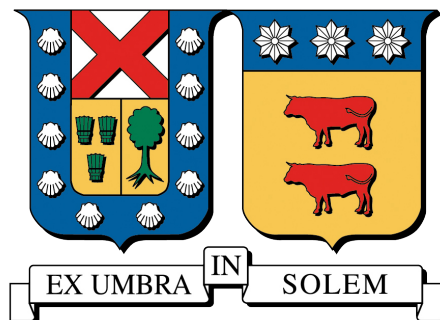


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTIAGO - CHILE



**PROPUESTA DE UN CONVERTIDOR PARA LA CONEXIÓN DE UN SISTEMA
DE GENERACIÓN UNDIMOTRIZ AL SISTEMA INTERCONECTADO
NACIONAL**

JUAN PABLO MORA SEGOVIA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

PROFESORES PATROCINANTES : PhD. Patricio Valdivia Lefort
PhD. Antonio Sánchez Squella
PROFESOR CORREFERENTE : Ing. Jaime Galleguillos Villagra

SEPTIEMBRE 2018

*"... y viene la vida
y me hace recordar
que la vida
es un gran regalo ... "*

Hoy yo quiero dedicar
a mis viejos este logro
que vale mas que el oro
esta memoria terminar
y a Belén quisiera cantar
que tambien es para tí
porque contigo partí
el final de este proceso
y al final es eso
nunca se alejen de mí

AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos no serán cortos, no sería justo para todo lo vivido en estos años y que culminan en este trabajo.

Al profesor Patricio Valdivia, por proponerme este tema de memoria y hacerme partícipe de proyectos asociados a la energía undimotriz. Al profesor Antonio Sánchez, por apoyarme en este trabajo de memoria y las oportunidades que me ha dado durante mi etapa de estudiante. A Jaime Galleguillos, por compartir todos sus conocimientos en el área undimotriz y motivar el desarrollo de este trabajo.

A Sebastian Figueroa de Maestría Diesel, por facilitar la información del modelo mecánico del MADIUN y ayudarme a entender su operación y las variables mecánicas asociadas.

A los profesores y funcionarios del DIE: Aldo, Andrés, Antonio, Leonardo, Jorge, Patricio, Nancy y Romina, con quienes compartí todos estos años (con altos y bajos) y hoy cierro un proceso donde me llevo algo de cada uno, un aporte a mi formación profesional y personal.

A Joshua, Javiera, Karen y Charlin, por la tremenda experiencia que fue realizar mi práctica con ellos y entregarme mucho de su propia experiencia. Le dieron forma a lo que aspiro a tener en un equipo de trabajo durante mi vida profesional.

Al equipo de Admisión, por la experiencia, la buena onda y darme un espacio para ayudar en lo que es la orientación vocacional de los jóvenes de 4º Medio.

A Patricia, Steve, Margarita y Luz, por los 2 años que trabajamos juntos, por la confianza y el apoyo durante todo ese periodo.

A mis compañeros, ya que al final de esto, muchos trabajos, pruebas y simplemente un rato de conversación, ayudaron a llegar aquí. En especial, agradezco a Matías Urrutia y Carlos Cardenas su apoyo constante durante todo el proceso de memoria y los años como compañeros y amigos.

Al baile, por desconectarme y hacer que conociera a las personas que considero más cercanas a mí. A los Salsanos, a Folclor USM y a Ritmo Prohibido, mi eterna gratitud por la felicidad y los momentos que me han regalado.

A los grandes amigos que hice en la universidad: Jaime, Nicole, Eric, Pablo, Coni, Cami y Caro. Que lo que el casino juntó, no lo separe el guaguancó.

A mi hermano, muchas gracias.

A mis padres, por siempre confiar en mí, entregarme lo mejor de ellos, apoyarme cuando los he necesitado y amarme como lo han hecho toda su vida.

A Belén, por ser la mayor sorpresa de este último año, por soportarme y apoyarme, por conocerme, amarme, querer siempre lo mejor de mí y acompañarme en este largo proceso.

Y finalmente a Dios y la Mater, que me hicieron llegar a la UTFSM, conocer a todos los que mencioné y a muchísimas más personas (la lista sería larguísima) que hacen que hoy pueda cerrar esta gran etapa: mi vida universitaria.

A todos, infinitas gracias.

RESUMEN EJECUTIVO

Este trabajo propone un sistema de conexión eléctrica para un generador de energía con olas, desarrollado en Chile. Se realizó una revisión sobre el estado del arte para determinar las mejores alternativas para el dispositivo, proponiendo un accionamiento eléctrico con una máquina síncrona de imanes permanentes, un rectificador pasivo, un inversor y un filtro, y un control de voltaje orientado para la conexión a la red. Las simulaciones consideran escenarios de olas del puerto de Valparaíso, modelos mecánicos del MADIUN y modelos eléctricos del convertidor. La simulación indica que es posible tener una generación de energía anual de $2,5[MWh]$, con un factor de planta de 19 % para un equipo de capacidad nominal de $1500[W]$. Se proponen tareas multidisciplinarias para el futuro, con el objetivo de mejorar la absorción de potencia y la calidad de la energía entregada a la red.

Palabras Clave. Energía Marina, Generación de Energía con Olas, MADIUN, Conexión a la red.

ABSTRACT

This work propose an electric connection system for an Wave Energy Generator, developed in Chile. A review about the art state was done to determinate the best alternatives for the dispositive, proposing a electric drive with a permanent magnet synchronous machine, a passive rectifier, an inverter and a filter, and a voltage oriented control for the grid connection. The simulations consider wave scenarios of Valparaíso port, mechanical models of MADIUM prototype and electric models of the converter. The simulation gives a 2,5[MWh] annual energy generation, with a plant factor of 19 % for a 1500[W] nominal capacity equipment. There are proposed multidisciplinary tasks for future, with the goal of improve the power absorption and the energy quality delivered to the grid.

Keywords. Marine Energy, Wave Energy Generation, MADIUN, Grid Connection.

Índice de Contenidos

1. Introducción	1
2. Contextualizando la Energía Undimotriz	2
2.1. El recurso marítimo	2
2.1.1. Entendiendo las Olas	3
2.1.2. Energía oceánica y la realidad chilena	3
2.2. Generación Undimotriz	3
2.2.1. Dispositivos WEC	4
2.2.2. Generadores comúnmente vistos y electrónica asociada	6
2.2.3. El problema de control	8
2.2.4. Conexión al sistema	9
2.3. Simulaciones y montajes experimentales	10
2.4. Norma Técnica y requerimientos para el sistema chileno	10
3. Caso de Estudio y Metodología	12
3.1. Dispositivo WEC: MADIUN	12
3.2. Escenario marítimo	12
3.3. Componentes	13
3.3.1. Generador	13
3.3.2. Convertidor de potencia	13
3.3.3. Enlace en corriente directa	14
3.3.4. Protecciones	14
3.4. Control del inversor	14
3.5. Conexión a la red	15
4. Modelo de Simulaciones	16
4.1. Modelo mecánico	16
4.2. Modelo del Generador	19
4.3. Modelo del Convertidor y Enlace DC	19
4.4. Sistema de control y ajuste de parámetros	21
4.4.1. Phase Locked Loop	21
4.4.2. Control de corriente a la red	21
4.4.3. Control de Tensión	23
4.5. Simulación del sistema de generación Undimotriz	24
5. Presentación de Resultados y Discusión	28
5.1. Desempeño del control	28
5.1.1. Mejoras al sistema de control y el convertidor de potencia	29
5.2. Potencia y Energía al sistema	30
5.2.1. Proyección de energía generada	30
5.2.2. Optimo de potencia	32
5.3. Corriente de salida del inversor	32

5.3.1. Norma Técnica	33
6. Conclusiones	36
Bibliografía	37
A. Modelo matemático del prototipo MADIUN	40
B. Control discreto y el Método de Tustin	41
C. Orientar tensiones: Phase Locked Loop	42
D. Modelo del convertidor de potencia	44
E. Modelo del Enlace DC	46

Índice de Tablas

3.1. Frecuencia de ocurrencia de olas, según altura y periodo.	13
4.1. Parámetros de la máquina de imanes permanentes simulada	19
4.2. Parámetros del filtro de salida del inversor y del condensador	19
5.1. Flujo de potencia hacia la red equivalente.	30
5.2. Potencia, en $[W]$, para distintos escenarios de olas.	31
5.3. Energía, en $[kWh]$, generada anualmente para los escenarios de olas más frecuentes en el puerto de Valparaíso.	31
5.4. Valores de THD.	33
A.1. Valores de las variables para el modelo de la fuerza sobre el carrete	40

Índice de Figuras

2.1. Mapa conceptual con clasificaciones de dispositivos WEC [Drew et al. (2009)]	4
2.2. PB3 [PB3 (2017)]	6
2.3. Pelamis WEC	6
2.4. Vista exterior del LIMPET.	7
2.5. Generador Undimotriz Hidrostático.	7
2.6. Prototipo MADIUN.	8
2.7. Topología para una máquina de inducción	8
2.8. Topología para una máquina de inducción doblemente excitada	9
2.9. Topología para una máquina sincrónica de imanes permanentes	9
2.10. Esquema de conexión a la red	10
4.1. Fuerzas sobre una boya	16
4.2. Esquema del MADIUN instalado en la costa	19
4.3. Esquema en Plecs del MADIUN.	20
4.4. Planta del convertidor y enlace DC	21
4.5. Respuesta a escalón y Rechazo a Perturbación del controlador del PLL	22
4.6. Respuesta a escalón y Rechazo a Perturbación del controlador de corriente	23
4.7. Respuesta ante perturbación (ola de alta energía)	25
4.8. Diagrama de bloques del control	26
4.9. Esquema simplificado de la simulación, con la conexión propuesta.	26
4.10. Esquema de simulación del sistema de generación en el programa PLECS.	27
5.1. Seguimiento de referencia para tensión v_{dc} y corrientes i_{sd} e i_{sq}	28
5.2. Seguimiento de referencia para tensión v_{dc} y corrientes i_{sd} e i_{sq}	29
5.3. Seguimiento de referencia para tensión v_{dc} y corrientes i_{sd} e i_{sq}	30
5.4. Potencia en el tiempo.	31
5.5. Corriente al sistema.	33
5.6. Corriente al sistema.	34
5.7. Corriente al sistema.	35
D.1. Modelo de la conexión del inversor con la red	45

1 | Introducción

Chile se destaca por su alto potencial energético a partir de Energías Renovables No Convencionales (ERNC), y se ha concentrado en el desarrollo de proyectos eólicos, solares, biomasa, mini hidráulicos, geotérmicos y de concentración solar, ampliando su matriz energética.

Actualmente, las ERNC implementadas en el país han visto un incremento en su capacidad instalada en el Sistema Eléctrico Nacional (19.2 % de la capacidad instalada), pero su intermitencia y/o estacionalidad introducen una variable aleatoria a la hora de proyectar la generación renovable. Es por esto que la búsqueda de nuevas alternativas y la implementación de nuevas tecnologías permitirá dar otras opciones para cumplir este objetivo en los plazos impuestos a nivel país.

La energía undimotriz en nuestro país está catalogada como un medio de generación renovable no convencional, ya que logra transformar la energía de las olas a energía mecánica y posteriormente, es posible transformarla a energía eléctrica.

En particular, este trabajo tiene por objetivo proponer un sistema de conexión a la red eléctrica para un equipo undimotriz dado, a través de un convertidor que permita inyectar la energía generada a la red. Esto lleva a plantear un modelo dinámico del sistema propuesto, definir un esquema de control adecuado, realizar simulaciones con escenarios de olas conocidos y realizar una revisión de la Norma Técnica que regula la instalación, puesta en marcha y operación de estos dispositivos.

Con estos objetivos, el Capítulo 2 busca interiorizar en lo que son las energías marinas (particularmente la Undimotriz) y presenta un breve estado del arte de los desarrollos de esta tecnología. El Capítulo 3 expone las características específicas del caso de estudio, fundamentando la elección de los componentes y sistemas de control a la bibliografía citada. En el Capítulo 4, se desarrolla el modelo matemático a implementar en la simulación y se definen los alcances que posee la herramienta. El Capítulo 4 presenta los resultados y se realiza un análisis de ellos, proponiendo mejoras y trabajos futuros con el fin de mejorar el desempeño del sistema.

La motivación de este trabajo obedece a la curiosidad del área marítima. En general, la generación de energía conlleva un cierto control sobre el recurso primario (canalización de ríos, embalses y/o acumulación de combustible). Sin embargo, energías como la solar, la eólica y la misma undimotriz presentan un desafío mayor por no existir un control sobre estas, dependiendo netamente de la disponibilidad del recurso, por lo que la ingeniería busca aprovechar, de la mejor manera posible, el recurso disponible. El mar, en particular, es un medio de alta energía, en extremo agresivo para los materiales y presenta un retraso importante en términos de desarrollo si se compara con otras tecnologías renovables. Es por esto que incentivar la investigación y el desarrollo de energías marinas, en un país con miles de kilómetros de costa, podría llevar a un desarrollo del conocimiento importante al país.

2 | Contextualizando la Energía Undimotriz

Este capítulo servirá como estado del arte para el desarrollo de esta memoria. Se repasará brevemente las características de la generación undimotriz (dispositivos, tecnologías utilizadas), los desafíos que implica la implementación de este tipo de generación y aspectos legislativos a tener presentes.

2.1. El recurso marítimo

Los océanos cubren más del 70 % de la superficie del planeta y el movimiento del agua se puede entender a partir de 3 fenómenos principalmente: mareas, corrientes marinas y olas.

Las mareas corresponden a un fenómeno periódico debido a la interacción de la luna, el sol, la tierra y sus respectivos campos gravitacionales, lo cual produce una variación en el nivel del mar.

Las corrientes marinas corresponde al movimiento de aguas en los océanos, causadas por un conjunto de elementos, como lo son la rotación terrestre, los vientos, la configuración de las costas y la ubicación de los continentes.

Las olas son ondas que viajan por la superficie del mar y que son originadas principalmente por el viento.

Así mismo, dependiendo del tipo de fenómeno marítimo del cual se desea extraer energía, existen tecnologías específicas para rescatar el recurso energético. En el caso de las mareas, un ejemplo es la central “La Rance”, al norte de Francia, con una potencia nominal de 240 [MW] y opera desde 1966. Similar a lo realizado por un embalse alimentado por un río, “La Rance” aprovecha las diferencias en la altura de marea en el estuario del río Rance para llenar y vaciar un embalse, mientras que el flujo atraviesa una turbina, logrando generar en ambos sentidos de flujo [EDF France (2018)]. La turbina “SEAGen S”, de 1,2 [MW] de potencia nominal, aprovecha las corrientes marinas con turbinas de eje horizontal, logrando una generación de 20 [MWh] de energía por día [Atlantis Resources (2018)]. Distintas investigaciones han logrado implementar mejoras para estos dispositivos, aplicando métodos de control avanzados y logrando montajes de laboratorio [Khan et al. (2013); Hazra et al. (2014)]. Ejemplos de la tecnología undimotriz se dan en la sección 2.2.1.

Existe literatura donde se detalla con mayor detalle todas estas formas de aprovechar el recurso marítimo [Drew et al. (2009); Alcorn y O’Sullivan (2014); Hong et al. (2014); Penalba y Ringwood (2016); Uihlein y Magagna (2016); von Jouanne y Brekken (2017)]. En particular, este trabajo se concentra en las olas y la tecnología undimotriz.

2.1.1. Entendiendo las Olas

Las olas se pueden describir como una superposición de ondas superficiales regulares de distinta amplitud, frecuencia y dirección, que se propagan largas distancias a nivel superficial en el mar.

Se puede hablar de dos categorías de estado de mar respecto a las olas: mar de viento y mar de fondo. El mar de viento se caracteriza por ser sectores donde se generan olas, por lo que existe una alta superposición de olas de distintas frecuencias, alturas y direcciones, lo que entrega un comportamiento caótico de la superficie marina. Por su parte, el mar de fondo (también llamado “*swell*”) se caracteriza por poseer olas más suaves respecto al mar de viento, presentando una menor superposición y mayor regularidad [Universidad de Valparaíso (2016)].

El oleaje puede estudiarse, principalmente, a través de las siguientes variables:

- Altura significativa
- Periodo del oleaje
- Dirección de propagación

Dependiendo de estas variables es su clasificación y utilidad a la hora de considerar un lugar apto para implementar un sistema de generación undimotriz. [Universidad de Chile (2013)], en su explorador marino, define la potencia de la ola como:

$$P = 0,5TH_s^2[kW] \quad (2.1)$$

Donde T es el periodo de oleaje (intervalo de tiempo entre las olas) y H_s corresponde a la media aritmética del tercio de las olas más altas de un conjunto de olas. Con esta ecuación y los datos de oleaje respecto al año 2010, es posible obtener información sobre el potencial undimotriz a lo largo de todo el país. A su vez, trabajos como el de [Mediavilla (2016)] han entregado información relevante para realizar simulaciones y estimar el desempeño de la generación undimotriz en Chile.

2.1.2. Energía oceánica y la realidad chilena

Chile se caracteriza por tener grandes extensiones marítimas, las cuales cubren los más de 4000 km de costa del país y rodean las islas y archipiélagos. La costa nacional se ve dominada por el *swell*, decayendo en intensidad de sur a norte y no posee variaciones significativas entre las distintas estaciones del año [Acuña y Monárdez (2007)].

El potencial chileno en energía undimotriz se ha estimado en 200 [GW], uno de los potenciales más elevados del mundo. Si se evalúa el potencial undimotriz transmitido por una ola regular, por unidad de ancho de cresta, según las distintas zonas geográficas del país, en la zona norte alcanza valores de 20[kW/m], en la zona centro llega a 50[kW/m] y en el sur es posible llegar a los 100[kW/m] en las costas de Chiloé, lo que representa los valores más altos a nivel nacional [Mediavilla (2016)].

En [Medel (2010)] se presenta el estudio de la factibilidad técnica y económica de instalar generación undimotriz y mareomotriz con la información vigente en 2010 y se concluye que, si bien al momento del estudio no era viable la instalación de un proyecto undimotriz por motivos económicos, el lograr mejores factores de planta y menores costos de inversión permitirían implementar esta tecnología en el país.

2.2. Generación Undimotriz

Cada tipo de tecnología de generación posee componentes característicos que permiten la transformación de energía, en función de su fuente primaria. A continuación, se presenta un resumen a las características

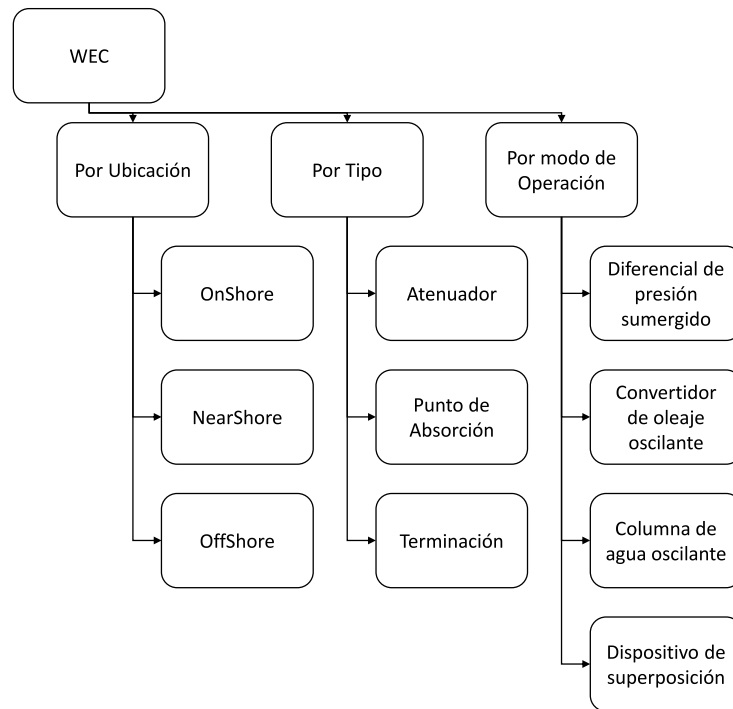


Figura 2.1: Mapa conceptual con clasificaciones de dispositivos WEC [Drew et al. (2009)]

y desarrollos undimotrices existentes (a nivel mecánico y a nivel eléctrico) y algunas definiciones importantes para entender esta tecnología.

2.2.1. Dispositivos WEC

Wave Energy Converter (WEC) corresponde a los dispositivos capaces de transformar la energía de las olas en energía mecánica. La investigación en estas materias vió un fuerte impulso en los años 70, por la crisis del petróleo. Sin embargo, este tipo de tecnología no prosperó debido a sus altos costos de desarrollo e implementación. Los últimos años, la necesidad de ampliar la matriz energética, dando énfasis en el desarrollo de tecnologías renovables no convencionales, ha reforzado la investigación en este tipo de dispositivos.

Por lo mismo, existen una gran cantidad de dispositivos, clasificados según distancia a la costa, forma de operación y profundidad del dispositivo. La Figura 2.1 muestra un esquema de la clasificación recién mencionada según [Drew et al. (2009)]¹.

Beneficios: Comparativamente con otros tipos de generación renovable no convencional, las ventajas principales que presenta son [Drew et al. (2009)]:

- La densidad energética del agua es mayor respecto a la de otros tipos de energía renovable ($0.1-0.3 \text{ kW/m}^2$ del sol contra $2-3 \text{ kW/m}^2$ del agua)
- La variabilidad estacional de las olas sigue el comportamiento de la demanda de energía: oleaje más intenso en época de invierno y más calmo en época de verano.
- El impacto ambiental depende del tipo de dispositivo (distancia a la costa, profundidad, velocidad relativa). En general, la literatura plantea que el impacto es menor a otros tipos de ERNC debido a que

¹ En la actualidad existen diversos prototipos y diseños, por lo que pueden existir aún más clasificaciones de dispositivos WEC

son dispositivos de dinámicas lentas, ocupan menos espacio para generar potencias similares y no tiene emisiones en su operación.

- Es capaz de generar la mayor parte del tiempo (respecto a otros dispositivos ERNC) ya que se diseñan para poder generar con las olas más pequeñas hasta las más grandes. Su factor de planta depende principalmente de la intensidad de las olas del lugar.
- La capacidad de predecir el comportamiento de las olas es alta, debido a que estas viajan grandes distancias desde las zonas de generación de olas, con bajas pérdidas en el trayecto.

Desafíos: Cada tecnología ERNC tiene sus complejidades. Esto lleva a que en el caso undimotriz:

- El reciente interés por este tipo de tecnologías hace que muchos de los proyectos se encuentren aun en etapa de estudio y existan pocos modelos comerciales que sean capaces de operar como centrales que aporten potencia al sistema.
- Al igual que en la energía eólica, la intermitencia del recurso marítimo (en términos de su amplitud y frecuencia) son las variables que más complican a la hora de aplicar un control sobre el convertidor de potencia.
- Los diseños y materiales deben ser tales que puedan resistir condiciones adversas, como lo es el agua, el ambiente salino, marejadas, entre otros fenómenos propios del mar.
- La frecuencia de las olas es baja y la energía que poseen es alta, por lo que el accionamiento debe ser capaz de adaptar adecuadamente la energía para que sea útil al sistema, ya sea en casos de olas de baja energía (30-70 kW/m) como olas de alta energía para condiciones extremas (2000 kW/m).

Power Take-Off (PTO's): La energía de la ola es posible de transformar mediante un PTO (Power Take-Off), desde el movimiento oscilatorio de la ola en un movimiento que pueda ser útil mecánicamente [Drew et al. (2009); Rhinefrank et al. (2012)]. Esto determina finalmente la elección del generador a implementar, dependiendo de si es una transformación directa del movimiento (oscilación a movimiento lineal) o se transforma en un movimiento rotativo.

Ejemplos de dispositivos WEC: El PB3 PowerBuoy (Figura 2.2), de Ocean Power Technologies (USA), es un dispositivo *off-shore* que utiliza la energía potencial de las olas. Teniendo en cuenta que la oscilación del agua es menor a medida que se descende, el PB3 posee un plato inferior que permanece estático y que permite que la estructura principal quede fija, mientras que la boya superior oscila con el movimiento de las olas superiores, siendo clasificado como un *point absorber*. El movimiento lineal lo transforma en rotativo a través de un circuito hidráulico, bombeando pistones que accionan un motor hidráulico y, consecutivamente, este se encuentra acoplado a un generador eléctrico [Ocean Power Technologies (2018); Mekhiche y Edwards (2014)]. PELAMIS WEC, de la empresa Pelamis Wave Power (Escocia), opera de manera similar, aportando presión al circuito hidráulico a través del movimiento en 2 dimensiones de las uniones de cilindros semisumergidos que actúan como una cadena flotante (Figura 2.3), siendo clasificado como un dispositivo del tipo *Attenuator*.

LIMPET, de Wavegen Limited (actualmente VOITH, en Escocia), es un dispositivo en costa y corresponde a un dispositivo de columna de agua oscilante (OWC). El generador está conectado a una turbina de aire operada por la presión que ejercen las olas sobre una cámara sumergida, donde el agua varía su altura con la frecuencia de las olas. Esto hace que la presión ejercida en la cámara al subir la ola (o el vacío que se produce al bajar) fluya aire por la turbina de Wells, la cual solo gira en un sentido, independiente de la dirección del aire (Figura 2.4).

A nivel nacional, el Generador Undimotriz Hidrostático (GUH), patentado el 2015 en el INAPI, es considerado un dispositivo WEC, al utilizar la energía de las olas para bombear agua a una piscina en tierra, a una mayor altura. Sin embargo, la generación de energía eléctrica es similar a cualquier tecnología hidráulica, al tener agua embalsada con una diferencia de altura que permita aprovechar la energía potencial.



Figura 2.2: PB3 [PB3 (2017)]



Figura 2.3: Pelamis WEC

Este generador posee una operación similar a una central de bombeo, utilizando la energía de las olas para elevar el fluido (Figura 2.5) [Departamento de Geofísica (2017)].

El prototipo MADIUN, dispositivo con solicitud de protección el 2007 y con patente de invención registro N° 47.152, de la empresa Maestranza Diesel, se clasifica como un dispositivo en costa, del tipo **point absorber**. Este opera por boyas que impulsan el eje de un volante de inercia, acoplado a un generador eléctrico (Figura 2.6). El dispositivo ha sido desarrollado por la empresa desde 2007 y en 2015 se construyó un prototipo a escala real, probado en Valparaíso, logrando una potencia máxima de 758[W] y un promedio de 366[W] para un equipo de 1,5[kW] nominal [Bravo Moya (2008); Riquelme Medina (2011); Figueroa (2016)].

2.2.2. Generadores comúnmente vistos y electrónica asociada

La intermitencia en la generación se logra afrontar, principalmente, gracias al accionamiento que se pueda utilizar y la combinación adecuada de generador y convertidor. Los desarrollos presentan distintas alternativas para solucionar este tipo de inconvenientes [O'Sullivan et al. (2010)].

Conversión directa Los generadores lineales son dispositivos que poseen imanes en su eje motriz y se mueve de forma axial al estator. Estos han surgido como una opción para la generación undimotriz, debido a que el movimiento oscilatorio de las olas se puede transformar directamente en un movimiento lineal,



Figura 2.4: Vista exterior del LIMPET.



Figura 2.5: Generador Undimotriz Hidrostático.

sin pasar por una etapa para transformar el movimiento a rotatorio, y acoplar el eje del generador al PTO [Rhinefrank et al. (2012); O’Sullivan y Dalton (2009)].

Una ventaja de los generadores lineales es su relativa alta eficiencia y el poseer menos etapas de conversión de energía mecánica. Su principal desventaja radica en que las dinámicas de las olas son lentas, por lo que la velocidad relativa del generador también lo es. En parte, los generadores tipo “Snapper” buscan aumentar la velocidad relativa de oscilación de los generadores para solucionar este problema [Polinder et al. (2004)].

El esquema en términos de electrónica de potencia plantea una etapa de rectificación, filtro e inversión para poder llevar la energía a la red, similar a lo que se ve en un generador rotativo de imanes permanentes o uno de inducción [Boström et al. (2009)].

Generadores Rotativos Se escoge este tipo de generadores cuando el dispositivo WEC logra transformar la energía de las olas en un movimiento rotativo. Las opciones más mencionadas en la bibliografía corresponden a los generadores de inducción y generadores sincrónicos de imanes permanentes [O’Sullivan y Dalton (2009); Alcorn y O’Sullivan (2014)].

En el caso de los generadores de inducción con rotor de jaula (Figura 2.7), se les añade un partidor suave para proteger el generador y, debido a que las máquinas de inducción tienen requerimientos de reactivos, un banco de condensadores que permite corregir el factor de potencia del generador. Operan como una generación a velocidad fija, asociado a la frecuencia de la red y el deslizamiento que logre al generar, debido a la variación del torque en el eje. La gran ventaja de esta se asocia a que estos no requieren un convertidor para ser conectados a la red y pueden conectarse directamente al sistema, disminuyendo costos al no requerir



Figura 2.6: Prototipo MADIUN.

un convertidor, simplificando el sistema al no considerar el control de otro elemento y no añade armónicos a la red. En sus contras se puede mencionar el hecho de poseer escobillas, lo cual aumenta la frecuencia del mantenimiento por desgaste y por encontrarse en un ambiente salino. Además, esta configuración pierde flexibilidad ya que no es posible controlarlo, por lo que no se puede optimizar la extracción de potencia, sumado a las pérdidas propias de una jaula ardilla.

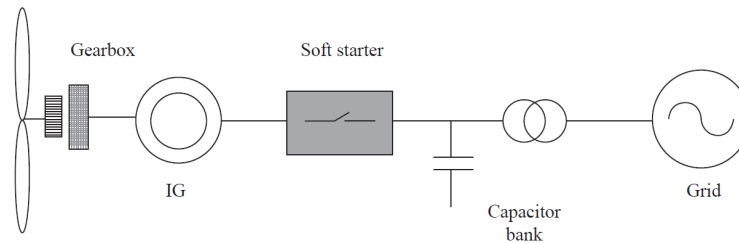


Figura 2.7: Topología para una máquina de inducción (jaula ardilla) [Alcorn y O'Sullivan (2014)]

Para una configuración donde se logre privilegiar la flexibilidad del sistema a través de generación con velocidad variable, se utilizan máquinas sincrónicas de imanes permanentes (PMSG) con un convertidor de potencia que permite adaptar la energía a la red y optimizar la generación del dispositivo según el recurso disponible (Figura 2.9). También es posible utilizar máquinas de inducción doblemente excitados (DFIG) junto a un convertidor de potencia (Figura 2.8), diferenciándose ambos métodos que la máquina sincrónica tiene ventajas desde el punto de vista de las pérdidas y por el hecho de no tener escobillas, punto donde podría tener problemas la máquina de inducción ante un ambiente agresivo como lo es el marino. La ventaja de esta configuración radica en la versatilidad del sistema, se logra desacoplar el generador de la red (protección ante fallas del sistema) y la eventual capacidad de almacenar energía, ayudando a mejorar la continuidad de la inyección de energía. Sus desventajas implican mayores costos de implementación, sistemas de control más complejos y al poseer más elementos, existe un mayor número de puntos susceptibles a fallas [Amundarain et al. (2011); Hong et al. (2014); Hazra y Bhattacharya (2015)].

2.2.3. El problema de control

En los casos donde la conexión del generador a la red se realice a través de convertidores de potencia, como lo presentado en las Figuras 2.8 y 2.9, el problema de control se puede separar en 2 partes: un

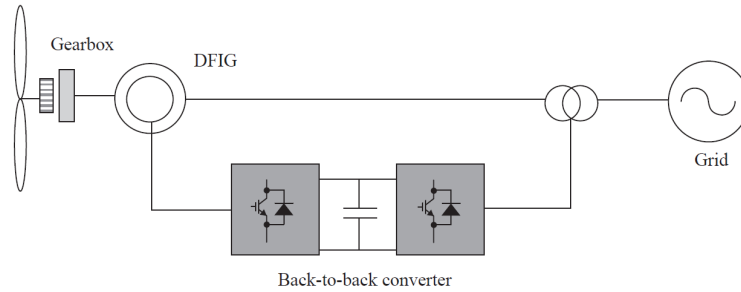


Figura 2.8: Topología para una máquina de inducción doblemente excitada [Alcorn y O'Sullivan (2014)]

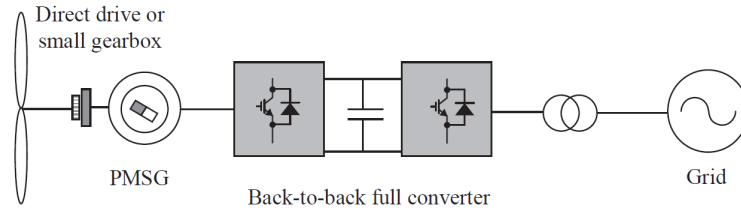


Figura 2.9: Topología para una máquina sincrónica de imanes permanentes [Alcorn y O'Sullivan (2014)]

control visto desde el generador y otro control visto desde la red. Ambos problemas se trabajan de manera desacoplada, debido a que el rectificador controla el comportamiento del generador, mientras que el inversor controla el flujo de energía entre el enlace en corriente continua y la red eléctrica. A pesar de ser problemas desacoplados, la operación conjunta permite una conexión segura en términos de la operación del sistema undimotriz [Molinas et al. (2007)].

El control del generador permite obtener la potencia generada de una manera determinada. Estrategias de control son variadas. [Alcorn y O'Sullivan (2014)] presenta alternativas como control de campo orientado (FOC), control de torque directo (DTC), controladores de campo y algunos controles que se aplican también en otras aplicaciones ERNC, como es el Maximum Power Point Tracking (MPPT) [Benelghali et al. (2012); Amon et al. (2012); Eder y Edwards (2013); Jafarishiadeh et al. (2017)].

Por su parte, el control hacia la red posee estrategias como son el control por voltaje orientado (VOC), el control de potencia directo (DPC) y sus respectivas variantes, lo cual permite una conexión adecuada a la red según los parámetros que establezca la norma local, tanto de tensión, frecuencia, factor de potencia y nivel de armónicos [Alcorn y O'Sullivan (2014)].

2.2.4. Conexión al sistema

La distancia que posea el dispositivo hasta un punto de conexión a la red es determinante para evaluar el tipo de enlace que se realizará.

En el caso de dispositivos off-shore, la existencia de una subestación submarina se hace necesaria (Figura 2.10) y sus variantes dependerán de la magnitud del proyecto y la distancia a la costa. Es posible que desde la subestación submarina hasta el enlace a la red sea transmisión en AC o DC, y los costos asociados dependerán de la distancia y la potencia a transmitir [O'Sullivan y Dalton (2009); Wang y Lin (2017)].

Así mismo, la forma de conectar las distintas unidades de una granja undimotriz tienen distintas variantes. Es posible tener un transformador elevador para cada dispositivo, o un transformador mayor para varios; es posible conectar en grupos para llegar a la subestación submarina o también se realizan conexiones individuales para cada sistema de generación [Ahmed et al. (2010)].

Un ejemplo de esto es el sistema de pruebas de sistemas off-shore "Wave Hub", ubicado en Cornwall, UK. Opera desde el año 2012 con posibilidades de conectar al sistema en 11kV o 33kV, con una potencia

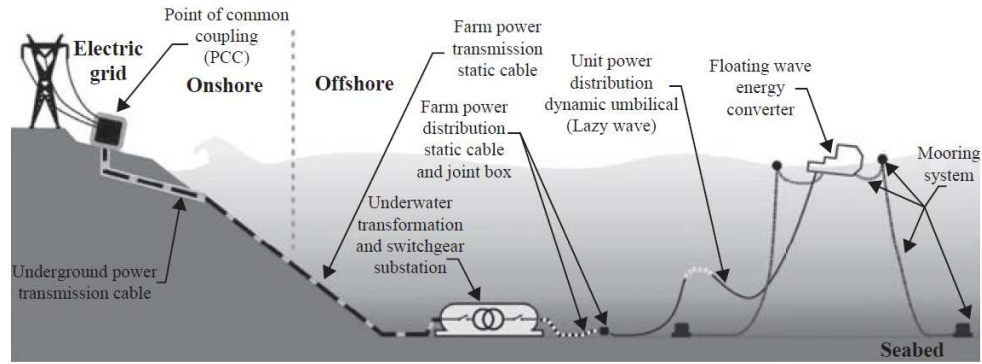


Figura 2.10: Esquema de conexión a la red de dispositivos off-shore [Alcorn y O'Sullivan (2014)]

nominal de 30 MVA. La subestación submarina se encuentra a 16 km de la costa, a unos 50 metros de profundidad, con posibilidad de conexión de 4 diferentes granjas para pruebas de operación y estabilidad de las granjas [Ahmed et al. (2010); WaveHub (2018)].

En el caso de dispositivos On-Shore, el problema se simplifica debido a que estos dispositivos tienen sus componentes principales en tierra. Esto lleva a que las soluciones de conexión para generación undimotriz on-shore sean similares a lo planteado para granjas eólicas cercanas a la costa [Ramirez et al. (2015)].

2.3. Simulaciones y montajes experimentales

Las simulaciones han sido esenciales para la implementación de nuevas tecnologías, y eso no excluye a la generación undimotriz. En este contexto, las simulaciones de sistemas de generación undimotriz poseen como entrada un tren de olas, basado en los parámetros relevantes comentados en 2.1.1, y en la salida se obtiene la potencia y energía que puede proveer el sistema de generación.

Para esto, se requiere el modelo mecánico del dispositivo WEC, su comportamiento ante distintos escenarios marítimos, el modelo del generador, del sistema de conversión y el control que se implemente para el conjunto.

Algunas aplicaciones van enfocadas, por ejemplo, en la predicción de la energía generada por un sistema de boya oscilante [Zuo y Wang (2016)], evaluar el desempeño de una modulación SVC para un convertidor multinivel en un WEC del tipo OWC [Colak y Derya Kocabas (2016)], realizar un montaje experimental, donde el eje impulsor de la máquina simule el comportamiento del PTO ante el escenario de olas programado [Ramirez et al. (2015)] o realizar pruebas de desempeño de un control determinado al sistema [Park et al. (2017)].

2.4. Norma Técnica y requerimientos para el sistema chileno

En Chile, la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio (conocida también como NTSyCS) establece las exigencias de seguridad y calidad de servicio de los sistemas interconectados, regulados por la Ley General de Servicios Eléctricos.

La NTSyCS ha evolucionado en la medida que existen nuevas problemáticas y desafíos en el sistema eléctrico. Estos últimos años, los grandes cambios se han reflejado en establecer las condiciones para centrales no convencionales, como solares y eólicas, diferenciándolas de las grandes centrales hidráulicas y térmicas. A pesar de que las normas no poseen criterios específicos, la energía de origen marino (undimotriz, mareomotriz, corrientes marinas, diferencial de presión) si es parte del alcance de la norma por ser considerada una forma de energía renovable no convencional en la Ley.

Es por esto que un primer criterio para determinar las condiciones de conexión al sistema puede estar dado por las exigencias a los sistemas eólicos y solares en la NTSyCS. En particular, es posible encontrar en el capítulo 3-3 las exigencias mínimas para el diseño de instalaciones de generación, en el 3-6 los requisitos mínimos para la interconexión, modificación y retiro de instalaciones, en el 5-4 los estándares en generación y transmisión para estado normal y de alerta, entre otros capítulos relevantes a la hora de diseñar sistemas de generación conectados a la red chilena.

Para niveles de tensión menores, la Norma Técnica de Conexión y Operación de Equipamiento de Generación en Baja Tensión establece los procedimientos, metodologías y exigencias para la conexión y operación de equipamientos de generación cuya capacidad instalada total no supere los 100[kW], en redes de servicio público de distribución de electricidad. Esta norma posee el alcance suficiente para ser aplicada a la generación undimotriz, debido a que es válida para los dispositivos descritos en el art. 225, letra aa), del DFL N° 4/20.018 del 2007. En particular, el número 6 de este artículo define como energía renovable no convencional a “Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la energía de los mares, correspondiente a toda forma de energía mecánica producida por el movimiento de las mareas, de las olas y de las corrientes, así como la obtenida del gradiente térmico de los mares”.

En particular, es de interés el Título 4-6 de dicha norma, “Calidad de Servicio del Equipamiento de Generación”. En general, se indica que el equipo debe ser diseñado, instalado y operado de tal manera que no afecte la operación del sistema de distribución y asigna responsabilidades ante incumplimientos de esta condición. Además, hace referencia a que los equipos deben cumplir con el estándar internacional IEC6100-3-3 o IEC61000-3-11, según corresponda aplicar, en lo que concierne a variaciones rápidas de tensión, parpadeo y niveles de armónicos que presenta el equipo.

Otra opción es considerar las normas que se hayan implementado en otro país, como la guía para la conexión a la red de sistemas de conversión de energía marina, publicado por la European Marine Energy Centre (EMEC), la cual orienta en los criterios utilizados en el Reino Unido para la conexión de instalaciones de generación marina [EMEC (2009)].

3 | Caso de Estudio y Metodología

En este capítulo se detallará el proceso por el cual se busca cumplir con los objetivos planteados para este trabajo, presentando el dispositivo WEC con el cual se trabajará, la configuración para el accionamiento deseado y los criterios que fundamentarán las simulaciones que se mostrarán en el siguiente capítulo.

3.1. Dispositivo WEC: MADIUN

El dispositivo mecánico con el cual se desarrolla este trabajo es el MADIUN, el cual fue introducido en la sección 2.2.1. Este prototipo de dispositivo WEC corresponde a la categoría de *point absorber* (absorción puntual), debido a que utiliza una o varias boyas para impulsar el eje mecánico y así entregar la energía de la ola al generador eléctrico. Fue concebido como una alternativa simple y económica de generación eléctrica con olas, lo cual es un elemento diferenciador con otros equipos que poseen costos de implementación más elevados. Este trabajo será coherente con el principio de obtener una forma simple de realizar una conexión eléctrica al sistema.

Algunas características diferenciadoras que posee el dispositivo son:

- Posee la mayor parte de sus piezas en tierra, por lo que corresponde a un dispositivo *OnShore*.
- En su eje posee un volante de inercia para atenuar los impulsos ejercidos por la boya y disminuir los efectos de eventuales escalones de potencia que pueda producir una ola de gran magnitud.
- Puede operar con más de una boya, separadas una distancia tal que permita la mayor continuidad de movimiento posible en el eje del volante de inercia.
- El prototipo fue ideado, diseñado y patentado por la empresa chilena Maestranza Diesel.

El dispositivo fue probado en 2015 en caleta Portales (Valparaíso), con un PMSG conectado por un rectificador a un conjunto de baterías y estas suministraban energía a un inversor de potencia que alimentaba a un conjunto de cargas desacopladas de la red, por lo cual nunca ha sido conectado directamente a la red y el sistema de rectificación no aplicaba un control sobre el generador.

La empresa Maestranza Diesel, dueña de la patente del dispositivo, facilitó el modelo matemático que poseen del MADIUN, con el cual es posible estimar la potencia en el eje y se pretende dar continuidad a este modelo con los componentes eléctricos que puedan establecerse.

3.2. Escenario marítimo

Como se planteó en la sección 2.3, las simulaciones buscan entregar información respecto a la potencia generada, teniendo como entrada el tren de olas que se estiman en una ventana de tiempo. Para efectos de esta memoria, el objetivo es simular una conexión al sistema, estudiar el desempeño del control aplicado sobre los componentes eléctricos dentro de la simulación, a partir de un escenario de olas dado, y evaluar el aporte en términos de energía generada al sistema.

Es por esto que se pretende hacer simulaciones con olas regulares, las cuales permiten evaluar el desempeño en estado estacionario del sistema de generación. La amplitud y el periodo de prueba serán determinadas por la ola de mayor frecuencia estadística de la zona a simular.

Los datos marítimos son obtenidos del Atlas de Oleaje de Chile [Universidad de Valparaíso (2016)], con datos de la boya del puerto de Valparaíso, correspondientes a datos de olas someras² del sector, los cuales se muestran en la Tabla 3.1. Con esto, será posible evaluar todos los escenarios de olas regulares y estimar la generación anual del dispositivo.

$H_{mo}[m]$	$T_m[s]$							
	[7 – 8[	[8 – 9[	[9 – 10[	[10 – 11[	[11 – 12[	[12 – 13[	[13 – 14[	[14 – 15[
]0 – 0,3[	14,7	9,3	9,8	9,2	8,1	6,4	3,7	1,8
]0,3 – 0,6[	5,7	1,6	1,6	2,4	2,4	5,1	6,2	5,8
]0,6 – 0,9[	2,2	0,2						
]0,9 – 1,2[	1,1							

Tabla 3.1: Frecuencia de ocurrencia de olas, según altura y periodo. Datos correspondientes al puerto de Valparaíso [Universidad de Valparaíso (2016)]

3.3. Componentes

Para la simulación, se deben considerar los distintos componentes que se requieren para la conexión al sistema del prototipo WEC, como el generador, el rectificador y el inversor. En esta sección se entregarán las especificaciones de cada una de estas partes.

3.3.1. Generador

El generador a utilizar será de imanes permanentes (PMSG). La elección de este tipo de generador se basa en que son generadores con mejores niveles de aislación contra ambientes abrasivos, lo cual disminuye la frecuencia del mantenimiento que requieren. Además no requiere de compensación de reactivos como el caso de las máquinas de inducción.

Una de sus desventajas es el esfuerzo mecánico al cual pueden verse sometidos los imanes del rotor, ya que pueden someterse a esfuerzos electromecánicos que podrían causar una ruptura de los imanes y que estos salgan expulsados, conllevando a posibles daños en el generador. Esta situación se puede dar en el caso de marejadas o eventos de olas de mayor energía.

Dentro de las precauciones que se debe tener en relación a la capacidad del equipo en caso de realizar una prueba real, se encuentra el nivel de torque y velocidad permitidos por la máquina contra los parámetros que entrega el MADIUN y la curva de tensión-velocidad para no dañar la aislación de los devanados ante un oleaje agresivo.

3.3.2. Convertidor de potencia

Para las simulaciones, se decide utilizar un puente de diodos (rectificador no controlado) y un inversor de IGBT (inversor controlado) para adaptar la señal del generador y adaptarla a parámetros de la red. Las ventajas de esta distribución permiten:

- Evita el diseño de un control para el generador, simplificando el sistema.
- Disminuye los costos económicos asociados a la etapa de rectificación.

²Las olas someras corresponden a olas que se propagan en zonas donde la profundidad del fondo marino es baja, por lo que la topología del fondo marino incide en el comportamiento de las olas en superficie.

- Desacopla el generador de la red debido a la alta variabilidad que poseen las olas.
- Logra un control sobre el flujo de potencia activa y reactiva hacia la red.

No serán consideradas las pérdidas por conmutación en los convertidores para simplicidad de los modelos. Los bajos niveles de pérdidas que poseen estos equipos justifican la decisión.

3.3.3. Enlace en corriente directa

Para el enlace en corriente directa, se utilizará un capacitor con el fin de regular las variaciones de tensión y se dimensionará según la energía que se espera evacuar del MADIUN y el nivel de tensión deseado en el enlace.

No se considerará almacenamiento de energía en la simulación, ya que el objetivo principal es lograr la conexión del sistema a la red. A pesar de esto, se analizará si un sistema de almacenamiento sería pertinente para una mejor operación del conjunto.

3.3.4. Protecciones

Si bien no se dimensionarán ni programarán proyecciones para efectos de esta memoria, se debe tener en cuenta a la hora de implementar un montaje experimental los elementos que permitan evitar daños en los componentes eléctricos y mecánicos del sistema de generación, como por ejemplo:

- Protecciones mecánicas para evitar que el generador llegue a velocidades y torques superiores a las que pueda permitir su aislación, sus rodamientos y ejes.
- Protecciones ante sobrecorrientes que puedan dañar los componentes electrónicos (diodos e IGBT)
- Protecciones ante sobretensiones en el enlace DC.
- Protecciones que aseguren el sincronismo adecuado a la red por parte del equipo.

3.4. Control del inversor

Como se menciona en la sección 2.2.3, el convertidor de potencia debe ser controlado desacoplada-mente para la rectificación y la inversión. Para este caso, en donde se tiene un rectificador no controlado, solo se implementará un sistema de control para la inversión.

El control a implementar corresponde a un control orientado por tensión (*Voltage-oriented Control* o VOC). Esta estima la posición angular midiendo directamente el voltaje en la línea, y con un lazo interno de corriente en coordenadas ortogonales controla el flujo de energía entre el enlace en corriente continua y la red. La referencia de corriente en el eje directo se encuentra dado por el lazo externo de tensión, el cual mantiene el valor de la tensión en el enlace DC y controla la dirección y magnitud del flujo de potencia.

Al ser un control vectorial, posee un buen seguimiento ante las dinámicas del sistema, su frecuencia de conmutación es fija y menor respecto a otros métodos de control (disminuyendo las pérdidas por conmutación y facilitando el diseño de filtros adecuados a la salida del convertidor).

Sus desventajas se asocian a la medición que se debe realizar para estimar la posición angular de la tensión de la red, ya que es una medición directa y no un cálculo como lo realiza un *Virtual Field Oriented Control* (VFOC), el cual estima a través de un flujo virtual.

Se utilizara una modulación PWM (Modulación por ancho de pulso ó **Pulse-Width Modulation**) la cual modifica el ciclo de trabajo del convertidor, tal que de un tren de pulso se obtenga una señal sinusoidal equivalente [Mohan et al. (2007)].

3.5. Conexión a la red

Considerando que el MADIUN aún es un dispositivo de baja potencia, la ley chilena lo podría considerar un pequeño medio de generación distribuido, el cual tiene la posibilidad de conectarse al sistema a nivel de distribución. Al no realizar simulaciones con granjas undimotrices, se simulará una conexión a la línea de distribución, sin profundizar en las dinámicas locales que puede causar la inyección de energía a la red. Este supuesto es razonable debido a las potencias que logra proporcionar el equipo.

Se asumirá que a la salida del filtro del inversor, existe un transformador $Yd1$, $380/220[V]$, que permitirá la conexión a una red trifásica en distribución, ya que el generador escogido no posee el nivel de voltaje suficiente para inducir tensiones que permitan la conexión directa del inversor a la red. Sin embargo, este transformador no será simulado y se analizará el comportamiento del sistema de generación a la salida del filtro del inversor. Este supuesto se considera razonable, ya que la red es lo suficientemente robusta para no ser mayormente alterada por las dinámicas de un sistema de generación de baja potencia.

4 | Modelo de Simulaciones

4.1. Modelo mecánico

Los componentes del MADIUN se pueden dividir en las siguientes secciones:

- La boya que absorbe la energía de la ola.
- El cable que sujeta la boya al mecanismo, el cual se encuentra en contacto a 4 puntos: la boya, la polea en el fondo marino, el carrete y el contrapeso.
- El carrete que impulsa los ejes del MADIUN.
- El contrapeso que permite mantener la tensión del cable.
- El volante de inercia, que permite acumular parte de la energía obtenida desde la boya como energía cinética.
- Variadores de velocidad en ambos extremos del eje del volante, para amplificar la velocidad que obtiene el carrete (de magnitud baja) y que el generador pueda operar con velocidades cercanas a la nominal. A la vez, disminuye el torque aplicado sobre el generador.

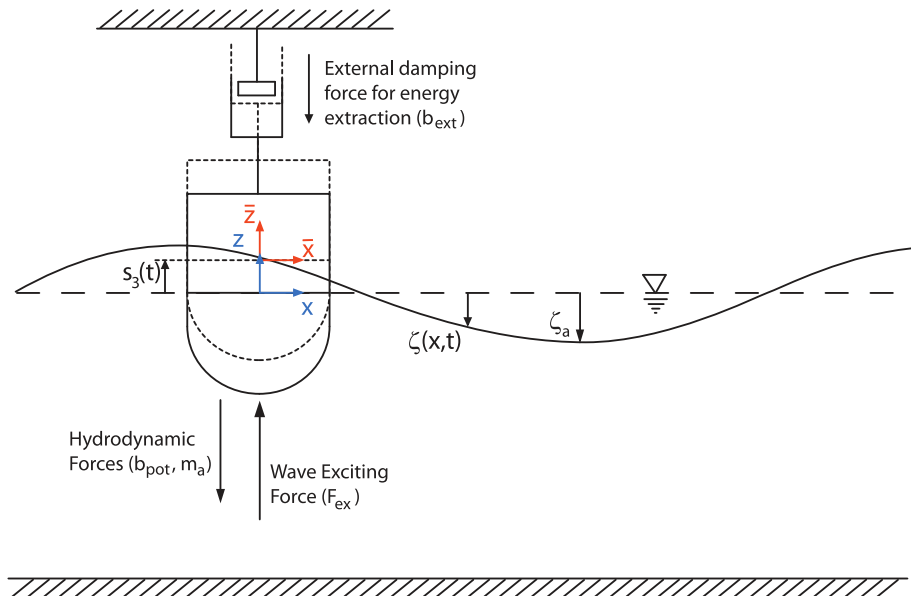


Figura 4.1: Esquema simplificado de las fuerzas que actúan sobre una boya [Grüter \(2016\)](#).

Para entender el modelo se deben tomar en cuenta las fuerzas que actúan sobre la boya. En términos simples, se pueden considerar 3 fuerzas: la fuerza de excitación producida por la ola (F_{ex}), la fuerza hidrodinámica del fluido (mar) y la fuerza amortiguadora externa que extrae la energía de la ola (F_{bext}). Se

plantea en Grüter (2016) que cada una de estas fuerzas es proporcional ya sea a la posición, velocidad o aceleración que tenga la boya. La boya, si bien posee 6 grados de libertad debido al desplazamiento y la rotación en los 3 ejes coordenados, solo es de interés el desplazamiento vertical de la boya para la generación de energía, a modo de un esquema simplificado del problema. De esto se obtiene la siguiente ecuación:

$$(m + m_a)a_{boya} + b_{pot}v_{boya} + cz_{boya} = F_{ex} - F_{bext} \quad (4.1)$$

Donde m y m_a son la masa de la boya y la masa hidrodinámica agregada de la boya, b_{pot} es el coeficiente de amortiguamiento hidrodinámico, c es el coeficiente de restauración de las fuerzas hidrostáticas y a_{boya} , v_{boya} y z_{boya} corresponden a la aceleración, velocidad y posición en el eje z de la boya. Esta ecuación se debe complementar con las ecuaciones del MADIUN, que determinarán la relación de la fuerza aplicada sobre el carrete desde el generador. De aquí, es requerido obtener la fuerza del generador, reflejada en el carrete, la cual actúa como F_{bext} .

El análisis de la fuerza del generación, reflejada en el carrete, se estudia desde su origen, como lo desarrolla Figueroa (2016). Primero se consideró, a partir de los datos del fabricante del generador que utilizaron para las pruebas realizadas el año 2015, la curva de momento en función de la velocidad del generador sincrónico de imanes permanentes, como la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} M_G(n_G) &= A * n_G + B \\ M_G(\omega_G) &= A * \frac{60}{2\pi} * \omega_G + B \end{aligned} \quad (4.2)$$

Con M_G el momento del generador, n_G la velocidad del rotor en *RPM* y A , B coeficientes de la curva.

El origen del momento aplicado al generador corresponde al momento que impone el volante de inercia, dado por:

$$I_V * \alpha_V - M_{CV} + M_{GV} = 0 \quad (4.3)$$

Donde I_V es la inercia del volante, α_V es la aceleración angular del volante, M_{CV} es el momento del carrete, referido al volante, y M_{GV} es el momento del generador, referido al volante. Con esto, es posible escribir 4.2 como:

$$\begin{aligned} M_G(\omega_G) &= A * \frac{60}{2\pi} * \omega_G + B \\ \frac{M_{GV}(w_V)}{R_{GV}} &= A * \frac{60}{2\pi} * R_{GV} * \omega_V + B \\ M_{GV}(w_V) &= A * \frac{60}{2\pi} * R_{GV}^2 * \omega_V + B * R_{GV} \end{aligned} \quad (4.4)$$

con R_{GV} la relación de velocidades entre el generador y el volante, ω_V la velocidad angular del volante.

De las ecuaciones 4.3 y 4.4 es posible despejar el momento aplicado sobre el carrete M_C desde el generador y el volante de inercia (se puede considerar como un momento de carga sobre el carrete):

$$\begin{aligned} M_{CV}(\omega_V) &= M_{GV}(w_V) + I_V * \alpha_V \\ M_{CV}(\omega_V) &= A * \frac{60}{2\pi} * R_{GV}^2 * \omega_V + B * R_{GV} + I_V * \alpha_V \\ \frac{M_C(\omega_C)}{R_{CV}} &= A * \frac{60}{2\pi} * R_{GV}^2 * \omega_V + B * R_{GV} + I_V * R_{CV} * \alpha_C \\ M_C(\omega_C) &= A * \frac{60}{2\pi} * R_{GV}^2 * R_{CV} * \omega_V + B * R_{GV} * R_{CV} + I_V * R_{CV}^2 * \alpha_C \end{aligned} \quad (4.5)$$

A partir del diagrama de cuerpo libre del carrete y de que la sumatoria de momentos en un cuerpo es cero, se tiene la expresión para la fuerza de tensión en la boya F_{tb} expresada en términos de aceleración a_C y velocidad lineal V_C es:

$$\begin{aligned}
\sum M &= 0 \\
M_{tb} &= M_{cp} + M_c \\
F_{tb}R_{tb} &= m_{cp}(\alpha_C - g)R_{cp} + M_c \\
F_{tb} &= \frac{IR_{CV}^2 + m_{cp}R_{cp}}{R_{tb}b^2}a_C + \frac{\frac{A*60}{2\pi}R_{CV}^2R_{GV}^2}{R_{tb}^2}V_C + \frac{-m_{cp}gR_{cp} + BR_{GV}R_{CV}}{R_{tb}^2} \\
F_{tb} &= \alpha * \alpha_C + \beta * V_C + \gamma
\end{aligned} \tag{4.6}$$

definiendo las constantes como:

$$\alpha = \frac{IR_{CV}^2 + m_{cp}R_{cp}}{R_{tb}b^2} \tag{4.7}$$

$$\beta = \frac{\frac{A*60}{2\pi}R_{CV}^2R_{GV}^2}{R_{tb}^2} \tag{4.8}$$

$$\gamma = \frac{-m_{cp}gR_{cp} + BR_{GV}R_{CV}}{R_{tb}^2} \tag{4.9}$$

Finalmente, a partir ahora se debe considerar la ecuación de las fuerzas sobre la boya, vista en la ecuación 4.1, con lo que la fuerza sobre el carrete F_C corresponde a:

$$F_C = (m + m_a + \alpha) * a_{boya} + (b_{pot} + \beta) * V_{boya} + (c + \gamma)z_{boya} \tag{4.10}$$

Los valores de los coeficientes fueron obtenidos de manera experimental en el canal de pruebas de la Universidad Austral de Chile y se presenta la tabla con los valores de las variables en el Anexo A

Esta ecuación no considera elementos como:

- Pérdidas mecánicas por roce en rodamientos.
- Pérdidas en el volante de inercia por la viscosidad del aire.
- Catenaria formada por el cable y el peso del mismo.
- Grados de libertad (ejes x e y, y rotaciones en los ejes)

En la simulación, se consideraron 3 boyas distanciadas de tal manera que logre una continuidad en la fuerza sobre el carrete, como es posible de apreciar en la Figura 4.2. Se considerará ideal la distancia entre boyas, es decir, para cualquier periodo de boya, la ola se verá reflejada en las distintas boyas en un tercio del periodo de la ola. La altura y frecuencia de la ola son ingresados como parámetros de entrada (expresado como una posición, velocidad y aceleración) y la fuerza resultante se multiplica por el radio del carrete R_{tb} para obtener el momento aplicado en el carrete por la boya. La señal obtenida se filtra para considerar solamente para obtener valores positivos de momento, ya que el carrete acciona el PTO solamente cuando la boya sube, mientras que cuando baja la boya, el carrete libera el eje para que el contrapeso tire el cable, permitiendo mantener la tensión del mismo.

A la señal se resta el torque aplicado por el generador, amplificado según los variadores de velocidad mecánicos. La resultante ingresa a una fuente de torque, la cual entrega la energía a los componentes del PTO (variadores de velocidad, volante de inercia) y finalmente se conecta la salida del PTO a la entrada de torque de la PMSM. El esquema implementado en PLECS se presenta en la Figura 4.3

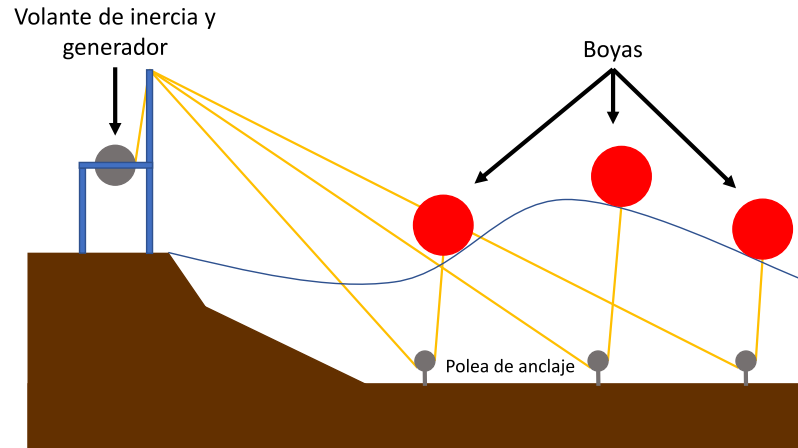


Figura 4.2: Esquema del MADIUN instalado en la costa. La distancia relativa de las boyas permite el aprovechamiento de la energía de la ola

4.2. Modelo del Generador

Los parámetros de la máquina de imanes permanentes utilizada vienen de [Ivanqui et al. (2015)] y los parámetros utilizados se muestran en la Tabla 4.1.

Potencia Nominal [kW]	3
Tensión [V_{LL}]	220
Frecuencia [Hz]	30
Flujo [$V \cdot s$]	1.143
Torque [Nm]	90
Inercia [$kg \cdot m^2$]	0.02
$R[\Omega]$	0.3
$L[mH]$	5
Pares de polos	5

Tabla 4.1: Parámetros de la máquina de imanes permanentes simulada

Se utiliza el bloque de PLECS “Permanent-Magnet Synchronous Machine”, ingresando los parámetros requeridos.

4.3. Modelo del Convertidor y Enlace DC

Como se mencionó anteriormente, el convertidor se compone de un puente de diodos, el enlace DC con un condensador, un puente de IGBT y un filtro a la salida del convertidor. Los parámetros del filtro y del condensador son presentados en la Tabla 4.2.

$R_f [\Omega]$	0.01
$L_f [mH]$	15
$C_{dc} [\mu F]$	3300

Tabla 4.2: Parámetros del filtro de salida del inversor y del condensador

El modelo matemático se desarrolla en detalle en los Anexos D y E, dando por resultado el diagrama de bloques expuesto en la Figura 4.4

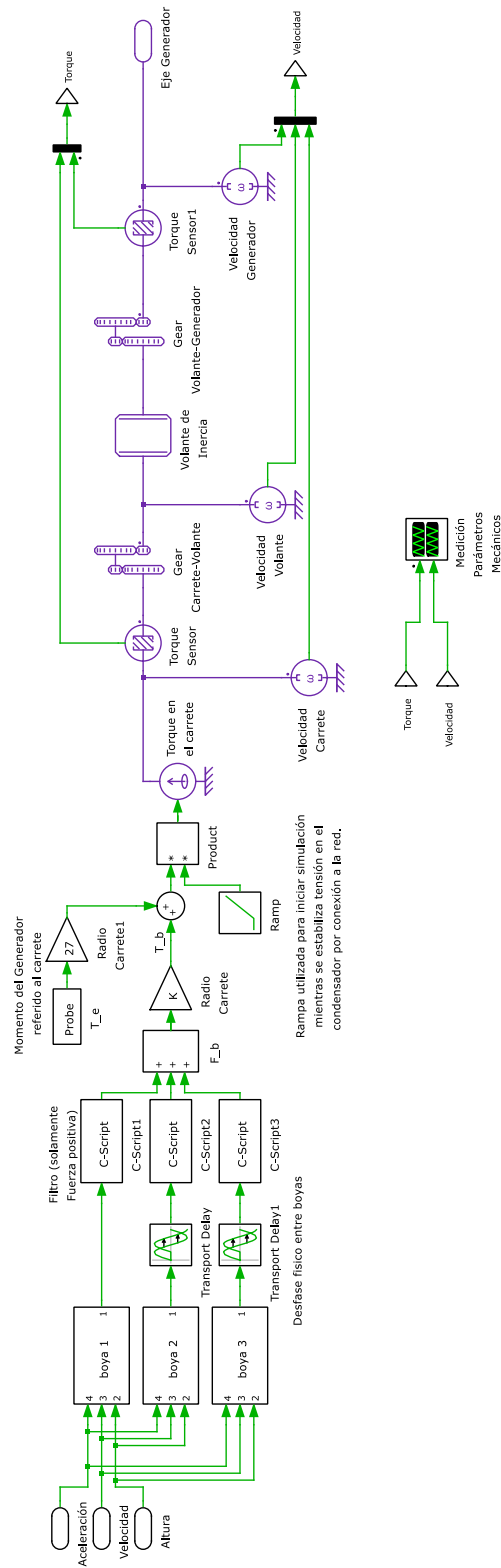


Figura 4.3: Esquema en Plecs del MADIUN.

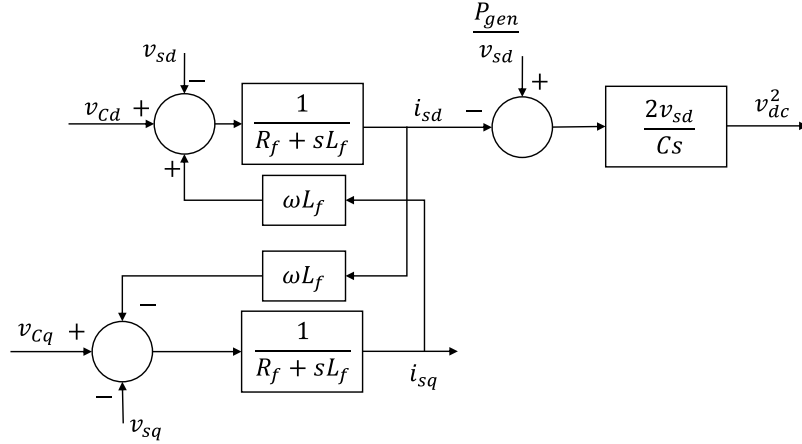


Figura 4.4: Modelo matemático en diagrama de bloques del convertidor y enlace DC, conectado a la red eléctrica.

4.4. Sistema de control y ajuste de parámetros

El diseño del sistema de control consta de 3 etapas: ajuste del PLL, ajuste de parámetros para el lazo interno de corriente y el ajuste para el lazo externo de tensión.

4.4.1. Phase Locked Loop

El PLL sirve para sincronizar el inversor con la red, conociendo la posición del vector espacial de tensión de la red. El desarrollo detallado se encuentra en el Anexo C. La planta equivalente del sistema en el plano discreto, considerando una frecuencia de muestreo de $10[kHz]$, corresponde a:

$$G_{PLL}(z) = \frac{2z - 1}{h(z + 1)} \quad (4.11)$$

Donde h corresponde a la inversa de la frecuencia de muestreo.

El control seleccionado corresponde a un proporcional-integral (PI), el cual fue sintonizado a través del lugar geométrico de raíces, utilizando la herramienta “*rltool*” de MATLAB, con la cual es posible evaluar la respuesta escalon y el rechazo a perturbaciones para distintos valores de los parámetros de control. De la sintonización, se considera que el siguiente controlador posee una respuesta adecuada:

$$C_{PLL}(z) = 761,86 \frac{z - 0,93116}{z - 1} \quad (4.12)$$

En la Figura 4.5 se presenta la respuesta a escalón y el rechazo a perturbación del lazo.

4.4.2. Control de corriente a la red

Para el caso del lazo interno, se tiene una planta de primer orden a la cual se le implementa un control PI. Para sintonizar el controlador, se busca que el cero del controlador cancele el polo de la planta, obteniendo como resultado un lazo cerrado de primer orden, con un tiempo de estabilización arbitrario que cumpla con el objetivo de control y permita tener un lazo estable.

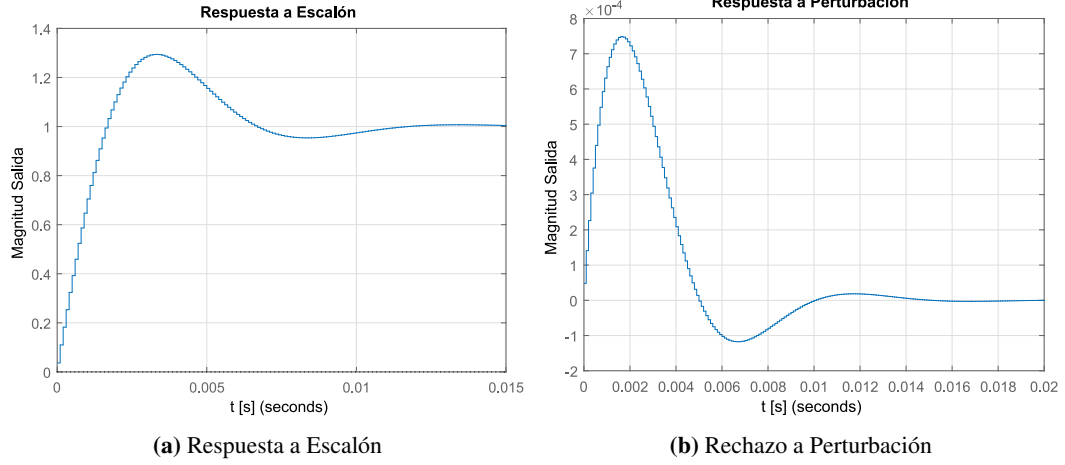


Figura 4.5: Respuesta a escalón y Rechazo a Perturbación del controlador del PLL

A partir de esto, se obtiene la planta de la corriente a la red:

$$G_i(s) = \frac{1}{sL_f + R_f} = \frac{\frac{1}{R_f}}{s\frac{L_f}{R_f} + 1} \quad (4.13)$$

El control PI a implementar queda expresado como:

$$C_i(s) = K_{i1} + \frac{K_{i2}}{s} = K_{i2} \frac{s\frac{K_{i1}}{K_{i2}} + 1}{s} \quad (4.14)$$

De aquí, la función de lazo cerrado del convertidor corresponde a la expresión:

$$\begin{aligned} H_i(s) &= \frac{C_i(s)G_i(s)}{1 + C_i(s)G_i(s)} \\ &= \frac{\frac{K_{i2}}{sR_f} \frac{s\frac{K_{i1}}{K_{i2}} + 1}{s\frac{L_f}{R_f} + 1}}{1 + \frac{K_{i2}}{sR_f} \frac{s\frac{K_{i1}}{K_{i2}} + 1}{s\frac{L_f}{R_f} + 1}} \end{aligned} \quad (4.15)$$

Si, convenientemente, se determina que:

$$\frac{K_{i1}}{K_{i2}} = \frac{L_f}{R_f} \quad (4.16)$$

La función de transferencia queda de la siguiente manera:

$$H_i(s) = \frac{1}{s\frac{R_f}{K_{i2}} + 1} \quad (4.17)$$

Lo que corresponde a un sistema de primer orden, estudiado ampliamente en la teoría de control [Ogata (2018)]. El término que acompaña a la variable s corresponde a un cuarto del tiempo en que demora la planta en estabilizarse, por lo que si se impone un tiempo de respuesta T_i , es posible determinar el valor de la constante K_{i2} y, en consecuencia, el valor de la constante K_{i1} :

$$K_{i2} = \frac{R_f}{T_i} \quad (4.18)$$

$$K_{i1} = \frac{L_f}{T_i} \quad (4.19)$$

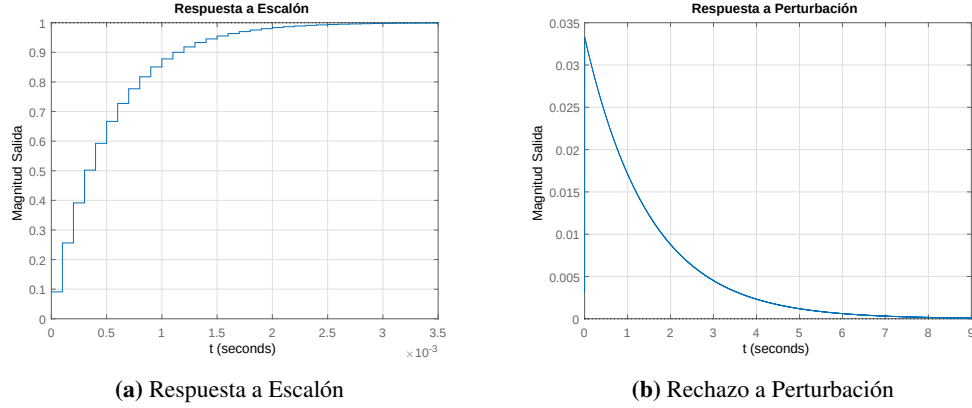


Figura 4.6: Respuesta a escalón y Rechazo a Perturbación del controlador de corriente

Con esto, los coeficientes de la planta corresponden a:

$$G_i(s) = 100 \frac{1}{s1,5 + 1} \quad (4.20)$$

Y el control implementado, para un tiempo de estabilización $T_i = 500[\mu s]$ corresponde a:

$$C_i(s) = 20 \frac{s1,5 + 1}{s} \quad (4.21)$$

Esto lleva a que la planta de lazo cerrado de corriente se exprese como:

$$H_i(s) = \frac{2000}{s + 2000} \quad (4.22)$$

Con esto, el último paso corresponde a transformar los parámetros del control de corriente a variables discretas, considerando el mismo periodo de muestreo $h = 1/10000$ utilizado para el control discreto del PLL:

$$C_i(z) = 30,001 \frac{z - 0,9999}{z - 1} \quad (4.23)$$

En la Figura 4.6 se muestra la respuesta a escalon y el rechazo a perturbación del lazo de corriente.

4.4.3. Control de Tensión

Para el lazo externo de control, debe tomarse en cuenta el lazo cerrado de corriente, obtenido en la sección anterior, para sintonizar el sistema de control.

Se define el control PI para el lazo de tensión como:

$$C_v(s) = K_{v1} + \frac{K_{v2}}{s} = K_{v2} \frac{s \frac{K_{v1}}{K_{v2}} + 1}{s} \quad (4.24)$$

Y, conociendo la planta del lazo cerrado de corriente $H_i(s)$ de la ecuación 4.17 y la planta del enlace DC $G_v(s)$ de la ecuación E.2, es posible obtener la planta de lazo cerrado del sistema como

$$\begin{aligned}
H_{sist} &= \frac{C_v(s)H_i(s)G_v(s)}{1 + C_v(s)H_i(s)G_v(s)} \\
&= \frac{K_{v2} \frac{s^{\frac{K_{v1}}{K_{v2}}+1}}{s} \frac{1}{s^{\frac{R_f}{K_{v2}}+1}} \frac{2v_{sd}}{Cs}}{1 + K_{v2} \frac{s^{\frac{K_{v1}}{K_{v2}}+1}}{s} \frac{1}{s^{\frac{R_f}{K_{v2}}+1}} \frac{2v_{sd}}{Cs}}
\end{aligned} \tag{4.25}$$

Con esto, se buscan los valores de K_{v1} y K_{v2} a través de la herramienta “*rltool*”, similar a lo realizado para el ajuste del control del PLL.

De lo anterior, se obtiene los parámetros del control de tensión:

$$C_v(s) = 403,7 * 10^{-6} \frac{0,8851s + 1}{s} \tag{4.26}$$

El cual, en términos de tiempo discreto, se expresa como:

$$C_v(z) = 357,3 * 10^{-6} \frac{z - 0,9997}{z + 1} \tag{4.27}$$

Para evaluar la estabilidad del lazo, se evaluó en la simulación un escenario donde:

- El condensador esta cargado y posee una tensión de 360[V].
- El inversor comienza a operar para conectarse a la red.
- Se impone un escalon de 0 a 1500[Nm] en el carete, valor que en estado estacionario supera los 2[kW] de potencia de salida en el generador, equivalente a un tren de olas regular de 1,5[m] y 7[s] de periodo.

Es posible observar en la Figura 4.7.c que la tensión posee un *overshoot* de un 8 % respecto a su referencia, logrando llegar a una banda del 5 % en 318[ms]. Por su parte, la corriente pierde inicialmente el seguimiento de la referencia, principalmente por los tiempos impuestos al control de tensión, asociados a la operación del equipo. La corriente de salida llega a un peak de 6,7[A_{RMS}].

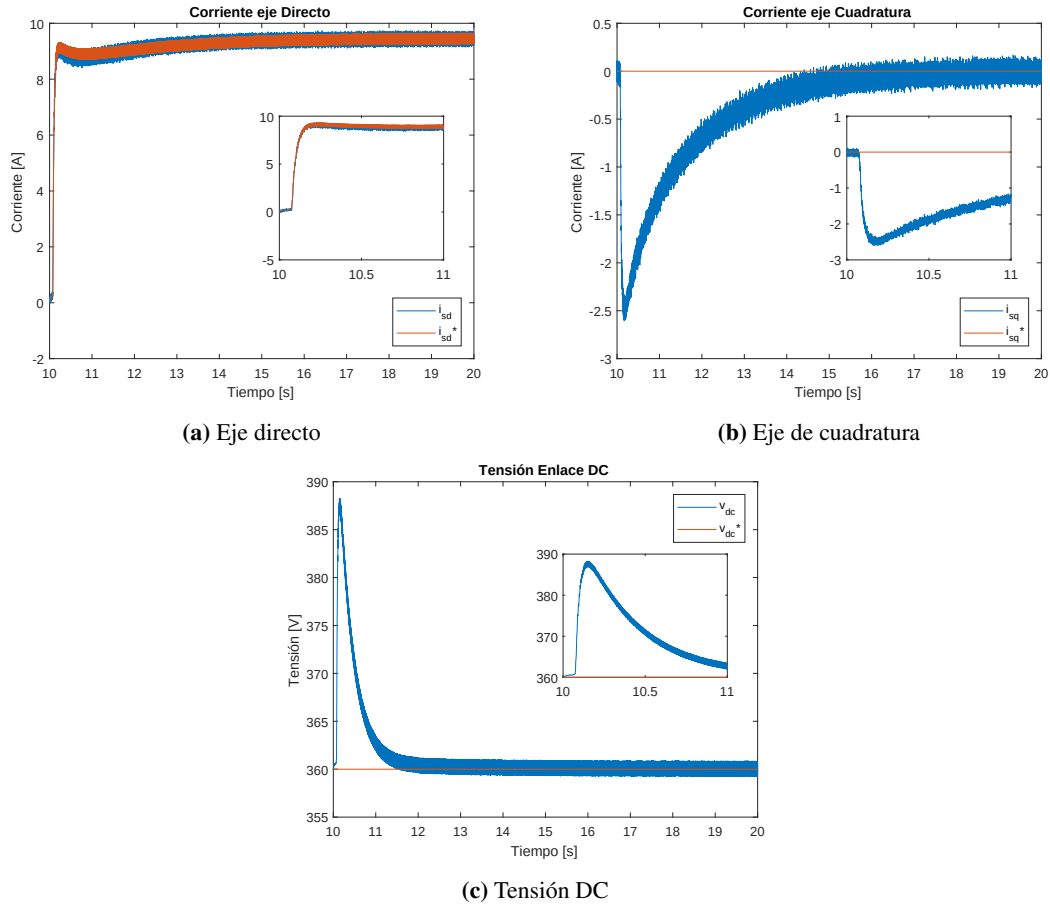
La Figura 4.8 muestra, en diagramas de bloque, el modelo matemático completo, incluyendo control y plantas de los distintos componentes eléctricos.

Como comentarios generales del sistema de control:

- El lazo de control interno siempre es más rápido que el externo, y en este caso los beneficios se reflejan desde la perspectiva de que las variaciones energía disponible desde el generador son más lentas que la velocidad de reacción del convertidor, por lo que un control de tensión veloz solo añadiría ruido innecesario al control.
- El volante de inercia es un aliado a la hora de rechazar perturbaciones, ya que permite absorber parte de la energía de la perturbación en forma de energía cinética y no se refleja directamente en el generador.
- Hubo dificultades a la hora de ajustar el control de tensión, debido a que los tiempos de reacción del control deben ser bajos por las dinámicas mecánicas, lo cual incide principalmente en el rechazo de perturbaciones, lo cual es un punto donde se debe profundizar en trabajos futuros.

4.5. Simulación del sistema de generación Undimotriz

Para resumir, la simulación consta del modelo mecánico del MADIUN, que tiene por entradas la posición, velocidad y aceleración de la boya respecto al oleaje y tiene como salida el torque aplicado en el eje del generador de imanes permanentes. Este último se encuentra conectado a un puente de diodos,

**Figura 4.7:** Respuesta ante perturbación (ola de alta energía)

rectificando la corriente al enlace DC y el puente de IGBT realiza la inversión. El control del inversor posee 3 componentes: El seguimiento del ángulo de la red a través del PLL, el control de tensión del enlace DC y el control de corriente del inversor. La salida del inversor posee un filtro que atenúa las componentes armónicas de la conmutación del convertidor y finalmente se conecta a la red infinita, que equivalen a los terminales del transformador elevador. La Figura 4.9 muestra el esquema general de la topología propuesta y la Figura 4.10 presenta la ventana principal de la simulación del sistema de generación undimotriz.

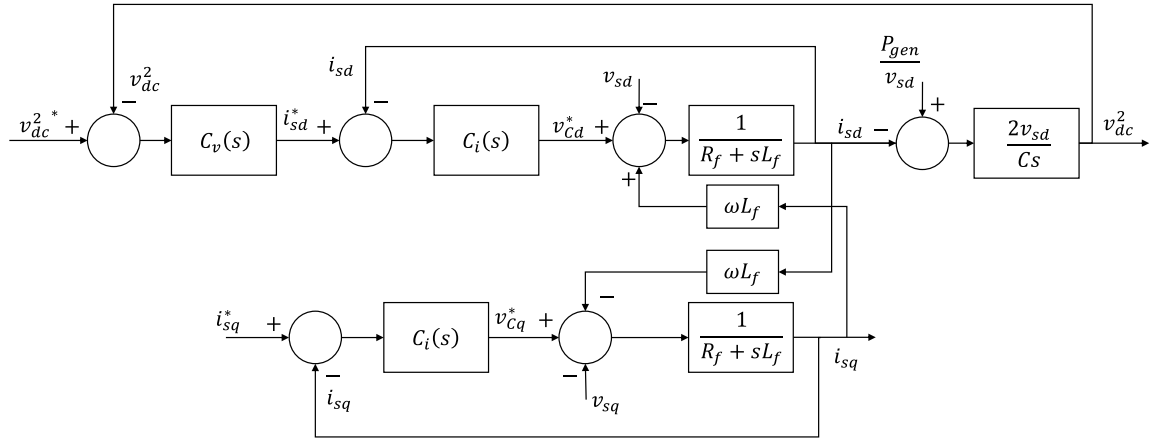


Figura 4.8: Modelo matemático en diagrama de bloques del convertidor, enlace DC y bloques de control.

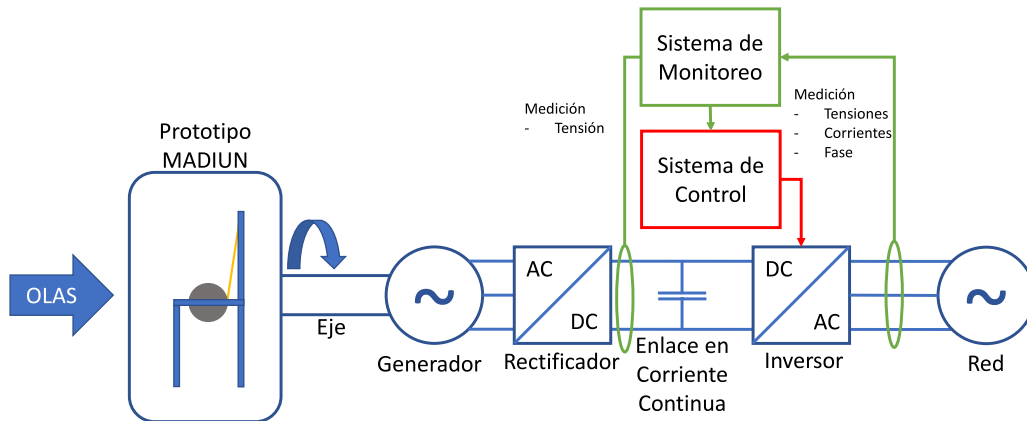


Figura 4.9: Esquema simplificado de la simulación, con la conexión propuesta.

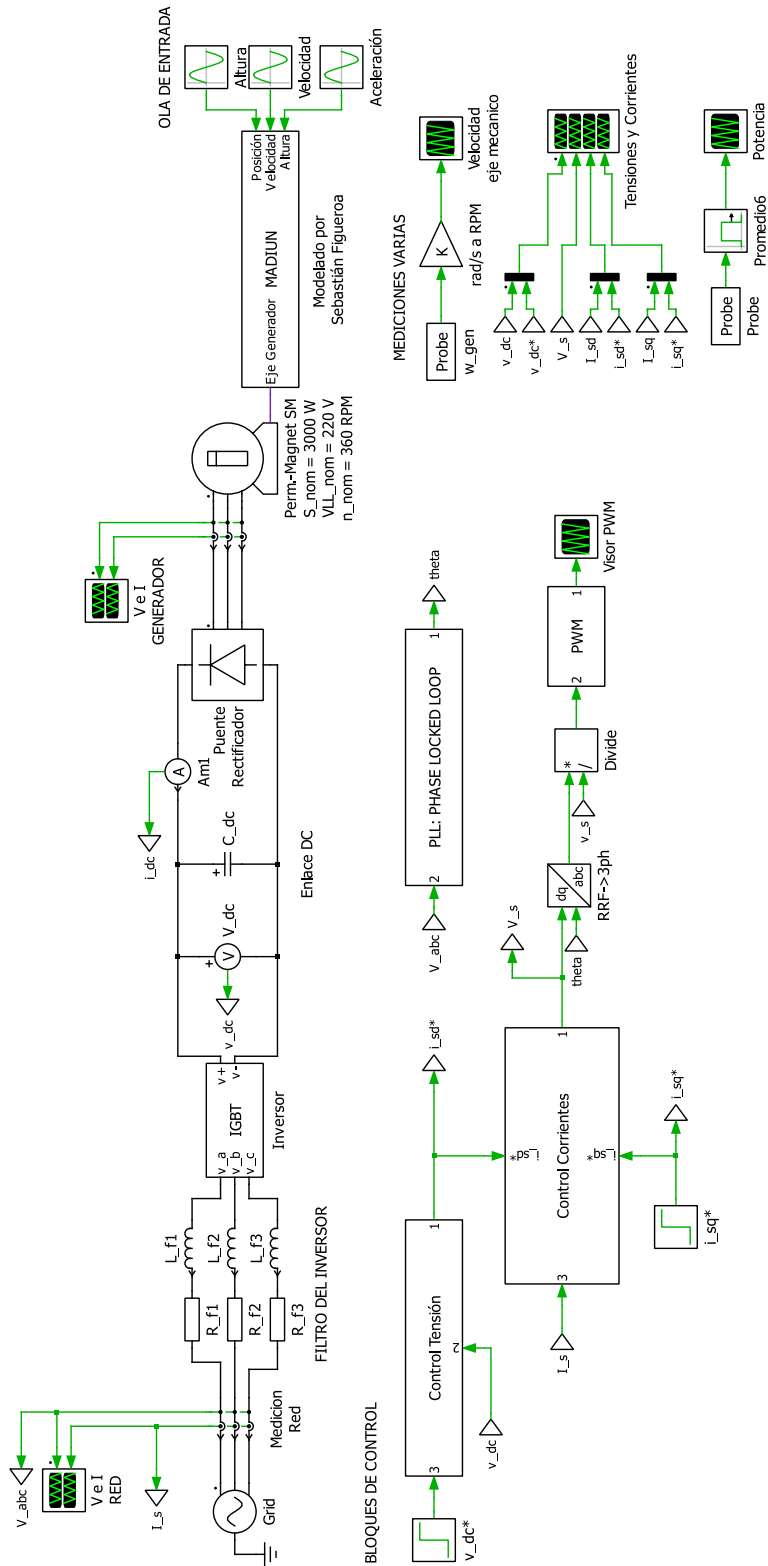


Figura 4.10: Esquema de simulación del sistema de generación en el programa PLECS.

5 | Presentación de Resultados y Discusión

Las simulaciones fueron realizadas en función a los datos de la boya del puerto de Valparaíso. Se escogieron 3 escenarios para evaluar el desempeño del control y la corriente de salida de inversor:

- Olas de periodo largo y de baja altura (15[s] y 0,4[m])
- Olas de periodo corto y de baja altura (8[s] y 0,4[m])
- Olas de periodo corto y de gran altura (8[s] y 1,1[m])

Además, se realizó una proyección de la energía que el dispositivo puede entregar en condiciones ideales, según el mapa de frecuencias de ola (altura y periodo de ola).

5.1. Desempeño del control

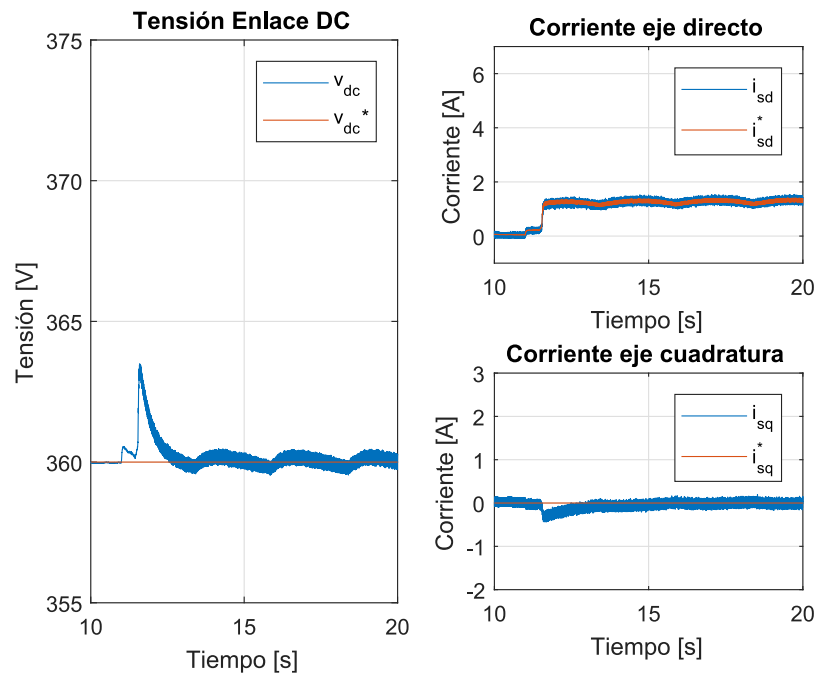


Figura 5.1: Seguimiento de referencia para tensión v_{dc} (izquierda) y corrientes i_{sd} e i_{sq} (derecha superior e inferior). Olas de 0,4[m] de altura y 15[s] de periodo.

El control de tensión da por resultado la referencia de la corriente directa, lo cual permite evacuar la energía acumulada en el condensador. Este control es más lento que el lazo de corriente, por motivos de estabilidad del lazo cerrado, y porque las dinámicas mecánicas son más lentas, por lo que un control rápido solo logra introducir ruido innecesario en la señal. Se observa en la parte derecha de las Figuras 5.1, 5.2 y 5.3

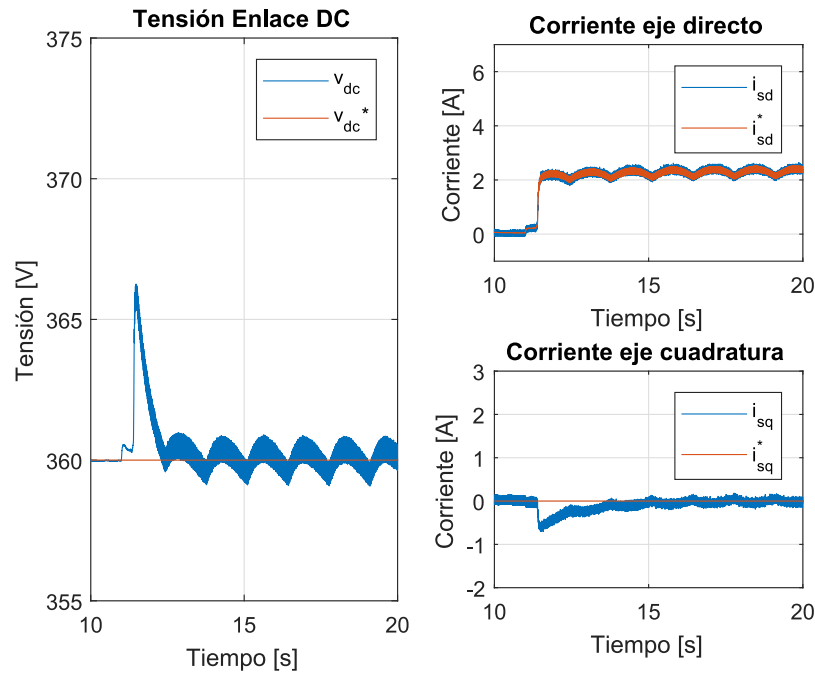


Figura 5.2: Seguimiento de referencia para tensión v_{dc} (izquierda) y corrientes i_{sd} e i_{sq} (derecha superior e inferior). Olas de $0,4[m]$ de altura y $8[s]$ de periodo.

que la tensión en el enlace DC logra mantener un valor medio igual a la referencia, oscilando en torno a la referencia ($360[V]$) en una amplitud entre 2 y $15 [V]$, lo cual depende de la amplitud y periodo de la ola. La frecuencia de oscilación coincide con la frecuencia de la ola y la forma de onda se puede entender en 2 etapas: el impulso que da el cable al carrete por la fuerza de la boya (pendiente mayor) y la energía entregada por el volante de inercia al sistema (pendiente menor). El seguimiento de la corriente directa en la parte derecha superior de las Figuras mencionadas se considera adecuado, ya que realiza el seguimiento esperado, más el ruido propio de la conmutación del inversor. El ruido disminuye al tener un mayor flujo de potencia.

La corriente de cuadratura mantiene un comportamiento periódico con un valor medio cercano a la referencia, aumentando su amplitud de oscilación ante variaciones bruscas de la velocidad y el toque de la máquina.

5.1.1. Mejoras al sistema de control y el convertidor de potencia

Una primera observación es el hecho de que el sistema de control solo gobierna las dinámicas de la red, por lo que el desempeño del generador como tal no es controlado, sino que se establece, a partir de la tensión del enlace DC, sus condiciones de operación.

Es por ello que, en el caso de implementar un rectificador controlado a la salida del generador, sería posible implementar un control de generación. Metodologías como las presentadas en 2.2.3 son opciones válidas y estudiadas la literatura, que podrían ser implementadas en un montaje experimental. En particular para el MADIUN, se recomendaría un control de torque por sobre un control de velocidad para el generador sincrónico, principalmente por los argumentos presentados en 5.2.2.

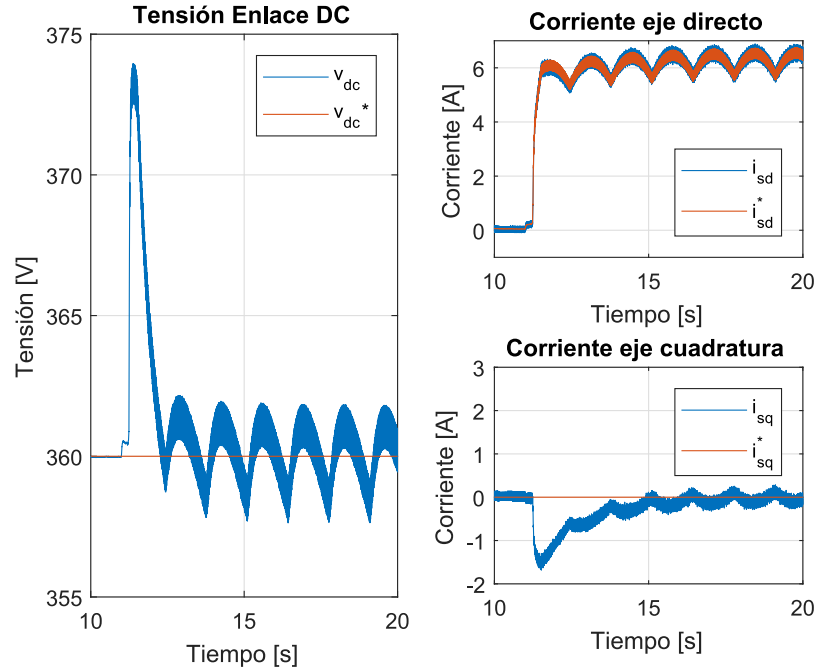


Figura 5.3: Seguimiento de referencia para tensión v_{dc} (izquierda) y corrientes i_{sd} e i_{sq} (derecha superior e inferior). Olas de 1,1[m] de altura y 8[s] de periodo.

Por otra parte, la posibilidad de evaluar el comportamiento de la corriente con otros tipos de modulación sería interesante, desde la perspectiva de aminorar los efectos indeseados en lo que concierne a componentes armónicas.

5.2. Potencia y Energía al sistema

La potencia de salida concuerda con la forma de la ola, tanto en altura como en periodo, y los valores máximos, mínimos y promedio en estado estacionario se pueden ver en la Tabla 5.1. La Figura 5.4 muestra su comportamiento en el tiempo.

	1,1[m] y 8[s]	0,4[m] y 8[s]	0,4[m] y 15[s]
Mín	1298.12	477.56	260.45
Avg	1426.86	552.29	285.49
Máx	1501.17	547.99	299.47

Tabla 5.1: Flujo de potencia hacia la red equivalente.

Tomando en cuenta la ecuación 2.1, la potencia de la ola tiene una dependencia lineal con el periodo y cuadrática con la altura. Sin embargo, para los casos en que se tiene la misma altura pero distinta frecuencia, al disminuir el periodo de la ola aumenta la potencia que absorbe el PTO. Esto está asociado a la frecuencia de resonancia de la boya, tema que se comentará en la Sección 5.2.2.

5.2.1. Proyección de energía generada

Es de interés obtener la energía anual, E_{anual} , que se generaría con el MADIUN instalado en el puerto de Valparaíso. Por ello, se realizaron las simulaciones para todos los escenarios marítimos que se presentan

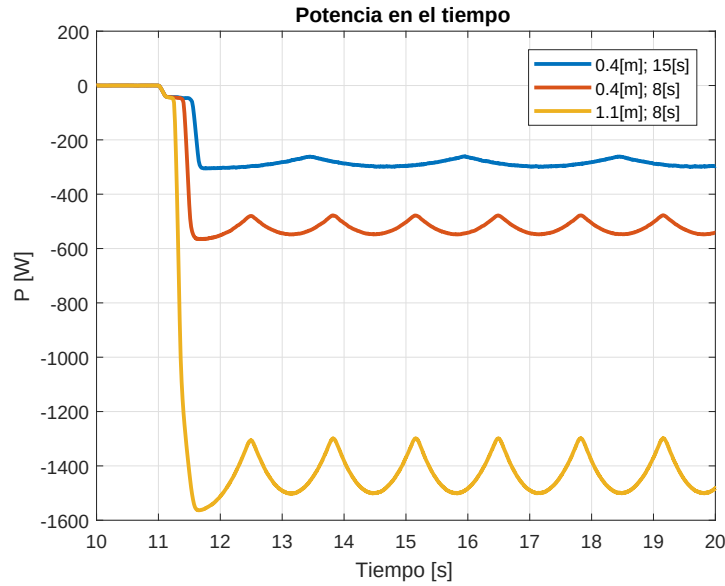


Figura 5.4: Potencia en el tiempo para 3 escenarios de olas. Valores negativos indican que la red absorbe energía desde el sistema de generación

con mayor frecuencia en el puerto (8 frecuencias de ola entre 7 y 15 [s] y 4 alturas de olas entre 0 y 1.2 [m]) y se multiplicó cada una de esas potencias para una altura i y un periodo j , P_{ij} , por un factor de ocurrencia de la ola i , f_{ij} , aplicando una sumatoria a todos estos valores y multiplicándolos por la cantidad de horas de un año t_{anual} , como se muestra en la siguiente expresión:

$$E_{anual} = t_{anual} * \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^8 P_{ij} f_{ij} \quad (5.1)$$

Los valores de f_{ij} se obtienen de la Tabla 3.1, mientras que la potencia y la energía para cada escenario se presentan en la Tabla 5.3 y 5.2 respectivamente.

$H_{mO}[m]$	$T_m[s]$							
	[7 – 8[	[8 – 9[	[9 – 10[	[10 – 11[	[11 – 12[	[12 – 13[	[13 – 14[	[14 – 15[
]0 – 0,3[	221	198	180	165	153	143	135	127
[0,3 – 0,6[	625	552	494	448	410	378	352	329
[0,6 – 0,9[	1039	915						
[0,9 – 1,2[	1594							

Tabla 5.2: Potencia, en [W], para distintos escenarios de olas.

$H_{mO}[m]$	$T_m[s]$							
	[7 – 8[	[8 – 9[	[9 – 10[	[10 – 11[	[11 – 12[	[12 – 13[	[13 – 14[	[14 – 15[
]0 – 0,3[	285	161	154	133	109	80	44	20
[0,3 – 0,6[	312	77	69	94	86	169	191	167
[0,6 – 0,9[	200	16						
[0,9 – 1,2[	154							

Tabla 5.3: Energía, en [kWh], generada anualmente para los escenarios de olas más frecuentes en el puerto de Valparaíso.

La energía anual estimada para este equipo corresponde a 2522,48[kWh] al año. Tomando en cuenta que corresponde a un equipo de potencia nominal de 1500[W], su factor de planta es de un 19,2 %. Con

un sistema de baterías, el equipo podría entregar continuamente un equivalente de 288[W] por cada unidad instalada.

5.2.2. Óptimo de potencia

Desde la Mecánica En si, la eficiencia del sistema de generación pasa principalmente por el dispositivo mecánico y las boyas. Si bien esta área del conocimiento se aleja del alcance de esta memoria, se hará una explicación resumida para entender como, desde el sistema eléctrico, es posible mejorar la extracción de potencia desde la ola.

En particular, según [Grüter (2016)], la absorción de energía desde la boya se puede modelar como la suma de la fuerza de excitación producida por la ola, las fuerzas hidrodinámicas sobre la boya y un amortiguamiento debido a la extracción de potencia desde un PTO. Sin embargo, los coeficientes que gobiernan la dinámica de la boya se ven modificados dependiendo de la fuerza que provoque el generador sobre la boya.

Para explicarlo con otras palabras, “absorber una ola, significa generar una ola”: el dispositivo debe generar olas que interfieran destructivamente con las olas del mar, lo que por la ley de conservación de la energía implicaría que la energía de la ola fue absorbida por el sistema de generación.

Es por esto que una manera de mejorar la extracción de potencia del sistema de generación es caracterizar el comportamiento de la boya a distintos niveles de torque aplicado al generador. Esto en el modelo sería equivalente a una fuerza que permitiría lograr un óptimo, variando los parámetros equivalentes del conjunto, produciendo una variación en la frecuencia de resonancia de la boya, punto en el cual se obtiene la mayor absorción de potencia.

Una propuesta de metodología puede ser similar a lo utilizado para caracterizar turbinas eólicas y la aplicación del MPPT. Se obtienen las curvas potencia-velocidad, a distintas velocidades de viento, y se registran los puntos de máxima potencia, a los cuales se ajusta la referencia de control para llegar a un valor cercano al óptimo. En este caso, las olas dependen de su periodo y más aún de su altura, por lo que una metodología similar generaría un plano de potencia óptima, considerando una boya adicional que realice mediciones que ayuden a predecir las olas incidentes y permitan obtener la referencia adecuada para el torque de la máquina.

Maximun Power Point Tracking (MPPT) Otra opción, para el caso particular del convertidor diseñado, es lograr variar la referencia de tensión en el enlace DC, de tal manera que permita una mejor extracción de potencia desde el MADIUN.

Una alternativa corresponde al Seguimiento de Máxima Potencia Puntual (MPPT, por su sigla en ingles), el cual ha sido utilizado en aplicaciones de generadores lineales y aerogeneradores. A través de un *tracker*, el controlador evalúa la magnitud de un parámetro determinado, y según el sentido de la variación de este parámetro, el controlador varía la referencia. Para el caso puntual del MADIUN, se evaluaría la potencia inyectada al sistema y se variaría la referencia del enlace DC.

Otra opción es la implementación de un rectificador controlado que permita tener un control sobre la máquina, con lo que se puede implementar un controlador que tome decisiones en función del estudio que se pueda realizar respecto a la absorción de energía por parte de la boya, implicando un mayor costo al proyecto por la mayor cantidad de componentes y mediciones que requeriría este tipo de montajes.

5.3. Corriente de salida del inversor

Para el sistema simulado, es posible analizar el contenido armónico de la corriente inyectada a la red para los 3 escenarios indicados al principio del documento. Como la corriente oscila tal como las olas, la amplitud de la señal es oscilatoria. Para estado estacionario, se analizan las corrientes cuando se encuentra en

su amplitud mayor y cuando se encuentra en su amplitud menor. Esto es posible visualizarlo en las Figuras 5.5, 5.6 y 5.7.

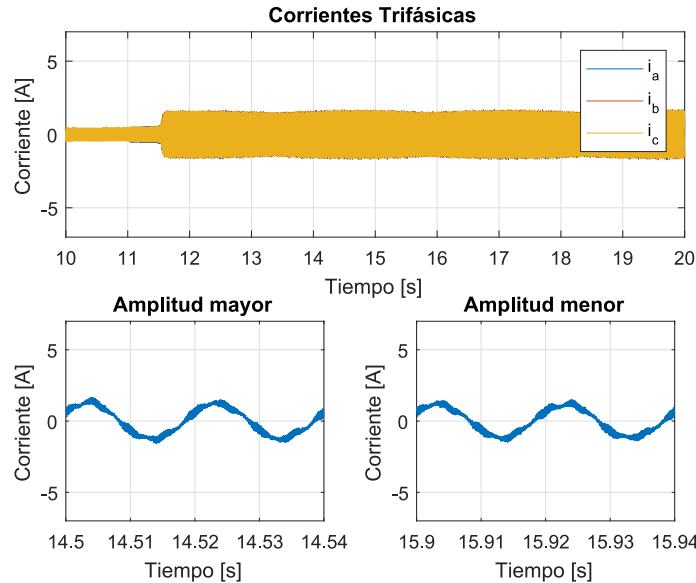


Figura 5.5: Corriente al sistema para olas de 0,4[m] de altura y 15[s] de periodo.

A mayor potencia de entrada, mayor es la magnitud de corriente y menor es el ruido en la señal de corriente. Esto está asociado al nivel de tensión en el enlace DC y la modulación producida por el control. La Tabla 5.4 indica los valores de la distorsión armónica total de la corriente en los distintos escenarios y niveles de corriente, donde el escenario de menor energía lleva a una distorsión armónica relevante (cercano al 12 %) mientras que los otros casos oscila entre un 9 % y un 2 %.

	THD		
	0,4[m] y 15[s]	0,4[m] y 8[s]	1,1[m] y 8[s]
Amplitud Mayor	0.091	0.051	0.019
Amplitud Menor	0.150	0.087	0.038

Tabla 5.4: Valores de THD.

5.3.1. Norma Técnica

En el caso de este dispositivo, la NTSyCS no puede ser evaluada directamente debido a que el nivel de potencia y el lugar de conexión del dispositivo queda fuera del alcance de dicha norma, ya que si bien plantea que regula las centrales generadoras de energía, también plantea que norma sin perjuicio de otra normativa que efectúe exigencias particulares, como lo es la Norma Técnica de Conexión y Operación de Equipamiento de Generación en Baja Tensión.

En términos de calidad de suministro, corresponde aplicar el Estandar Internacional IEC61000-3-2, que indica los límites para la emisión de armónicos de corriente para equipos con corrientes menores a 16[A] por fase y el Estandar Internacional IEC61000-3-3, el cual especifica las limitaciones de cambios de tensión, fluctuaciones de tensión y flicker en sistemas de suministro público de baja tensión, para equipos con tensión nominal menor o igual a 16[A] por fase.

Ambas normas piden escalas de tiempo sobre el minuto de pruebas para evaluar las variables, situación que no se evaluó debido a que, por la cantidad de información que maneja la simulación, no se pueden hacer simulaciones de más de 40 segundos. Sin embargo, se puede comparar para una ventana de tiempo

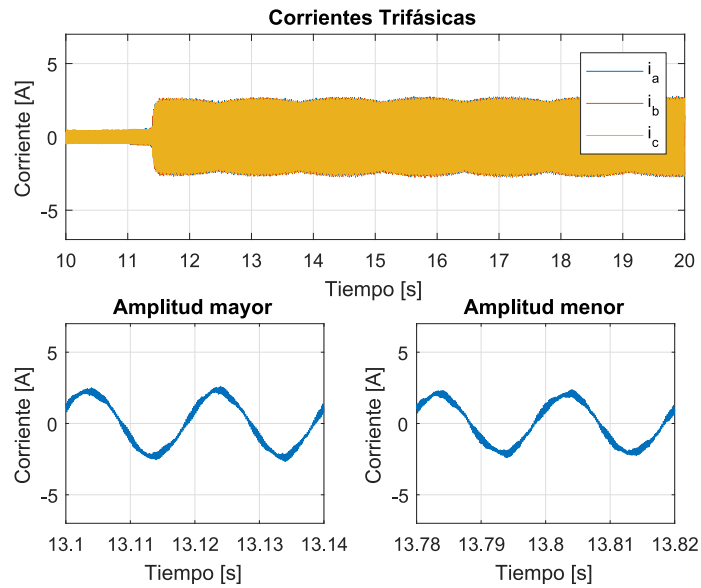


Figura 5.6: Corriente al sistema para olas de $0,4[m]$ de altura y $8[s]$ de periodo.

menor para las variables de corriente. Es así donde se puede verificar que el diseño propuesto cumple con el contenido armónico solicitado por la norma, ya que el THD no supera el 15% y las magnitudes de las componentes de Fourier de la corriente simulada no son mayores a los $50[mA]$ que muestra el escenario de olas agresivo en su séptima armónica.

Por parte del análisis de la tensión, no se puede realizar un mayor análisis debido a las escalas de tiempo que exige la norma y debido a que la simulación no consideró un modelo de la red local para analizar las perturbaciones que podría producir.

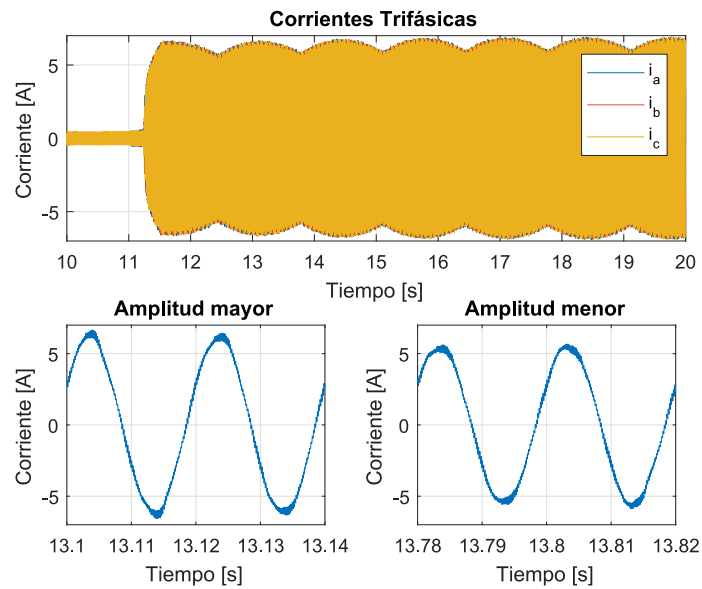


Figura 5.7: Corriente al sistema para olas de 1,1[m] de altura y 8[s] de periodo.

6 | Conclusiones

En trabajo se propone un accionamiento eléctrico que permite evacuar energía del dispositivo WEC denominado MADIUM, el cual extrae la energía de las olas por medio de un sistema de boyas. El esquema diseñado para evacuar la energía obtenida por el MADIUN consta de un generador de imanes permanentes, un rectificador pasivo (puente de diodos), un enlace DC (condensadores), un inversor (IGBT) y un filtro a la salida del convertidor. Este esquema de conexión ha sido estudiado ampliamente en la literatura y da respaldo a los resultados obtenidos en las simulaciones presentadas en el Capítulo 4, las cuales permiten tener un escenario de olas dado como dato de entrada y la potencia eléctrica inyectada al sistema como salida.

El sistema de control implementado en el inversor corresponde a un control orientado por tensión (VOC), el cual fue evaluado en la Sección 5.1, obteniendo un desempeño adecuado a los objetivos de este trabajo. A pesar de esto, cabe destacar que el sistema de control debe ser mejorado con el objetivo de mejorar la extracción de potencia desde la boya, ya sea manteniendo la estructura actual con variaciones en la referencia de tensión en el enlace DC o implementando un control de generación a un rectificador activo, lo cual entregaría mayor versatilidad al sistema.

Las consideraciones marítimas se basaron en los datos del puerto de Valparaíso y se simularon todos los escenarios de olas regulares, los cuales multiplicados por su frecuencia de ocurrencia, permiten obtener una estimación del factor de planta equivalente y la energía anual que podría proveer el dispositivo. Esto llevó a un promedio de potencia inyectada al sistema de 288[W]. El sistema de generación logra entregar valores de potencia máxima del orden de los kW si el escenario de olas es agresivo. Ello lleva a que se deba considerar un sistema de protecciones, mecánicas y eléctricas, para proteger el equipo y evitar daños.

El diseño lleva a que la norma que regula la conexión del MADIUN a la red corresponde a la Norma Técnica de Conexión y Operación de Equipamiento de Generación en Baja tensión. Se realiza una revisión de las características que debe tener el sistema, las consideraciones constructivas que requiere el equipo y se verifica que se cumple el contenido armónico exigido por la normativa, quedando para un trabajo futuro los estudios del nivel de cortocircuito y las variaciones en el nivel de tensión.

A partir de esta memoria, el principal trabajo a futuro lleva a implementar el diseño propuesto, construyendo un MADIUN con todos los componentes vistos en este trabajo y realizar pruebas que permitan validar experimentalmente el control propuesto y los componentes descritos. Además, es posible desarrollar el sistema de proyecciones y las características específicas del sistema de medición para el diseño propuesto.

Incentivar la investigación en el área de energía marina es un desafío importante a nivel de ingeniería, debido a que debe ser multidisciplinario, se debe buscar la manera en que estos equipos puedan aportar a los sistemas eléctricos y sean considerados como alternativa para las empresas, en un Chile donde el proceso de descarbonización y la búsqueda de medios de generación amigables con el medio ambiente pueden ser impulsos a tecnologías y, sobretodo, conocimientos que aporten a un desarrollo sustentable del país.

Bibliografía

(2017). PB3 Image. (document), 2.2

Acuña, Hugo y Monárdez, Patricio (2007). *Evaluación del potencial de la energía del oleaje en Chile*. 2.1.2

Ahmed, Tarek; Nishida, Katsumi; y Nakaoka, Mutsuo (2010). Grid power integration technologies for offshore ocean wave energy. *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, (pp. 2378–2385). 2.2.4, 2.2.4

Alcorn, Ray y O’Sullivan, Dara (2014). *Electrical Design for Ocean Wave and Tidal Energy Systems*. 2.1, 2.2.2, 2.7, 2.8, 2.9, 2.2.3, 2.10, E

Amon, E. a.; Brekken, T. K. a.; y Schacher, a. a. (2012). Maximum Power Point Tracking for Ocean Wave Energy Conversion. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 48(3), 1079–1086. 2.2.3

Amundarain, Modesto; Alberdi, Mikel; Garrido, Aitor J; y Garrido, Izaskun (2011). Modeling and Simulation of Wave Energy Generation Plants : Output Power Control. *IEEE transactions on in*, 58(1), 105–117. 2.2.2

Atlantis Resources (2018). Tidal Turbines | Installation & Procurment. 2.1

Benelghali, S.; Benbouzid, M. E. H.; y Charpentier, J. F. (2012). Generator Systems for Marine Current Turbine Applications: A Comparative Study. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 37(3), 554–563. 2.2.3

Boström, Cecilia; Member, Student; Waters, Rafael; Lejerskog, Erik; y Svensson, Olle (2009). Peer-Reviewed Technical Communication Study of a Wave Energy Converter Connected to a Nonlinear Load. 34(2), 123–127. 2.2.2

Bravo Moya, Nicolas Alberto (2008). *Sistema de conversión mecánica eléctrica para un generador undimotriz*. PhD thesis, Universidad de Chile. 2.2.1

Colak, Ilknur y Derya Kocabas, Ahmet (2016). Space vector modulation controlled three-level converter for ocean wave energy conversion. *2016 18th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*, (April), 1–5. 2.3

Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción (2017). Prototipo de Bío Bío se suma a la carrera por hacer rentable la energía undimotriz. 2.2.1

Drew, B.; Plummer, A. R.; y Sahinkaya, M. N. (2009). A review of wave energy converter technology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 223(8), 887–902. (document), 2.1, 2.1, 2.2.1, 2.2.1, 2.2.1

Eder, James y Edwards, Kathleen (2013). Empirical Demonstration of Acausal Control Strategies for Wave. *32nd international conference; Proceedings of the asme; ocean, offshore mechanics and arctic engineering conference*, (pp. 1–9). 2.2.3

EDF France (2018). Tidal Power. 2.1

EMEC (2009). Guidelines for Grid Connection of Marine Energy Conversion Systems. *EMEC (European Marine Energy Centre Ltd)*. 2.4

- Figuerroa, Sebastian (2016). *Estudio experimental para el análisis del funcionamiento y mejoramiento en el diseño del equipo undimotriz MADIUN*. PhD thesis, Universidad Técnica Federico Santa María. 2.2.1, 4.1
- Grüter, Laura (2016). *Experimental and Numerical Analysis of a Wave Energy Conversion Buoy*. PhD thesis, Technische Universität Berlin. 4.1, 5.2.2
- Hazra, Samir y Bhattacharya, Subhashish (2015). Electrical Machines for Power Generation in Oscillating Wave Energy Conversion System - A Comparative Study. *2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, (pp. 1538–1544). 2.2.2
- Hazra, Samir; Shrivastav, Ashish Sanjay; Gujarati, Akash; y Bhattacharya, Subhashish (2014). Dynamic emulation of oscillating wave energy converter. *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2014*, (pp. 1860–1865). 2.1
- Hong, Yue; Waters, Rafael; Boström, Cecilia; Eriksson, Mikael; Engström, Jens; y Leijon, Mats (2014). Review on electrical control strategies for wave energy converting systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 329–342. 2.1, 2.2.2
- Ivanqui, J.; Miranda, P. L K; Voltolini, H.; y Carlson, R. (2015). Control of a trapezoidal EMF PMSG under asymmetrical faults. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2015-Septe, 462–467. 4.2
- Jafarishiadeh, Seyyedmahdi; Farasat, Mehdi; y Mehraeen, Shahab (2017). Wave Energy Converter by Using HVDC line and Undersea Storage System. (pp. 5565–5571). 2.2.3
- Khan, N; Rabbi, S F; Hinchey, M J; y Rahman, M A (2013). An Adaptive Nonlinear MPPT Controller for Stand Alone Marine Current Energy Conversion Systems. (pp. 404–409). 2.1
- Medel, Sebastián Alejandro (2010). *Estudio de Implantación de tecnologías Mareomotrices y Undimotrices como Pequeños Medios de Generación Distribuida*. PhD thesis, Universidad de Chile. 2.1.2
- Mediavilla, Dernis (2016). *Energía undimotriz en Chile continental: zonas de generación del oleaje y predictibilidad*. 2.1.1, 2.1.2
- Mekhiche, Mike M y Edwards, Kathleen A (2014). A Renewable Energy Source for Powering Offshore Oil and Gas Applications. *Proceedings of the 19th Offshore Symposium, Texas Section of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, (February), 1–11. 2.2.1
- Mohan, Ned; Undeland, Tore M.; y Robbins, William P. (2007). *Power Electronics Converters, Applications, and Design*. 3.4
- Molinas, Marta; Skjervheim, Ottar; Andreassen, Pål; Undeland, Tore; Hals, Jørgen; Moan, Torgeir; y Sørby, Bernt (2007). Power electronics as grid interface for actively controlled wave energy converters. *2007 International Conference on Clean Electrical Power, ICCEP '07*, (pp. 188–195). 2.2.3
- Ocean Power Technologies (2018). PB3. 2.2.1
- Ogata, Katsuhiko (2018). *Ingeniería de Control Moderna*. Madrid: Pearson Educación, 5 edición. 4.4.2
- O'Sullivan, Dara y Dalton, G (2009). Challenges in the Grid Connection of Wave Energy Devices. *The 8th European Wave and Tidal Energy Conference*, (pp. 12–20). 2.2.2, 2.2.2, 2.2.4
- O'Sullivan, D; Mollaghan, D; Blavette, a; y Alcorn, R (2010). Dynamic characteristics of wave and tidal energy converters & a recommended structure for development of a generic model for grid connection. *A report prepared by HMRC-UCC for OES-IA under ANNEX III*, (July), 1–76. 2.2.2
- Park, Joon Sung; Kim, Jin-hong; Hyon, Byong Jo; Choi, Jun-hyuk; y Model, A Dynamic (2017). Analysis of Power Generation for Direct Wave Energy Converter. (pp. 714–717). 2.3
- Penalba, Markel y Ringwood, John V. (2016). A review of wave-to-wire models for wave energy converters. *Energies*, 9(7). 2.1

- Polinder, Henk; Damen, Michiel E C; y Gardner, Fred (2004). Linear PM generator system for wave energy conversion in the AWS. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19(3), 583–589. 2.2.2
- Ramirez, Dionisio; Bartolome, Juan Pablo; Martinez, Sergio; Herrero, Luis Carlos; y Blanco, Marcos (2015). Emulation of an OWC Ocean Energy Plant with PMSG and Irregular Wave Model. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 6(4), 1515–1523. 2.2.4, 2.3
- Rhinefrank, Ken; Schacher, Alphonse; Prudell, Joseph; Brekken, Ted K.A.; Stillinger, Chad; Yen, John Z.; Ernst, Steven G.; Von Jouanne, Annette; Amon, Ean; Paasch, Robert; Brown, Adam; y Yokochi, Alex (2012). Comparison of direct-drive power takeoff systems for ocean wave energy applications. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 37(1), 35–44. 2.2.1, 2.2.2
- Riquelme Medina, Pedro Alejandro (2011). Aparato para extraer energía desde las olas de un cuerpo de agua, que comprende una boya masiva, flotando en la superficie, un cable que se extiende hasta el fondo marino, una polea anclada que cambia la dirección del cable, un chasis, dos carretes, un co. 2.2.1
- Uihlein, Andreas y Magagna, Davide (2016). Wave and tidal current energy - A review of the current state of research beyond technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1070–1081. 2.1
- Universidad de Chile (2013). Explorador de Energía Marina. 2.1.1
- Universidad de Valparaíso (2016). Atlas de Oleaje de Chile. 2.1.1, 3.2, 3.1
- von Jouanne, Annette y Brekken, Ted K. A. (2017). Ocean and Geothermal Energy Systems. *Proceedings of the IEEE*, 105(11), 2147–2165. 2.1
- Wang, Li y Lin, Chun-yu (2017). Stability Analysis of a Microgrid System with Large- Scale Wind and Ocean Energy Farms Fed to a Power Grid through an HVDC Link. 9994(c). 2.2.4
- WaveHub (2018). Official Page. 2.2.4
- Zuo, Jie y Wang, Zhenshu (2016). Electrical Power Prediction Based on Oscillating Buoy Wave Energy Converter. (pp. 226–229). 2.3

A | Modelo matemático del prototipo MADIUN

$m[kg]$	178.0968	B	0.467
$D_{fs}[m]$	0.73	λ	1.825
$I[kg * m^2]$	0.2836	$m_a[kg]$	46.074
R_{CV}	15	b_{pot}	47.289
R_{GV}	1.8	$A_w[m^2]$	0.4185
$R_{CP}[m]$	0.2	c	4208.5
$m_{CP}[kg]$	100	$\alpha[kg]$	2095.2
$R_{tb}[m]$	0.2	$\beta[kg/s]$	11800
A	0.0678	$\gamma[kg/s^2]$	-4589.8

Tabla A.1: Valores de las variables para el modelo de la fuerza sobre el carrete

B | Control discreto y el Método de Tustin

La teoría de control plantea que un controlador diseñado para un sistema continuo puede ser escrito en términos discretos. Esto con el fin de implementar controles con lógica computacional y permitir la programación de controles sin necesidad de tener una gran cantidad de elementos electrónicos como lo pueden ser compuertas lógicas.

El Método de Tustin puede ser usado para transformar una función de transferencia lineal invariante en dominio continuo del tiempo $H_{cont}(s)$, en una función lineal invariante en el dominio discreto del tiempo $H_{disc}(z)$.

Esta transformación es posible gracias a una aproximación, en donde:

$$s \approx \frac{2}{T} \frac{z - 1}{z + 1} \quad (\text{B.1})$$

Evalutando la función, se tiene que:

$$H_{disc}(z) = H_{cont}\left(\frac{2}{T} \frac{z - 1}{z + 1}\right) \quad (\text{B.2})$$

Esto permite transformar el sistema (controles o plantas) del sistema continuo al discreto, pudiendo implementar este tipo de control.

C | Orientar tensiones: Phase Locked Loop

Los lazos de seguimiento de fase (o PLL por su nombre en ingles) permiten realizar un seguimiento de la frecuencia y el ángulo relativo de un sistema, que en este caso, permite la sincronía del inversor con la red.

El primer paso para la implementación del PLL es transformar las tensiones trifásicas de línea a ejes coordenados ortogonales a través de la transformación de Clarke:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha(t) \\ v_\beta(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_a(t) \\ (v_c(t) - v_b(t))/\sqrt{3} \end{bmatrix}$$

Para orientar las coordenadas ortogonales, se debe imponer un ángulo para orientar las referencias con las tensiones reales de la red. El ángulo θ posee una ecuación de la forma:

$$\theta = \int \omega(t) dt \quad (C.1)$$

Su forma equivalente, expresada en términos de la transformada de Laplace, corresponde a:

$$\theta = \frac{1}{s} \omega \quad (C.2)$$

La transformada de Park permite utilizar este ángulo para orientar el sistema ortogonal al ángulo de interés:

$$\begin{bmatrix} v_d(t) \\ v_q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha(t) \\ v_\beta(t) \end{bmatrix}$$

Llevando al siguiente desarrollo el vector de tensión del sistema:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_s &= v_\alpha + jv_\beta \\ &= v_\alpha \cos(\theta) + v_\beta \sin(\theta) + j(v_\beta \cos(\theta) - v_\alpha \sin(\theta)) \\ &= v_d + jv_q \end{aligned}$$

Se espera que la tensión en el eje de cuadratura v_q sea igual a cero para orientar el campo. Con esto, es posible encontrar la expresión para normalizar la magnitud de la tensión v_q :

$$\frac{v_q}{|V_s|} = \frac{v_\beta \cos(\theta) - v_\alpha \sin(\theta)}{\sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2}}$$

Considerando la tensión v_β con valor cero y θ con un valor muy pequeño, es posible aproximar la ecuación anterior como:

$$\frac{v_q}{|V_s|} \simeq \theta \quad (C.3)$$

Estas aproximaciones permiten afirmar que es posible, a través de una referencia en v_q , obtener el ángulo del vector espacial de tensión.

Para efectos de esta memoria, el PLL implementado fue realizado en un bloque “*C-Script*”, en el cual se programó el control discreto para obtener el ángulo del vector de tensión. Se utilizó el método de Tustin para transformar el sistema en tiempo continuo a tiempo discreto.

D | Modelo del convertidor de potencia

Para la conexión al sistema, se debe orientar la tensión de la red $\mathbf{V}_s$, obteniendo el ángulo θ con el cual se logra sincronizar la tensión del convertidor $\mathbf{V}_C$ e inyecta la corriente $\mathbf{I}_s$ al sistema, la cual pasa por el filtro ubicado entre la red y el convertidor.

Así, es posible escribir las ecuaciones del sistema en su expresión temporal como:

$$\begin{aligned} v_{Ca}(t) &= R_f i_a(t) + L_f \frac{di_a}{dt} + v_a(t) \\ v_{Cb}(t) &= R_f i_b(t) + L_f \frac{di_b}{dt} + v_b(t) \\ v_{Cc}(t) &= R_f i_c(t) + L_f \frac{di_c}{dt} + v_c(t) \end{aligned} \quad (D.1)$$

Reescribiendo esto en términos de fasores espaciales, la expresión queda como

$$\mathbf{V}_C = R_f \mathbf{I}_s + L_f \frac{d\mathbf{I}_s}{dt} + \mathbf{V}_s \quad (D.2)$$

Con:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_C &= \frac{2}{3} [v_{Ca} + v_{Cb} e^{j\frac{2\pi}{3}} + v_{Cc} e^{-j\frac{2\pi}{3}}] = V_C e^{j\omega t} \\ \mathbf{V}_s &= \frac{2}{3} [v_a + v_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + v_c e^{-j\frac{2\pi}{3}}] = V e^{j\omega t + \gamma} \\ \mathbf{I}_s &= \frac{2}{3} [i_a + i_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + i_c e^{-j\frac{2\pi}{3}}] = I e^{j\omega t + \phi} \end{aligned}$$

Considerando una red en la cual existe una tensión y frecuencia constantes, es posible asumir que el ángulo θ con el cual se orientará el sistema posee una frecuencia angular ω fija y un desfase θ_g determinado:

$$\theta = \omega t + \theta_g$$

reescribiendo la expresión D.2 como:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{Cg} &= \mathbf{V}_C e^{j(\omega t + \theta_g)} \\ &= R_f \mathbf{I}_{sg} + j\omega L_f \mathbf{I}_{sg} + L_f \frac{d\mathbf{I}_{sg}}{dt} + \mathbf{V}_s \end{aligned}$$

De aquí, es posible descomponer en los ejes directo y de cuadratura:

$$v_{Cd} = R_f i_{sd} - \omega L_f i_{sq} + L_f \frac{di_{sd}}{dt} + v_{sd} \quad (D.3)$$

$$v_{Cq} = R_f i_{sq} + \omega L_f i_{sd} + L_f \frac{di_{sq}}{dt} + v_{sq} \quad (D.4)$$

Esquemáticamente, el sistema escrito en diagramas de bloque queda expresado como lo muestra la Figura D.1.

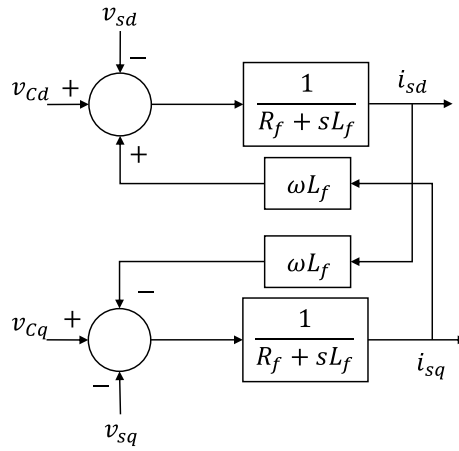


Figura D.1: Modelo matemático en diagrama de bloques del convertidor, conectado a la red eléctrica.

E | Modelo del Enlace DC

En términos de control, el objetivo es lograr evacuar la energía obtenida de las olas a la red. Para esto, se evalúan 3 componentes:

- La energía acumulada en el condensador, la cual depende de la capacidad del condensador C_{dc} y la tensión en el condensador v_{dc} .
- La energía proporcionada por el generador P_{gen} , dependiente del comportamiento de las olas.
- La energía evacuada a la red, la cual depende de la tensión de la red $\mathbf{V}_s$ y la corriente que va hacia la red $\mathbf{I}_s$.

Esta expresión no considera las pérdidas ni en el enlace DC ni en el convertidor para simplicidad del modelo. Con esto, es posible desarrollar la función en términos de potencia:

$$\begin{aligned} v_{dc}C \frac{dv_{dc}}{dt} &= P_{gen} - \mathcal{R}\{\mathbf{V}_s \mathbf{I}_s^*\} \\ v_{dc}C \frac{dv_{dc}}{dt} &= P_{gen} - v_{sd}i_{sd} - v_{sq}i_{sq} \end{aligned}$$

Considerando que el sistema se encuentra orientado y la referencia de tensión de cuadratura es cero, es posible reescribir la expresión linealizada como lo presenta [Alcorn y O'Sullivan \(2014\)](#) en la sección 2.6.3.1, aplicando el teorema de la derivada de la multiplicación:

$$\begin{aligned} v_{dc}C \frac{dv_{dc}}{dt} &= P_{gen} - v_{sd}i_{sd} \\ \frac{1}{2}C \frac{dv_{dc} * v_{dc} + v_{dc} * dv_{dc}}{dt} &= P_{gen} - v_{sd}i_{sd} \\ \frac{1}{2}C \frac{dv_{dc}^2}{dt} &= P_{gen} - v_{sd}i_{sd} \end{aligned} \tag{E.1}$$

La expresión se reescribe convenientemente para poder obtener la expresión de la planta del enlace DC:

$$G_v(s) = \frac{2v_{sd}}{Cs} \tag{E.2}$$