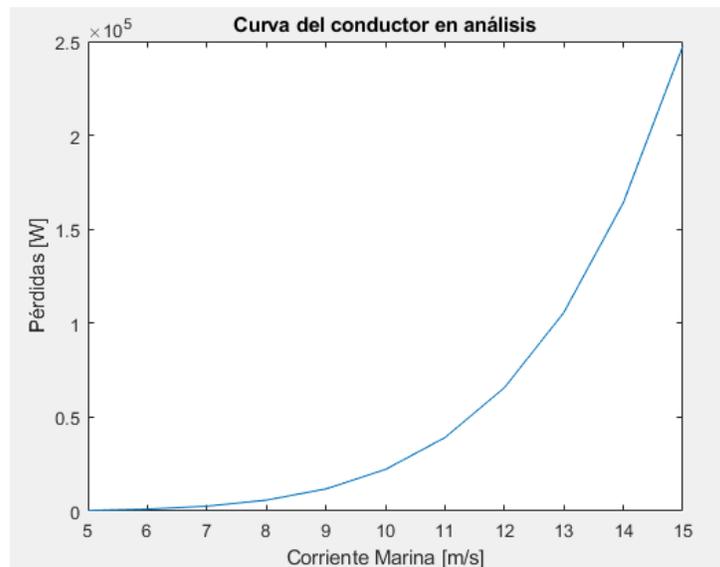


Figura 4-22. Comportamiento del cable submarino respecto las pérdidas.

Observamos que las pérdidas en el cable submarino son notorias cuando la corriente marina llega a 8[m/s], con un comportamiento exponencial.

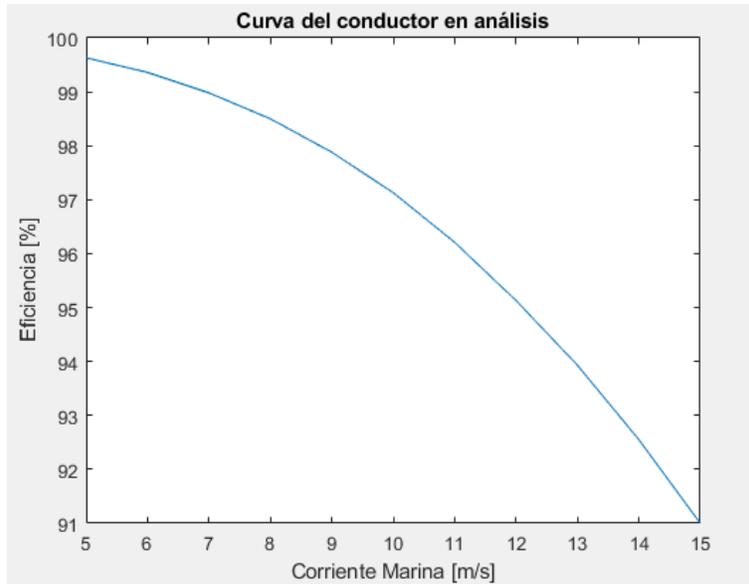


Figura 4-23. Comportamiento del cable submarino respecto a la eficiencia.

La eficiencia del cable submarino decrece cuando incrementa la corriente marina pero no cae debajo del 90 [%].

4.2.2. Análisis detallado de pérdidas en CD (10 líneas)

Se inserta el cable submarino elegido en las diez líneas que se analizaron de manera ideal y presentar los resultados obtenidos por las mediciones.

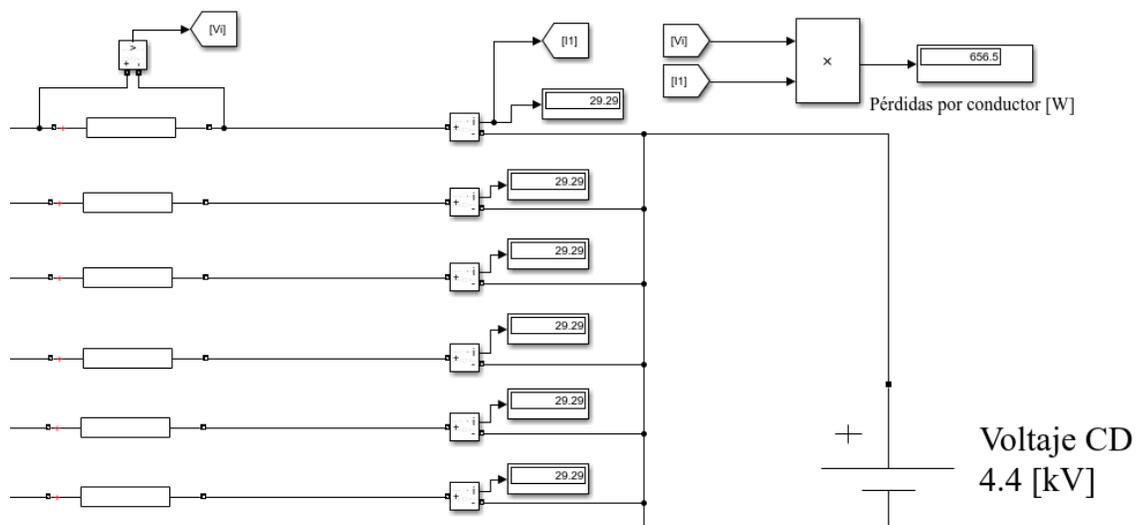


Figura 4-24. Medición de corriente modelo de 10 líneas de CD con cable seleccionado.

Tabla 4.5. Datos obtenidos del cable eléctrico submarino para el modelo de 10 líneas de CD.

| Corriente Marina [m/s] | Corriente [A] | Voltaje [V] | Pérdidas [W] | Eficiencia [%] |
|------------------------|---------------|-------------|--------------|----------------|
| 5 | 2.096 | 1.603 | 3.3598 | 99.96 |
| 6 | 3.657 | 2.798 | 10.2322 | 99.93 |
| 7 | 5.835 | 4.463 | 26.0416 | 98.90 |
| 8 | 8.722 | 6.673 | 58.2019 | 99.84 |
| 9 | 12.42 | 9.499 | 117.9379 | 99.79 |
| 10 | 17.01 | 13.01 | 221.4173 | 99.70 |
| 11 | 22.61 | 17.29 | 390.9750 | 99.61 |
| 12 | 29.29 | 22.41 | 656.5186 | 99.50 |
| 13 | 37.17 | 28.44 | 1057.0574 | 99.36 |
| 14 | 46.33 | 35.45 | 1642.3741 | 99.21 |
| 15 | 56.88 | 43.51 | 2474.8369 | 99 |

De acuerdo con la Tabla 4.5. la eficiencia que presenta el cable submarino en el punto de máximo desempeño de la máquina PMSG (color verde) es de 99.5%. Las pérdidas, tomando en cuenta las 10 líneas da como resultado un total de 6565.186 [W].

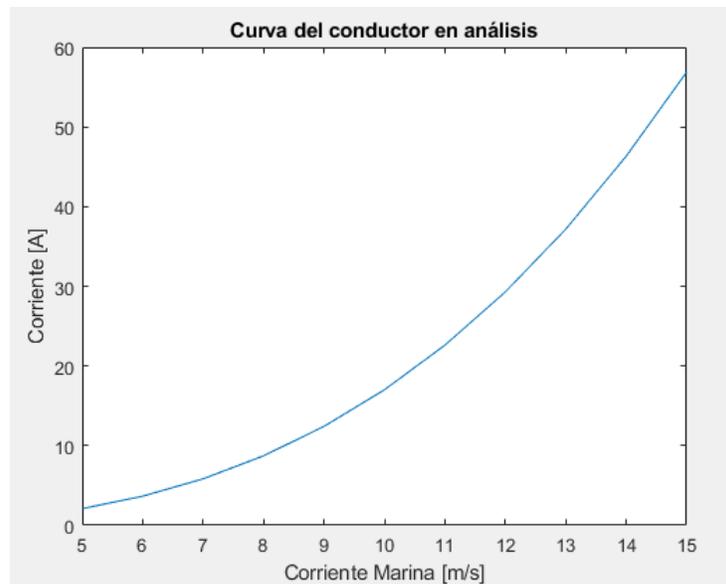


Figura 4-25. Comportamiento del cable submarino respecto a la corriente.

La corriente en el cable va aumentando mientras la corriente marina aumenta exponencialmente, llegando al límite de 56 [A] aproximadamente.

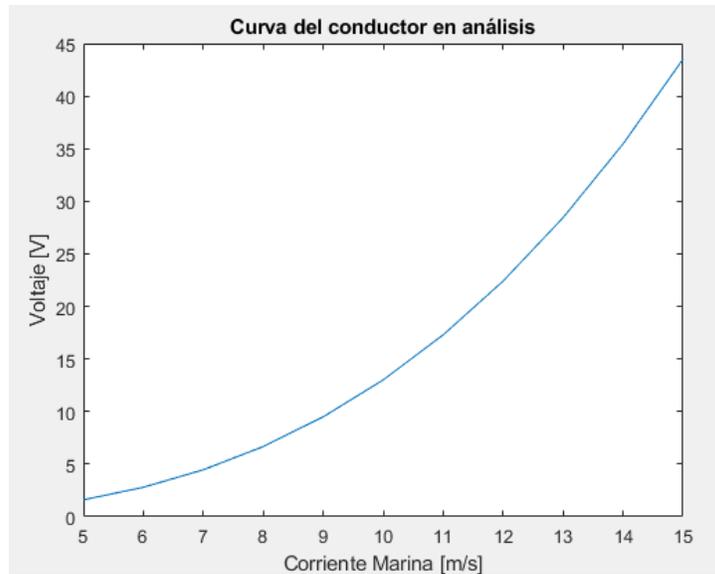


Figura 4-26. Comportamiento del cable submarino respecto al voltaje.

El voltaje crece de manera similar a la corriente eléctrica, llegando a un valor máximo de 43 [V] aproximadamente.

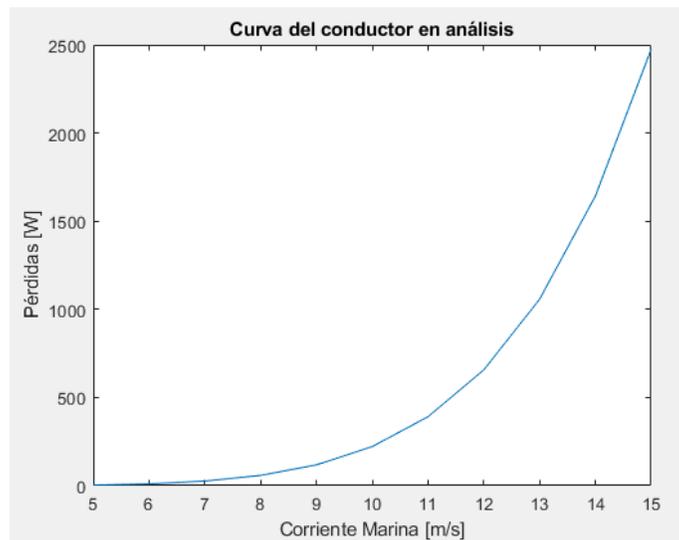


Figura 4-27. Comportamiento del cable submarino respecto a las pérdidas.

Las pérdidas se comienzan a notar a partir de 7[m/s] de la corriente marina, alcanzando un límite superior de 2500 [W] aproximadamente.

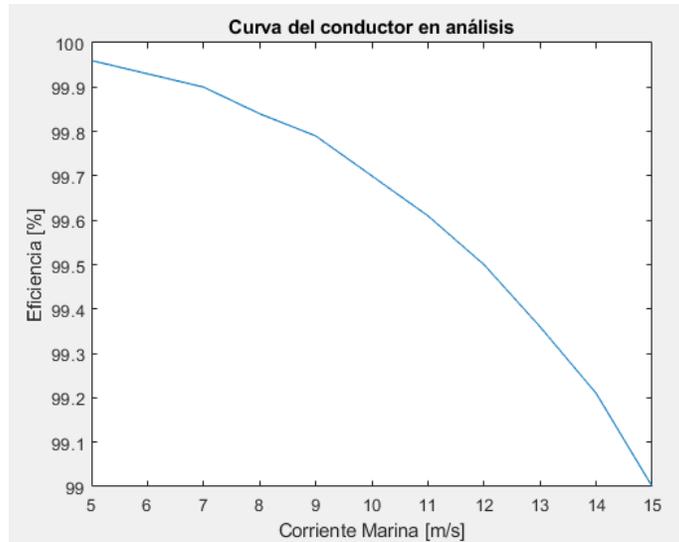


Figura 4-28. Comportamiento del cable submarino respecto a la eficiencia.

Observamos que la eficiencia decae casi 1% desde el punto más bajo de la corriente marina hasta su máxima velocidad simulada. Podríamos considerar “ideales” las pérdidas en este modelo.

4.2.3. Análisis detallado de pérdidas 1 línea CA

Una vez obtenidos los resultados de la simulación insertamos el cable submarino elegido para la simulación. Posteriormente se realizará la Tabla 4.6 y sus gráficas correspondientes de corriente, voltaje, pérdidas y eficiencia.

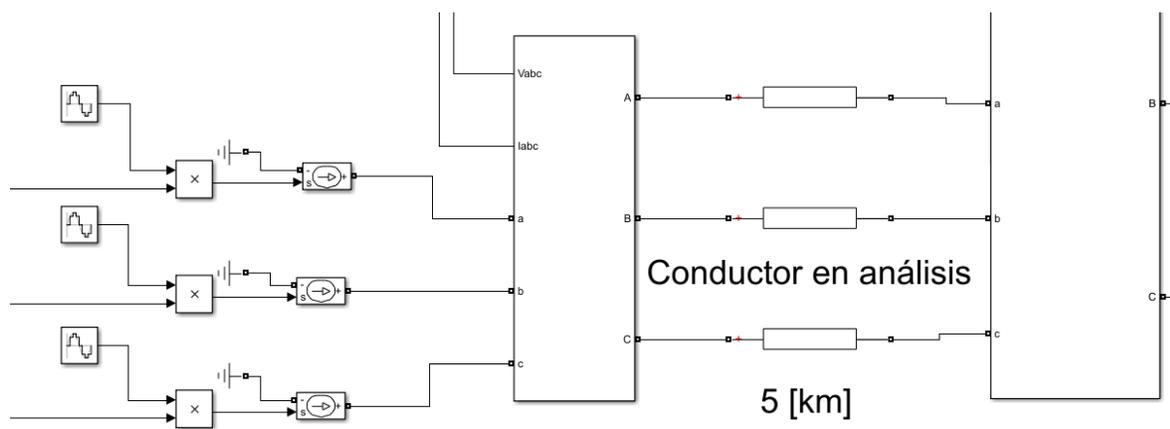


Figura 4-29. Medición de corriente modelo de 1 línea de CA con cable seleccionado.

Tabla 4.6. Datos obtenidos del cable eléctrico submarino para el modelo de 1 línea de CA.

| Corriente Marina [m/s] | Corriente [A] | Voltaje [V] | Pérdidas [W] | Eficiencia [%] |
|------------------------|---------------|-------------|--------------|----------------|
| 5 | 32.22 | 4 | 128.88 | 99.78 |
| 6 | 56.25 | 18 | 1,012.5 | 99.05 |
| 7 | 89.74 | 37 | 3,320.38 | 98.06 |
| 8 | 134.2 | 63 | 8,454.6 | 96.75 |
| 9 | 191 | 95 | 18,145 | 95.18 |
| 10 | 261.7 | 136 | 35,591.2 | 93.24 |
| 11 | 347.8 | 185 | 64,343 | 91.03 |
| 12 | 450.7 | 244 | 109,970.8 | 88.50 |
| 13 | 571.8 | 314 | 179,545.2 | 85.67 |
| 14 | 712.8 | 394 | 280,843.2 | 82.65 |
| 15 | 875 | 487 | 426,125 | 79.40 |

De acuerdo con la Tabla 4.4. la eficiencia que presenta el cable submarino en el punto de máximo desempeño de la máquina PMSG (color verde) es de 88.5%. Las pérdidas totales que se presentan en el cable submarino de la línea trifásica son de 109,970.8[W].

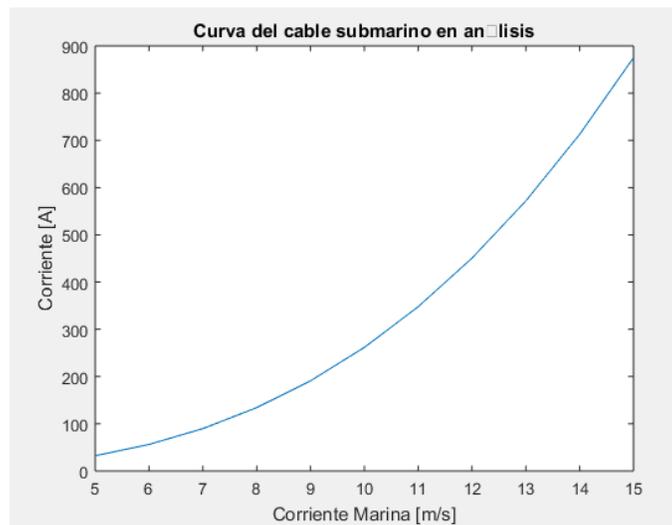


Figura 4-30. Comportamiento del cable submarino respecto a la corriente.

Observamos el crecimiento de la corriente de manera exponencial, llegando a un límite superior de 870 [A] aproximadamente.

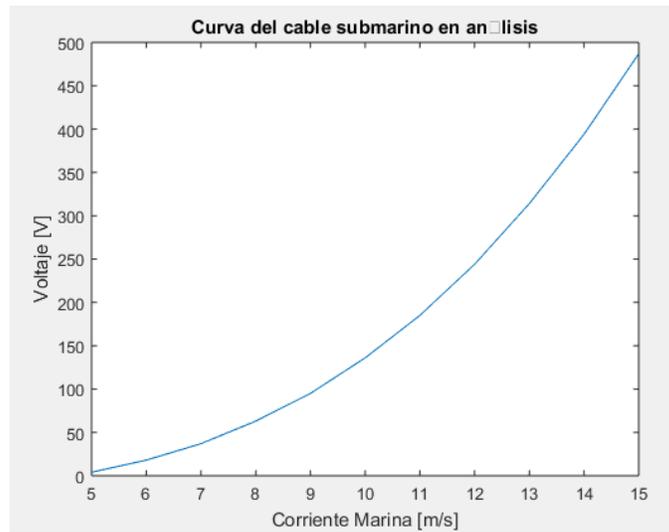


Figura 4-31. Comportamiento del cable submarino respecto al voltaje.

El voltaje crece cuando sigue incrementándose la corriente marina, llegando a un valor final de 470 [V].

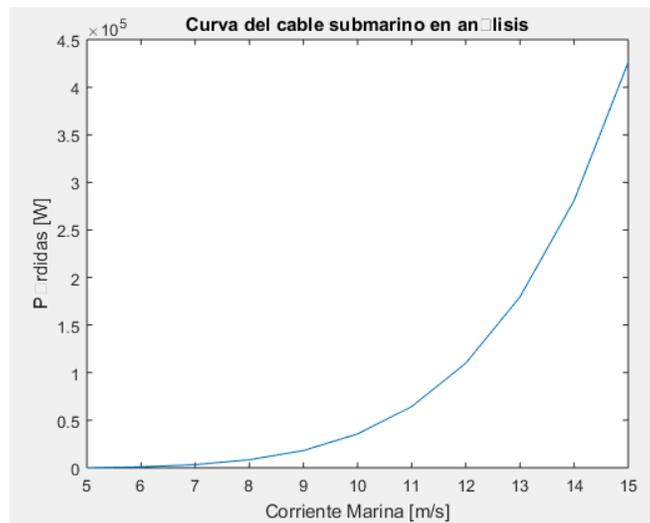


Figura 4-32. Comportamiento del cable submarino respecto a las pérdidas.

El cambio en las pérdidas se nota cuando la corriente llega a 7[m/s], llegando a un total de 425 [kW] cuando llega a 15 [m/s].

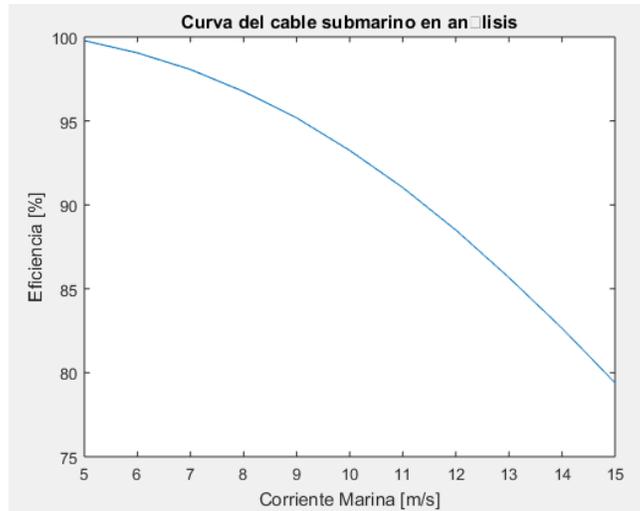


Figura 4-33. Comportamiento del cable submarino respecto a la eficiencia.

La eficiencia del cable llega a decaer por debajo del 80%, considerando que la turbina opera cuando la corriente marina está a 15[m/s].

Comparación de pérdidas del cable eléctrico submarino

En la Tabla 4.7. se muestra el resultado de las simulaciones con los parámetros del cable eléctrico submarino cuando se tiene una corriente marina de 12 [m/s], que suponemos que es el punto máximo de generación de la granja.

Tabla 4.7. Comparación de pérdidas eléctricas en el cable submarino para los modelos propuestos

| Modelo | Pérdidas [W] |
|-------------------------|---------------------|
| 1 línea de CD | 65,650 |
| 10 líneas de CD | 6,565.186 |
| 1 línea trifásica de CA | 109,970.8 |

Comparación de eficiencia del cable eléctrico submarino

En la Tabla 4.8. se muestra el resultado de manera similar a la Tabla 4.7. de la eficiencia que se presentan en cada modelo de transmisión de energía.

Tabla 4.8. Comparación de la eficiencia en el cable submarino para los modelos propuestos

| Modelo | Eficiencia [%] |
|-------------------------|-----------------------|
| 1 línea de CD | 95.13 |
| 10 líneas de CD | 99.5 |
| 1 línea trifásica de CA | 88.5 |

5. CONCLUSIONES

5.1. Aportes

Los aportes realizados en este trabajo de investigación fue establecer una base desde la generación hasta la transmisión de corriente alterna (CA) y corriente directa (CD) donde posteriormente se deduce el método más eficiente de transmisión.

Se sometió a diferentes pruebas un cable eléctrico submarino con los parámetros proporcionados por el fabricante. Los modelos propuestos que fueron sometidos a prueba en este trabajo fueron:

- a) 1 línea de CD
- b) 10 líneas de CD
- c) 1 línea trifásica de AC

Sin embargo, estos modelos fueron ejemplos dado que no sólo existen estas formas para transmitir energía eléctrica.

Se realizaron pruebas a diferentes velocidades de la corriente marina considerando tanto el mejor de los casos como el peor.

Con base en los resultados obtenidos del voltaje y corriente en el cable eléctrico submarino, se realizó una estimación de pérdidas tomando en cuenta la variación de velocidad y la potencia que entregaba la máquina PMSG.

5.2. Trabajos Futuros

En el presente trabajo se hizo énfasis en las pérdidas eléctricas que se presentan en el cable submarino, sin embargo, queda abierta una posible investigación de lo que sucede en los convertidores de potencia, en las máquinas PMSG ante este tipo de transmisión de energía eléctrica.

Este trabajo está delimitado a simular las pérdidas por medio de un software, se espera trabajar con un proyecto físico para considerar las normas existentes que se aplican en la instalación de cables eléctricos submarinos.

Como trabajos futuros se planea seguir en el área de proyectos de energías renovables debido a que es un campo que en México no se encuentra desarrollado en comparación con otros países mencionados en el capítulo 2.

Aportar con ideas y brindar soluciones a próximos proyectos que requieran diferentes propuestas para obtener el mejor desempeño, cuidando el aspecto económico y visual.

5.3. Impactos en el entorno

Es una realidad que la energía oceánica está en una etapa nueva, es decir, falta mucho por conocer sobre este tipo de energía renovable que ya cuenta con algunos proyectos en operación. Al tener una nueva forma de producir electricidad, implicaría una vía alterna en cuanto a una generación convencional que use recursos no renovables que en algún punto en el tiempo desaparecerán o escasearan, ocasionando una subida en el costo, resultando más difícil acceder a un servicio básico como lo es la energía eléctrica.

Enfocándonos en el impacto visual, dependerá del tipo de generación que se requiere usar para un proyecto. Esto obliga a analizar las ventajas y desventajas presentes en los sistemas de generación marítima y su entorno.

5.4. Discusión

En esta tesis se presentó un modelo de para transmitir energía eléctrica por corrientes marinas, sin embargo, hay que considerar el hecho de que las olas o corrientes del mar no son constantes y presentan variabilidad al momento de aprovecharlas. La planta o granja presentada en este modelo podría servir a pequeñas comunidades o como posible reserva rodante, todo esto queda pendiente

a analizar. Es importante observar la viabilidad de un proyecto a través de un software, esto no queda delimitado uno solo, existen infinidad de software para realizar más análisis de este tipo.

5.5. Conclusiones

Se consideró el tiempo en el que el sistema de máquinas de generación entrega su máxima potencia a 12 [m/s]. Además, la selección del cable eléctrico submarino que se insertó en las pruebas a los modelos propuestos se debe a que con demás fabricantes el diseño de los cables es pensado en voltajes mayores a 400 [kV].

Con base en los resultados obtenidos mediante el simulador MATLAB Simulink con los modelos propuestos para la transmisión de potencia de 1.5 [MW] generada por un sistema de máquinas PMSG a través de corrientes marinas se determina que los métodos más eficientes en función de las pérdidas es 1 línea de CD y 10 líneas de CD.

Para el modelo de 1 línea de CD, requiere de dos estaciones convertidoras, una para elevar el voltaje proveniente de la generación de las máquinas PMSG en CD y para realizar otro cambio de voltaje de CD a CA e incorporarlo a la red eléctrica. La eficiencia obtenida en este modelo que se considera como el adecuado para implementar el cable submarino es buena debido a que está por encima del 90%.

El modelo de 10 líneas de CD, aunque sus pérdidas eléctricas son pequeñas por cable y eficiencia es excelente, se requeriría invertir en esos mismos cables lo cual podría afectar la viabilidad del proyecto respecto a lo económico. Además, Este modelo tendría que contar con una estación convertidora para ser totalmente funcional, lo cual incrementaría mucho más el costo de inversión en este modelo de transmisión.

El modelo de 1 línea de AC supera las pérdidas que se presentan en el modelo seleccionado, puede ser debido a pérdidas por efecto piel, o hasta por los mismos parámetros del cable (capacitancia e inductancia). La única ventaja en esta propuesta es que requeriría solamente una estación convertidora y su acoplo a la red sería prácticamente directa.

Con los resultados obtenidos podemos determinar que para un sistema de generación por corrientes marinas el método de transmisión más eficaz es la transmisión de CD

Se pueden proponer otro modelo para la transmisión de potencia, pero este trabajo queda delimitado a analizar el modelo que resulte más viable para presentar menos pérdidas en el cable submarino, cuidando el impacto económico del proyecto.

Referencias

- [1] Annette Von Jouanne & Ted K. A. Brekken. Ocean and Geothermal Energy Systems.
- [2] Yongxing Zhang, Yongjie Zhao, Wei Sun and Jiakuan Li. (2021). Ocean wave energy converters: Technical principle, device realization, and performance evaluation. pp. 2-3.
- [3] Lim Yee Kai, Shamsul Sarip, Hazilah Mad Kaidi, Jorge Alfredo Ardilla-Rey, Noorazizi Mohd Samsuddin, Mohd Nabil Muhtazaruddin, Firdaus Muhammad-Sukki and Saardin Abdul Aziz. (2021). Current Status and Possible Future Applications of Marine Current Energy Devices in Malaysia: A review.
- [4] Chris S. Edrington, Senior Member IEEE Michael Steurer, Senior Member IEEE, James Langston, Senior Member IEEE, Touria El-Mezyani, Member IEEE and Karl Schoder, Member IEEE. Role of Power Hardware in the Loop in Modeling and Simulation for Experimentation in Power and Energy Systems.
- [5] Yongqiang ZHU, Lihu JIA, Chunming DUAN, Xiaoyan SUN and Wenrui GUO. Status of testing fiel for ocean energy generation.
- [6] Tidal Energy (Mayo 20, 2022). Disponible en:
<https://education.nationalgeographic.org/resource/tidal-energy/>
- [7] Hydropower explained: Tidal power (Agosto 10, 2022). Disponible en:
<https://www.eia.gov/energyexplained/hydropower/tidal-power.php>
- [8] Mia, Md and Islam, Md. Abidul and Islam, Mehran (2021). Powering Offshore Structure Using Renewable Energy: A Review Study. SSRN Electronic Journal. 05. 61-80.
10.2139/ssrn.3807353.

- [9] How artificial lagoons can be used to harvest energy from the tides (Marzo 5, 2015). Disponible en: <https://theconversation.com/how-artificial-lagoons-can-be-used-to-harvest-energy-from-the-tides-38403>
- [10] Orbital lanza O2, la turbina mareomotriz más potente del mundo (24 abril, 2021). Disponible en: <https://ecoinventos.com/orbital-o2/>
- [11] Orbital Marine Power. Disponible en: <https://orbitalmarine.com/o2/>
- [12] Technology case study: Sihwa lake tidal power station (Agosto 2, 2016). Disponible en: <https://www.hydropower.org/blog/technology-case-study-sihwa-lake-tidal-power-station>
- [13] Sihwa Tidal Power Plant (Julio 30, 2019). Disponible en: <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/sihwa-tidal-power-plant>
- [14] Sihwa Lake Tidal Power Station – “The World’s Largest Tidal Power Station”. Disponible en: <https://www.energywarden.com/sihwa-lake-tidal-power-station/>
- [15] Liverpool officials look to Far East for tidal barrage ideas (Mayo 17, 2022). Disponible en: <https://www.offshore-energy.biz/liverpool-officials-look-to-far-east-for-tidal-barrage-ideas/>
- [16] Rance Tidal Power Station, France (Abril 24, 2013). Disponible en: <https://www.thegreenage.co.uk/cos/rance-tidal-power/>
- [17] Vincent de Laleu, (2009). La Rance Tidal Power Plant. Disponible en: <https://tethys.pnnl.gov/>.
- [18] Tapping France’s La Rance Tidal Power Station. Disponible en: <https://www.energywarden.com/la-rance-tidal-power-station/>.
- [19] Swansea Bay Tidal Lagoon (SBTL) (Septiembre 23, 2022). Disponible en: <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/swansea-tidal-lagoon-sbtl#description>.

- [20] Swansea Bay – Tidal Lagoon. Disponible en:
<http://www.tidallagoonpower.com/projects/swansea-bay/>.
- [21] MeyGen – SAE Renewables (Marzo 2023) . Disponible en: <https://simecatlantis.com/tidal-stream/meygen/>.
- [22] MeyGen Tidal Energy Project – Phase I (Septiembre 23, 2022). Disponible en:
<https://tethys.pnnl.gov/project-sites/meygen-tidal-energy-project-phase-i>.
- [23] Annapolis Tidal Station (Abril 17, 2020). Disponible en: <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/annapolis-tidal-station>.
- [24] North America’s oldest tidal power plant set for closing (Febrero 25, 2021).
Disponible en: <https://www.offshore-energy.biz/north-americas-oldest-tidal-power-plant-set-for-closing>.
- [25] Annapolis Tidal Power Generating Station, North Landmark.
Disponible en: <https://marinas.com/view/>.
- [26] Nexans. Submarine Power Cables (2003). Recuperado de: <https://www.nexans.de/de/>.
- [27] Introduction to HVDC Submarine Power Cables.
Disponible en <https://www.tupienergy.com/introduction-submarine-power-cables>.
- [28] Ramos Guerrero, José Manuel. (2022). Diseño de un generador eléctrico para aerogeneradores de eje vertical y de baja potencia. [Tesis de Licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: <http://132.248.9.195/ptd2022/abril/0824160/Index.html>

- [29] Durante Gómez, Wilder. (2019). Diseño de generadores síncrono multipolo de imanes permanentes para su uso en aerogeneradores de baja potencia. [Tesis de Maestría]. Universidad del Istmo. Disponible en: http://www.unistmo.edu.mx/bibliotecas/tesis_posgrado/2016-2018/Tesis_Wilder.pdf
- [30] Madani, N. (2011). Design of a Permanent Magnet Synchronous Generator for a Vertical Axis Wind Turbine.
- [31] Cozumel. Crédito total a OpenStreetMap.
Disponible en <https://www.openstreetmap.org/copyright>.
- [32] Vittal, V. & Ayyanar, R. (2013). Grid Integration and Dynamic Impact of Wind Energy. Springer Science+Business Media New York.
- [33] M.H., Rashid. (2013). Power Electronics Devices, Circuits, and applications (4th ed.). Pearson Education Limited.
- [34] Saadat, H. (1999). Power System Analysis. McGraw-Hill.
- [35] Alcérreca-Huerta, J.C., Encarnacion, J.I., Ordoñez-Sánchez, S., Callejas-Jiménez, M., Diez Barroso, G., Allmark, M., Mariño-Tapia, I., Silva Casarín, R., O'Doherty, T., Johnstone, C. & Carrillo, L. (2019). Energy Yield Assessment from Ocean Currents in the insular Shelf of Cozumel Island.
- [36] Valdivia Díaz, Lissette. (2022). Modelos de red de un sistema de generación por corrientes marina. [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México.