UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA

SANTIAGO-CHILE

"DESARROLLO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ"

MARCELO ORTIZ GONZALEZ

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: DR. ING. DANILO ESTAY

PROFESOR CO-REFERENTE: DR. ING. SHEILA LASCANO

JUNIO 2016

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a la vida, personas, situaciones y oportunidades que me han llevado a crecer enormemente en diferentes aspectos.

"El trabajo es la respuesta a toda interrogante".

Resumen

En la actualidad la energía undimotriz representa un desafío ante la necesidad energética del mundo. Existen innumerables prototipos e incluso modelos comerciales que dicen poder manejar las dificultades propuestas por el mar, y obtener energía eléctrica. Pero la implementación de estos proyectos ha evidenciado que la energía undimotriz no es un recurso fácil de manipular, mareas, marejadas, ambiente corrosivo, transporte de la energía generada, son algunas de las contrariedades que ofrece este recurso, aun así, la inventiva e iniciativa de algunos permite trabajar y enfrentar estas adversidades, con un objetivo claro, aprovechar el potencial undimotriz. El presente trabajo de titulación tiene por objetivo la estimación la potencia disponible en el sitio de instalación, dimensionamiento de elementos mecánicos, fabricación del prototipo e instalación para llegar finalmente al análisis de los resultados obtenidos.

Abstract

At present wave energy represents a challenge to the world's energy needs. There are countless prototypes and even business models that say they can handle the challenges proposed by the sea, and get electricity. But the implementation of these projects has shown that the wave energy is not easy to manipulate resources, tides, waves, corrosive environment, transport of energy generated, are some of the setbacks that offers this resource, yet the inventiveness and initiative some allowed to work and face these adversities, with a clear objective, seize the wave potential. This memory titration aims degree estimating the power available at the site of installation, sizing of mechanical elements, manufacturing and installation of the prototype and finally to the analysis of the results.

Índice General

Resumen III
Abstract III
Índice General IV
Índice de Figuras VI
Índice de Tablas VIII
Introducción 1
Objetivos propuestos 2
1. Capítulo 1: Estado del Arte y Marco Teórico 3
1.1 Estado del arte 3
1.1.1 Energía Mareomotriz 3
1.1.2 Energía mareotérmica 4
1.1.3 Conversión de gradiente salino 5
1.1.4 Corrientes marinas 7
1.1.5 Energía Undimotriz 8
1.1.6 Tecnologías para el aprovechamiento de la energía undimotriz 9
1.1.7 Proyectos de energía undimotriz en el mundo 10
1.1.8 Patentes 14
1.1.9 Invención en desarrollo 19
1.1.10 Aplicación particular 23
1.2 Marco teórico 24
1.2.1 Descripción estadística del oleaje 24
1.2.2 Definición de ola individual 25
1.2.3 Alturas y periodos característicos de las olas 27
1.2.4 Distribución de alturas de olas individuales 28
1.2.5 Distribución del periodo de la ola 30
1.2.6 Distribución conjunta de altura de olas y periodos 31
1.2.7 Relación de altura y periodo característico 32
1.2.8 Estimación de potencia disponible en el oleaje 33
1.2.9 Teoría simplificada 34
1.2.10 Fenómenos costeros 35

2. Capítulo 2: Estimación de Potencia Undimotriz 38
2.1 Energía undimotriz un recurso global 38
2.1.1 Metodología para la estimación de potencia 39
2.1.2 Oleaje en aguas profundas 40
2.1.3 Reconstrucción y transferencia del espectro 41
2.1.4 Matriz de transformación 44
2.2 Caracterización del punto de estudio 45
2.2.1 Identificación del lugar 45
2.2.2 Sobre la instalación del equipo 47
2.3 Caracterización de la potencia undimotriz 48
2.3.1 Parámetros del oleaje 48
2.3.2 Potencia media 51
3. Capítulo 3: Prototipo en Desarrollo 53
3.1 Presentación del prototipo 53
3.2 Resultados 59
3.2.1 Consideraciones sobre los materiales 59
3.2.2 Condiciones estándares de operación del sistema (CEO) 59
3.2.3 Parámetros calculados 64
3.2.4 Componentes seleccionados 64
4. Capítulo 4: Resultados y Análisis 70
4.1 Sistema de medición 70
4.1.1 Encoder incremental 71
4.1.2 Sensor de corriente ACS 712 74
4.1.3 Sensor de tensión de generador 75
4.1.4 Sensor de tensión de las baterías 76
4.2 Resultados obtenidos 76
4.3 Análisis 81
4.3.1 Sobre la instalación 81
4.3.2 Sobre el sistema de medición 82
4.3.3 Sobre los resultados 83
Conclusiones 86

Líneas Futuras 88
Referencias 90
Anexos 92
Anexo A: Memorias de cálculo 92
Memoria de cálculo Eje de inercia 92
Memoria de cálculo Eje de transmisión 96
Memoria de cálculo del ejeprincipal 101
Memoria de cálculo del eje guía de boyas 107
Memoria de cálculo del eje guía de contrapesos 110
Memoria de cálculo del volante de inercia 113
Anexo B: Ficha técnica del generador 117
Anexo C: Ficha técnica rodamientos trinquete 119

Índice de Figuras

Figura 1.1 Posición relativa de la luna respecto a la tierra [1] 4
Figura 1.2 Esquema conceptual de una central mareotérmica [2] 4
Figura 1.3 Esquema de la ganancia energética por PRO [3] 6
Figura 1.4 Esquema de una planta de generación eléctrica mediante PRO [4] 6
Figura 1.5 Diagrama de molinos para corrientes marinas [5] 7
Figura 1.6 Esquema representativo de la composición espectral del oleaje [6] 8
Figura 1.7 OPT PowerBuoy fotografía del equipo en superficie [8] 11
Figura 1.8 Rompeolas donde está instaladas las turbinas de generación [9] 11
Figura 1.9 Equipo Pelamis y esquema conceptual de su funcionamiento [10] 12
Figura 1.10 Fotografía del equipo Arquímedes Wave Swing [11] 13
Figura 1.11 Fotografía del equipo Wave Dragon [12] 14
Figura 1.12 Esquema referencial de la invención [13] 19
Figura 1.13 Esquema etapa A [13] 20
Figura 1.14 Esquema etapa B [13] 21
Figura 1.15 Esquema etapa C [13] 22

Figura 1.16 Lógica de conversión para la invención en estudio 23
Figura 1.17 Muestreo de alturas e identificación de cruces por cero [14] 25
Figura 1.18 Identificación de ondas individuales [14] 26
Figura 1.19 Histograma de altura de la ola y periodo [6] 29
Figura 1.20 Histograma normalizado y densidad de probabilidad de Rayleigh [6].... 29
Figura 1.21 Gráfico de dispersión de datos conjuntos de altura y periodo [14] 31
Figura 1.22 Espectro de la varianza en función de la frecuencia pico [6] 32
Figura 1.23 Curvas Iso - potencias según teoría simplificada 34
Figura 1.24 Efecto del shoaling en la distribución del espectro del oleaje [14] 36
Figura 1.25 Diagrama referencia de difracción en un rompeolas [6] 36
Figura 1.26 Diagrama de refracción para frentes regulares de olas [14] 37
Figura 2.1 Densidad global del potencial undimotriz [15] 39
Figura 2.2 Metodología para el cálculo de potencia disponible [15] 39
Figura 2.3 Diagrama predictivo de Hmo para 3 puntos en costas del pacífico [16] ... 40
Figura 2.4 Resumen del método de reconstrucción espectral propuesto [17]..... 43
Figura 2.5 Matriz de conversión de potencia Para el equipo Aqua Buoy [8] 44
Figura 2.6 Posición geográfica del prototipo en desarrollo [18]..... 45
Figura 2.7 Pronóstico de marejadas SHOA próximas al sitio de instalación [19]..... 46
Figura 2.8 Diagrama referencial para la instalación del prototipo..... 47
Figura 2.9 Altura significativa de las olas para los climas seleccionados [17]..... 49
Figura 2.10 Período peack para los climas seleccionados [17]..... 50
Figura 2.11 Comparación de resultados entre SWAN y las mediciones ADCP [17] . 51
Figura 2.12 Referencia del espectro significativo esperado en la zona de interés..... 52
Figura 3.1 Vista de la parte no sumergida del prototipo 53
Figura 3.2 Vista de la parte sumergida del prototipo 54
Figura 3.3 Esquema de generación en base a un impulso dado por el oleaje 54
Figura 3.4 Curva desempeño del generador (Anexo A) 60
Figura 3.5 Curva de torque del generador (Anexo A) 60
Figura 3.6 Curvas de potencia estimadas según modelo..... 62
Figura 3.7 Vista lateral y dimensionada del prototipo 63

Figura 4.1 Encoder incremental usado para la medición [22] 71
Figura 4.2 Arduino UNO con tarjeta Logger Shield [22] 72
Figura 4.3 Encoder para la medición del desplazamiento de las eslingas 72
Figura 4.4 Fotografía de la instalación de los encoder..... 73
Figura 4.5 Plataforma online de captura de datos y monitoreo visual 73
Figura 4.6 Sensor de corriente modelo ACS 712 [22] 74
Figura 4.7 Diagrama de conexionado del sensor ACS 712 [23]..... 75
Figura 4.8 Arreglo de resistencias para la medición de tensión..... 75
Figura 4.9 Arreglo de resistencias para medir tensión en banco de baterías 76
Figura 4.10 Desplazamiento de las tres eslingas durante la mañana de 1 de Mayo ... 77
Figura 4.11 Generación eléctrica y rpm para el prototipo según figura 4.10..... 77
Figura 4.12 Generación eléctrica y rpm del generador para el día 27/07/2015 78
Figura 4.13 Generación eléctrica y rpm del generador para el día 28/07/2015 79
Figura 4.14 Generación eléctrica y rpm del generador para el día 05/08/2015 80
Figura 4.15 Generación eléctrica y rpm para el día 05/08/2015 con cortocircuito..... 80
Figura 4.16 Fotografía al lugar de instalación del prototipo..... 82
Figura 4.17 Arreglo de los gráficos obtenidos en la lectura del día 1 de Mayo..... 84
Figura 4.18 Aceleración del generador y desplazamiento de eslingas..... 85

Índice de Tablas

Tabla 1.1 Mecanismos de explotación para la energía undimotriz [7] 9
Tabla 2.1 Mareas correspondientes al punto de instalación [19]..... 46
Tabla 3.1 Descripción y vistas de subconjuntos del prototipo..... 55
Tabla 3.2 Desagregación de subconjuntos y componentes..... 57
Tabla 3.3 Componentes de transmisión de potencia y eficiencias..... 61
Tabla 3.4 Parámetros calculados para los ejes de acuerdo a las CEO 64

Introducción

El basto océano que baña las costas de los 5 continentes hace la función de contenedor, tanto de vida para toda la flora y fauna marina como para la energía gravitacional y solar que afecta sobre planeta. Si se toma en cuenta que la proporción de océano versus tierra firme corresponde a unas tres cuartas partes del total, no cabe duda que puede ser una importante fuente de energía. De ahí la necesidad de identificar cuáles son las manifestaciones de esta energía en el lecho marino, tal de encontrar el método más idóneo para su aprovechamiento. El presente trabajo de titulación está dentro del desarrollo de un proyecto de investigación por parte de la empresa Maestranza Diesel S.A. el cual pretende precisamente aprovechar la energía undimotriz disponible en las costas. El concepto que desarrolla este prototipo está basado en una patente de invención que lo describe.

A partir de esta patente se decide construir un primer prototipo de 1.5 kW. Sin embargo, en este primer intento se llegó a la conclusión que existía una brecha de conocimiento entre el diseño y el comportamiento de la energía undimotriz. Es por ello que este trabajo plantea el relacionar las variables de la energía undimotriz con las características de la patente, es decir, relacionar potencia disponible con la ola que el prototipo debe soportar o al tamaño de la boya, al diámetro de los ejes y/o los desplazamientos que los componentes móviles del prototipo deben tolerar. Una primera lectura es que hay un trabajo que hacer en cuanto a entender mejor la naturaleza de la energía undimotriz, cómo se puede cuantificar, cuáles son sus parámetros característicos, definir alguna manera de estimarla. Una segunda lectura muestra que hace falta un modelo mecánico para el prototipo, que pueda relacionar variables como la potencia disponible y las características que deba tener el prototipo para poder aprovecharla y a la vez soportar las solicitaciones. Tal de más adelante poder escalar el prototipo potencias mayores usando estos modelos.

Objetivos propuestos

El objetivo general de este trabajo es realizar el dimensionamiento prototipo undimotriz en base al diseño básico, realizado anteriormente por el equipo de Maestranza Diesel, a partir del sistema de conversión detallado en la patente de invención N° 47152.

A partir de los objetivos descritos a continuación, se pretende llevar a cabo el dimensionamiento de los componentes mecánicos y eléctricos del prototipo, para su posterior fabricación y prueba.

1. Estimar de potencia marina disponible en función del oleaje.
2. Definir las condiciones de sitio para la instalación del equipo.
3. Dimensionar componentes mecánicos y eléctricos del equipo.
4. Construir el prototipo y realizar pruebas de laboratorio.

Capítulo 1: Estado del Arte y Marco Teórico

En el presente capítulo se desarrolla el marco conceptual de este trabajo, donde se describen las diferentes formas de energía existentes en el océano, haciendo énfasis en la energía undimotriz. Finalmente, se describe la teoría para la estimación de potencia undimotriz, valores característicos y teoría simplificada.

1.1 Estado del arte

En función de lo descrito en las palabras introductorias se presentan a continuación una descripción general de algunos tipos de energías presentes en el océano.

1.1.1 Energía Mareomotriz

La energía mareomotriz es la proveniente de las mareas altas y bajas que generan la variación de energía potencial del agua debido a la variación en la cota marina. Las diferencias de alturas van por lo general entre los 0.5 y 3 metros, aun así hay casos más extremos como Francia con 12 metros y Canadá con 15 metros, también hay registros de 8 metros en costas chilenas en la región de Puerto Montt. En cuanto a su frecuencia, en la costa de chile diariamente se cuenta con dos mareas altas y dos mareas bajas, lo cual no es una generalidad, por ejemplo en el sur del mar de China solo hay una marea por día, esta diferencia se debe a la causa que genera dicha marea. Entre las causas que generan las mareas se pueden identificar las diferencias en las fuerzas gravitacionales resultantes del cambio de posición de la luna respecto a la tierra (ver Figura 1.1), que afectan directamente a la fuerza del gradiente de presión de la superficie del agua [1].

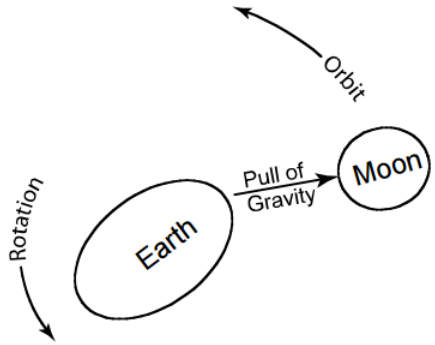


Figura 1.1 Posición relativa de la luna respecto a la tierra [1]

1.1.2 Energía mareotérmica

La principal energía que alimenta al planeta es la energía solar, la cual es en parte absorbida y en parte reflejada por la atmósfera. La gran porción de agua que compone este planeta hace que la fracción de energía absorbida se estabilice y distribuya de forma regular.

La fracción absorbida por la masa oceánica penetra en ella hasta 1000 metros de profundidad. Al combinar esta característica con el alto valor del calor específico del agua, hacen del océano un gran colector solar que equilibra el planeta de los bruscos cambios climáticos.

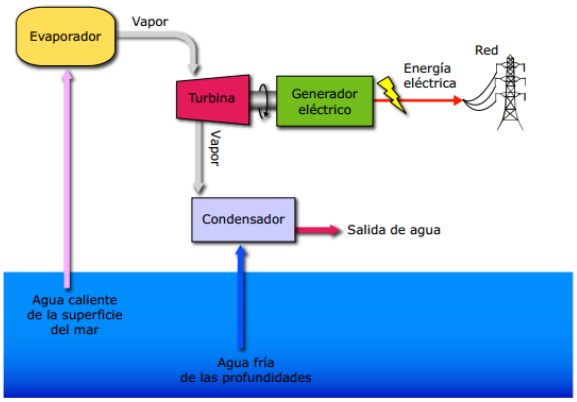


Figura 1.2 Esquema conceptual de una central mareotérmica [2]

La profundidad que alcanza la energía calórica depende de la turbidez del agua, ya que a menor turbidez mayor penetración y viceversa. En función de esto se observa una primera capa de temperatura relativamente uniforme los primeros 200 metros. Luego de esta zona aparece la llamada termoclina la cual se define como una zona de transición en donde hay un descenso importante en la temperatura del agua hasta aproximadamente los 400 metros y luego de esto las temperaturas se acercan a los 4 °C descendiendo de manera gradual pero con menor intensidad.

Dado lo anterior es posible identificar dos capas térmicas en la masa oceánica con diferencias de temperaturas entre 10 y 25°C. Es este gradiente el que entrega el potencial energético disponible. Un ejemplo conceptual para el aprovechamiento de esta energía se grafica en la Figura 1.2. Este corresponde a un sistema de ciclo abierto, en el que el agua de mayor temperatura se bombea a una cámara presurizada a la presión de evaporación. El vapor generado en la operación pasa a una turbina, para luego ser condensado en un intercambiador en donde el circuito de baja temperatura es alimentado por el agua marina de profundidades. El proceso genera como subproducto agua desalinizada, dada por el vapor condensado.

1.1.3 Conversión de gradiente salino

La energía de gradiente salino está basada en el principio de osmosis. Esta consiste en el traspaso de agua de una cámara a otra por medio de una membrana semipermeable. El flujo de agua se genera por la diferencia de concentración salina entre las cámaras. El resultado del traspaso volumétrico de agua de una cámara a otra, genera un aumento de presión, según muestra la Figura 1.3.

La presión generada por el proceso de osmosis tiene variadas alternativas de uso, la más utilizada es la presión osmótica retardada o PRO (pressure retarded osmotic),

debido a que presenta la mejor eficiencia respecto a la utilización de este tipo de energía.

El proceso realizado se describe en la Figura 1.4. La parte central del diagrama indica el traspaso volumétrico entre cámaras con las flechas diagonales. La transferencia varía entre un 80 y 90% del agua desde la cámara de menor concentración hacia la cámara de mayor concentración salina, dicho movimiento es el responsable del aumento de caudal y presión en esta cámara. Esto se aprovecha para el funcionamiento de una turbina y posterior generador eléctrico.

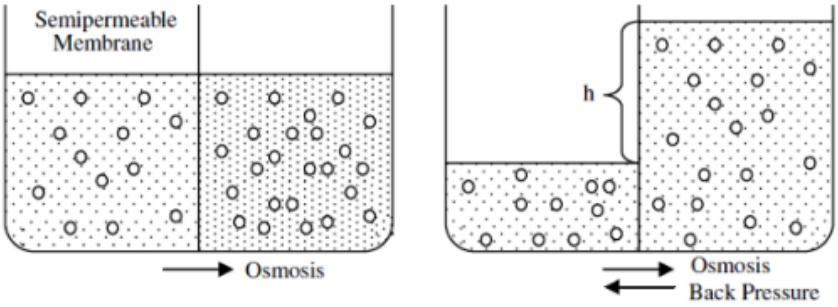


Figura 1.3 Esquema de la ganancia energética por PRO [3]

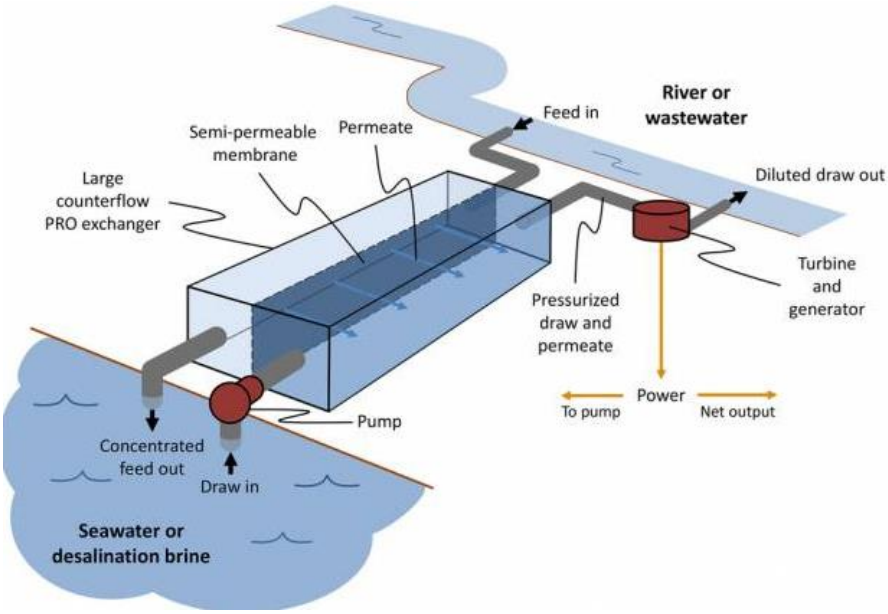


Figura 1.4 Esquema de una planta de generación eléctrica mediante PRO [4]

1.1.4 Corrientes marinas

El océano, como ya se ha descrito anteriormente, es un gran acumulador de la energía solar y gravitacional. Las corrientes marinas son originadas por diferentes causas tales como los desplazamientos de grandes volúmenes de agua, producto de las mareas, así como también los movimientos causados por la aceleración de coriolis por el movimiento conjunto de rotación y traslación realizada por la tierra, entre otros. En adición a lo anterior se encuentran los movimientos de agua debido a la existencia de gradientes salinos y térmicos. Dichos sucesos dotan al agua de un gran potencial cinético, y con una importante característica, predictibilidad. El aprovechamiento de esta energía cuenta con un método similar al eólico (ver Figura 1.5) en donde se utilizan molinos sumergidos.

Figura 1.5 Diagrama de molinos para corrientes marinas [5]

1.1.5 Energía Undimotriz

Como gran parte de las energías marinas, la undimotriz o energía de las olas es un derivado terciario de la energía solar. La radiación solar transferida a la atmósfera genera un aumento en la temperatura de las masas de aire, se produce su desplazamiento que conocemos como vientos. Estos vientos a su vez transmiten por rozamiento a la superficie oceánica parte de su energía cinética, generando oleaje.

Los trenes de olas funcionan como acumuladores de energía que se desplazan a través del océano, en diferentes direcciones según su foco de origen. Siendo el oleaje observado en las costas es una composición de ondas provenientes de diferentes focos (ver Figura 1.6).

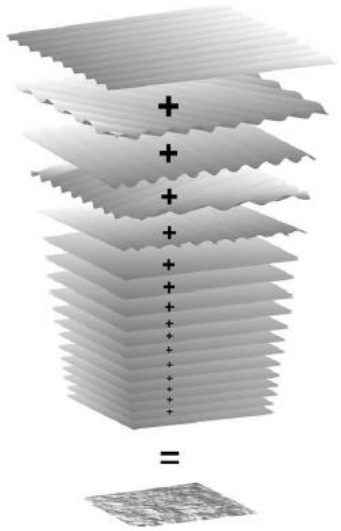


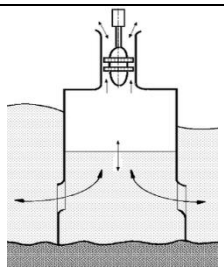
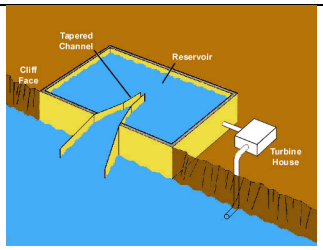
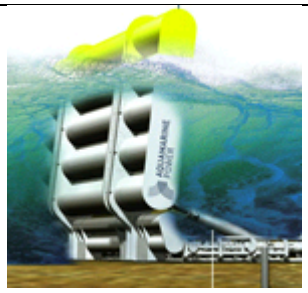
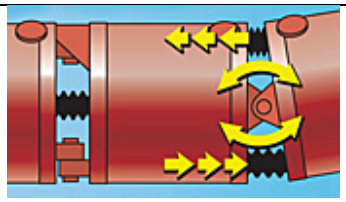
Figura 1.6 Esquema representativo de la composición espectral del oleaje [6]

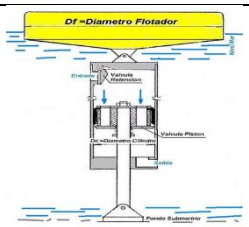
A continuación se estudiará en detalle la energía undimotriz, por ser el tema principal de este trabajo de título, su descripción teórica y diferentes mecanismos para su aprovechamiento, así como también las características y lógica de funcionamiento del prototipo en desarrollo.

1.1.6 Tecnologías para el aprovechamiento de la energía undimotriz

La energía undimotriz, al igual que la energía solar, eólica y otros tipos de Energías renovables no convencionales (ERNC), cuenta con diferentes mecanismos para su explotación, a continuación se presentan en la Tabla 1.1 algunos de estos:

Tabla 1.1 Mecanismos de explotación para la energía undimotriz [7]

Tipo	Descripción	Diagrama
Columna de agua oscilante	Oscilación del agua dentro de una cámara semi sumergida y abierta por debajo del nivel del mar. Se produce un cambio de presión del aire por encima del agua.	
Sistemas totalizadores	Pueden ser flotantes o fijos a la orilla. Atrapan la ola incidente, almacenando el agua en una presa elevada.	
Sistemas basculantes	Pueden ser tanto flotantes como sumergidos. El movimiento de balanceo se convierte a través de un sistema hidráulico o mecánico en movimiento lineal o rotacional para el generador eléctrico.	
Sistemas hidráulicos	Sistemas de flotadores conectados entre sí. El movimiento relativo entre flotadores se emplea para bombear a través de motores hidráulicos.	

Tipo	Descripción	Diagrama
Sistemas de bombeo	Aprovechan el movimiento vertical del agua mediante un flotador en la superficie conectado a un sistema de bombeo de tipo axial.	

1.1.7 Proyectos de energía undimotriz en el mundo

Como antecedente dentro del estudio de este tipo de energía, se encuentran los diferentes proyectos desarrollado a nivel mundial. A continuación se presenta una muestra de estos.

1.1.7.1 Multinacional – OPT PowerBuoy

Los proyectos OPTPowerBuoy para el aprovechamiento de la energía de las olas, se localizan en las costas de Norte América, Europa, Japón y Australia. Es un mecanismo de tipo puntual, que consta de una boya oscilante para la generación de energía eléctrica. A la fecha la compañía suministra boyas generadoras comerciales en dos formatos, 350 W y 15kW de alimentación continua, siempre sujeto a la potencia disponible en el punto de operación. La Figura 1.7 muestra una fotografía del equipo.

Figura 1.7 OPT PowerBuoy fotografía del equipo en superficie [8]

1.1.7.2 Mutriku wave power plant

La central undimotriz está ubicada en el dique exterior del puerto de Mutriku, País Vasco, su construcción comienza el año 2006 [9]. Se basa en la metodología de columna de agua oscilante (ver Figura 1.8). Tiene implementadas 16 turbinas con una potencia total de 296 kW. Esta es primera planta comercial de energía undimotriz a nivel mundial.

Figura 1.8 Rompeolas donde está instaladas las turbinas de generación [9]

1.1.7.3 Pelamis

El proyecto Pelamis está dentro de la metodología de transformación de los sistemas hidráulicos. Consiste en una serie de secciones cilíndricas que se encuentran parcialmente sumergidas y unidas por bisagras como lo muestra la Figura 1.9. La ola induce un movimiento relativo entre dichas secciones, activando un sistema hidráulico interior que bombea aceite a alta presión a través de un sistema de motores hidráulicos, equilibrando las variaciones con acumuladores.

El año 2010 la compañía entrega a la empresa E.ON un equipo de 750kW a modo de prueba. Finalmente y luego de 3 años [10] la empresa devuelve el equipo dando un paso al lado en la participación de las energías renovables no convencionales marinas.

Figura 1.9 Equipo Pelamis y esquema conceptual de su funcionamiento [10]

1.1.7.4 Arquímedes Wave Swing

Proyecto instalado en las costas de Orkney, Escocia, consiste en una boya seccionada a la mitad, sumergida bajo el agua entre los 50 y 90 metros de profundidad, entre las secciones de la boya se encuentra una cámara de aire que se comprime y descomprime al aumentar y disminuir la columna de agua sobre ella. Esta energía se transforma en energía eléctrica aprovechando el movimiento oscilatorio a través de generadores

lineales de imanes permanentes (ver Figura 1.10). La energía generada se transmite a la superficie por cables submarinos. El proyecto se expone el 2010 [11] a modo de presentación con un equipo de 250 kW y desde el año 2011 se comienza con la comercialización del mismo.

Esta es una de las tecnologías más avanzadas, pues al estar sumergidas aprovechan el movimiento de las olas sin estar directamente expuestas a las tempestades del medio ambiente, solucionando así uno de los grandes problemas que es el diseño de los equipos para la resistencia ante las situaciones meteorológicas extremas.

Figura 1.10 Fotografía del equipo Arquímedes Wave Swing [11]

1.1.7.5 Wave Dragon

Este proyecto de conversión undimotriz cuenta con un prototipo frente a las costas Danesas de Nissun Bredning. El proyecto consiste en una estructura flotante de aproximadamente 237 toneladas, y su construcción comenzó en el año 2010 [12] pensando en un equipo de demostración de 1.5 MW. Su principio de funcionamiento consiste en el aprovechamiento de la energía cinética de la onda marina. Posee 2 brazos que completan una separación de 58 metros, para captar una mayor cantidad de oleaje

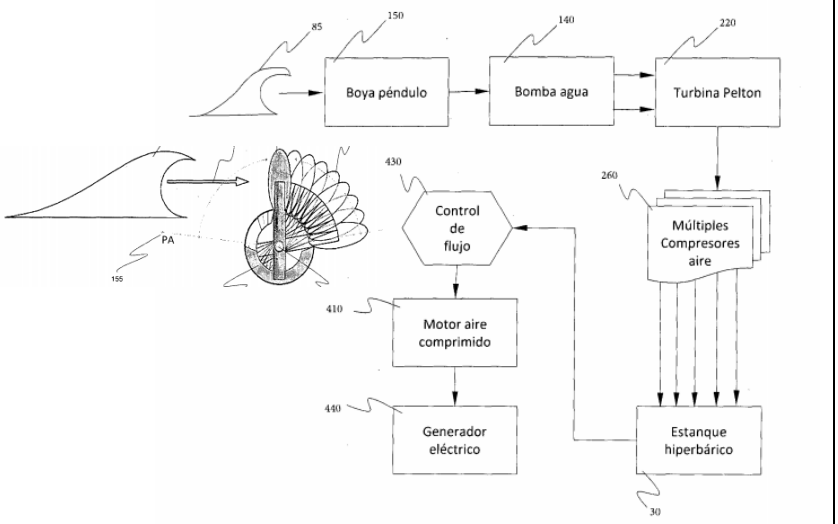
y lo dirige a una plataforma que hace la función de represa (acumulador de energía potencial), luego al liberar el agua se hace pasar por una turbina conectada a un sistema de generación eléctrica. La Figura 1.11 muestra un fotografía de la máquina más un esquema del funcionamiento descrito.

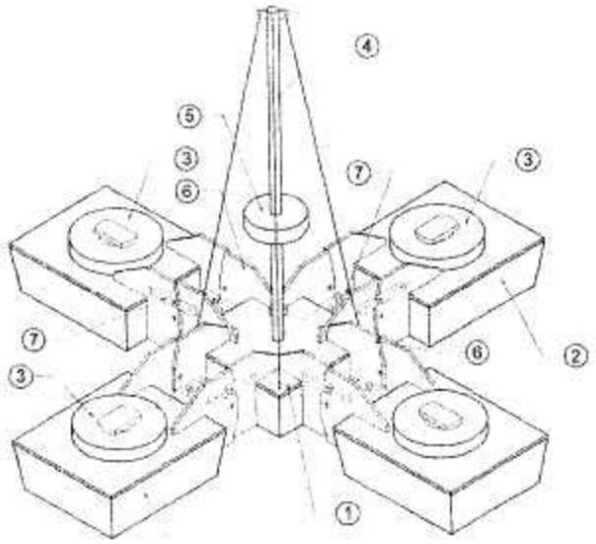
Figura 1.11 Fotografía del equipo Wave Dragon [12]

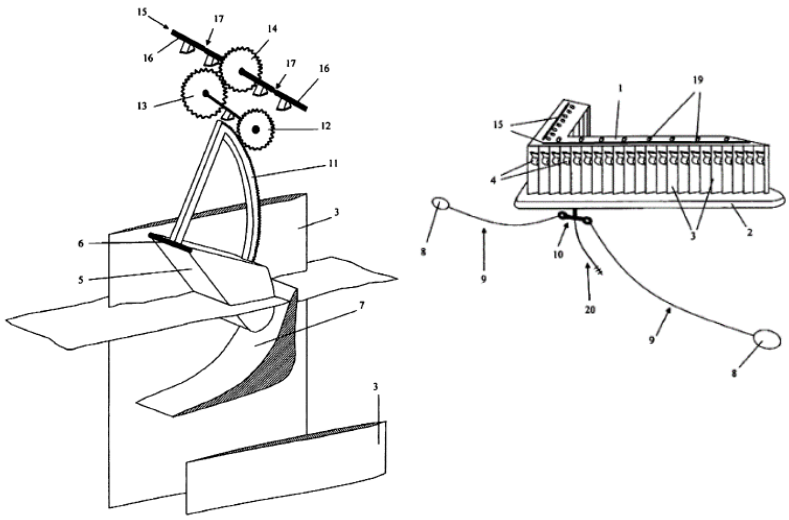
Como se observa en los proyectos recién planteados el aprovechamiento de la energía undimotriz es de bajo impacto ambiental, entendiéndose por ello, impacto visual, sonoro, y principalmente en la emisión de gases de efecto invernadero. Aun así, es importante notar que a medida que los equipos se alejan de la costa, los costos aumentan de forma importante debido a las dificultades para la implementación, mantenimiento y el transporte de la energía.

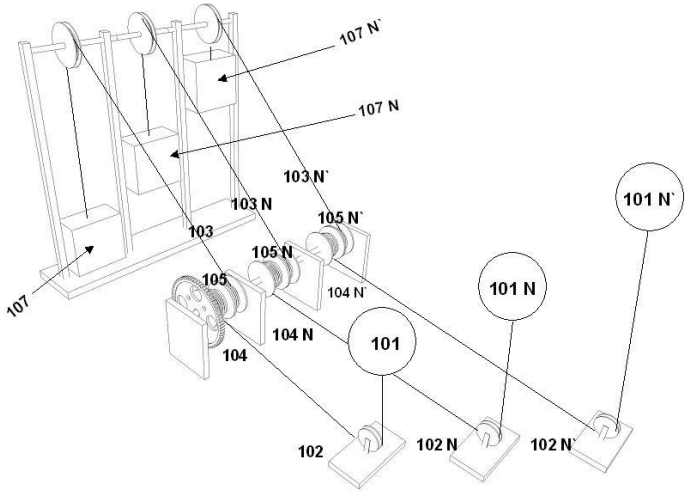
1.1.8 Patentes

A continuación se presentan algunas patentes para dar énfasis a la última, la cual es la desarrollada en profundidad en el presente trabajo.

Título	Sistema de generación de energía eléctrica undimotriz
N° Registro	WO 2013029195 A1
Clasificación	PCT/CL2012/000045
Resumen	Sistema generador de energía eléctrica Undimotriz, boya-pendular capta la energía de la ola y traspasa el movimiento unidireccionalmente a un volante de inercia dentro de una caja presurizada. El eje del volante transmite la energía a una bomba hidráulica y luego el flujo hidráulico emerge por tuberías flexibles, hacia una turbina Pelton. El eje de la turbina mueve un volante de inercia con peso variable, que trasmite su movimiento a un eje de trasmisión al cual se empalman múltiples cajas reductoras en serie. A cada caja reductora se empalma un compresor de aire de alta presión, los compresores emplazados en paralelo se empalman a una matriz de acero, que se empalma un estanque hiperbárico de gran volumen para acumular energía neumática, por cada, motor neumático posee una válvula de restricción para el control de velocidad y potencia. La fuerza mecánica del motor neumático es traspasada a los generadores eléctricos.
Figura Referencia	

Título	Generador undimotriz hidrostático
N° Registro	WO 2012116459 A1
Clasificación	PCT/CL2011/000057
Resumen	Generador undimotriz hidrostático que comprende una balsa central y al menos cuatro balsas radiales unidas a la balsa central mediante bisagras que poseen cada una dos pistones, de manera que el impulso provisto por la acción de las olas permite que los pistones bombeen un fluido en movimiento, preferiblemente agua de mar, desde el interior del mar hacia un punto de elevación en la costa desde donde es canalizado en forma controlada hacia una turbina conectada a un generador de corriente eléctrica. En el centro de la balsa central del generador undimotriz se dispone un mástil que comprende un peso elevado que actúa como excitador metacéntrico de la estructura. En una aplicación alternativa, la energía undimotriz-hidrostática puede ser utilizada para el traslado de agua hacia el interior en aplicaciones de riego, o como fluido conductor para transporte de materia prima en la minería.
Figura Referencia	

Título	Plataforma para capturar energía de las olas
N° Registro	WO 2010061013 A1
Clasificación	PCT/ES2009/000512
Resumen	Se trata de una plataforma para capturar la energía de las olas, apta para aguas profundas y ultraprofundas, comprendida por una cubierta sustentada sobre un casco sumergido mediante pilares hidrodinámicos uniformemente distribuidos a lo largo de sus flancos. Su vista en planta tiene forma de V y se autoorienta de manera que el frente de ola avanza perpendicularmente al plano de simetría de la misma. La energía de las olas se absorbe mediante módulos independientes, los cuales se encuentran ubicados entre los pilares a lo largo de los flancos. La generación de realiza absorbiendo energía mediante un sistema mecánico unidireccional de forma progresiva según avanzan el frente de ola, lo que ofrece la posibilidad de convertir el movimiento periódico de éstas en un movimiento continuo. La plataforma se estabiliza con grandes lastres unidos, mediante cables de amarre, al extremo inferior de su eje de pivotamiento, que la permite autoposicionarse adecuadamente en cada instante.
Figura Referencia	

Título	Mecanismo de conversión undimotriz
N° Registro	47152
Clasificación	IPC/E02B9/08; IPC/F03B13/12
Resumen	Aparato para extraer energía desde las olas de un cuerpo de agua que comprende una boya masiva, maciza o hueca flotando en la superficie del agua, un cable que se extiende hasta el fondo marino, una polea anclada que cambia la dirección del cable, un chasis, dos carretes un contrapeso; y método para captar la energía del movimiento de las olas
Figura Referencia	

1.1.9 Invención en desarrollo

El actual proyecto consiste en el desarrollo de un prototipo experimental, que pretende obtener información acerca de la efectividad del mecanismo descrito en la patente N° 47152 “Mecanismo de conversión undimotriz” [13]. Para ello primeramente se describe en detalle la invención en desarrollo, apoyándose en la Figura 1.12.

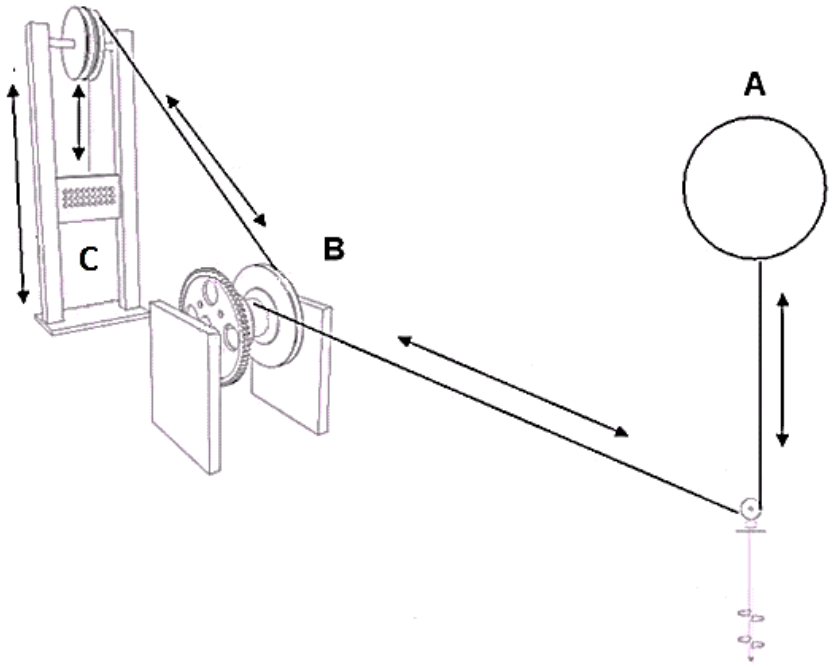


Figura 1.12 Esquema referencial de la invención [13]

El sistema de conversión undimotriz consta de tres partes principales indicadas en la Figura 1.12 con las letras A, B y C. Las cuales constituyen la esencia de la invención.

La etapa A (ver Figura 1.13) corresponde a una boya que se encuentra flotando, un cable conecta a la boya con la etapa siguiente, de esa forma se transmite la potencia del oleaje absorbido por la boya a el resto del mecanismo. Una polea que mantiene la posición de la boya en un punto referencial y cambia de dirección del cable para

priorizar el movimiento vertical de la boya. Un anclaje mantiene la posición de la polea, resistiendo a las solicitaciones del sistema.

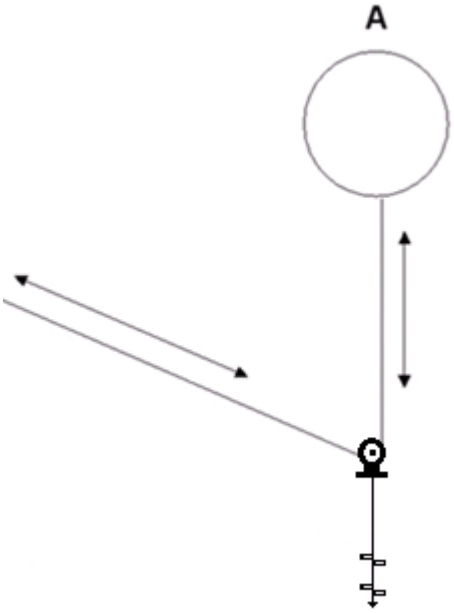


Figura 1.13 Esquema etapa A [13]

Como resultado de la etapa A se obtiene un pulso oscilante cada vez que el oleaje levanta la boya. La etapa B (ver Figura 1.14) corresponde a la rectificación de la señal mecánica absorbida en la etapa A. Se compone de un carrete con dos ranuras, una que recibe la cuerda proveniente de la etapa A y la otra que se conecta con la etapa siguiente. Este carrete, está montado sobre unos rodamientos de tipo trinquete, los cuales funcionan como rodamiento en una dirección, mientras que en dirección contraria transmiten el torque desde la cubeta exterior a la interior lo cual permite transmitir la potencia al eje y además enrollar la cuerda en dirección contraria sin tener que frenarlo. Acompañando al conjunto anterior y solidario al eje se encuentra un volante de inercia el cual mantiene una determinada diferencia de velocidad angular en el eje, entre los pulsos que se reciben.

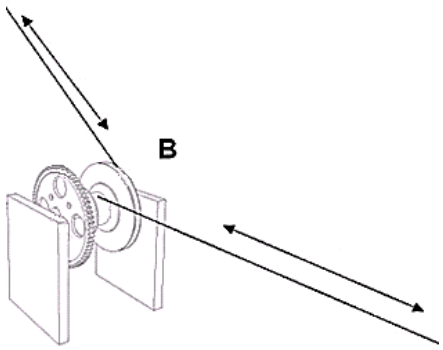


Figura 1.14 Esquema etapa B [13]

Finalmente, la etapa C (ver Figura 1.15) es el complemento de la etapa anterior, y permite mantener la tensión del cable entre los pulsos percibidos por la boya, manteniendo la cuerda enrollada en el carrete de la etapa B.

La etapa C consta de un sistema de rieles por los cuales se mueven contrapesos en forma vertical, están conectados mediante un cable al carrete de la etapa B

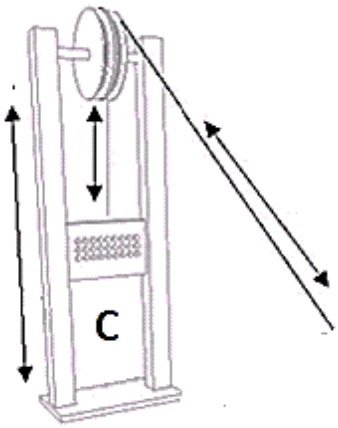


Figura 1.15 Esquema etapa C [13]

Teniendo en cuenta lo anterior, es posible definir una secuencia de pasos que permitan describir el funcionamiento del equipo, las cuales se enumeran a continuación:

1. La boya flota sobre la superficie del mar.
2. El movimiento de una ola genera el desplazamiento vertical de la boya (Figura 1.13) la cual transmite este movimiento a través del cable hacia el carrete del eje principal (Figura 1.14).
3. El cable que va hacia la etapa A se desenrolla mientras que el que cable va hacia la etapa C se enrolla elevando el contrapeso.
4. El eje principal gira junto al carrete.
5. Esta acción continua hasta que la boya llega a su punto de elevación máxima según sea la característica del oleaje.
6. En esta primera etapa el volante de inercia acumula la energía captada por la boya.
7. Tras el momento de mayor elevación, la boya comienza a descender, se genera el mismo efecto en el contrapeso debido a la altura ganada en el paso 3. Y dado que ambos cables están enrollados sobre el mismo carrete en el eje principal pero en direcciones contrarias, mientras se desenvuelve del

cable del contrapeso se enrolla del cable de la boya. Esta acción continua hasta que la boya llega a su punto mínimo de elevación.

8. Mientras, el volante de inercia sigue girando, el movimiento del carrete no tiene ningún efecto sobre el eje, ya que la dirección de giro al enrollar, corresponde a la dirección que no genera tracción sobre el eje. Esto se logra por los rodamientos tipo trinquete sobre los cuales está montado el carrete.
9. Luego de esto el equipo está preparado para recibir el siguiente impulso por parte del oleaje, y así repetir el ciclo descrito [13].

1.1.10 Aplicación particular

Se puede apreciar en la Figura 1.16 como la energía mecánica entregada por la invención pasa hasta el consumidor final a través de la lógica de almacenamiento, es decir, se toma la energía desde el generador, se lleva a un banco de baterías y luego de eso, se realiza el consumo desde ese banco y no desde la fuente directa de energía eléctrica que es el generador el cual va a presentar sin dudas fluctuaciones en su nivel de carga disponible.

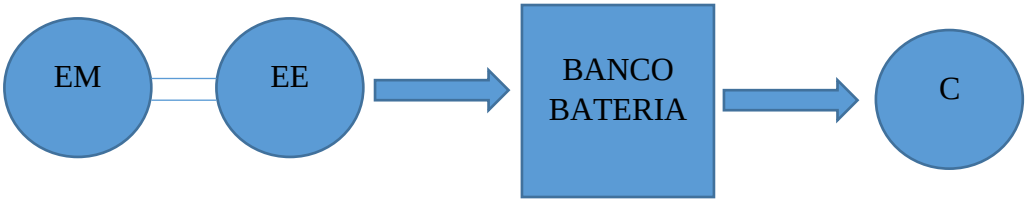


Figura 1.16 Lógica de conversión para la invención en estudio

donde:

EM: Energía mecánica obtenida a partir de la invención

EE: Energía eléctrica

C: Carga o consumidor

1.2 Marco teórico

1.2.1 Descripción estadística del oleaje

El análisis correspondiente a la elevación de las olas se puede hacer de acuerdo a un dominio temporal o espacial, la siguiente descripción se realiza desde un enfoque temporal.

Se presenta en la ecuación 1.1 un modelo de probabilidad de Gauss, de media nula y desviación estándar típica, es decir, una $Normal\ N(0, \sigma_\eta^2)$. En donde σ_η^2 es la varianza del proceso y, asimismo, cuantifica su contenido energético (que depende esencialmente de la amplitud al cuadrado),

$$p(\eta) = \frac{1}{\sigma^2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\eta^2}{2\sigma_\eta^2}} \tag{1.1}$$

$$\sigma_\eta^2 = \eta_{rms}^2 = Esp\left\{\left(\eta - \mu_\eta\right)^2\right\} \tag{2.2}$$

donde,

: Media para un grupo de casos

: Desviación estándar

: Desplazamiento medio cuadrático.

Este método matemático estadístico es adecuado para oleajes simétricos como los encontrados en altamar y en consecuencia deja de serlo para oleaje de aguas menos profundas o someras, ya que en estas condiciones la no linealidad prevalece y el proceso deja de ser Gaussiano. Aun así se usa como referencia en un número importante de situaciones.

1.2.2 Definición de ola individual

El concepto de ola individual es básico en la estimación de la potencia undimotríz disponible en un determinado sitio. A través de una medición continua del nivel del oleaje, se puede identificar una ola individual, tal como lo muestra la figura 1.17. Por definición teórica una ola individual no corresponde a la elevación misma respecto a la superficie, sino, al corte del nivel de la superficie por el cero, el cual corresponde al valor promedio de elevación. La convención generalmente establece que una ola individual se puede identificar como el conjunto de datos de nivel o el perfil que se encuentran entre dos cortes por cero descendentes, es decir, mediciones discretas de nivel que pasan de valores positivos a negativos [14].

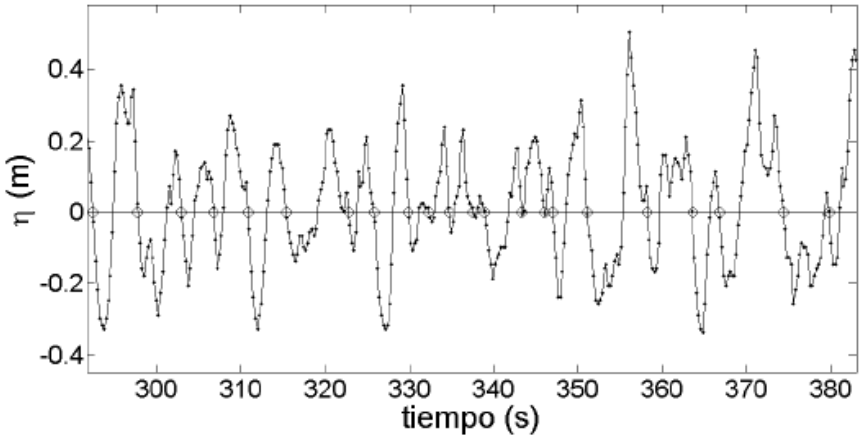


Figura 1.17 Muestreo de alturas e identificación de cruces por cero [14]

La altura de la onda individual se define la diferencia entre la mínima y máxima altura medidas en una onda individual como se puede identificar en la Figura 1.18.

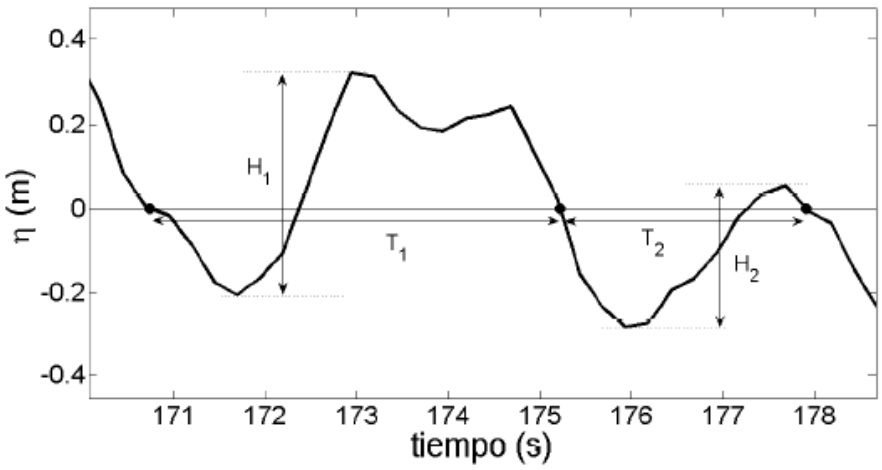


Figura 1.18 Identificación de ondas individuales [14]

La determinación de las características del oleaje se logra promediando los valores de altura y periodo de los valores obtenidos en los registros. Pero para asegurar las condiciones de estacionalidad y homogeneidad, es necesario que el tiempo de medición sea lo suficiente acotado, pero a la vez se requiere un número aceptable de datos para obtener promedios confiables. Generalmente, se trabaja con intervalos de 30 min o 1 hora.

Más adelante se observará que para la construcción de cartas de oleaje (hindcast) en base a la información estadística de los vientos, se toleran intervalos de tiempo de hasta 3 horas [15].

1.2.3 Alturas y periodos característicos de las olas

Para poder identificar la naturaleza del oleaje estudiado en cuanto a altura periodo y consecuentemente disponibilidad energética [6] es que se hace uso de las siguientes definiciones:

1. Alturas y periodos medios: Corresponde a la media aritmética de todos los datos obtenidos para olas individuales. La fórmula 1.3 muestra como se calcula la altura media:

$$\bar{H} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} H_k \tag{1.3}$$

de forma análoga,

$$\bar{T} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} T_k \tag{1.4}$$

en algunas bibliografías el periodo promedio se denota como T_z

1. Altura cuadrática media: La cual se define con la ecuación 1.5,

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} {H_k}^2} \tag{1.5}$$

también de forma análoga,

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} {T_k}^2} \tag{1.6}$$

Estas medidas características son importantes al momento de analizar los datos respecto a la cantidad de energía que entrega la onda. Ya que la energía de una onda es proporcional al cuadrado de la amplitud.

2. Ola máxima: Se define esta medida característica como el registro de la máxima elevación dentro de un intervalo de muestreo y se define como H_{max}, también se identifica su periodo asociado de la forma $T_{H_{max}}$

Los valores característicos anteriores corresponden a información que se busca intuitivamente pero que no representa estrictamente lo que se aprecia en las mediciones en terreno. Para ello se necesitan otros indicadores que se muestran a continuación.

3. Altura significativa: Se define como la altura promedio del tercio superior de alturas registradas en el intervalo de estudio, se identifica por,

$$H_{1/3} = \frac{1}{N/3}\sum_{k=1}^{N/3} H_k \tag{1.7}$$

donde k representa la posición del dato de altura ordenados de mayor a menor. El periodo característico se define de igual manera,

$$T_{1/3} = \frac{1}{N/3}\sum_{k=1}^{N/3} T_k \tag{1.8}$$

también donde k representa la posición del dato de periodo ordenados de mayor a menor.

Dentro de la bibliografía se puede encontrar la altura significativa $H_{1/3}$, también como H_s, o altura de diseño, la cual es útil como referencia para tal actividad. La explicación se asienta en que antiguamente las estructuras eran diseñadas de acuerdo a la información captada de forma visual, la cual se aproxima bastante a la $H_{1/3}$ o H_s [6].

1.2.4 Distribución de alturas de olas individuales

Para profundizar el análisis, una mejor manera de observar los datos de altura de olas es a través de un histograma que muestra la frecuencia con la que se presentó cada medición dentro de un intervalo [6]. En la Figura 1.19 se muestra un ejemplo de esta disposición de los datos.

Esta medición corresponde obviamente a la de un lugar específico, para lo cual es necesario hacer un arreglo antes de poder comparar esta información con la de otra

localidad. Para ello se trabaja de forma adimensional teniendo H como $H/\overline{H}$ y la frecuencia como $n/(N\Delta H/\overline{H})$, donde n es el número de olas de altura H, N es el número de olas y $\Delta\overline{H}$ corresponde al tamaño del sub intervalo.

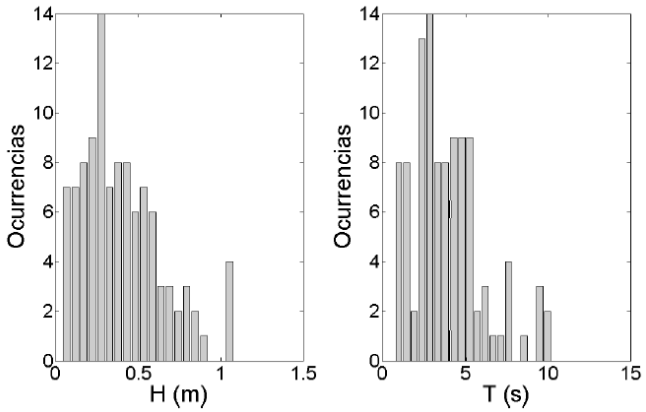


Figura 1.19 Histograma de altura de la ola y periodo [6]

El resultado de este análisis adimensional conlleva la descripción de la densidad de probabilidad una vez $H/\overline{H} \rightarrow 0$. Se cuenta con resultados teóricos y prácticos que muestran como la densidad de probabilidad correspondiente se aproxima a la función de distribución de Rayleigh [6] (ver Figura 1.20).

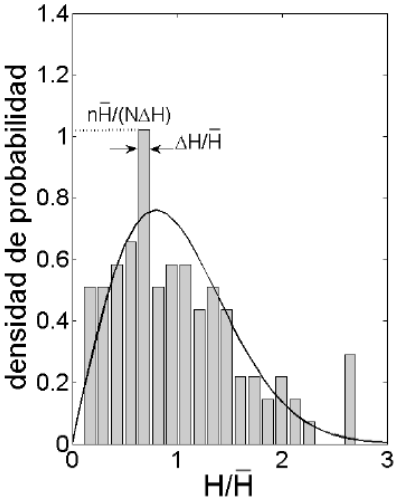


Figura 1.20 Histograma normalizado y densidad de probabilidad de Rayleigh [6]

La función de densidad de probabilidad de Rayleigh se define de la siguiente forma $f_R(x) \in (0, +\infty)$ tal que,

$$f_R(x) = \frac{x}{\sigma_x^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}} \tag{1.9}$$

Para olas de aguas profundas de altura H las funciones de densidad de probabilidad y de distribución expresadas en términos de H_{rms},

$$f_R(H) = 2\frac{H}{H_{rms}^2} e^{-\frac{H^2}{H_{rms}^2}} \tag{1.10}$$

$$F_R(H) = 1 - e^{-\frac{H^2}{H_{rms}^2}} \tag{1.11}$$

Estas expresiones corresponden a la estimación de funciones de densidad de probabilidad válidas para zonas de aguas profundas o alta mar. Cuando la ola se aproxima a la costa y se hace presente la ruptura la altura en la ola se aleja un tanto de esta aproximación para lo cual se han estudiado también algunas aproximaciones correspondientes a correcciones empíricas a la distribución de Rayleigh.

1.2.5 Distribución del periodo de la ola

A diferencia de la altura, el periodo ha sido descrito en forma menos precisa y se ha desarrollado en relación con la altura característica de la ola. Con esto se logra obtener una estimación de esta medida.

1.2.6 Distribución conjunta de altura de olas y periodos

Si se observa la Figura 1.21, es posible identificar como existe una relación mínima entre la altura y el periodo, la relación se observa en la línea diagonal que se genera en la parte inferior del gráfico, donde no se registran combinaciones entre altura y periodo.

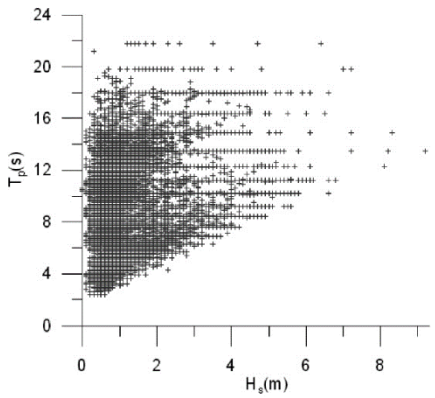


Figura 1.21 Gráfico de dispersión de datos conjuntos de altura y periodo [14]

Dado lo anterior y a pesar de las dificultades de profundización en la teoría que aporta la gran variabilidad en los resultados, para un determinado sitio y condición climática se puede generar una relación empírica entre estas variables como muestra la ecuación 1.12

$$T_s = \alpha H_s^{\beta} \tag{1.12}$$

donde, α y β corresponden a valores estimados de forma empírica una vez analizados los resultados obtenidos en el muestreo.

1.2.7 Relación de altura y periodo característico

Como se aprecia en la Figura 1.22 es posible asignar una distribución conveniente tal de relacionar la varianza de la altura de la ola con la frecuencia, identificando la frecuencia que maximiza tal función como frecuencia pico.

Ahora bien, esta relación no muestra de forma directa cual será la altura de las olas para la relación dada. Para ello se van definir algunos conceptos.

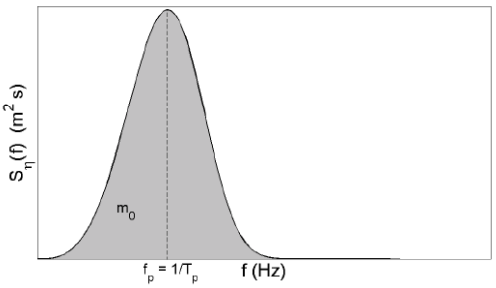


Figura 1.22 Espectro de la varianza en función de la frecuencia pico [6]

El momento de orden-n m_n, se define por la ecuación 1.13,

$$m_n = \int_0^\infty f^n S(f) df \tag{1.13}$$

de esta forma el momento de orden 0 $m_0 = \int_0^\infty S(f) df$, corresponde al área bajo la curva y tiene relación con el contenido energético de la ola.

Es importante notar que la función $S(f)$ corresponde a la descripción continua del espectro de la varianza dada para la información rescatada en el punto de interés, en cuanto a la variación vertical de la superficie marina.

1.2.8 Estimación de potencia disponible en el oleaje

La potencia entregada por el tren de olas se define en términos de la velocidad de transferencia de energía por unidad de anchura a través de un plano vertical perpendicular a la dirección de la onda [14], la cual se calcula de acuerdo a la ecuación 1.14,

$$P = \rho g \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} S(f,\theta) C_g(f,h) df d\theta \quad \left[\frac{W}{m}\right] \tag{1.14}$$

donde P es la potencias media, ρ es la densidad del agua, $S(f,\theta)$ es la distribución del espectro de la varianza en función de la frecuencia y la dirección, $C_g(f,h)$ es la celeridad o velocidad del grupo de ondas en función de la frecuencia del espectro y la altura entre el piso marino y la superficie. C_g se describe de forma lineal mediante la ecuación 1.15,

$$C_g = \frac{1}{2}\left[1 + \frac{\frac{4\pi h}{L}}{senh\left(\frac{4\pi h}{L}\right)}\right] \frac{g}{2\pi f}\left[\tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)\right] \tag{1.15}$$

donde T característico corresponde al periodo del tren de olas seleccionado y L a la longitud de onda característica [14]. El periodo característico también se identifica como T_p el cual como ya se indicó corresponde al periodo que maximiza la función de distribución de la varianza.

1.2.9 Teoría simplificada

La expresión (1.16) se puede simplificar a partir de las aproximaciones, teniendo en cuenta los parámetros estimados del análisis espectral. La ecuación 1.16 es utilizada para la construcción de las curvas iso – potencias [16],

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} T_e H_s \tag{1.16}$$

donde P corresponde a la potencia disponible dada las unidades características de altura característica y periodo asociado, ρ corresponde a la densidad del agua de mar equivalente a 1025 kg/m^3 y g la aceleración de gravedad, las curvas generadas en base a la ecuación 1.16 se muestran a modo de ejemplo en la Figura 1.23.

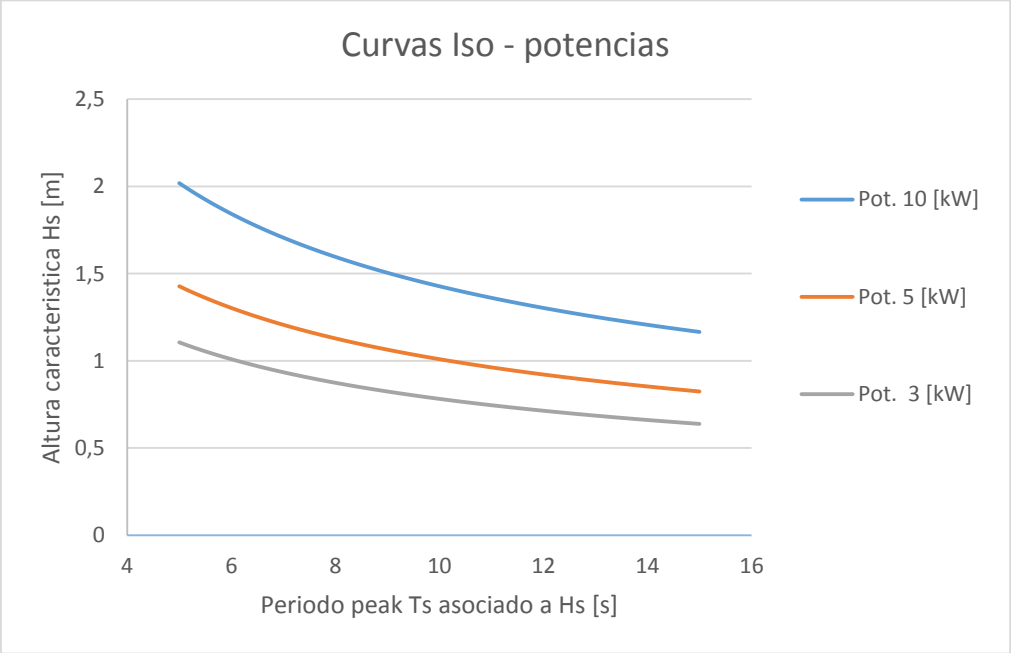


Figura 1.23 Curvas Iso - potencias según teoría simplificada

1.2.10 Fenómenos costeros

Ya que el lugar de instalación del equipo corresponde a zonas costeras, a continuación se definen algunos eventos denominados fenómenos costeros, que son causados por la naturaleza de la geografía de las costas.

1.2.10.1 Shoaling

Shoaling corresponde a la variación de amplitud de la ola debido a la variación de la distancia entre la cota media del frente de onda y el piso marino. Se entiende que este fenómeno comienza a ocurrir cuando la distancia entre en piso marino y la ola es menor a la mitad de la longitud de onda. Obviamente este fenómeno se produce cuando olas se aproximan a la línea de costa.

A medida que el oleaje se aproxima a la costa el movimiento circular de las partículas de agua en una onda comienzan a interactuar con el fondo marino, y por ello se extiende el movimiento circular en una forma elíptica horizontalmente, describiendo de esta forma un movimiento aplanando y estirado.

Finalmente la diferencia de velocidad entre la parte más cercana al fondo marino y la superficie del agua genera el punto de ruptura o colapso de la onda. Esto a su vez amplifica el movimiento horizontal, elevando las crestas de la onda (ver Figura 1.24), creando una zona de fuerte oleaje.

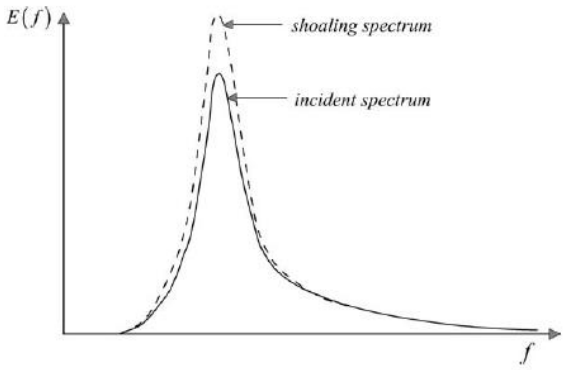


Figura 1.24 Efecto del shoaling en la distribución del espectro del oleaje [14]

1.2.10.2 Difracción

El fenómeno de difracción corresponde a un fenómeno costero que se provoca al momento en que un rompeolas, península o isla, se enfrentan a un frente de olas generando tras ella una especie de sombra, pivotando el punto del accidente, y redistribuyendo el frente como un as de olas. La distribución de la altura de la onda difractada se puede determinar con base en la velocidad del frente, su dirección y la teoría respecto a la potencia del oleaje. Dicho cálculo da como resultado diagramas de difracción como a modo de ejemplo se aprecia en la Figura 1.25.

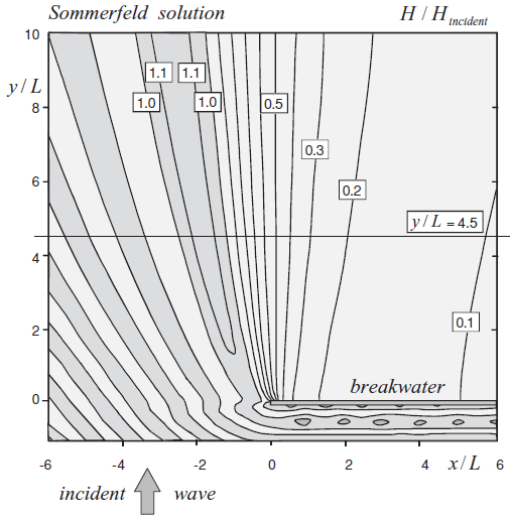


Figura 1.25 Diagrama referencia de difracción en un rompeolas [6]

Como se observa la intensidad del oleaje luego de este incidente presenta una importante caída. Esto lugares son generalmente identificados y corresponden a sitios idóneos para el posicionamiento de instalaciones portuarias

1.2.10.3 Refracción

El fenómeno de refracción que afecta a las ondas del oleaje corresponde al cambio de dirección de la onda al aumentar el roce con el fondo marino, esto ocurre una vez que la onda pasa de aguas profundas, es decir, que la profundidad es mayor que la mitad de su longitud de onda, hacia aguas menos profundas o someras. El cambio provoca que el frente de olas se alinee de forma tal, que siempre llega en forma paralela a la dirección normal de la costa. Un ejemplo de esto se puede ver en la Figura 1.26.

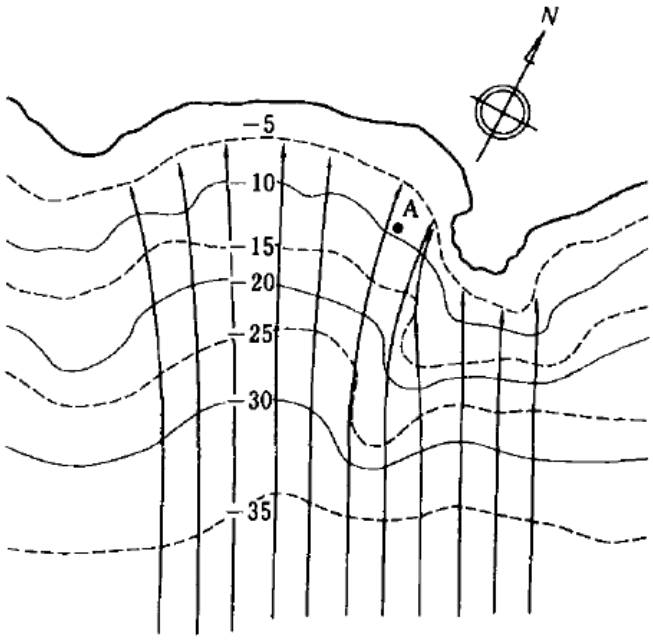


Figura 1.26 Diagrama de refracción para frentes regulares de olas [14]

Capítulo 2: Estimación de Potencia Undimotriz

En el presente capítulo se aborda el punto de la estimación de potencia percibida por el equipo, el cual está basado en una metodología predictiva estadística, para finalmente entregar una primera aproximación al oleaje en el lugar de instalación del prototipo.

2.1 Energía undimotriz un recurso global

Las olas del mar albergan enormes cantidades de energía en bruto y representan la mayor fuente sin explotar de las energías renovables en la actualidad.

Las olas se crean cuando el viento pasa sobre la superficie del océano. Incluso pequeñas ondas en la superficie ofrecen al viento una pendiente contra la cual empujar, haciendo que las ondas que crezcan y se desplazan hacia adelante. En aguas profundas, las olas pueden viajar miles de millas náuticas hasta que su energía se disipa en costas lejanas. La energía undimotriz producida en cualquier parte de una cuenca oceánica llega finalmente a la plataforma continental prácticamente no disminuida hasta alcanzar la profundidad de unos 200 metros. La interacción entre las olas y el fondo del mar genera una reducción gradualmente de la potencia disponible en el oleaje, lo cual es un punto importante para la contextualización de este trabajo dado que su aplicación se encuentra en aguas poco profundas también llamada aplicación on-shore.

Para contextualizar la situación de las costas chilenas es importante tener en cuenta que la combinación de la rotación de la Tierra y la dirección predominante del oeste de los vientos significa que las regiones de alta energía normalmente se encuentran a lo largo de las costas occidentales de los continentes, como lo es la costa chilena. La figura 2.1 muestra una distribución del recurso undimotriz en un marco global.

Las olas del mar son consistentes y se puede predecir con precisión más de 48 horas. En cambio, previsiones de viento precisas, sólo están disponibles durante 5-7 horas

antes. Además de lo anterior otro factor que hace de la energía undimotriz una atractiva alternativa para la generación de electricidad es su alta densidad de potencia en comparación con la densidad de potencia de la energía solar o eólica.

Figura 2.1 Densidad global del potencial undimotriz [16]

2.1.1 Metodología para la estimación de potencia

La metodología para la estimación de potencia undimotriz disponible según el lugar de estudio más la potencia entregada por los diferentes dispositivos o prototipos [15] se detalla en la figura 2.2,

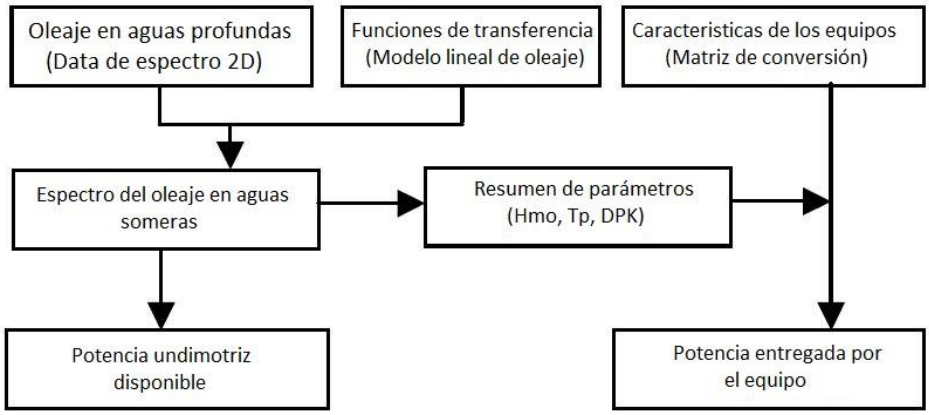


Figura 2.2 Metodología para el cálculo de potencia disponible [16]

De la figura 2.2 se entiende que la información necesaria para realizar las estimaciones de potencia son los datos del oleaje en altamar o también llamado hindcast y las funciones de transferencia correspondientes para trasladar la información de aguas profundas a aguas someras. Una vez con esta información se puede tener una estimación de la energía disponible en el sitio de estudio, lo cual se deriva en los valores característicos (H_{mo}, T_p, DPK). Luego la información de potencia disponible se cruza con la eficiencia de conversión para el equipo utilizado, obteniendo de esta forma una 1° aproximación al disponible efectivo.

2.1.2 Oleaje en aguas profundas

El oleaje en aguas profundas necesario para la estimación en del potencial en aguas someras, se obtiene mediante bases de datos. Un ejemplo de esta es la data "Olas Chile II", la cual es parte de una descripción espectral del oleaje del océano pacífico, que específicamente caracteriza las costas chilenas (ver Figura 2.3). Esta se basa en modelo de predicción retrospectiva que incluye la generación de olas en todo el océano pacífico entre 1985 y 2004. La base de datos obtenida con el modelo consiste en el espectro direccional cada 3 horas y durante 20 años [15] para las costas del océano pacífico. Una vez que se cuenta con esta información se procede a la determinación de índices de transferencia, para trasladar dicho espectro al punto de interés.

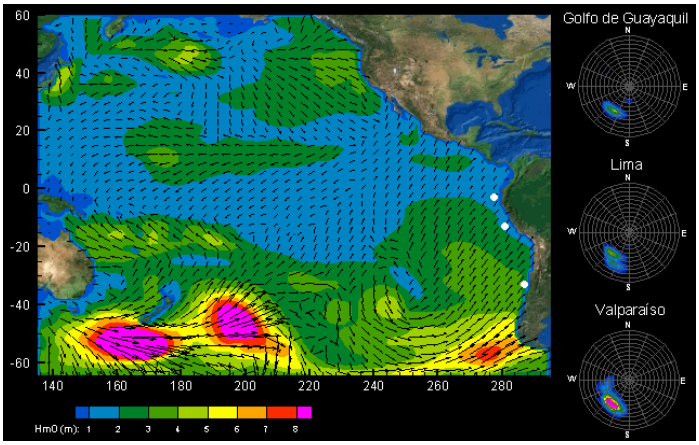


Figura 2.3 Diagrama predictivo de Hmo para 3 puntos en costas del pacífico [15]

2.1.3 Reconstrucción y transferencia del espectro

Para la obtención de las condiciones del oleaje en los puntos de interés se necesita un soporte tecnológico de transferencia espectral bidimensional de ondas en aguas profundas. Una de estas herramientas es STWAVE (soporte para el modelamiento de espectro del oleaje), desarrollado por la USACE (US Army Corp of Engineers), el cual logra trasladar los espectros de agua profundas a puntos de interés con base en la información espectral de las olas de altamar junto con una descripción de las características del piso marino (llamada también batimetría) de las zonas involucradas.

2.1.3.1 Reconstrucción de parámetros

El método de reconstrucción paramétrico consiste en la transformación de los parámetros estadísticos de onda (altura, periodo de pico y dirección media) en aguas profundas, a su equivalente en aguas poco profundas aplicando coeficientes de transformación de onda específica del sitio obtenidas de escenarios pre-modelado.Los pasos para la aplicación de este método son los siguientes:

1. Construir espectros aguas profundas teórico de Hm0 = 1 m con diferentes períodos y direcciones de pico, que cubran la mayor parte de la frecuencia.
2. Propagar estos espectros de forma independiente en el modelo y obtener las estadísticas de onda resultante en el sitio de interés, con el fin de construir los coeficientes de transformación de ondas descritos en las ecuaciones 2.1 y 2.2.

$$C_H = f(T_{agua\ profunda}, D_{agua\ profunda}) \tag{2.1}$$

$$C_D = f(T_{agua\ profunda}, D_{agua\ profunda}) \tag{2.2}$$

donde,

C_H: Coeficiente de transformación para altura significativa o de diseño

C_D: Coeficiente de transformación para dirección media de la ola

$T_{agua\ profunda}$: Periodo medio o pick en agua profunda

$D_{agua\ profunda}$: Dirección del frete de olas media en aguas profundas

3. Usando las 2.3 a 2.5, se pueden determinar los parámetros correspondientes a aguas someras en función de los valores de aguas profundas,

$$H_{agua\ somera} = H_{agua\ profunda}\ x\ C_H \tag{2.3}$$

$$D_{agua\ somera} = C_D(T_{agua\ profunda}, D_{agua\ profunda}) \tag{2.4}$$

$$T_{agua\ profunda} = T_{agua\ somera} \tag{2.5}$$

2.1.3.2 Reconstrucción del espectro

El método se entiende como la construcción del espectro en aguas poco profundas combinando linealmente espectros estimados ya transformadas utilizando los mismos coeficientes que construyen los espectros reales aguas de profundas, como una combinación lineal de los espectros de aguas profundas (hindcast). Los pasos la ejecución del método son los siguientes [17] y además se representan en la figura 2.4:

1. Construir espectros aguas profundas con diferentes períodos y direcciones de pico, que cubren la mayor parte de la frecuencia relevante.
2. Difundir estos espectros de forma independiente en el modelo y obtener los espectros de aguas poco profundas correspondientes al sitio de interés.
3. Encontrar los coeficientes que permiten la reconstrucción del espectro real de aguas profundas como una combinación lineal de los espectros de aguas

profundas. Esto se puede hacer mediante el ajuste de cada bin de energía a través de la solución de un problema de mínimos cuadrados.

4. Crear el espectro de aguas poco profundas correspondiente combinando linealmente los espectros de aguas poco profundas con los coeficientes encontrados antes.

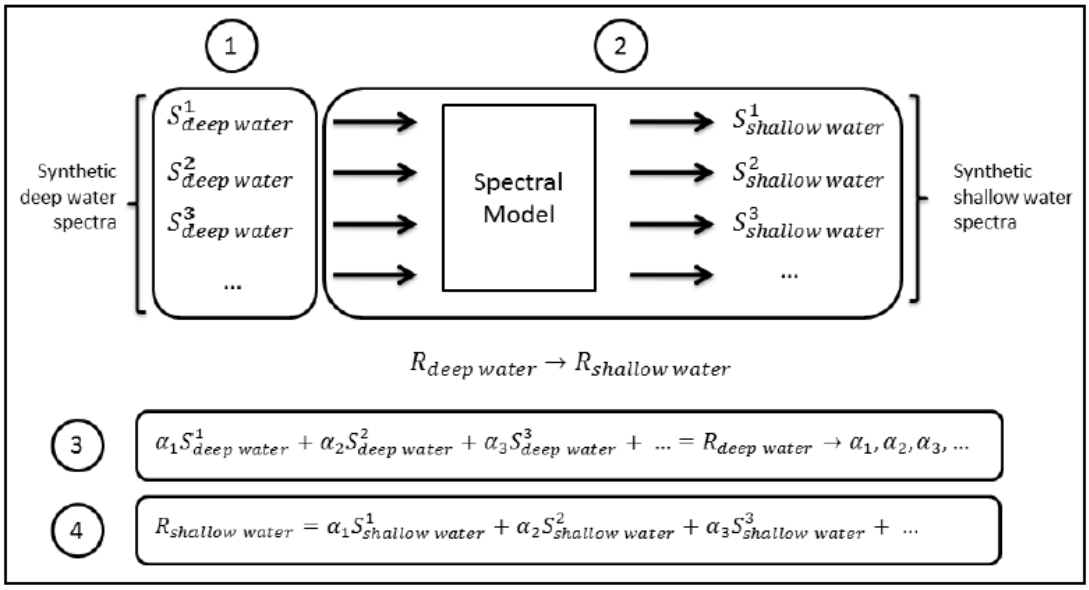


Figura 2.4 Resumen del método de reconstrucción espectral propuesto [17]

Luego el espectro en aguas someras resultante, es caracterizado mediante un resumen de parámetros del espectro que caracterizan el lugar de interés. Los parámetros mencionados de se definen a continuación:

a. Altura espectral de la ola (H_{mo}): Corresponde a la altura significativa o de diseño H_s para cada sitio particular, calculada en la ecuación 2.6:

$$H_{mo} = 3.8\sqrt{m_0} \tag{2.6}$$

b. Periodo peack (T_p): Corresponde al valor del periodo que maximiza la función de distribución de la varianza del espectro.

c. Dirección peak (DPK): Corresponde también a la dirección de la ola asociado al máximo valor de la distribución de la varianza para el espectro del sitio específico.

Luego el cálculo de potencia se puede realizar montando el resumen de los datos obtenidos para los parámetros característicos en la ecuación (1.16).

2.1.4 Matriz de transformación

La matriz de transformación es el último paso dentro de la metodología y corresponde al desarrollo de la performance del equipo para una combinación amplia de datos de entrada correspondientes a valores característicos del espectro de oleaje (ver figura 2.5). La importancia de esta matriz es la determinación de la potencia que puede ser extraída por un determinado equipo, dadas condiciones de sitio específico. Además sirve para comparar distintos equipos entre sí y tener una referencia en cuanto a la efectividad de estos [6].

T_p (s) H_s (m)	Power matrix (in kW)												
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0	0	8	11	12	11	10	8	7	0	0	0	0
1.5	0	13	17	25	27	26	23	19	15	12	12	12	7
2	0	24	30	44	49	47	41	34	28	23	23	23	12
2.5	0	37	47	69	77	73	64	54	43	36	36	36	19
3	0	54	68	99	111	106	92	77	63	51	51	51	27
3.5	0	0	93	135	152	144	126	105	86	70	70	70	38
4	0	0	0	122	176	198	188	164	137	112	91	91	49
4.5	0	0	0	223	250	239	208	173	142	115	115	115	62
5	0	0	0	250	250	250	250	214	175	142	142	142	77
5.5	0	0	0	250	250	250	250	250	211	172	172	172	92

Figura 2.5 Matriz de conversión de potencia Para el equipo Aqua Buoy [8]

2.2 Caracterización del punto de estudio

La presente sección tiene como tarea estimar la potencia disponible en el sitio de instalación, para posteriormente poder identificar las solicitaciones mecánicas de los materiales de la estructura.

2.2.1 Identificación del lugar

Para la instalación del equipo el lugar acordado corresponde a un sitio costero, facilitado por el Centro de Ex Cadetes y Oficiales de la Armada Caleuche (coordenadas de ubicación -33.01,-71.59), la orientación de la costa en la cual es instalado el equipo corresponde a orientación norte, lo cual implica una protección en cuanto al oleaje proveniente suroeste. La figura 2.6 muestra una referencia al lugar de instalación.

Figura 2.6 Posición geográfica del prototipo en desarrollo [18]

En suma a lo anterior se cuenta con la información respecto a la variación del nivel del mar en la costa generada por las diferentes mareas, esta información no se considera en la estimación de potencia, es decir, no afecta la altura significativa de la ola H_s, más si tiene importancia para el diseño pues el equipo debe ser capaz de adaptarse a los cambios de nivel generados por este fenómeno, la tabla 2.1 muestra la variación de dicho nivel para la primera quincena del mes de febrero del presente año.

Tabla 2.1 Mareas correspondientes al punto de instalación [19]

Fecha	Hora	Altura	Hora	Altura	Hora	Altura	Hora	Altura
01-02-2015	3:19	0.40 B	9:05	1.17 P	14:46	0.44 B	21:20	1.63 P
02-02-2015	3:57	0.34 B	9:44	1.21 P	15:27	0.41 B	21:57	1.66 P
03-02-2015	4:32	0.31 B	10:19	1.24 P	16:05	0.38 B	22:31	1.67 P
04-02-2015	5:04	0.30 B	10:52	1.26 P	16:40	0.37 B	23:03	1.65 P
05-02-2015	5:35	0.30 B	11:24	1.27 P	17:14	0.38 B	23:34	1.61 P
06-02-2015	6:04	0.32 B	11:56	1.27 P	17:47	0.41 B		
07-02-2015	0:04	1.54 P	6:33	0.36 B	12:29	1.27 P	18:21	0.46 B
08-02-2015	0:34	1.47 P	7:03	0.41 B	13:05	1.26 P	18:58	0.52 B
09-02-2015	1:07	1.38 P	7:35	0.46 B	13:45	1.25 P	19:40	0.59 B
10-02-2015	1:44	1.27 P	8:10	0.52 B	14:33	1.24 P	20:35	0.66 B
11-02-2015	2:29	1.17 P	8:54	0.57 B	15:33	1.24 P	21:52	0.71 B
12-02-2015	3:31	1.07 P	9:51	0.61 B	16:44	1.27 P	23:30	0.71 B
13-02-2015	4:59	1.02 P	11:00	0.63 B	17:56	1.34 P		
14-02-2015	0:53	0.63 B	6:27	1.02 P	12:11	0.60 B	18:59	1.44 P
15-02-2015	1:52	0.52 B	7:34	1.08 P	13:14	0.54 B	19:54	1.56 P

Además de tener en cuenta la variación en el nivel del mar (mareas), se deben considerar las variaciones temporales lo cual corresponde a las marejadas, que se definen como una variación positiva en el nivel del agua, generalmente acompañada de condiciones marítimas de tormenta. Un ejemplo de este pronóstico se muestra en la figura 2.7.

Figura 2.7 Pronóstico de marejadas SHOA próximas al sitio de instalación [19]

2.2.2 Sobre la instalación del equipo

Dado el diseño del equipo, hay algunas distancias importantes a considerar para proyectar su instalación, principalmente es el levantamiento de algunas distancias como la distancia entre el fondo marino y la superficie del agua y la distancia entre el eje principal del prototipo y las boyas, como referencia la figura 2.8 muestra un diagrama representativo.

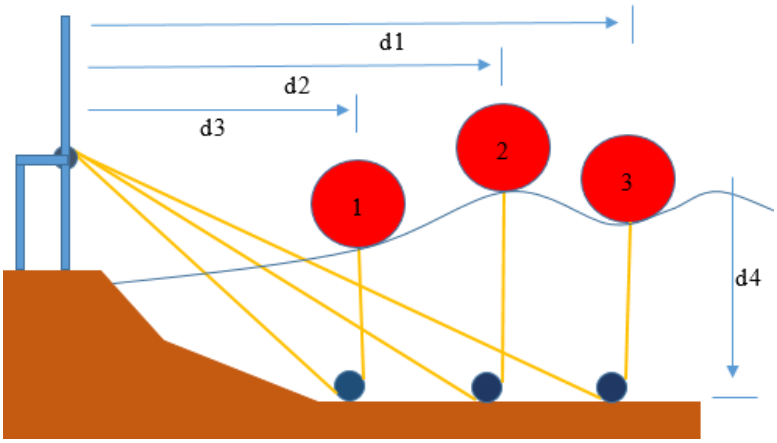


Figura 2.8 Diagrama referencial para la instalación del prototipo

Donde las medidas d1 al d4 corresponden a las distancias desde el eje principal del prototipo a los puntos de anclaje de las poleas sumergidas.

Dadas las características del lugar de instalación se estima que la distancia desde las boyas hasta la estructura principal será de 25, 40 y 65 metros, y que la profundidad del agua en la instalación de 10 metros, aproximadamente.

La información expuesta corresponde a la disponible y con la cual se realizará el estudio de potencial undimotriz, para el posterior dimensionamiento de las partes del equipo.

2.3 Caracterización de la potencia undimotriz

Ya se ha descrito la metodología de estimación de potencia undimotriz en aguas someras, así como el lugar de instalación del prototipo, ahora en función de la información anterior corresponde estimar la potencia percibida en dicho sitio. A continuación se presenta un resumen de parámetros característicos medidos en un lugar de similares características al sitio de instalación, los cuales serán tomados como referencia para el cálculo de la potencia disponible.

2.3.1 Parámetros del oleaje

Para resumir el clima de olas en el sitio, se obtienen los datos de las estadísticas de las condiciones del mar por mes, año, temporada y durante todo el año [17]. A continuación en las figuras 2.9 y 2.10 se presentan resultados obtenidos en zonas representativas del sitio en estudio. A una profundidad constante de 15 m.

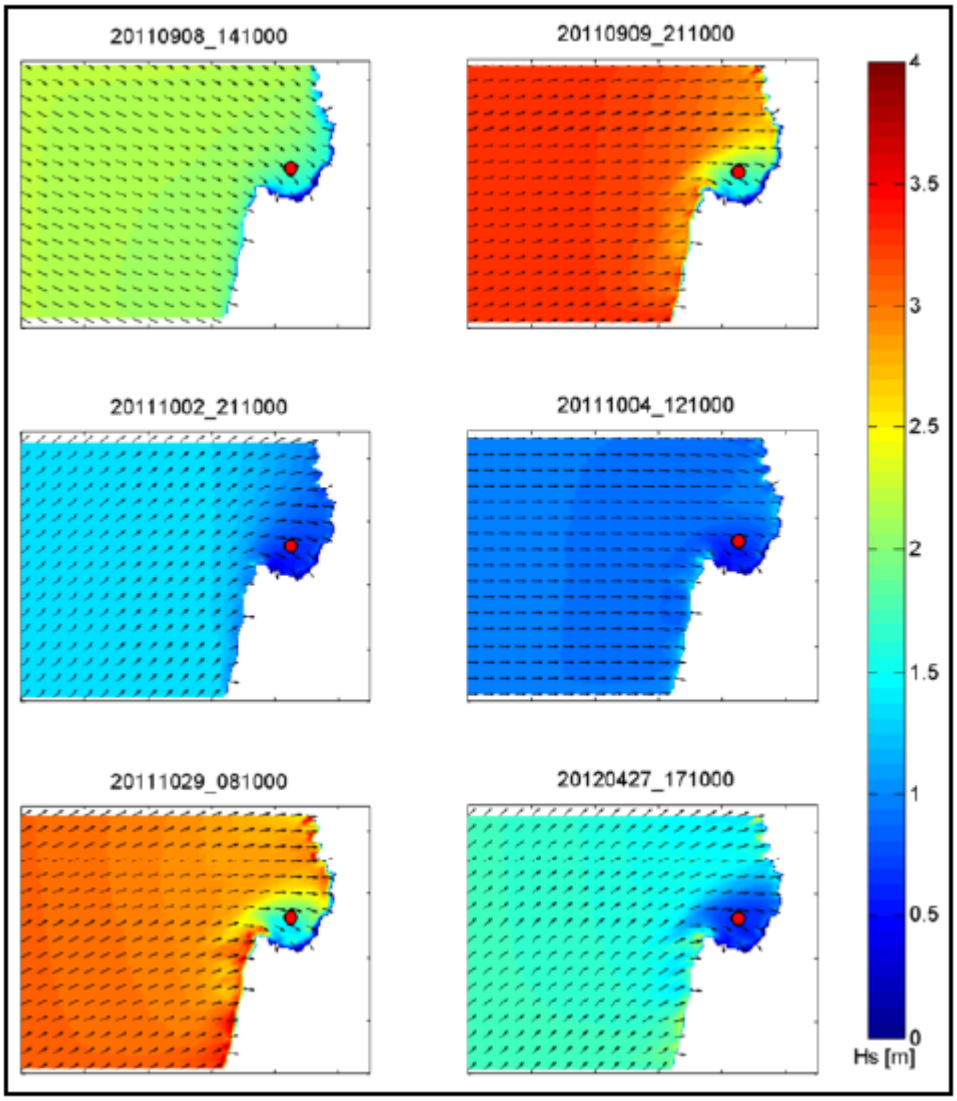


Figura 2.9 Altura significativa de las olas para los climas seleccionados [17]

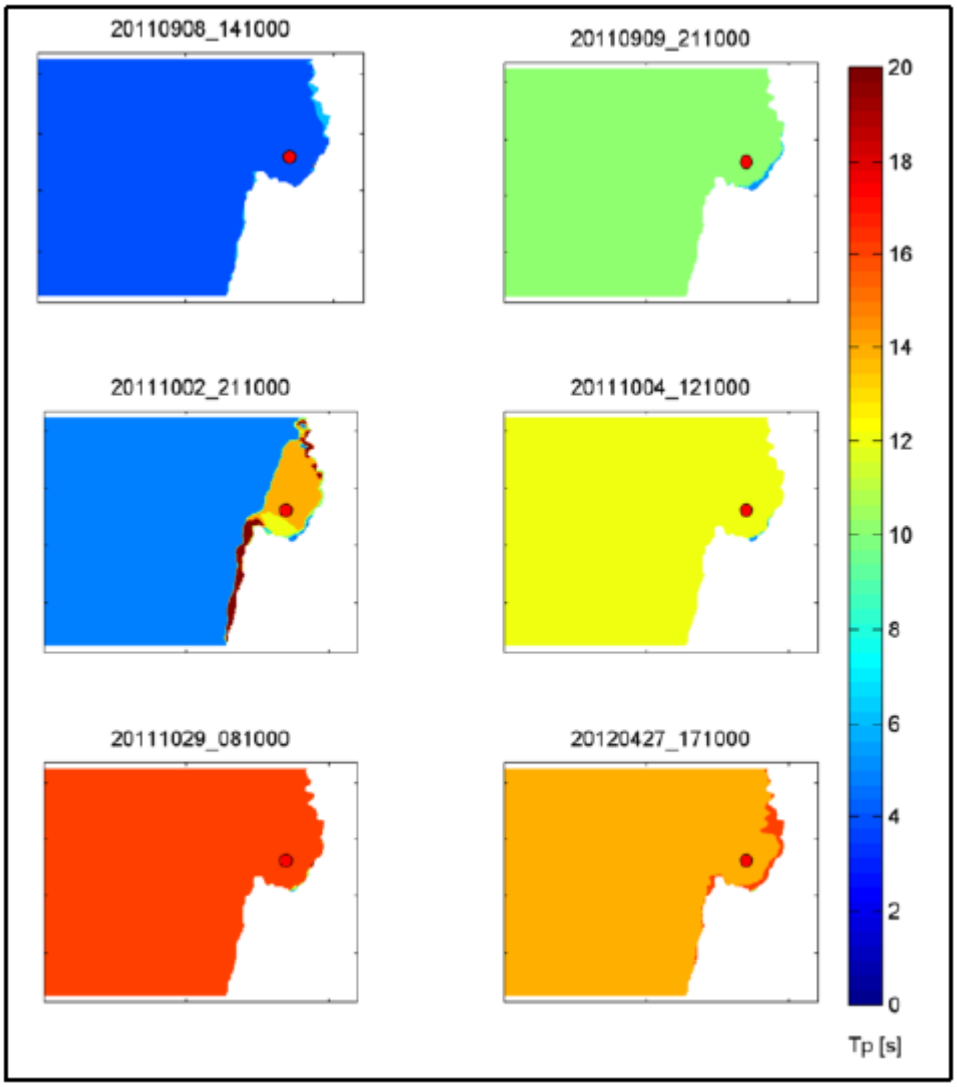


Figura 2.10 Período peack para los climas seleccionados [17]

2.3.2 Potencia media

La potencia media expresada en la figura 2.11 corresponde a un registro representativo de la zona de Lebu (-37.6°, -73.7°) similar a la zona de interés (-33.01,-71.59), aun así es válido aplicar un factor de corrección debido a los fenómenos costeros descritos anteriormente. Ya que el equipo está concebido para trabajar en la costa estos fenómenos siempre estarán presentes en la operación del equipo.

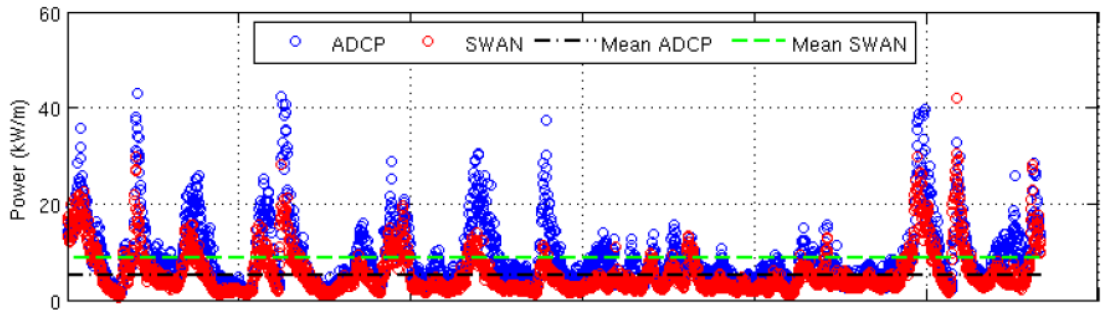


Figura 2.11 Comparación de resultados entre SWAN y las mediciones ADCP [17]

De la figura 2.11 se puede observar como la potencia media disponible en el sitio similar al de interés se sitúa alrededor de los 5 [kW/m]. Aun así, hay que considerar también la disminución del potencial al acercarse a la costa producido principalmente por el fenómeno de reducción de altura del frente de olas causado por la refracción, siendo esta importante al llegar a aguas someras de alrededor de 10 metros de profundidad. Esto además debe complementarse con los fenómenos costeros identificados en el punto de estudio, el cuál puede favorecer o empeorar la disponibilidad de potencia las cuales se pueden estimar en cerca de un 36% [16], esperando en ello un potencial medio de 3[kW/m].

A modo de visualizar la caracterización del mar en este punto y lograr tener una referencia la figura 2.12 muestra la configuración de altura característica y periodo peack correspondientes para la potencia media estimada.

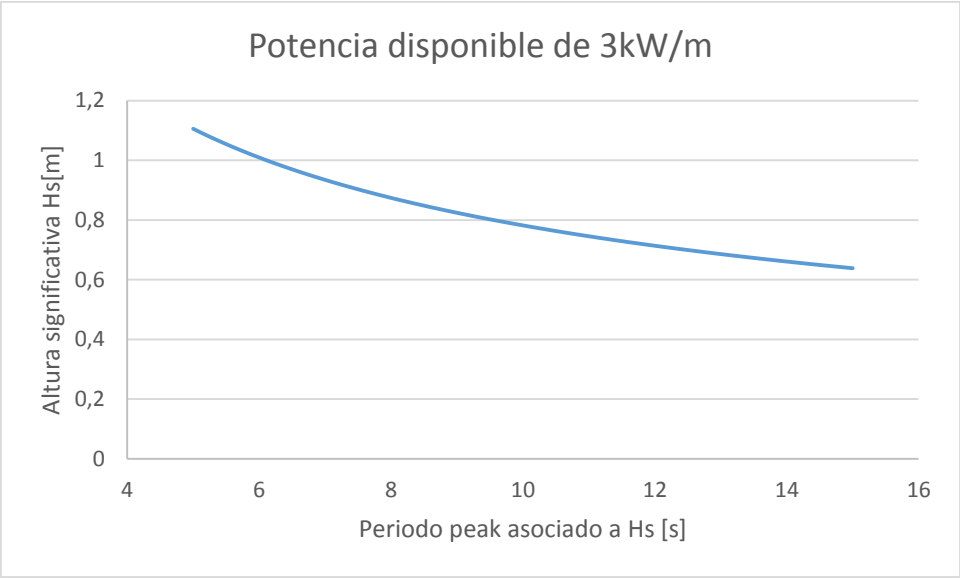


Figura 2.12 Referencia del espectro significativo esperado en la zona de interés

Se aprecia como la altura estimada para el diseño es de 0,6 a 1[m] en promedio y el periodo alrededor de 10 [s], datos que será tomados como referencia para el desarrollo de las partes mecánicas y eléctricas del prototipo en desarrollo.

Capítulo 3: Prototipo en Desarrollo

3.1 Presentación del prototipo

En base a la patente "Mecanismo de conversión undimotriz", el equipo de trabajo asignado para este proyecto desarrolló el modelo que se presenta a continuación, el cual se compone de dos partes principales, una seca en el borde cortero y una húmeda sumergida en el mar a metros de la orilla. Las figuras 3.1 y 3.2 presentan dos vistas generales del diseño del prototipo, en las cuales se indican sus principales subconjuntos. La tabla 3.1 muestra una desagregación de los componentes involucrados.

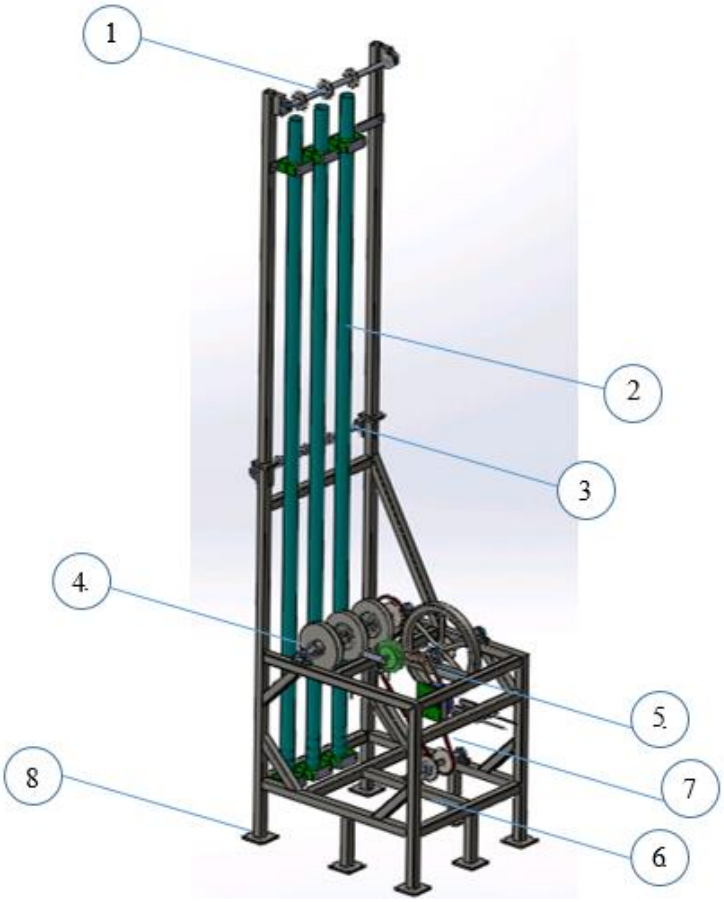


Figura 3.1 Vista de la parte no sumergida del prototipo

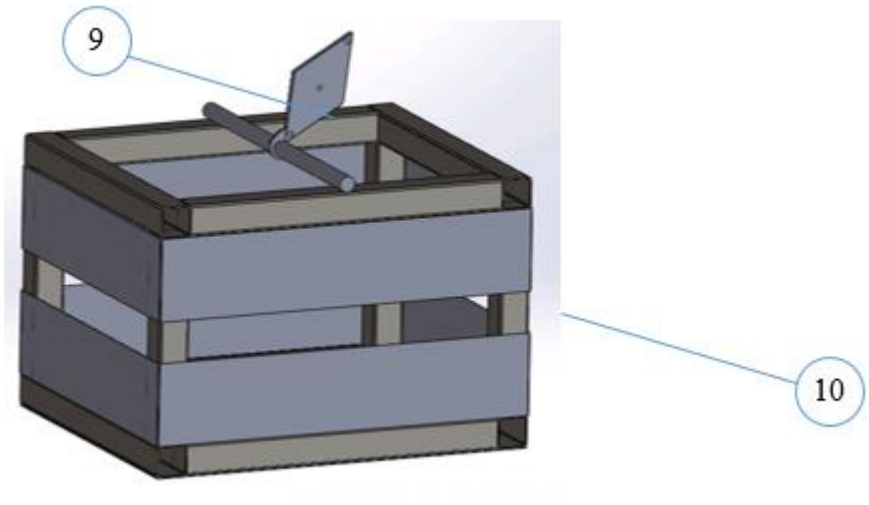


Figura 3.2 Vista de la parte sumergida del prototipo

A continuación y para tener mayor claridad en cuanto al proceso de generación se presenta la figura 3.3, esquema que describe el proceso de generación desde el oleaje.

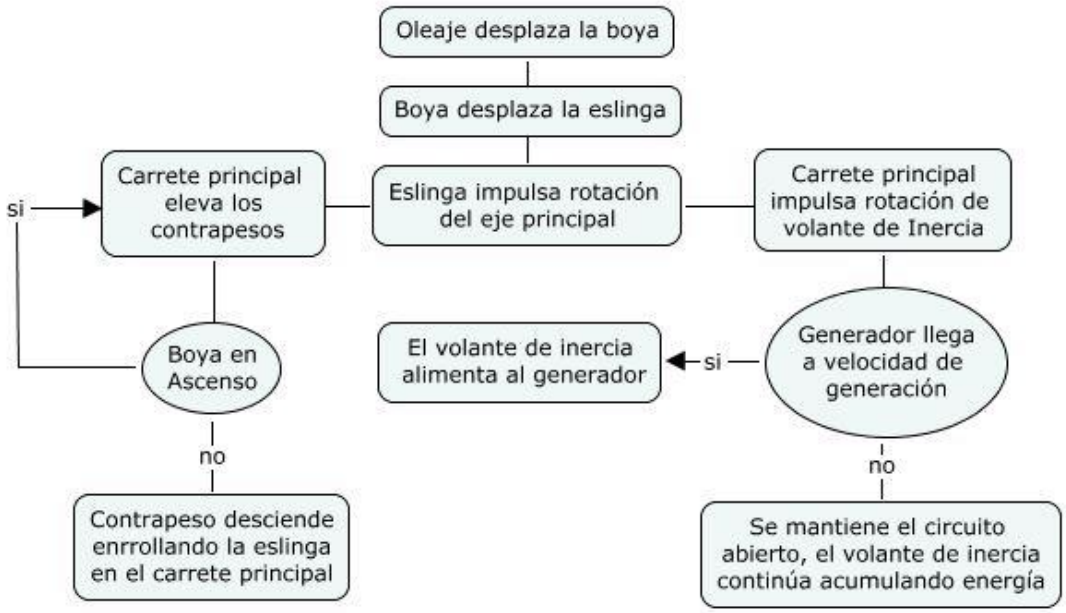
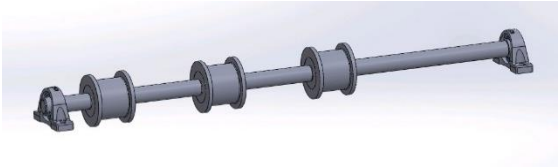
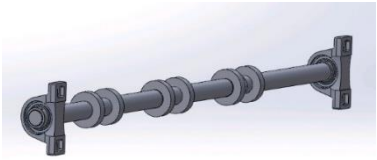
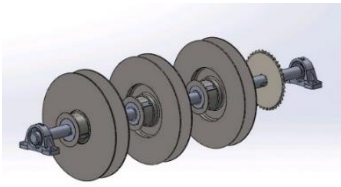
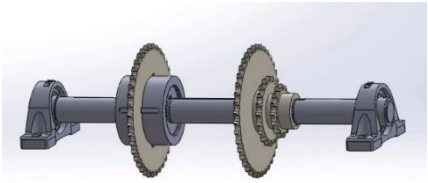
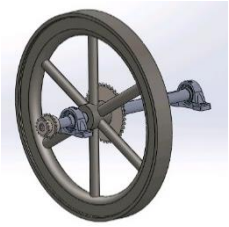
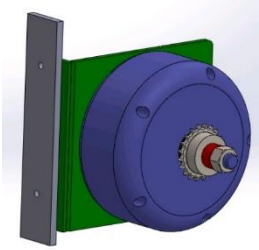
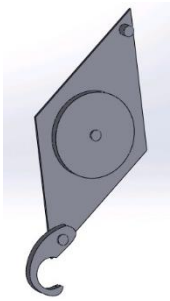
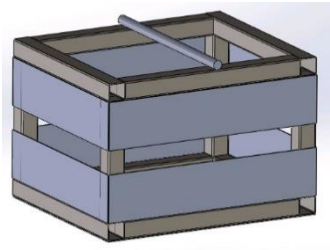


Figura 3.3 Esquema de generación en base a un impulso dado por el oleaje

Tabla 3.1 Descripción y vistas de subconjuntos del prototipo

ítem	Descripción	Vista
1	Eje guía para contrapesos Los carretes del eje, guían la cuerda que conecta a los contrapesos el eje principal.	
2	Guías de contrapesos Mantienen a los contrapesos restringidos a un movimiento vertical, evitando el balanceo.	
3	Eje guía para boyas Los carretes del eje, guían la cuerda que conecta las boyas con el eje principal.	
4	Eje principal Soporta a los carretes que reciben el impulso de parte del oleaje, a los contrapesos y a su vez transmite la potencia capturada al resto del sistema.	

ítem	Descripción	Vista
5	Eje de transmisión Soporta los piñones que generan la relación de transmisión entre el eje principal y el eje de inercia.	
6	Eje de Inercia Soporta al volante de inercia del sistema y transmite la potencia obtenida al generador, acoplado a través de un piñón en su extremo izquierdo.	
7	Generador Equipo que convierte la energía mecánica capturada en energía eléctrica.	
8	Estructura base Corresponde al esqueleto del prototipo, soporta los subconjuntos descritos anteriormente.	

ítem	Descripción	Vista
9	Polea sumergida Guía la cuerda que conecta las boyas con el eje guía para boyas.	
10	Canastillo Contiene el peso suficiente para fijar la polea y boya a ese punto en el borde costero.	

Los principales subconjuntos a su vez están formados por componentes. Estas partes individualmente deben ser capaces de soportar las cargas generadas en la operación del equipo en condiciones estándares. La tabla 3.2 detalla las partes a verificar, para asegurar que el prototipo soporte el trabajo a realizar.

Tabla 3.2 Desagregación de subconjuntos y componentes

Ítem	Subconjunto	Componente
1	Eje guía para contrapesos	Eje
		Rodamientos
		Descansos
2	Eje guía para boyas	Eje
		Rodamientos
		Descansos

Ítem	Subconjunto	Componente
3	Eje principal	Eje
		Rodamientos
		Descansos
4	Eje de transmisión	Eje
		Rodamientos
		Descansos
5	Eje de Inercia	Eje
		Descansos
		Volante de inercia
6	Estructura base	Reticulados
7	Canastillo	Polea

En el sub-capítulo 3.2 se realizará el trabajo de dimensionamiento y/o verificación de las partes ahora detalladas, con el fin de asegurar la integridad del prototipo para las condiciones de operación estándar.

3.2 Resultados

3.2.1 Consideraciones sobre los materiales

En las siguientes versiones del prototipo se evaluará el uso de materiales que soporten las condiciones de alta humedad y concentración salina presentes del lugar de instalación. Para este primer prototipo, pensado en que el principal objetivo es verificar el funcionamiento del mecanismo y la efectividad de la captación de energía, se dispondrán a construir los carretes y los pilares de la estructura en acero al carbono A36 debido a la resistencia y fácil manipulación. Asimismo el volante de inercia en acero fundido y los ejes en Acero SAE 4340 por su mayor resistencia. Ya que los materiales no son idóneos para el ambiente salino, para realizar una protección a la estructura se aplica pintura anticorrosiva para las partes estáticas y vaselina para las partes en movimiento.

3.2.2 Condiciones estándares de operación del sistema (CEO)

Las condiciones estándares de operación se basan en el torque y rpm que se establece a partir de la información entregada por el fabricante del generador usado el prototipo. Las figura 3.4 y 3.5 muestran las solicitaciones requeridas para llegar al punto de operación correspondiente a 1.5 [kWe].

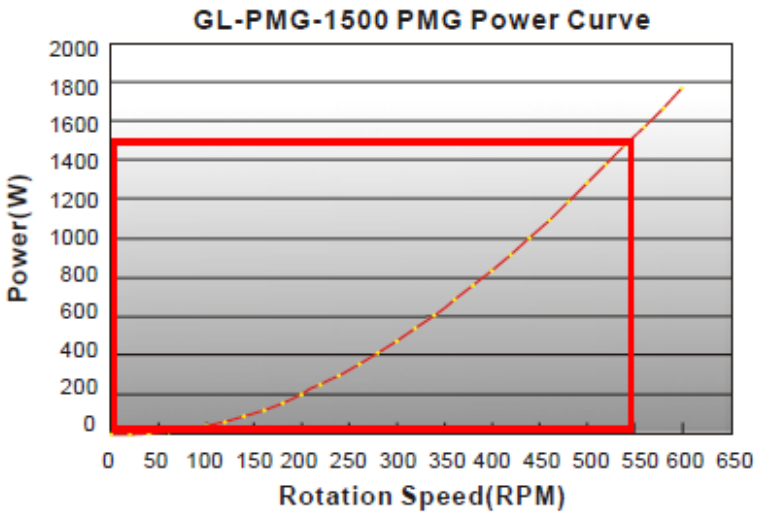


Figura 3.4 Curva desempeño del generador (Anexo A)

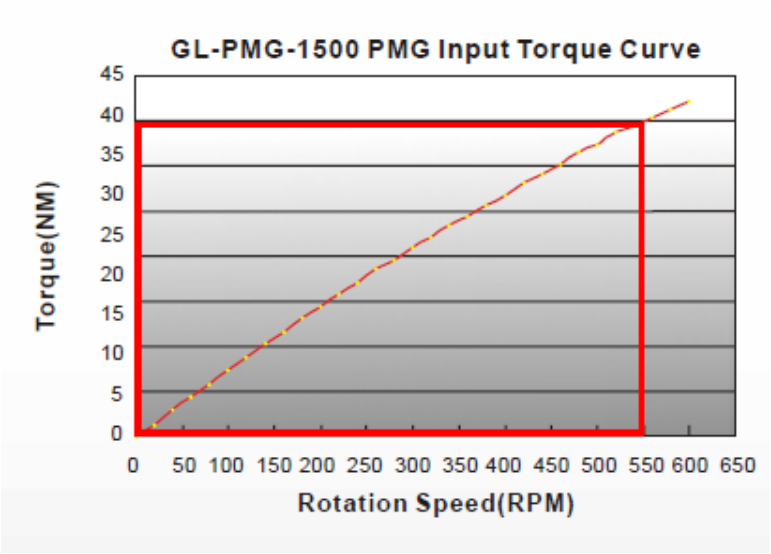


Figura 3.5 Curva de torque del generador (Anexo A)

Teniendo en cuenta lo anterior, las condiciones de operación estándar (CEO) definidas para el cálculo de los componentes del equipo son 550 revoluciones por minuto [RPM] y torque 40 [Nm] en el eje del generador.

Consideraciones dimensionales de la boya

Diámetro: 670 [mm]

Volumen sumergido: 75 [lt]

Consideraciones respecto a la eficiencia del prototipo

La eficiencia del prototipo se obtiene como el producto de la eficiencia de los componentes mecánicos involucrados en la transmisión de la energía, los cuales se observan en la tabla 3.3. La columna eficiencia acumulada refleja el producto descrito.

Tabla 3.3 Componentes de transmisión de potencia y eficiencias

N°	Componente	Ef. Mínima	Ef. Acumulada
1	Boya esférica	20%	20%
2	Eslinga	70%	15%
3	Polea sumergida	95%	13%
4	Carrete guía eslinga	95%	12%
5	Carrete principal	95%	12%
6	Cadenas de transmisión	90%	11%
7	Eje de transmisión (Rodamientos trinquete)	95%	11%
8	Cadena de transmisión	90%	10%

La eficiencia de la boya se determina de acuerdo a su radio según la referencia indicada [20], para las poleas carretes y ejes se considera la eficiencia de un 95% el cual corresponde a la eficiencia de los rodamientos sobre los cuales están montados estos componentes, para la transmisión por cadenas se considera un 90% [21]y finalmente para la eslinga y por falta de bibliografía en la materia se debe asumir una eficiencia de un 70%.

Sé tiene que el prototipo en desarrollo cuenta con una eficiencia estimada de un 10%. En este punto se extrae una primera conclusión y es que hay un potencial importante

en cuanto al desarrollo de elementos de captación de energía undimotriz que puedan aprovechar mejor la energía disponible.

Consideraciones respecto a la ola

La figura 3.6 muestra 4 curvas iso-potencias. Para este caso se asume una eficiencia aproximada de conversión del prototipo de un 10% por lo que se usa como referencia la curva de 15 [kW].

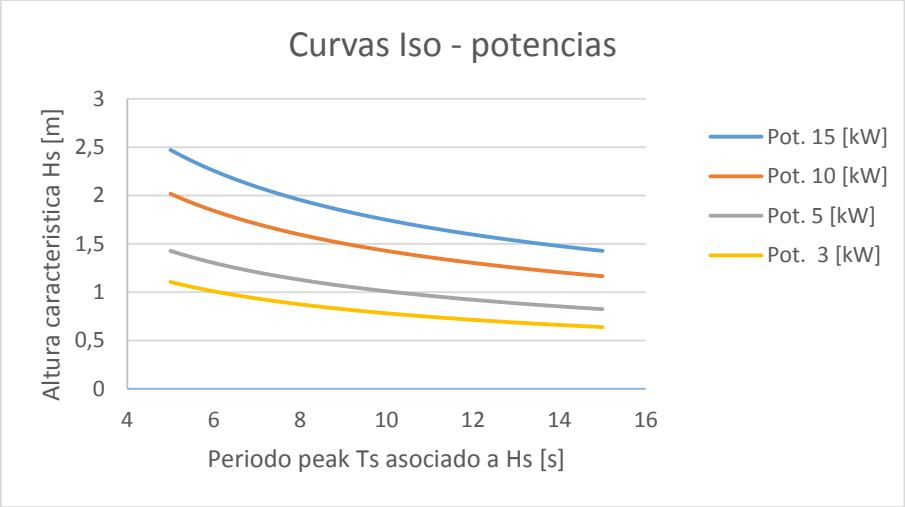


Figura 3.6 Curvas de potencia estimadas según modelo

La altura de la ola es importante dado que es necesario, para usarlo como referencia en el dimensionamiento del desplazamiento vertical que tendrán los contrapesos. El desplazamiento de estos contempla el recorrido de la boya debido a la ola, más el cambio de cota ocasionado por el cambio de mareas. Dado lo anterior, y considerando la eficiencia del prototipo, se toma como referencia un punto central en la curva de potencia 15 [kW]. A continuación se presentan los puntos seleccionados tanto para la amplitud como el periodo característico.

Altura de la ola: 1,7 [m]

Periodo: 11 [s]

<u>Consideraciones dimensionales para el mecanismo</u>

La figura 3.7 muestra una vista lateral de la estructura del prototipo, además se indican 4 puntos en donde están instalados los ejes.

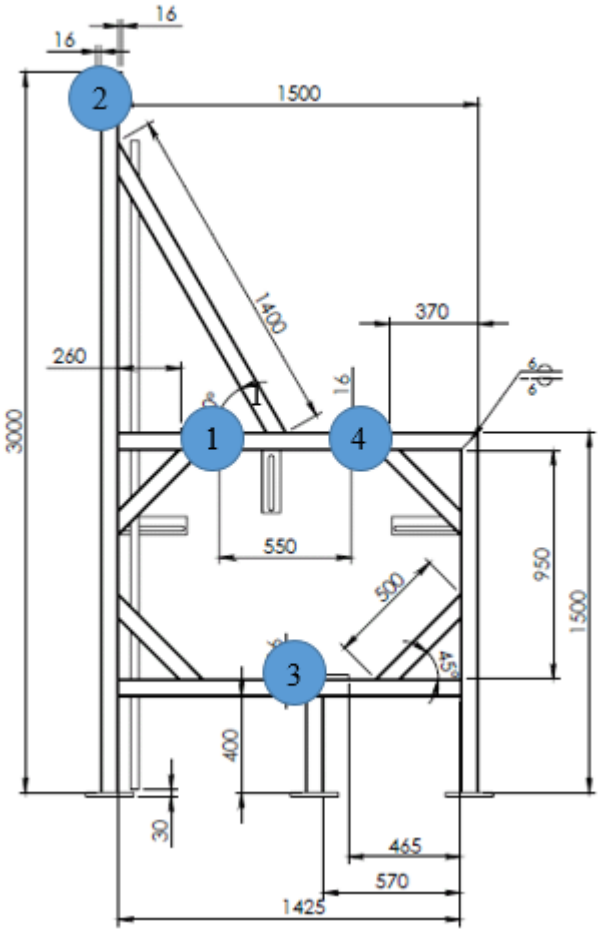


Figura 3.7 Vista lateral y dimensionada del prototipo

3.2.3 Parámetros calculados

La Tabla 3.4 muestra los valores calculados para las principales solicitaciones. Según las condiciones estándares de operación indicadas en el punto 3.2.2. Se muestra la carga sobre los ejes del equipo. Esto más la geometría de del prototipo permite determinar la carga sobre el resto de los componentes.

Tabla 3.4 Parámetros calculados para los ejes de acuerdo a las CEO

		Torque [Nm]	Tensión [N]
1	Eje principal	94	1675
2	Eje guía para boyas	0	1675
3	Eje de transmisión	61	870
4	Eje de inercia	40	570

3.2.4 Componentes seleccionados

Una vez realizadas las estimaciones de cargas sobre la estructura se realiza la selección de componentes, los cuales son presentados a continuación.

3.2.4.1 Piñón primario, de transmisión, de inercia y cadena de transmisión

La relación de velocidades entre el piñón primario y el piñón de transmisión va de 1 a 1.5, al igual que la de este con el piñón de inercia, por lo que la relación final de transmisión entre la velocidad de la boya y el volante de inercia va opcionalmente va de 1 a 2.25 veces, esto permite tener flexibilidad para adaptarse a condiciones de oleaje variadas.

3.2.4.2 Piñón Z15

- Nomenclatura 10B – 1 (5/8”) Z-15 según norma DIN 8187 - ISO/R 606
- Número de dientes Z = 15
- Diámetro primitivo Dp = 76,36 [mm]
- Ancho del diente h1 = 9,1 [mm]

3.2.4.3 Piñón Z20

- Nomenclatura 10B – 1 (5/8”) Z-20 según norma DIN 8187 - ISO/R 606
- Número de dientes Z = 20
- Diámetro primitivo Dp = 101,49 [mm]
- Ancho del diente h1 = 9,1 [mm]

3.2.4.4 Piñón Z40

- Nomenclatura 10B – 1 (5/8”) Z-40 según norma DIN 8187 - ISO/R 606
- Número de dientes Z = 40
- Diámetro primitivo Dp = 202,34 [mm]
- Ancho del diente h1 = 9,1 [mm]

3.2.4.5 Cadena

- Nomenclatura 5/8” x 3/8”
- Paso 15,875 [mm]
- Ancho interno 9,65 [mm]
- Rodillo 10,16 [mm]

3.2.4.6 Eje primario

- Material: SAE 4340
- Diámetro = 34,6 [mm]
- FS = 3

3.2.4.7 Eje de transmisión

- Material: SAE 4340
- Diámetro = 23,4 [mm]
- FS = 3

3.2.4.8 Eje superior boya

- Material: SAE 4340
- Diámetro = 23,4 [mm]
- FS = 3

3.2.4.9 Eje superior contrapeso

- Material: SAE 4340
- Diámetro = 40 [mm]
- FS = 3

3.2.4.10 Volante de inercia

- Material: Acero fundido
- Inercia = 13 [kgm^2]

3.2.4.11 Eje inercia

- Material: SAE 4340
- Diámetro = 40 [mm]
- FS = 3

3.2.4.12 Eslinga de tensión boya

- Material: Polyester de alta resistencia
- Norma: ASME 30.9
- Color: Lila
- Capas: 4
- Sección = 1,5”
- Carga de rotura mínima: 1.240 [kg]

3.2.4.13 Eslinga de tensión contrapeso

- Material: Polyester de alta resistencia
- Norma: ASME 30.9
- Color: Amarilla
- Capas: 2
- Sección = 1,5”
- Carga de rotura mínima: 640 [kg]

3.2.4.14 Contrapeso

- Material: Acero 1045
- Geometría cilíndrica
- Diámetro 100 [mm]

- Largo 100 [mm]
- Masa 6 [kg]

3.2.4.15 Rodamientos de los carretes superiores

- Tipo: rodillos cilíndricos de una hilera
- Nomenclatura: 6208 2RS
- Diámetro interior = 40 [mm]
- Diámetro exterior = 80 [mm]
- Ancho = 18 [mm]
- Carga estática = 18,8 [kN]
- Carga dinámica = 29,1 [kN]

3.2.4.16 Descansos

- Tipo descanso: Soporte de pie con rodamiento Y
- Código del descanso: SY 507 M
- Tipo rodamiento: rodillos cilíndricos de una hilera
- Código del rodamiento: YAR 207-2F
- Diámetro interior = 35 [mm]
- Carga estática = 15,3 [kN]
- Carga dinámica = 25,5 [kN]

3.2.4.17 Rodamiento trinquete

- Código del rodamiento: CSK 40
- Diámetro interior = 40 [mm]
- Diámetro exterior = 80 [mm]
- Ancho = 22 [mm]

- Torque = 385 [Nm]
- Carga estática = 12,25 [kN]
- Carga dinámica = 15,54 [kN]

3.2.4.18 Estructura

- Material: Acero A36 ó A3724
- Perfiles cuadrados 75 x 75 x 3 [mm]
- Soldadura al Arco

Con estos puntos definidos se procede a la corrección del diseño realizado y la posterior generación de los planos de fabricación. A partir de este momento se resuelven problemáticas como lo son el anclaje del equipo y la logística en lo que refiere al traslado y montaje del prototipo. El anexo 3 muestra parte de uno de los planos generados.

Capítulo 4: Resultados y Análisis

Este capítulo presenta y describe la información obtenida tras la instalación del prototipo. Se presenta la descripción del sistema de medición, los resultados obtenidos para distintas fechas y finalmente un análisis de los resultados.

4.1 Sistema de medición

Para observar cómo se comportará este equipo ante diversas situaciones climáticas a lo largo del día, surge la necesidad de elaborar un sistema de telemetría con tal de mantener el equipo monitoreado durante las 24 horas.

La información capturada genera los datos utilizada posteriormente para el análisis del comportamiento del equipo en función del oleaje.

Las variables a ser monitoreadas corresponden al desplazamiento de la eslinga en función del tiempo, rpm, tensión, corriente en el generador y tensión en las baterías. Las cuales se registran por medio de sensores instalados en la estructura principal para el desplazamiento de las eslingas y para las rpm del volante de inercia, luego del generador otro par de sensores para la medición de potencia generada y finalmente se suma un micro controlador el cual envía la información a una plataforma para poder observar los datos en línea.

El sistema de medición se basa en la estimación de la altura de la ola en función del tiempo, lo cual permite conseguir una primera estimación de la potencia disponible en el lugar de instalación.

Para medir la altura de la ola en función del tiempo, se mide el desplazamiento de la eslinga solidaria a la boya en función del tiempo. Cabe mencionar que esta medición es una aproximación a la posición real de la altura en la ola en función del tiempo. Ya

que existen pérdidas de recorrido en la boya y en la eslinga que se explican mejor la tabla 3.3.

A continuación se presentan los instrumentos de medición, el sistema de captura de datos y su instalación.

4.1.1 Encoder incremental

Dispositivo electrónico para medición de desplazamiento angular, marca YUMO modelo A6B2 (ver figura 4.1).

Estos dispositivos tienen en dos funciones de monitoreo en el equipo. Tres encoder registran el giro en ambos sentidos para de los carretes guías para las eslingas de las boyas. El cuarto encoder mide las RPM en el eje del volante de inercia.

En el desplazamiento de la eslinga se mide de forma indirecta. Se hace solidarizando el movimiento del cabezal del encoder con el carrete guía sobre el cual se apoya la eslinga, dicho carrete está montado sobre 2 rodamientos lo cual permite que en la medida que la eslinga se desplaza el carrete guía gire solidario a ella (ver figura 4.3 y 4.4). El encoder mide el desplazamiento angular de su cabezal en función del tiempo, lo cual se lleva al desplazamiento de la eslinga aplicando una relación de radios de giro entre el cabezal y la eslinga.

Figura 4.1 Encoder incremental usado para la medición [22]

Para decodificar la información entregada por el encoder se necesita un procesador de datos, en este caso se usa un Arduino UNO, con su correspondiente accesorio (Tarjeta Logger Shield) para poder almacenar la información captada por el dispositivo en una tarjeta SD. La figura 4.2 muestra el hardware descrito.

Figura 4.2 Arduino UNO con tarjeta Logger Shield [22]

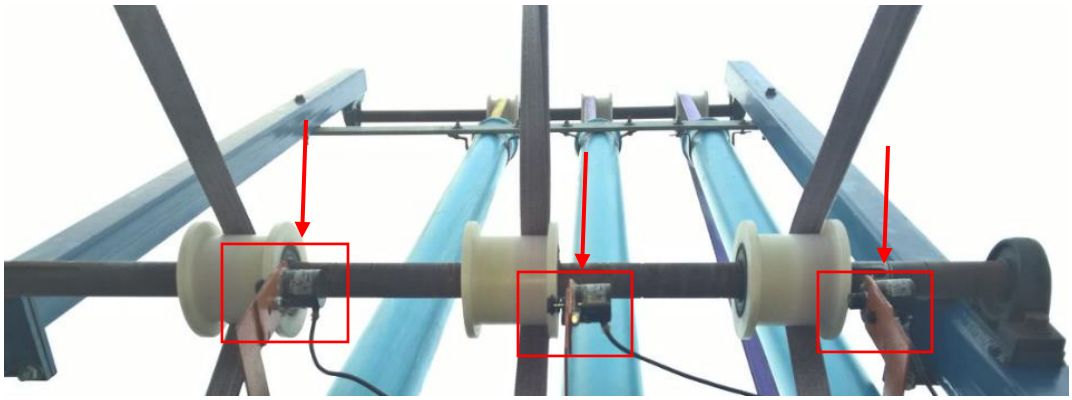


Figura 4.3 Encoder para la medición del desplazamiento de las eslingas

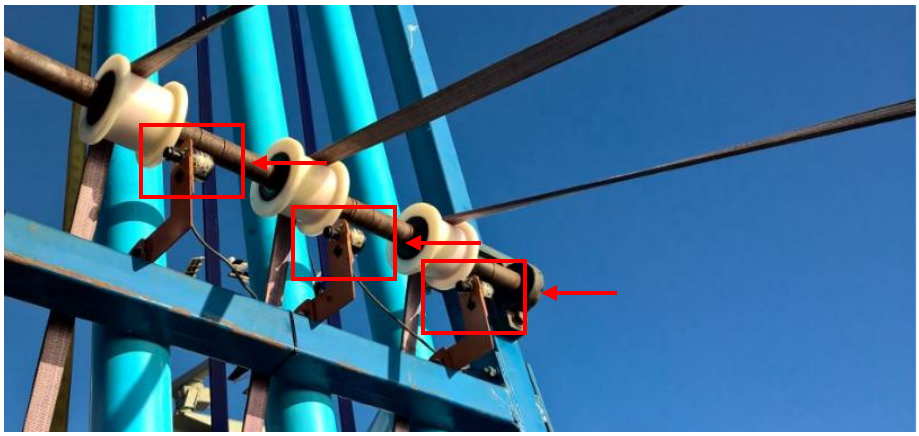


Figura 4.4 Fotografía de la instalación de los encoder

Para complementar el sistema de medición se solicitó al área de telemetría de la empresa el servicio de monitoreo en línea lo cual permitió salvar la información hacia una plataforma online en el momento que es capturada. Adicionalmente se utilizó una cámara para observar el prototipo y las boyas. La figura 4.5 muestra un pantallazo de la plataforma online.

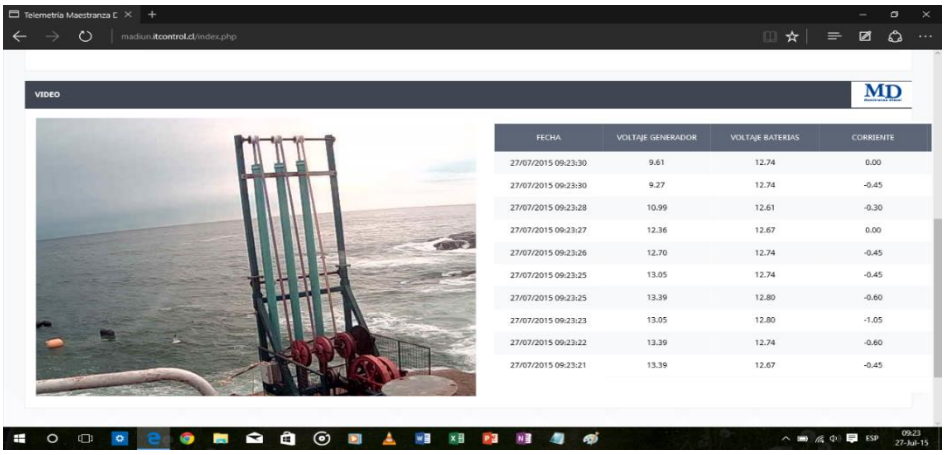


Figura 4.5 Plataforma online de captura de datos y monitoreo visual

Con los elementos descritos se cuantifica el valor del estímulo que recibe el prototipo. Lo que continúa es estimar la potencia entregada por el prototipo al sistema de carga de baterías, para ello se utilizan 3 parámetros: la velocidad del eje de inercia del

prototipo antes del generador, las mediciones de voltaje y corriente luego del generador.

Para la medición de la velocidad angular del eje se utiliza un encoder incremental igual a los usados para medir el desplazamiento de las eslingas.

4.1.2 Sensor de corriente ACS 712

La corriente que entrega el generador se mide con un sensor de corriente modelo ACS 712 (ver figura 4.6) en su versión para 30 amperes. El circuito integrado permite la medición de corriente continua o alterna que fluye a través de un conductor.

La corriente que se desea medir genera un campo magnético, que el sensor lo convierte en un voltaje proporcional a su salida, utilizando el efecto hall. Este voltaje a su vez es leído por un sistema microcontrolador a través de un convertidor A/D para obtener su valor máximo y mediante operaciones aritméticas calcular el valor RMS de la corriente de carga, en este caso la que entrega el generador. La figura 4.7 muestra el diagrama de conexionado para este sensor.

Figura 4.6 Sensor de corriente modelo ACS 712 [22]

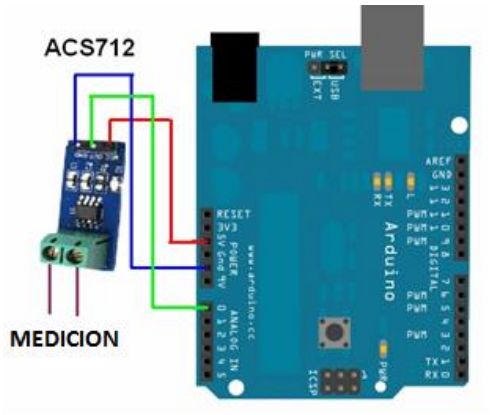


Figura 4.7 Diagrama de conexionado del sensor ACS 712 [23]

4.1.3 Sensor de tensión de generador

Para realizar el monitoreo de la tensión desde el generador se utiliza un arreglo de resistencias en serie (ver figura 4.8) en donde se mide la caída de tensión en una de ellas (máximo 5 volt) la cual es leída por el microcontrolador

Este arreglo de resistencias en serie está compuesto por 4 resistencias de 100kΩ y una resistencia de 12kΩ en la cual se conecta el puerto análogo del controlador. El factor de corrección para obtener el dato real de tensión en el generador, se obtiene de forma experimental, según la información rescatada en la plataforma.

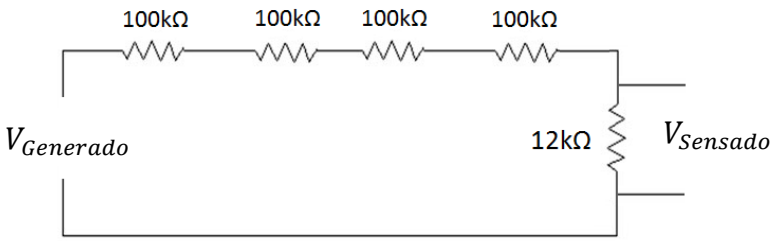


Figura 4.8 Arreglo de resistencias para la medición de tensión

4.1.4 Sensor de tensión de las baterías

La construcción de este sensor es similar al sensor anterior salvo que el arreglo de resistencias en serie es menor siendo este de dos resistencias de 33kΩ y una resistencia de 12kΩ, como lo muestra la figura 4.9.

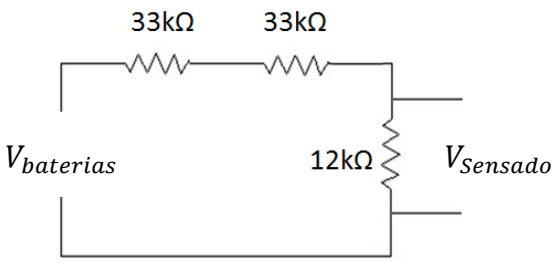


Figura 4.9 Arreglo de resistencias para medir tensión en banco de baterías

4.2 Resultados obtenidos

Una vez puesto el equipo en terreno (ver figura 4.10), e implementado el sistema de telemetría. Es momento de proceder a la toma de mediciones, a continuación las figuras de la 4.11, a la 4.16 muestran de los resultados obtenidos según día y hora se indica. Los valores medidos corresponden al valor instantáneo registrado.

Figura 4.10 Fotografía de la instalación

Medición 1 de Mayo

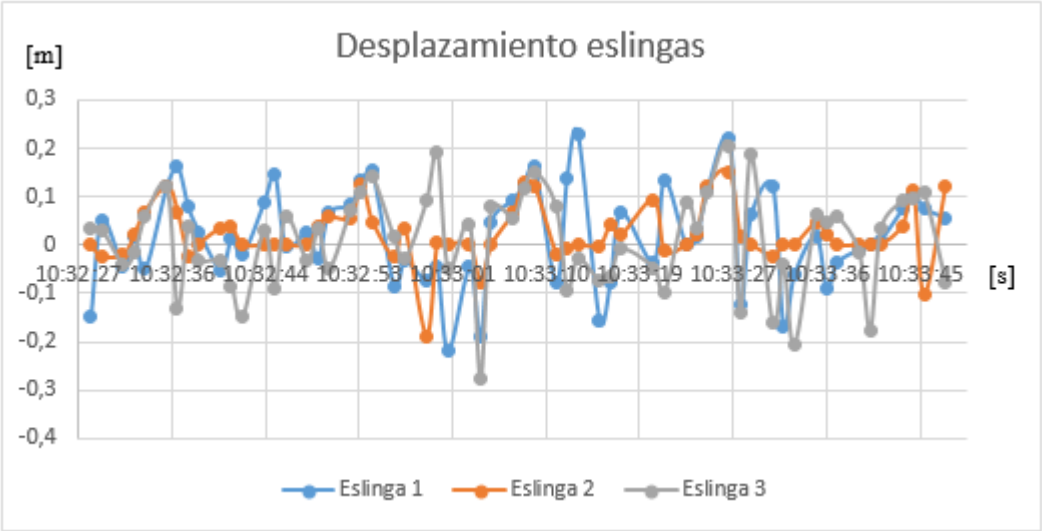


Figura 4.11 Desplazamiento de las tres eslingas durante la mañana de 1 de Mayo

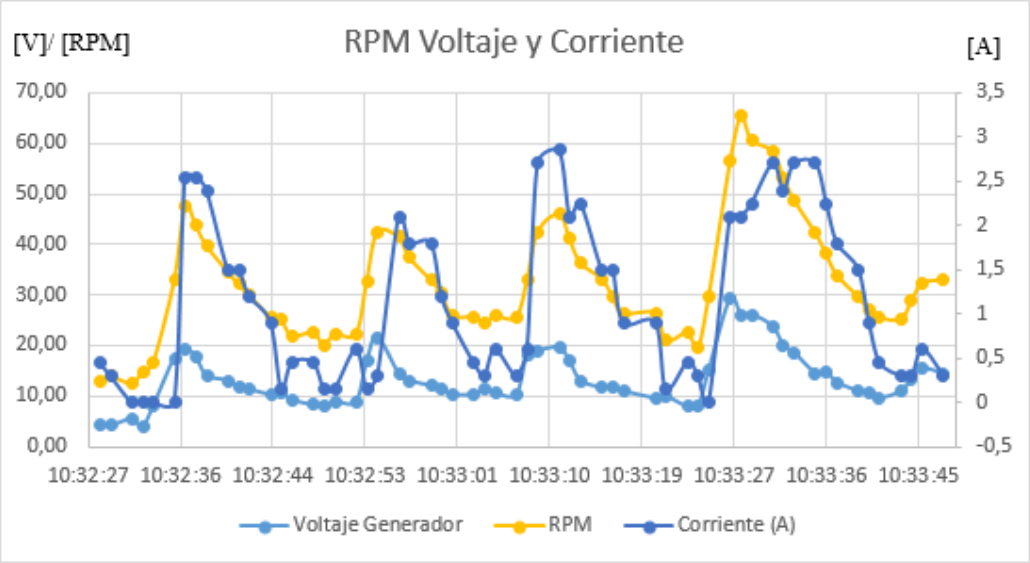


Figura 4.12 Generación eléctrica y rpm para el prototipo según figura 4.11

La información que entregada por la figura 4.11 muestra una el movimiento de las eslingas que a su vez representan el desplazamiento de la boya sobre la superficie,

aparentemente no se aprecia relación con la figura 4.12 que muestra la tensión y rpm para ese mismo intervalo de tiempo.

A diferencia de a figura 4.11, la figura 4.12 si se observan relaciones entre las variables expuestas. La variación de corriente se aproxima la variación de las RPM del prototipo, también se aprecia una relación entre los peaks de voltaje, y los puntos de aceleración de generador.

<u>Medición 27 de Julio</u>

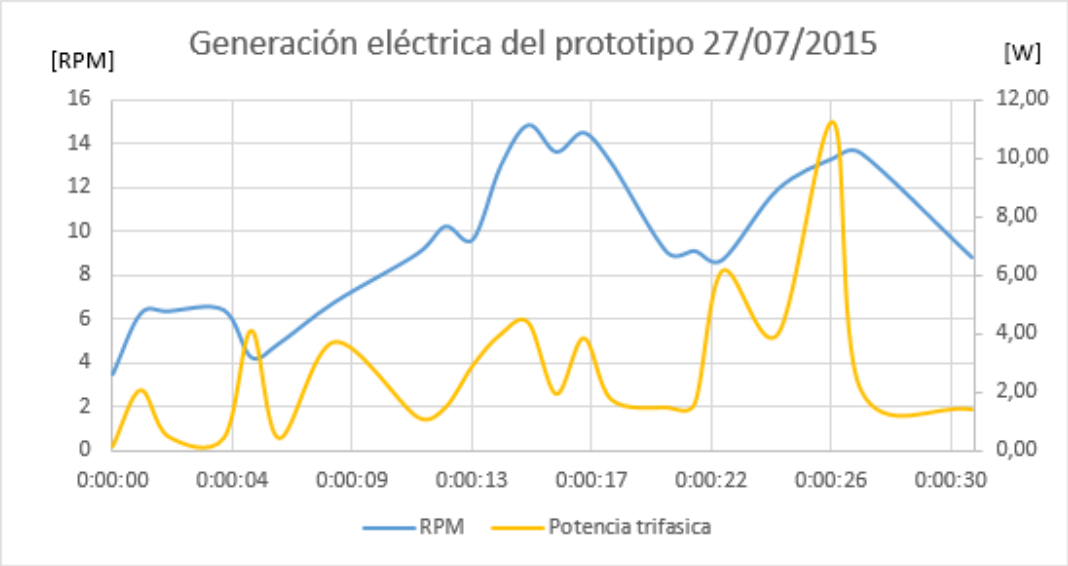


Figura 4.13 Generación eléctrica y rpm del generador para el día 27/07/2015

Medición 28 de Julio

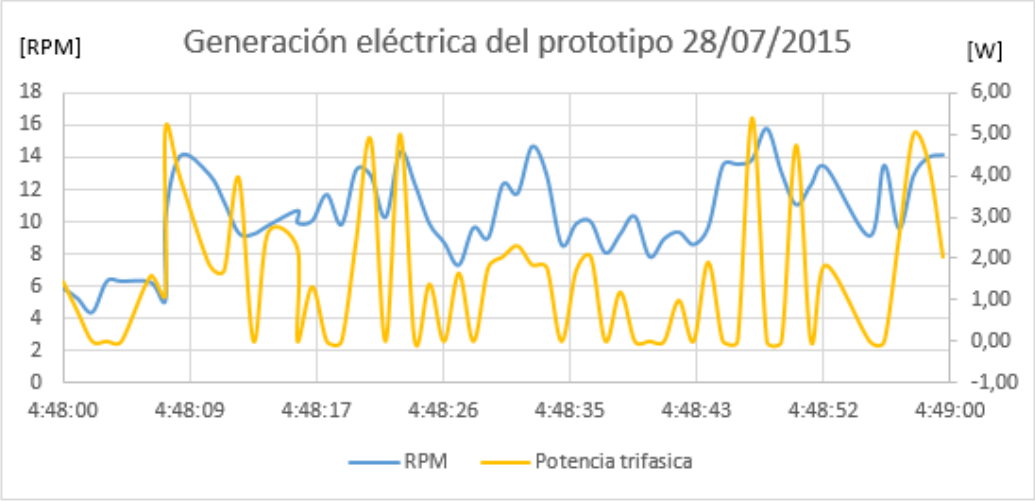


Figura 4.14 Generación eléctrica y rpm del generador para el día 28/07/2015

Las figuras 4.13 y 4.14 muestran instantes en los cuales se registró generación eléctrica por parte del prototipo.

Medición 5 de Agosto

El día 5 de agosto se presenta una marejada con olas cercanas a los 2 metros. El promedio de velocidad se establece en 70 RPM, con peaks eventuales cercanos a las 100 RPM tal como lo muestra la figura 4.15. Desde la 17:10 comienza un rápido incremento en la intensidad del oleaje lo que aumenta la potencia generada, a un promedio de 100 [W], mientras la corriente se aproxima a su límite máximo de 30 [A] (límite de corriente para el sensor ACS 712). Exactamente a las 17:51 y 14 segundos, se presenta un peak de carga que genera el cortocircuito del sistema de regulación eléctrica del prototipo (Ver figura 4.16). En consecuencia del cortocircuito se genera el aumento de las RPM debido a la pérdida de carga.

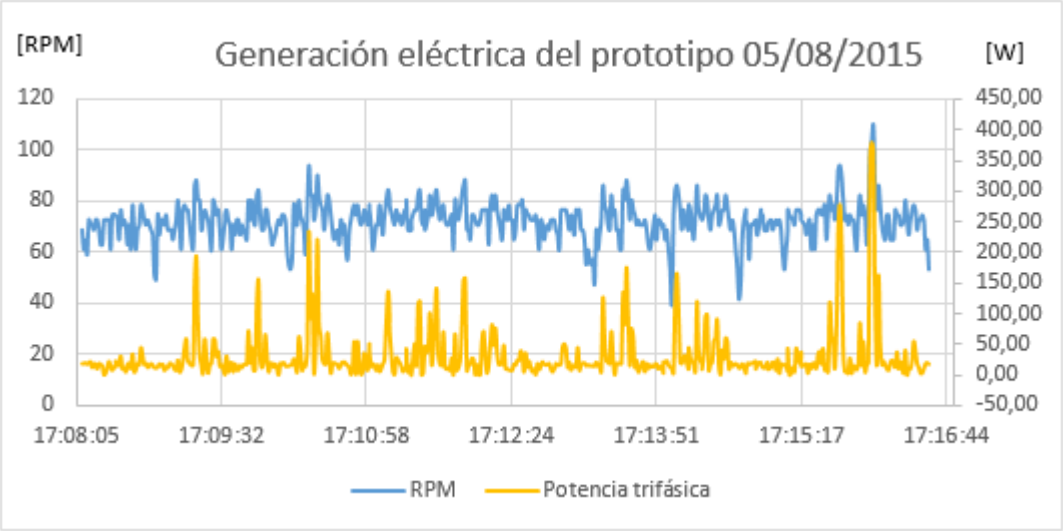


Figura 4.15 Generación eléctrica y rpm del generador para el día 05/08/2015

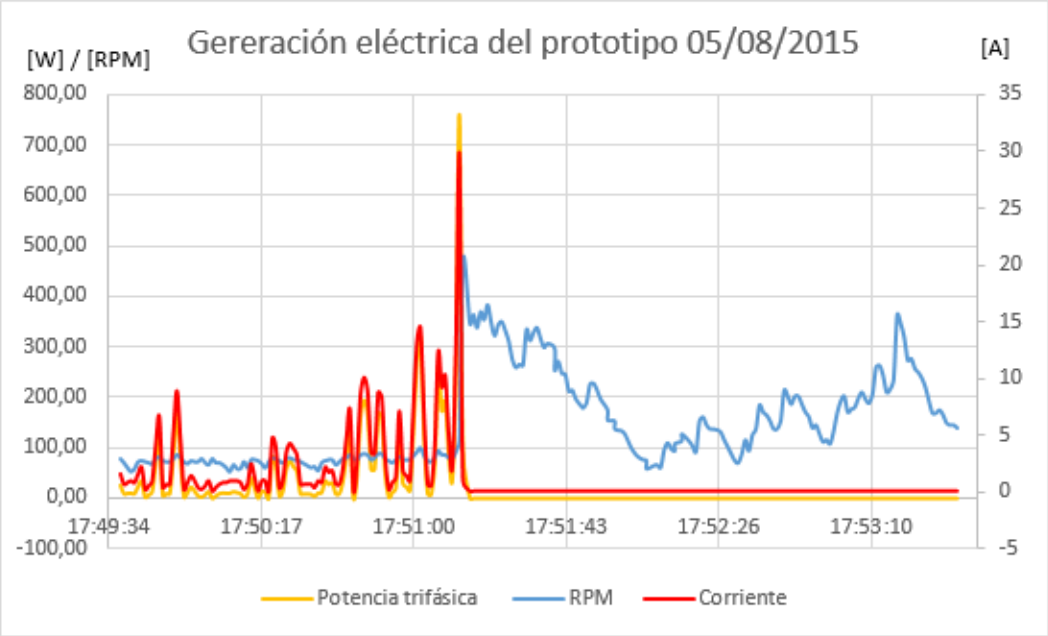


Figura 4.16 Generación eléctrica y rpm para el día 05/08/2015 con cortocircuito

4.3 Análisis

El análisis de los resultados será desagregado en 3 ítems, instalación, sistema de medición, y análisis de los resultados obtenidos, se realiza de esta forma para obtener el mayor provecho a la prueba realizada.

4.3.1 Sobre la instalación

La instalación se realiza en el lugar indicado en el punto 2.1.1 sobre un roquerío (figura 4.17), a unos 5 metros de distancia del agua, y otros 5 metros de elevación. En base al criterio de disminuir las pérdidas causadas por el roce del cable con el piso, es que en primera instancia se piensa en una estructura alta, para instalar el eje guía para las eslingas en la parte superior, generando así una distancia entre la eslinga y el piso y evitar las pérdidas por roce. Una de las ventajas del lugar de instalación, es que al tratarse de una pequeña quebrada, permite acercarse a la orilla y disminuir considerablemente la altura de llegada de las eslingas, en este caso corresponde a la mitad de lo presupuestado inicialmente. Al contrario, algunos puntos no favorables de este lugar, es la falta oleaje de intensidad ya que en más de un 90% del tiempo se registra oleaje que no supera el umbral necesario para la generación. En esta instancia, aparece un primer desafío el cual es determinar un lugar de instalación que cuente con la densidad energética suficiente para mantener el equipo en funcionamiento un porcentaje de tiempo mayor y a la vez que sea capaz de resistir a eventuales marejadas como las conocidas en las costas chilenas.

Figura 4.17 Fotografía al lugar de instalación del prototipo

4.3.2 Sobre el sistema de medición

El sistema de medición implementado correspondió a los encoders para la medición de desplazamiento de las eslingas y rpm en el generador, y lectores de corriente y voltaje a la salida de este, el almacenamiento de la información se realiza exportando la información a una plataforma online. Este sistema si bien es efectivo, no es lo suficientemente robusto para la aplicación, ya que se registran intervalos de tiempo en los que en especial los encoders presentan interrupciones en sus lecturas, luego de cierta velocidad. Además las placas utilizadas (Arduino UNO), no están preparadas para ambientes en el cual se presenta humedad e intensa salinidad. Aun así el sistema de medición es capaz de capturar importante información la cual se presenta en los resultados.

En esta materia una de las mejoras al prototipo es la medición de rpm a través de un contador de pulsos por inducción, el cual tiene características constructivas, que hacen de él un instrumento más idóneo para esta aplicación.

Otra mejora corresponde a la medición del desplazamiento de la boya, la cual se realiza de forma indirecta a través del movimiento de las eslingas. Esta forma indirecta de

medición es una aproximación a la medición del potencial disponible. Ya que en ella se incluye la diferencia del desplazamiento relativo entre la ola y la boya, y la eslinga con la boya, además se debe considerar el efecto de catenaria de la eslinga, el cual genera una diferencia entre el desplazamiento de la boya y lo que efectivamente lee el encoder en el punto de medición.

Una alternativa a este sistema de medición del potencial disponible, es la instalación de boyas de medición en el mismo sitio de la instalación del prototipo, esta genera una medición en paralelo al prototipo, con lo cual se evita realizar las correcciones indicadas previamente y el valor obtenido se puede comparar directamente con los valores de potencia eléctrica generada, y determinar una eficiencia experimental del prototipo.

4.3.3 Sobre los resultados

Respecto a los resultados se tienen diferentes observaciones, la primera de ellas es la de la efectividad del sistema para capturar la energía undimotriz disponible, en la costa de Valparaíso.

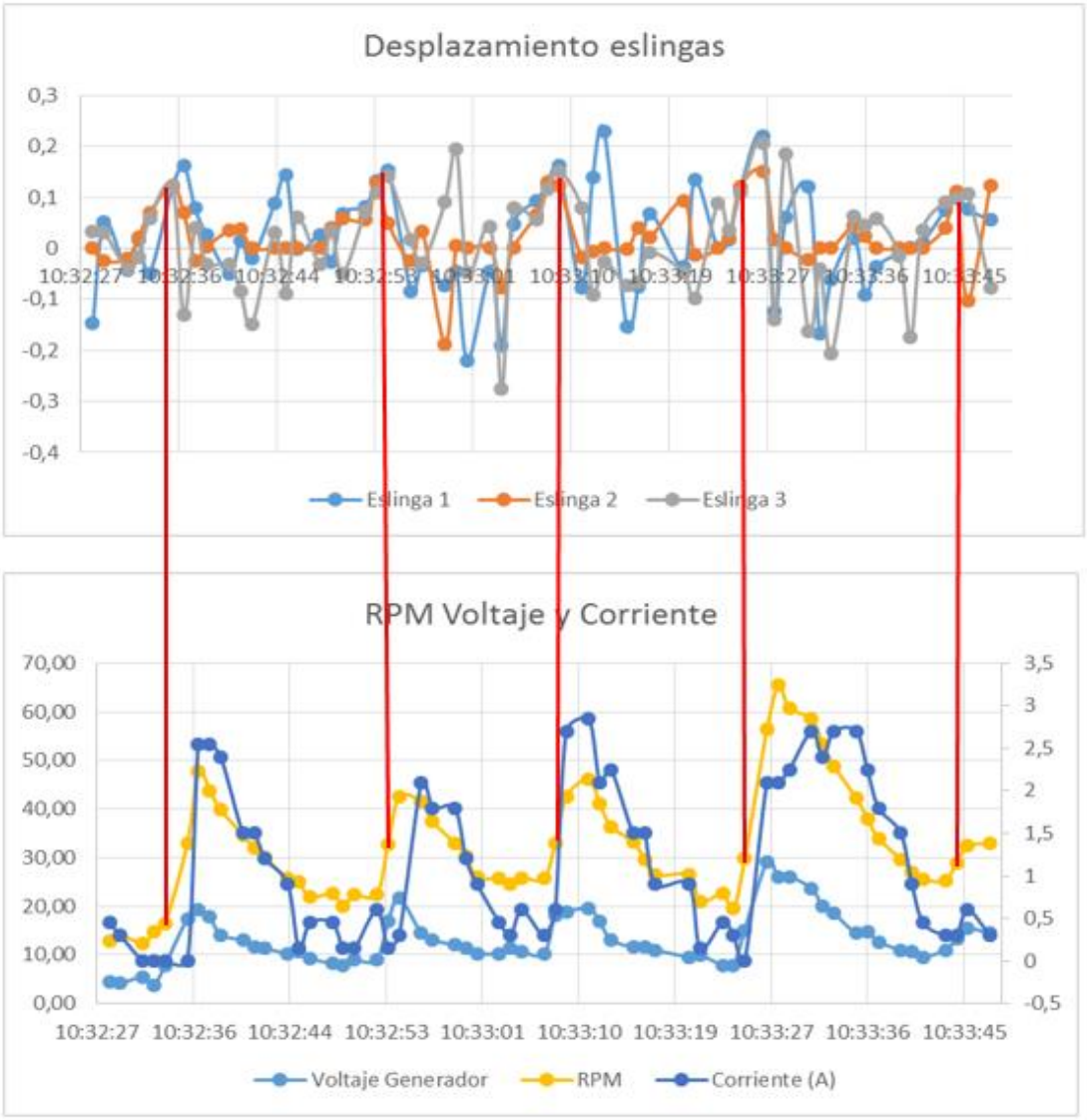


Figura 4.18 Arreglo de los gráficos obtenidos en la lectura del día 1 de Mayo

En la Figura 4.11 se observan los resultados de mediciones de desplazamiento de la boya del día 1 de mayo, mostrando las primeras mediciones de generación de potencia. Los resultados muestran como olas 40 [cm] son capaces de activar el sistema de generación, además si se observa la figura 4.17, la cual es una superposición de los gráficos referentes a la medición del día 1 de Mayo con un arreglo que indica los momentos en los cuales se comenzó con la generación de potencia, se puede observar

un patrón en el desplazamiento de las eslingas, las tres están en una posición relativamente similar, u otra lectura, las tres boyas se levantaron al mismo tiempo.

La figura 4.18 muestra los puntos de aceleración del generador, en contraste con el grafico del desplazamiento de las eslingas. En este caso se puede apreciar una relación entre el punto de aceleración y el movimiento simultáneo de las 3 eslingas.

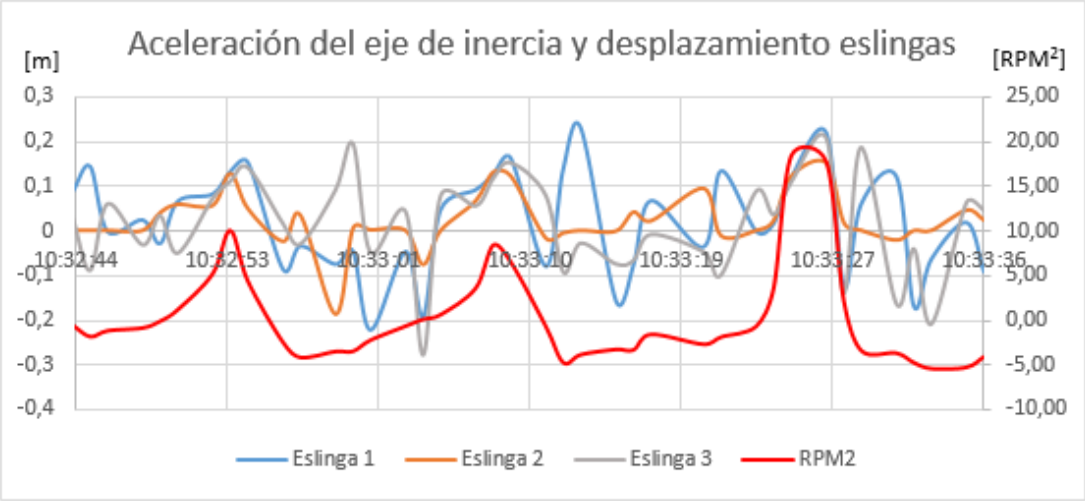


Figura 4.19 Aceleración del generador y desplazamiento de eslingas

Se observa como los puntos de aceleración están relacionadas con el movimiento simultáneo de las tres boyas, lo cual se puede explicar considerando que el movimiento simultáneo de las tres boyas equivale al movimiento de una boya con un área de captación igual a la suma de las áreas de cada una. Mayor superficie implica mayor potencia capturada, lo cual permite romper la inercia del sistema y generar el cambio de la velocidad en el eje del generador.

Una pregunta que se desprende de esta situación es si es más eficiente tener una superficie de captación distribuida en tres puntos como es este caso o, de lo contrario concentrarlas en solo una boya.

Conclusiones

La estimación de la potencia disponible en el sitio de instalación implica algunas dificultades, principalmente porque la información disponible para su cálculo corresponde a los valores característicos asociados a altamar, la que tiene una desviación con respecto al valor disponible para el prototipo dado el efecto de los fenómenos (shoaling, la difracción y/o la reflexión) que experimenta el frente de olas al aproximarse a la costa. Aun así es posible estimar la potencia disponible en el sitio de instalación usando como referencia mediciones de los valores característicos obtenidos en un lugar de similares características costeras que el punto de interés. Este valor corresponde a una referencia que muestra que la potencia disponible es suficiente para el funcionamiento del prototipo.

El criterio utilizado para obtener una aproximación a la potencia disponible en el sitio de instalación fue usar la teoría simplificada junto con los valores característicos (altura y periodo significativo del frente de ola) disponibles en otro sector de Chile de similar silueta costera. Dicha estimación indica que la potencia disponible es suficiente para el funcionamiento del prototipo.

El dimensionamiento de los componentes mecánicos y eléctricos del prototipo se parte de la suposición que la energía mecánica capturada (torque y rpm) será sumamente variable, por lo que la lógica en el desarrollo del ejercicio se basa en el control de esta variabilidad antes de llegar al generador. Una primera medida para esto es trabajar con bajas revoluciones, lo que invita a poner énfasis en la inercia del sistema, para disminuir la variación de la energía capturada, en el generador, es decir, seleccionar uno que pueda trabajar a bajas revoluciones y en los componentes que soporten el torque del mecanismo dado que la disminución de revoluciones implica el aumento de este en los componentes de transmisión de potencia. Se selecciona un generador de bajas revoluciones correspondiente a un GPM (generador de imanes permanentes), y según los requerimientos de este se realiza el dimensionamiento del resto de los elementos mecánicos, es decir, el volante de inercia se calcula para que la variación de rpm este

dentro del rango de generación, y los ejes también se calculan para soportar las cargas necesarias según el torque necesario por el generador. Los materiales escogidos para el prototipo son seleccionados pensando en cubrir con las solicitaciones mecánicas, mas no en la corrosión generada por el ambiente salino, posteriormente se deberá realizar un estudio más acabado en lo que respecta a la selección de materiales idóneos para esta aplicación.

La fabricación del prototipo se inicia con la confección de planos de los componentes estructurales, tales como ejes, estructura de soporte, carretes, bujes, entre otros, además los planos de los subconjuntos y conjunto completo. La fabricación y ensamblaje de los subconjuntos son encargados al mismo proveedor dado que no solo la fabricación requiere de la experiencia y capacidad sino también el ensamblaje, ya que pueden ser necesarios procedimientos térmicos, como el uso de nitrógeno para permitir el montaje de los componentes con ajustes.

La última etapa de este proyecto luego de la fabricación e instalación corresponde a la operación y el análisis de la información obtenida durante su funcionamiento. Respecto a esto la primera observación es la efectividad del mecanismo, este logra convertir la energía undimotriz en energía eléctrica. El sistema de carretes, contrapesos y volante de inercia, rectifica los impulsos y los homogeniza para permitir con el generador la conversión mecánica-eléctrica.

Complementario al prototipo se implementó un sistema de medición, el cual muestra como este requiere un mínimo de energía para comenzar a generar, un umbral de carga, que se traduce a una ola de características mínimas (altura y periodo representativo), aun así los resultados obtenidos no son concluyentes, debido a que corresponde a una primera colección de datos, que idealmente debe ser contrastada con mediciones futuras.

Algo que sí se logró identificar es que la generación se realizó en los momentos en que hubo una coincidencia en el movimiento de las boyas instaladas, es decir, los momentos en que la superficie de captación se multiplicó por el número de boyas en movimiento.

Esta es una de las conclusiones más relevantes pues se identifica la boya como un factor determinante en el control de la generación para esta tecnología y motiva a la investigación y desarrollo de nuevas alternativas. Esta lectura no hubiera sido posible sin entender la forma en cómo se desarrolla la energía undimotriz y la manera en cómo funciona este prototipo.

Líneas Futuras

El equipo logró estar funcionando más de 5 meses durante los cuales se identificaron importantes mejoras para adaptarse a las variables de operación, las más destacadas fueron la combinación de materiales para la transmisión de la potencia desde la boya hacia el carrete del eje principal, usando materiales más resistentes en las zonas de mayor desgaste como la sección que tiene contacto con la polea sumergida y otros materiales más livianos en los tramos restantes, otro punto identificado fue el número de las boya, lo cual tiene relación con la energía capturada con diferentes superficies de captación para una misma densidad energética. Cito estas observaciones ya que idealmente los siguientes desarrollos deben incluir desde su génesis estas mejoras.

Los desafíos que vienen por delante apuntan a tener más control de la energía capturada lo cual se puede trabajar desde dos aspectos. Entendiendo el principio de que el oleaje entrega una densidad energética variable, es posible tener más control compensando las bajas en la densidad energética con el aumento de la superficie de captación y viceversa, es decir el desarrollo de boyas de sección variable. Por otra parte el sistema de acumulación la energía es posterior al generador con un banco de baterías lo que significa que solo se acumula la energía que el generador logra transformar y hay una pérdida de la energía que se logra captar por el prototipo pero no logra superar el umbral de generación. Una alternativa a esto es sumar un paso más entre el volante de inercia y el generador, el cual corresponde a una central hidráulica que sea capaz de acumular la energía y entregarla al generador una vez se logre alcanzar una determinada cantidad,

tal de hacer funcionar el generador en su punto de mejor eficiencia y no desaprovechar la energía capturada.

Referencias

[1] R. Mcdonald, tidal forces and their effects in the solar system, 2005.

[2] M. Bravo, «sistema de conversión mecánica electrica para un generador undimotriz,» 2008.

[3] A.-w. M. A. A. H. A. Al-rabai'ah, research fractional-calculus diffusion equation, 2010.

[4] M. H. S. J. H. L. V. L. D. Banchika, limits of power production due to finite membrane area in pressure retarded osmosis, massachusetts institute of technology, 2014.

[5] P. U. Católica, «evolución de costos ernc,» mercados eléctricos - iee3372, junio 2012. [en línea]. Available: http://web.ing.puc.cl/power/alumno12/costosernc/d._mare.html.

[6] L. H. Holthuisen, waves in oceanic and coastal waters, new york: cambridge university press, 2007.

[7] E. R. A. C. G. S. D. Silva, «evaluation of various technologies for wave energy conversion in the portuguese nearshore,» 2013.

[8] I. Ocean power technologies, «ocean power technologies,» 2015. [en línea]. Available: http://www.oceanpowertechnologies.com.

[9] Www.Tek-Think.com, «Tek Think,» 2016. [En línea]. Available: http://tek-think.com/2014/08/10/building-voith-wells-generator-wave-energy-converter-everywhere.

[10] E. News, «energy news,» 2013. [en línea]. Available: http://www.energynews.es/un-estudio-realizado-en-reino-unido-senala-a-chile-como-lider-potencial-para-desarrollar-la-energia-de-las-olas/#top.

[11] A. O. E. Ltd, «aws ocean enegy,» 2014. [en línea]. Available: http://www.awsocean.com/home.aspx?ln=4.

[12] Espores, «Conservación,» 2013. [En línea]. Available: http://www.espores.org/es/component/k2/electricitat-que-ve-del-mar.html?Tmpl=component&print=1.

[13] P. Riquelme, «mecanismo de conversión undimotriz». Chile patente 47152, 24 agosto 2010.

[14] Y. Goda, random seas and design of maritime structures, singapore: uto-print, 1999.

[15] S. Y. B. &. A. C. E. Ltd., «olas del pacífico,» 2003. [en línea]. Available: www.olasdelpacifico.com.

[16] H. A. D. S. P. Monárdez, «evaluation of the potential of wave energy in chile,» estoril, portugal, 2008.

[17] J. C. R. C. P. A. Z. L. R. L. F. Domínguez, «assessment of fast spectral wave transfer methodologies from deep to shallow waters in the framework of energy resource quantification in the chilean coast,» 2014.

[18] Google, «Google Maps,» [En línea]. Available: https://www.google.cl/maps?Source=tldsi&hl=es.

[19] A. D. Chile, «servicio hidrográfico y oceanográfico de la armada,» 2014. [en línea]. Available: http://www.shoa.cl/mareas/tablademarea.html.

[20] B. L. Hongtao gao, «establishment of motion model for wave capture,» the college of marine engineering, dalian maritime university, china, 2015.

[21] N. E. L. R. L. R. Matt d. Kidd, «bicycle chain efficiency,» heriot-watt university, edinburgh uk.

[22] O. Chile, «mci,» 2012. [en línea]. Available: http://www.olimex.cl/.

[23] Arduino, «arduino,» 2015. [en línea]. Available: https://www.arduino.cc/.

Anexos

Anexo A: Memorias de cálculo

Memoria de cálculo Eje de inercia

Foto isométrico

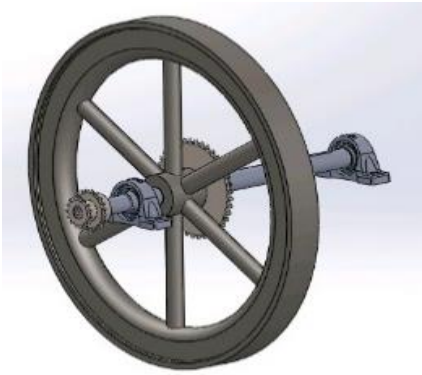
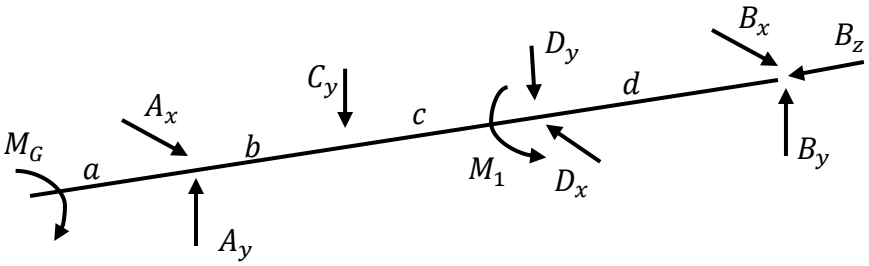


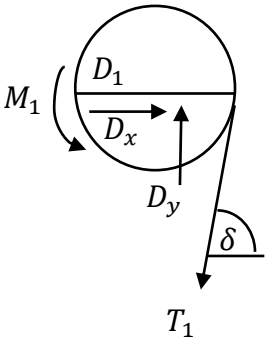
Figura A.1 Vista Isométrica del eje de inercia

DCL eje



$$\sum M_z = 0 \rightarrow M_G = M_1 \qquad \text{(A.1)}$$

DCL Piñón



$$\sum M_o = 0 \rightarrow M_1 = \frac{D_1}{2} T_1 \rightarrow T_1 = \frac{M_1}{\left[\frac{D_1}{2}\right]} \quad \text{(A.2)}$$

$$\sum F_x = 0 \rightarrow D_x = T_1 \cos(\delta) \quad \text{(A.3)}$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow D_y = T_1 \operatorname{sen}(\delta) \quad \text{(A.4)}$$

Considerando:

$$D_1 = 140\ [mm]$$

$$M_G = 40[Nm]$$

$$\delta = 80°$$

Se tiene:

$$T_1 = 570\ [N]$$

$$D_x = 63\ [N]$$

$$D_y = 566\ [N]$$

Respecto al DCL del eje

$$\sum M_{x(A)} = 0 \rightarrow B_x = \frac{(b+c)D_x}{(b+c+d)} \quad \text{(A.5)}$$

$$\sum M_{y(A)} = 0 \rightarrow B_y = \frac{bC_y+(b+c)D_y}{(b+c+d)} \quad \text{(A.6)}$$

$$\sum F_x = 0 \rightarrow A_x = D_x - B_x \quad \text{(A.7)}$$

$$\sum F_x = 0 \rightarrow A_y = C_y + D_y - B_y \quad \text{(A.8)}$$

Considerando:

$$C_y = 80\ [kg] = 785[N]$$

$$b = 80[mm]$$

$$c = 80\ [mm]$$

$$d = 360\ [mm]$$

Se tiene:

$$B_x = 19[N]$$

$$B_y = 295[N]$$

$$A_x = 44[N]$$

$$A_y = 1056[N]$$

Diagrama de Momento flector

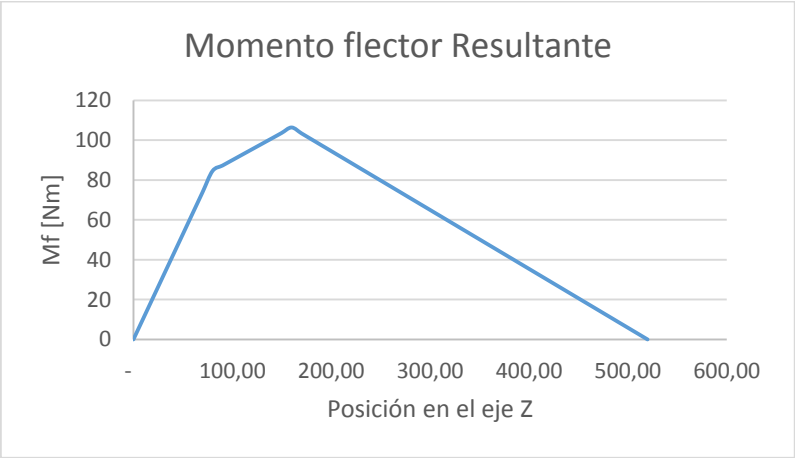


Figura A.2 Diagrama de Momento flector para el eje de Inercia

Ecuación del diámetro del eje

$$d^3 = \frac{32n}{\pi S_y}\sqrt{\left(M_f + \frac{F_a * d}{8}\right)^2 + 3\left(\frac{T}{2}\right)^2} \qquad \text{(A.9)}$$

Considerando:

$$S_y = 588\ [Mpa]\ (SAE4340)$$

$$n = 3$$

$$M_f = 106\ [Nm]$$

$$F_a = 0$$

$$T = 40[Nm]$$

<u>Finalmente</u>

$$d_{calculado} = 18\ [mm]$$

$$d_{escogido} = 40\ [mm]$$

Memoria de cálculo Eje de transmisión

Foto isométrico

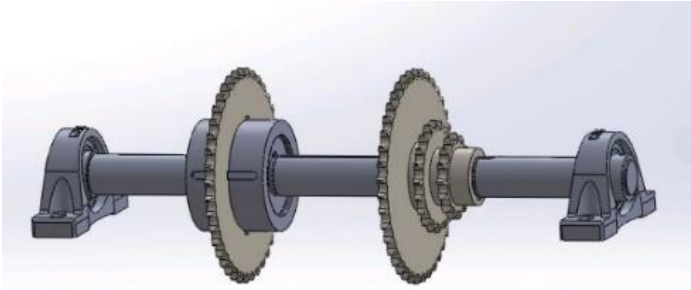
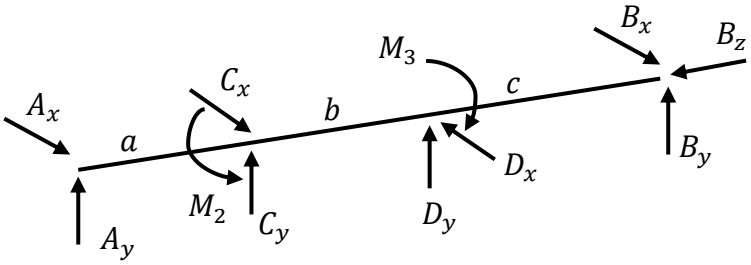


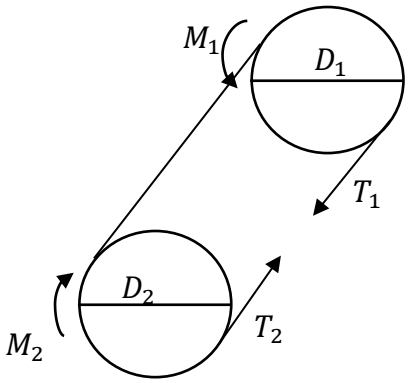
Figura A.3 Vista Isométrica del eje de transmisión

DCL eje



$$\sum M_z = 0 \rightarrow M_2 = M_3 \qquad \text{(A.10)}$$

DCL transmisión por piñones



$$\sum M_{0_1} = 0 \rightarrow M_1 = \frac{D_1 T_1}{2} \qquad \text{(A.11)}$$

$$\sum M_{0_2} = 0 \rightarrow M_2 = \frac{D_2 T_2}{2} \tag{A.12}$$

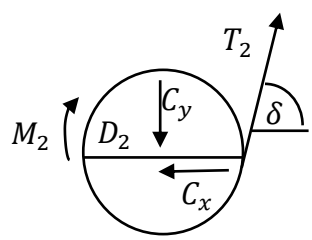
Dada la eficiencia de transmisión del 98% se tiene:

$$T_2 = \frac{T_1}{0{,}98} \tag{A.13}$$

Dada la relación de transmisión n=1,5 se tiene:

$$\frac{M_2}{M_1} = \frac{\frac{D_2 T_2}{2}}{\frac{D_1 T_1}{2}} = \frac{D_2 \frac{T_1}{0{,}98}}{D_1 T_1} = \frac{1}{0{,}98}\frac{D_2}{D_1} = \frac{1{,}5}{0{,}98} \rightarrow M_2 = \left[\frac{1{,}5}{0{,}98}\right] M_1 = \left[\frac{1{,}5}{0{,}98}\right] M_G \tag{A.14}$$

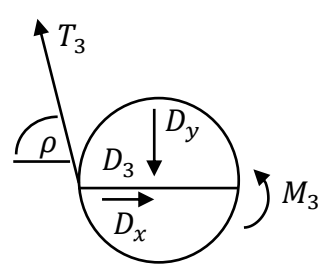
DCL Piñón 2



$$\sum F_x = 0 \rightarrow C_x = T_2 \cos(\delta) \tag{A.15}$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow C_y = T_2 \operatorname{sen}(\delta) \tag{A.16}$$

DCL Piñón 3



$$\sum M_{o_3} = 0 \ \rightarrow \ M_3 = \frac{D_3}{2} T_3 \rightarrow T_3 = \frac{M_3}{\left[\frac{D_3}{2}\right]} \tag{A.17}$$

$$\sum F_x = 0 \rightarrow D_x = T_3 \cos(\rho) \tag{A.18}$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow D_y = T_3 \operatorname{sen}(\rho) \tag{A.19}$$

Considerando:

$$T_1 = 570 \ [N]$$

$$D_1 = 140 \ [mm]$$

$$D_2 = 200 \ [mm]$$

$$D_3 = 140 \ [mm]$$

$$M_G = 40[Nm]$$

$$\delta = 80°$$

$$\rho = 70°$$

Se tiene:

$$M_2 = M_3 = 61 \ [Nm]$$

$$T_2 = 580[Nm]$$

$$T_3 = 870[N]$$

$$C_x = 64 \ [N]$$

$$C_y = 576[N]$$

$$D_x = 550 \ [N]$$

$$D_y = 670 \ [N]$$

Respecto al DCL del eje

$$\sum M_{y(A)} = 0 \rightarrow B_x = \frac{(a+b)D_x - aC_x}{(a+b+c)} \tag{A.20}$$

$$\sum M_{x(A)} = 0 \rightarrow B_y = -\frac{aC_y + (a+b)D_y}{(a+b+c)} \tag{A.21}$$

$$\sum F_x = 0 \rightarrow A_x = D_x - C_x - B_x \tag{A.22}$$

$$\sum F_x = 0 \rightarrow A_y = -(C_y + D_y + B_y) \tag{A.23}$$

Considerando:

$$a = 150[mm]$$

$$b = 215[mm]$$

$$c = 150\ [mm]$$

Se tiene:

$$B_x = 370[N]$$

$$B_y = -643\ [N]$$

$$A_x = 115\ [N]$$

$$A_y = -548\ [N]$$

Diagrama de Momento flector

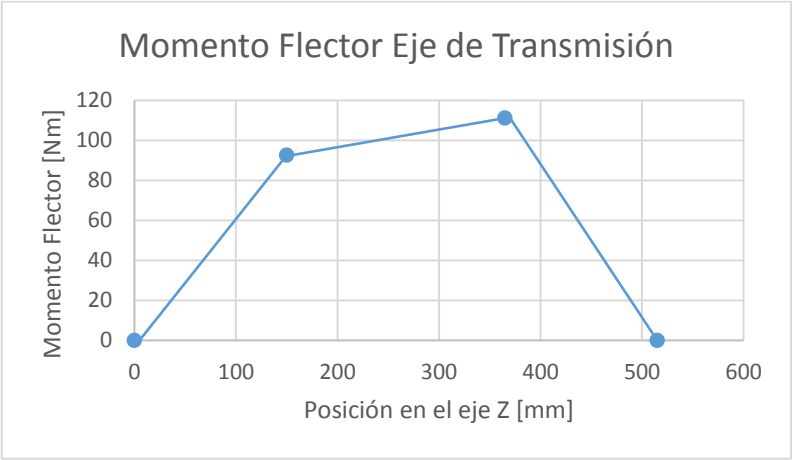


Figura A.4 Diagrama de Momento flector para el eje de transmisión

Ecuación del diámetro del eje

$$d^3 = \frac{32n}{\pi S_y}\sqrt{\left(M_f + \frac{F_a * d}{8}\right)^2 + 3\left(\frac{T}{2}\right)^2} \qquad \text{(A.9)}$$

Considerando:

$$S_y = 588\ [Mpa]\ (SAE4340)$$

$$n = 3$$

$$M_f = 112\ [Nm]$$

$$F_a = 0$$

$$T = 61[Nm]$$

<u>Finalmente</u>

$$d_{calculado} = 19\ [mm]$$

$$d_{escogido} = 40\ [mm]$$

Memoria de cálculo del ejeprincipal

Foto isométrico

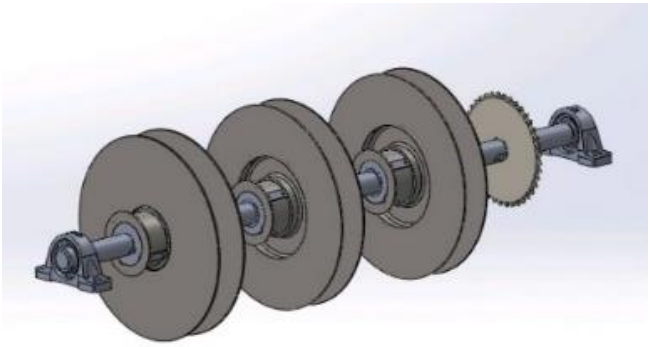
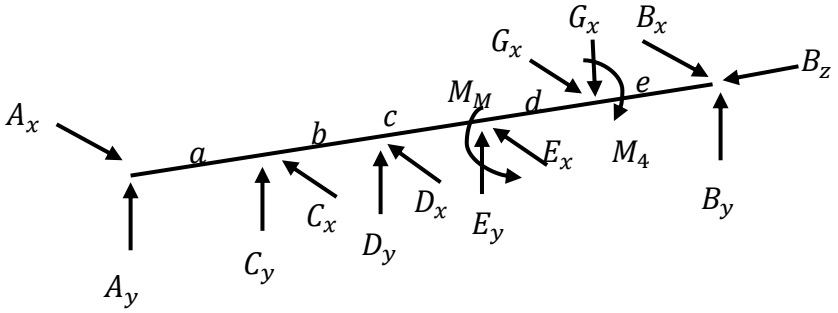
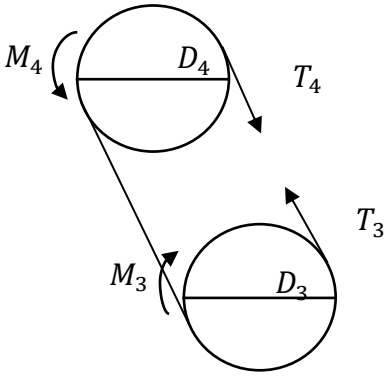


Figura A.5 Vista Isométrica del eje de principal

DCL eje



$$\sum M_z = 0 \rightarrow M_M = M_4 \qquad \text{(A.24)}$$



$$\sum M_{0_3} = 0 \rightarrow M_3 = \frac{D_3 T_3}{2} \quad \text{(A.25)}$$

$$\sum M_{0_4} = 0 \rightarrow M_4 = \frac{D_4 T_4}{2} \quad \text{(A.26)}$$

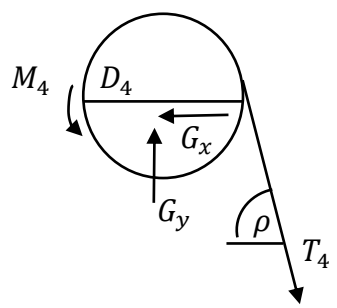
Dada la eficiencia de transmisión del 98% se tiene:

$$T_4 = \frac{T_3}{0{,}98} \quad \text{(A.27)}$$

Dada la relación de transmisión n=1,5 se tiene:

$$\frac{M_4}{M_3} = \frac{D_4 \frac{T_3}{0{,}98}}{D_3 T_3} = \frac{1}{0{,}98}\frac{D_4}{D_3} = \frac{1{,}5}{0{,}98} \rightarrow M_4 = \left[\frac{1{,}5}{0{,}98}\right] M_3 = \left[\frac{1{,}5}{0{,}98}\right]\left(\left[\frac{1{,}5}{0{,}98}\right] M_G\right) = \left[\frac{1{,}5}{0{,}98}\right]^2 M_G \text{(A.25)}$$

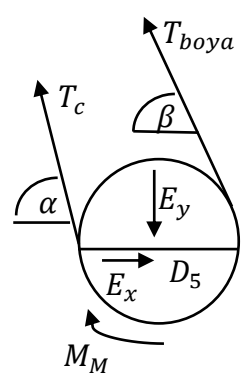
<u>DCL Piñón G</u>



$$\sum F_x = 0 \rightarrow G_x = T_4 \cos(\rho) \quad \text{(A.26)}$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow G_y = T_4 \operatorname{sen}(\rho) \quad \text{(A.27)}$$

<u>DCL Carrete E</u>



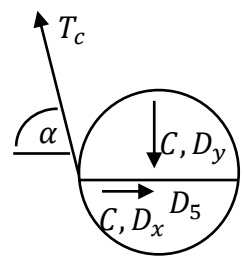
$$\sum M_{o_5} = 0 \;\rightarrow\; M_M = \frac{D_5}{2}(T_{boya} - T_c) \rightarrow T_{boya} = \frac{2}{D_5} M_M + T_c$$

$$M_M = \frac{2}{D_5}\left(\left[\frac{1{,}5}{0{,}98}\right]^2 M_G\right) + T_c \qquad \text{(A.28)}$$

$$\sum F_x = 0 \rightarrow E_x = T_c \cos(\alpha) + T_{boya}\cos(\beta) \qquad \text{(A.28)}$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow E_y = T_c \operatorname{sen}(\alpha) + T_{boya}\operatorname{sen}(\beta) \qquad \text{(A.29)}$$

<u>DCL Carrete C y D</u>



$$\sum F_x = 0 \rightarrow C_x = D_x = T_c \cos(\alpha) \qquad \text{(A.30)}$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow C_y = D_y = T_c \operatorname{sen}(\alpha) \qquad \text{(A.31)}$$

<u>Considerando:</u>

$$T_c = 735\ [N]$$

$$T_3 = 870\ [N]$$

$$D_3 = 140\ [mm]$$

$$D_4 = 200\ [mm]$$

$$D_5 = 200\ [mm]$$

$$M_G = 40[Nm]$$

$$\alpha = 87°$$

$$\beta = 85°$$

$$\rho = 70°$$

Se tiene:

$$M_4 = M_M = 94[Nm]$$

$$T_4 = 888[Nm]$$

$$T_{boya} = 1675[N]$$

$$C_x = D_x = 38\ [N]$$

$$C_y = D_y = 734[N]$$

$$E_x = \ 125[N]$$

$$E_y = \ 2407[N]$$

$$G_x = 304[N]$$

$$G_y = \ 834[N]$$

Respecto al DCL del eje

$$\sum M_{y(A)} = 0 \rightarrow B_x = \frac{aC_x+(a+b)D_x+(a+b+c)E_x-(a+b+c+d)G_x}{(a+b+c+d+e)} \quad \text{(A.32)}$$

$$\sum M_{x(A)} = 0 \rightarrow B_y = \frac{-aC_y-(a+b)D_y-(a+b+c)E_y+(a+b+c+d)G_y}{(a+b+c+d+e)} \quad \text{(A.33)}$$

$$\sum F_x = 0 \rightarrow A_x = C_x + D_x + E_x - G_x - B_x \quad \text{(A.34)}$$

$$\sum F_x = 0 \rightarrow A_y = G_y - C_y - D_y - E_y - B_y \quad \text{(A.35)}$$

Considerando:

$$a = 115[mm]$$

$$b = 300[mm]$$

$$c = \ 300[mm]$$

$$d = 285[mm]$$

$$e = \ 185[mm]$$

Se tiene:

$$B_x = -164[N]$$

$$B_y = 1080[N]$$

$$A_x = -61[N]$$

$$A_y = -1965[N]$$

Diagrama de Momento flector

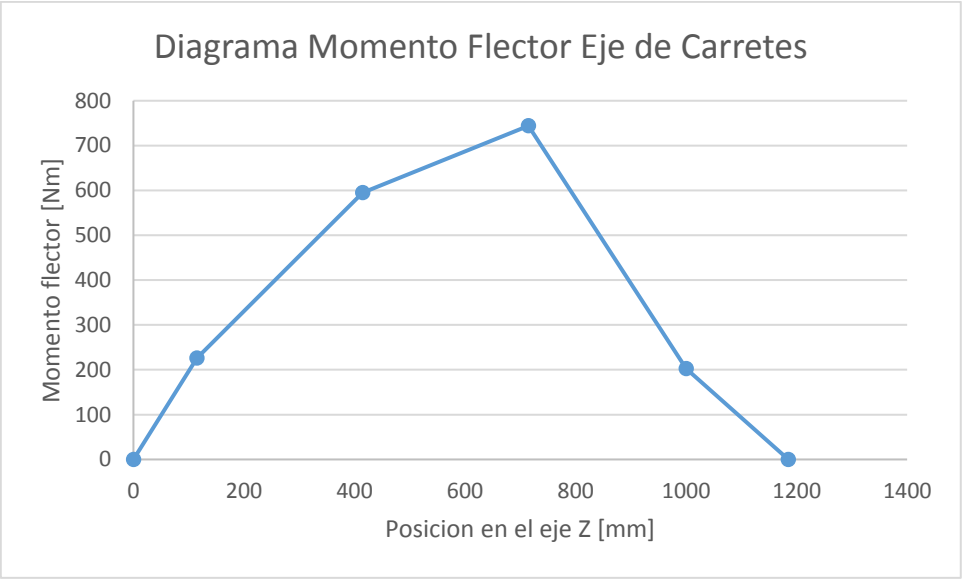


Figura A.6 Diagrama de Momento flector para el eje principal

Ecuación del diámetro del eje

$$d^3 = \frac{32n}{\pi S_y}\sqrt{\left(M_f + \frac{F_a * d}{8}\right)^2 + 3\left(\frac{T}{2}\right)^2} \qquad \text{(A.9)}$$

Considerando:

$$S_y = 588\ [Mpa]\ (SAE4340)$$

$$n = 3$$

$$M_f = 744[Nm]$$

$$F_a = 0$$

$$T = 94[Nm]$$

Finalmente

$$d_{calculado} = 34\ [mm]$$

$$d_{escogido} = 40\ [mm]$$

Memoria de cálculo del eje guía de boyas

Foto isométrico

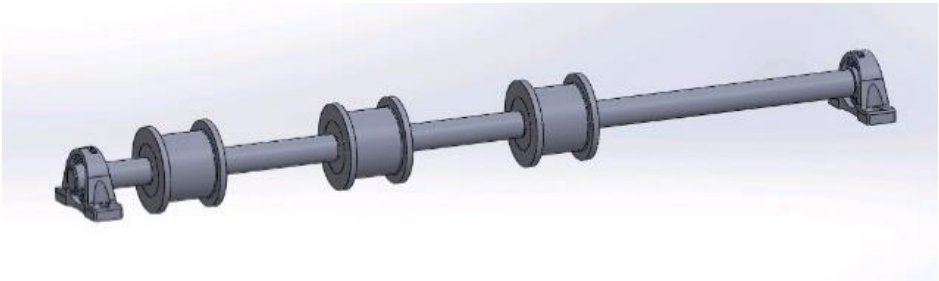
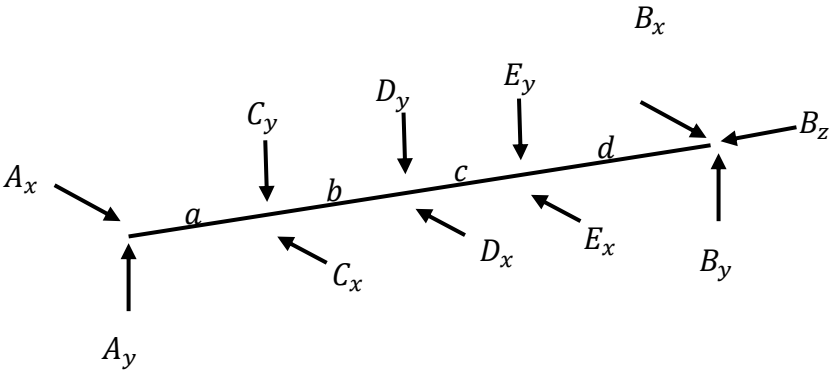
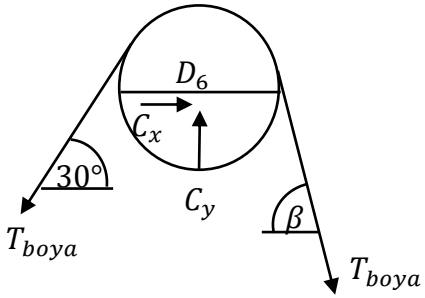


Figura A.7 Vista Isométrica del eje guía de boyas

DCL eje



DCL Carrete C, D y E



$$\sum F_x = 0 \rightarrow C_x = T_{boya}[\cos(30) - \cos(\beta)] \qquad \text{(A.36)}$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow C_y = T_{boya}[\text{sen}(30) + \text{sen}(\beta)] \quad \text{(A.37)}$$

Considerando:

$$T_{boya} = 1675\ [N]$$

$$\beta = 85°$$

Se tiene:

$$C_x = D_x = E_x = 2506[N]$$

$$C_y = D_y = E_y = 1305[N]$$

Respecto al DCL del eje

$$\sum M_{y(A)} = 0 \rightarrow B_x = \frac{aC_x + (a+b)D_x + (a+b+c)E_x}{(a+b+c+d)} \quad \text{(A.38)}$$

$$\sum M_{x(A)} = 0 \rightarrow B_y = \frac{aC_y + (a+b)D_y + (a+b+c)E_y}{(a+b+c+d)} \quad \text{(A.39)}$$

$$\sum F_x = 0 \rightarrow A_x = C_x + D_x + E_x - B_x \quad \text{(A.40)}$$

$$\sum F_x = 0 \rightarrow A_y = C_y + D_y + E_y - B_y \quad \text{(A.41)}$$

Considerando:

$$a = 115[mm]$$

$$b = 300[mm]$$

$$c = 300[mm]$$

$$d = 470[mm]$$

Se tiene:

$$B_x = 1370[N]$$

$$B_y = 2630[N]$$

$$A_x = 2545[N]$$

$$A_y = 4885[N]$$

Diagrama de Momento flector

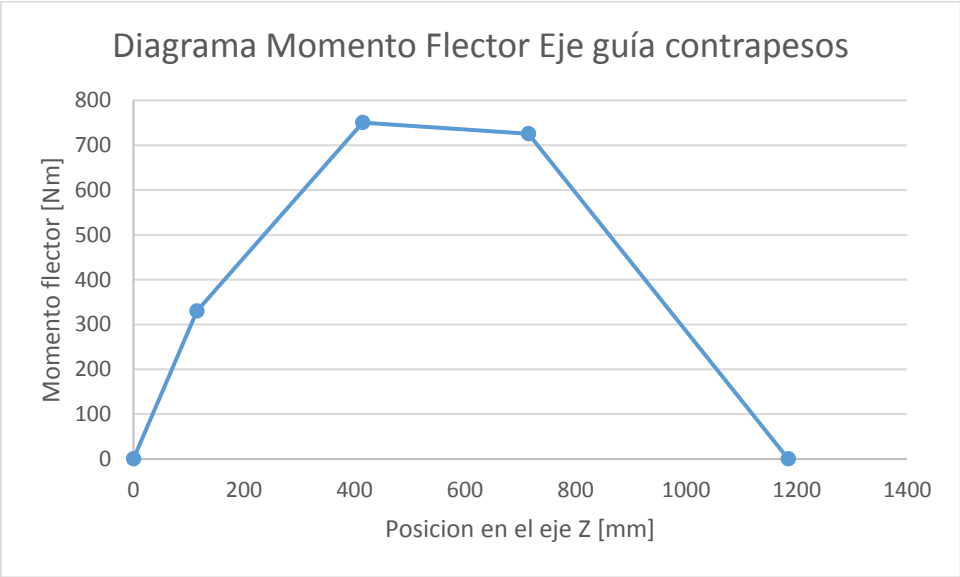


Figura A.8 Diagrama de Momento flector para el eje de guía de boyas

Ecuación del diámetro del eje

$$d^3 = \frac{32n}{\pi S_y}\sqrt{\left(M_f + \frac{F_a * d}{8}\right)^2 + 3\left(\frac{T}{2}\right)^2} \qquad \text{(A.9)}$$

Considerando:

$$S_y = 588\ [Mpa]\ (SAE4340)$$

$$n = 3$$

$$M_f = 750[Nm]$$

$$F_a = 0[N]$$

$$T = 0[Nm]$$

Finalmente

$$d_{calculado} = 40\ [mm]$$

$$d_{escogido} = 40\ [mm]$$

Memoria de cálculo del eje guía de contrapesos

Foto isométrico

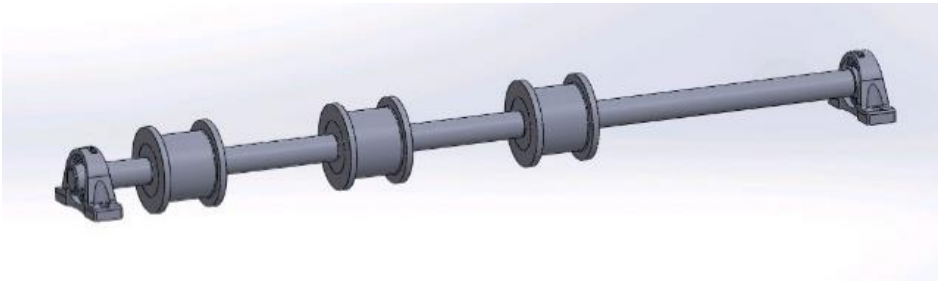
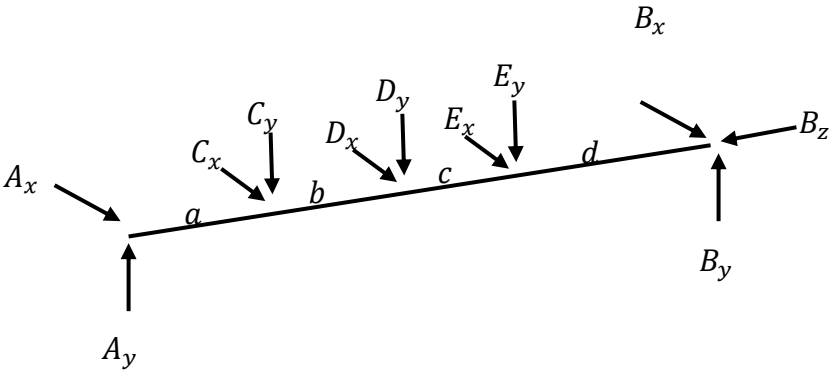
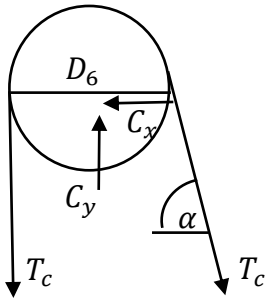


Figura A.9 Vista Isométrica del eje de guía de boyas

DCL eje



DCL Carrete C, D y E



$$\sum F_x = 0 \rightarrow C_x = T_c \cos(\alpha) \qquad \text{(A.42)}$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow C_y = T_c[1 + \text{sen}(\alpha)] \quad \text{(A.43)}$$

Considerando:

$$T_c = 735\ [N]$$

$$\alpha = 87°$$

Se tiene:

$$C_x = D_x = E_x = 38[N]$$

$$C_y = D_y = E_y = 1470[N]$$

Respecto al DCL del eje

$$\sum M_{y(A)} = 0 \rightarrow B_x = \frac{-aC_x-(a+b)D_x-(a+b+c)E_x}{(a+b+c+d)} \quad \text{(A.44)}$$

$$\sum M_{x(A)} = 0 \rightarrow B_y = \frac{aC_y+(a+b)D_y+(a+b+c)E_y}{(a+b+c+d)} \quad \text{(A.45)}$$

$$\sum F_x = 0 \rightarrow A_x = -(C_x + D_x + E_x + B_x) \quad \text{(A.46)}$$

$$\sum F_x = 0 \rightarrow A_y = C_y + D_y + E_y - B_y \quad \text{(A.47)}$$

Considerando:

$$a = 115[mm]$$

$$b = 300[mm]$$

$$c = 300[mm]$$

$$d = 470[mm]$$

Se tiene:

$$B_x = -40[N]$$

$$B_y = 1545[N]$$

$$A_x = -75[N]$$

$$A_y = 2865[N]$$

Diagrama de Momento flector

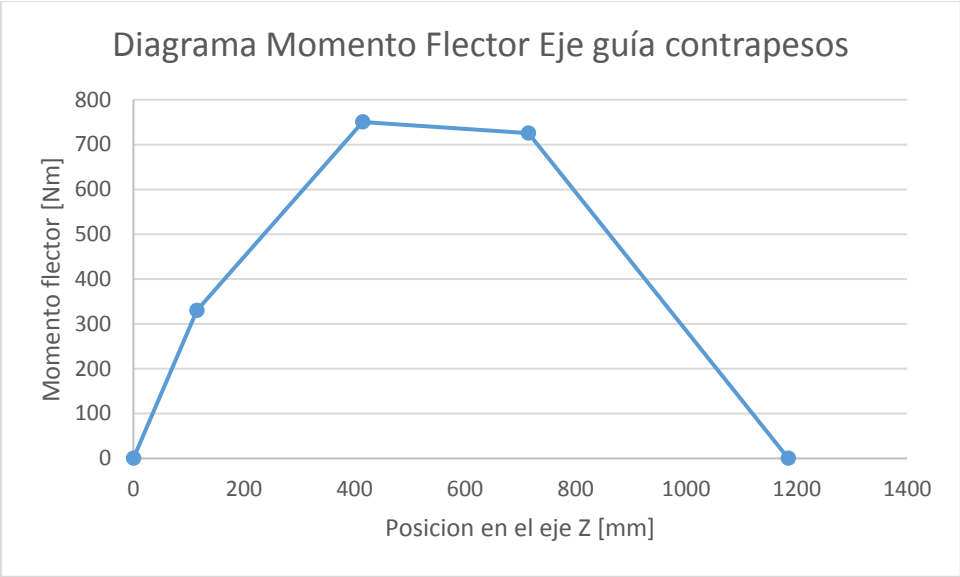


Figura A.10 Diagrama de Momento flector para el eje guía de contrapesos

Ecuación del diámetro del eje

$$d^3 = \frac{32n}{\pi S_y}\sqrt{\left(M_f + \frac{F_a * d}{8}\right)^2 + 3\left(\frac{T}{2}\right)^2} \qquad \text{(A.9)}$$

Considerando:

$$S_y = 588\ [Mpa]\ (SAE4340)$$

$$n = 3$$

$$M_f = 750[Nm]$$

$$F_a = 0$$

$$T = 0[Nm]$$

Finalmente

$$d_{calculado} = 34\ [mm]$$

$$d_{escogido} = 40\ [mm]$$

Memoria de cálculo del volante de inercia

El sistema de acumulación de energía cinética corresponde a un volante de inercia, el cual entrega su energía al sistema luego del impulso de la ola, esto con el objetivo de estabilizar la energía que alimenta al generador.

La figura A.11 muestra un esquema simplificado del sistema generador del impulso:

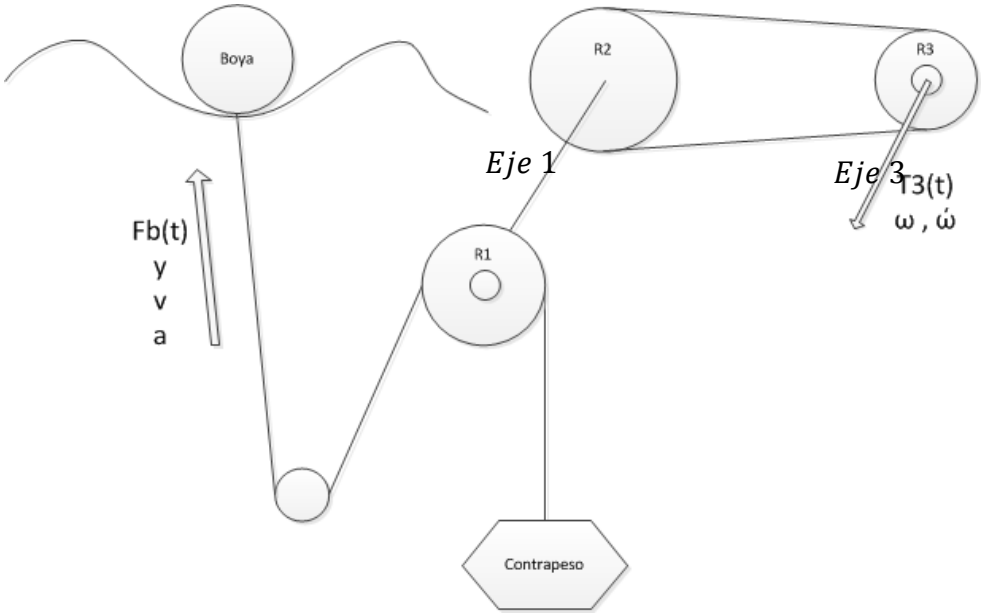


Figura A.11 Diagrama de Momento flector para el eje de Inercia

Tomando en cuenta que el eje 1 transmite potencia solo en dirección anti horaria, se entiende que para un ciclo de oscilación de la boya solo hay aporte en la primera parte del recorrido total. Este impulso es en magnitud desconocido y depende de factores como el empuje del agua, geometría de la boya y las características cinemáticas de la ola, aun así una vez que el equipo logre salir de la inercia, se puede asumir una correlación entre la velocidad ascendente de la boya y la velocidad angular del eje 3, de la siguiente forma:

$$\omega_1 = \frac{\dot{y}}{r_1} \tag{A.48}$$

$$\omega_1 = \omega_2 \tag{A.49}$$

$$V_2 = V_3 \rightarrow \omega_2 r_2 = \omega_3 r_3 \rightarrow \omega_3 = \frac{\omega_2 r_2}{r_3} \tag{A.50}$$

$$\omega_3 = \omega_4 \tag{A.51}$$

$$V_4 = V_5 \rightarrow \omega_4 r_4 = \omega_5 r_5 \rightarrow \omega_5 = \frac{\omega_4 r_4}{r_5} \tag{A.52}$$

$$\therefore \omega = \left(\frac{r_2}{r_3}\right)\left(\frac{r_4}{r_5}\right)\frac{\dot{y}}{r_1} \tag{A.53}$$

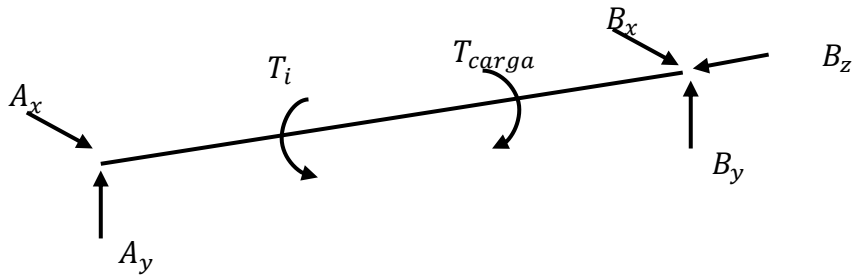
donde:

ω : Velocidad angular del eje 3

$\dot{y}$: Velocidad lineal ascendente de la boya

r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 : Radios piñones de transmisión del sistema

Ya que el impulso de la ola tiene una naturaleza cíclica pero desconocida en su distribución, es preferible modelar el volante necesario para el sistema, luego de dicho impulso, una vez que el sistema ha alcanzado una determinada velocidad, y solo actúa sobre este el generador del cual es conocido su torque, dicha situación se puede expresar de la siguiente manera:



$$\sum M_z = 0 \rightarrow T_{carga} - T_i = T_{carga} - I\ddot{\theta} = 0 \tag{A.54}$$

donde:

T_{carga} : Torque de la carga.

$I\ddot{\theta}$: Torque de inercia del sistema.

$$T_c = I\ddot{\theta}$$

$$T_c = I\frac{d\dot{\theta}}{dt} = I\frac{d\dot{\theta}}{d\theta}\frac{d\theta}{dt}$$

$$T_c d\theta = I\dot{\theta}d\dot{\theta}$$

$$\int_i^f T_c d\theta = \frac{1}{2}I({\theta_f}^2 - {\theta_i}^2)$$

$$I = \frac{2}{({\dot{\theta}_f}^2 - {\dot{\theta}_i}^2)}\int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} T_c d\theta$$

$$I = \frac{2}{\left({\dot{\theta}_f}^2 - {\dot{\theta}_i}^2\right)}\int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} T_c\frac{d\theta}{dt}dt$$

$$I = \frac{2}{({\dot{\theta}_f}^2 - {\dot{\theta}_i}^2)}\int_{t_1}^{t_2} T_c\dot{\vartheta}dt \qquad \text{(A.55)}$$

Finalmente reemplazando la del torque del generador entregado por el fabricante se obtiene la siguiente ecuación para la inercia necesaria según se decida

$$I = \frac{2}{(\dot{\theta}(t_2)^2 - \dot{\theta}(t_1)^2)}\int_{t_1}^{t_2}(a\dot{\vartheta}(t) + b)\dot{\vartheta}(t)dt \qquad \text{(A.56)}$$

donde:

$\dot{\theta}_{t_1}$: Velocidad angular inicial instante después del impulso

$\dot{\theta}_{t_2}$: Velocidad angular final instante antes del siguiente impulso

$\dot{\theta}(t)$: Función velocidad angular durante la pérdida de energía del volante

Ahora es necesario tener una expresión para la variación de la velocidad durante el tiempo de perdida de energía. Para ello se propone una variación de la velocidad angular constante durante la descarga, de la siguiente forma,

$$\dot{\theta}(t) = c * t + d$$

Se define la variación entre impulsos según la carga, es decir, entre $\dot{\theta}_1$ y $\dot{\theta}_2$ [rpm] en un tiempo igual al periodo entre impulsos de 10[s], para cálculos prácticos será llamado J, junto con esta magnitud se define el número a de boyas (k) a ocupar, ya que el periodo del impulso recibido corresponde finalmente a J/k. Según esto se puede redefinir la ecuación a,

$$\dot{\theta}(t) = \dot{\theta}(t_1) - \frac{(\dot{\theta}(t_1) - \dot{\theta}(t_2))}{J/k} * t \qquad \text{(A.57)}$$

Considerando:

$$\dot{\theta}(t_1) = 300[rpm]$$

$$\dot{\theta}(t_2) = 225[rpm]$$

$$J = 10[min]$$

$$k = 3[N]$$

$$c = \frac{0{,}07}{\frac{2\pi}{60}} \left[\frac{Nm}{rps}\right]$$

$$d = 3\ [rps]$$

$$t_1 = 0\ [s]$$

$$t_2 = 3{,}3\ [s]$$

Se tiene:

$$I_{resultante} = 8{,}8[kgm^2]$$

$$I_{escogida} = 8{,}8[kgm^2]$$

Anexo B: Ficha técnica del generador

Wind Turbine Permanent Magnet Generator/ Alternator

Ginlong Technologies GL-PMG-1500

World Leading Professional Wind Turbine Parts Supplier

Electrical Specification

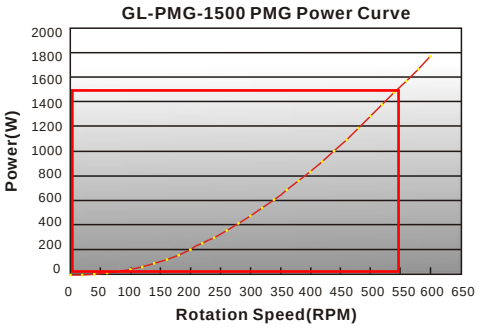
Rated Output Power(W):	1500
Rated Rotation Speed (RPM):	450
Recified DC Current at Rated Output (A):	30
Requied Torque at Rated Power:	35
Phase Resistance (Ohms):	0.57
Output Wire Square Section (mm^2):	4
Output Wire Length (mm):	600
Insultation:	H Class
Generator configuration:	3 Phase star connected AC output
Design Lifetime:	>20 years

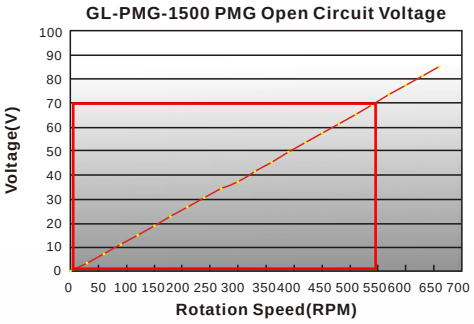
Mechanical Specification

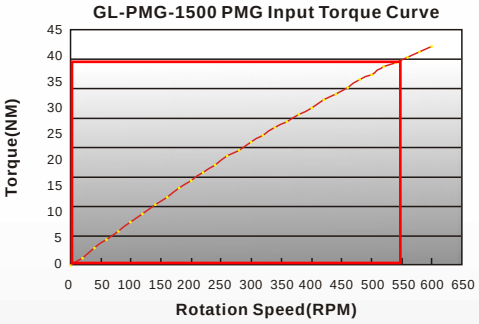
Weight (Kgs):	16.9
Starting Torque (NM):	<0.7
Rotor Inertia (Kg.m^2):	0.011
Bearing Type:	High standard NSK 6207DDUC3 (Front) NSK 6207VVC3 (Rear)

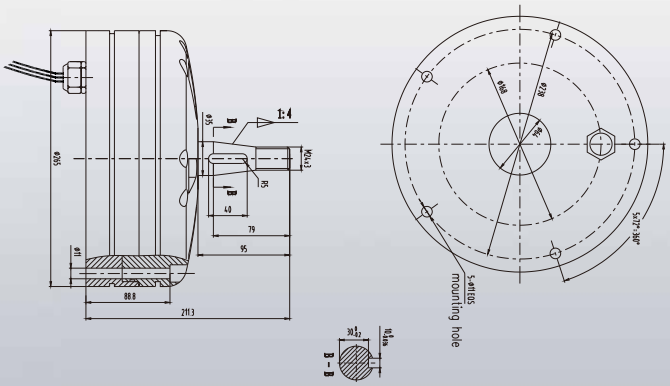
Material Specification

Shaft Material:	High standard Stainless Steel
Shaft Bearing:	High standard SKF or NSK bearing
Outer Frame Material:	High standard Aluminium alloy with TF/T6 heat treatment
(TF/T6 full heat treatment for increasing the performance of aluminium alloy as follows. Heat 4-12 hours at 525-545 degrees Celsius, quench with hot water, and precipitation heat treatment for 8-12 hours at 155-175 degrees Celsius.)	
Fasteners (nuts and bolts):	High standard Stainless Steel
Windings Temperature Rating:	180 degrees Celsius
Magnet Material:	NdFeB (Neodymium Iron Boron)
Magnets Temperature Rating:	150 degrees Celsius
Lamination Stack:	High specification cold-rolled Steel





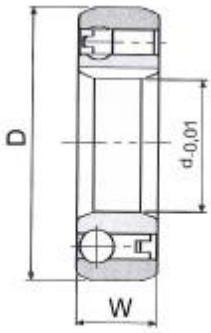




Anexo C: Ficha técnica rodamientos trinquete

ONE-WAY CLUTCH BEARINGS— CSK Series

Model **CSK** is a sprag type clutch (freewheel) integrated into a 6200 series ball bearing (except sizes 8 and 40). It is bearing supported, shipped grease lubricated and protected against dust larger than 0.3mm diameter. Torque transmission is ensured by a press fit assembly into a rigid outer housing with N6 tolerance, and onto a shaft with n6 tolerance. The initial bearing radial clearance is set at C5, and is reduced if using the press fit as specified. Operating temperature range:-20℃ to +100℃. Peaks up to +120℃ are acceptable for short periods.



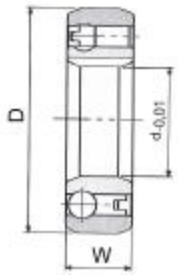
CSK

Bearing Number	Bore d(mm)	OD D(mm)	Width W(mm)	Torque (Nm)	Max. overrunning Speed (RPM)	Bearing loads		Single Weight (kg)
						Dynamic kN	Static kN	
CSK8	8	22	9	3.5	15,000	3.28	0.86	0.015
CSK12	12	32	10	12	10,000	6.10	2.77	0.05
CSK15	15	35	11	20	8,400	7.40	3.42	0.06
CSK17	17	40	12	40	7,350	7.90	3.80	0.07
CSK20	20	47	14	68	6,000	9.40	4.46	0.11
CSK25	25	52	15	105	5,200	10.7	5.46	0.14
CSK30	30	62	16	180	4,200	11.7	6.45	0.22
CSK35	35	72	17	240	3,600	12.6	7.28	0.33
CSK40	40	80	22	385	3,000	15.54	12.25	0.50

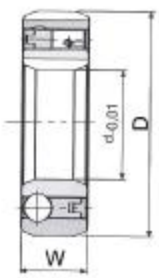
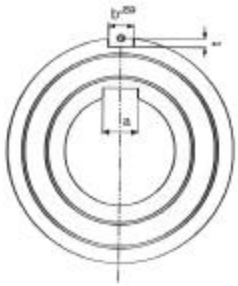
CSK—P and **CSK—PP** series are available upon request. CSK--P has the same construction and outside dimensions as type CSK, but has a keyway on the inner race; CSK--PP features a keyway in both the inner and outer race.

The Model CSK—P clutches must be secured to the shaft by customer supplied snap ring, set collar, spacer, etc. The outer race is secured with a press fit to a N6 tolerance. The Model CSK—PP clutches have a keyway on both races and must be secured by customer supplied snap ring, set collar, spacer, etc.

Model	Keyway(a)
CSK12	4 x 1.2
CSK15	5 x 1.2
CSK17	6 x 1.6
CSK20	6 x 1.6
CSK25	8 x 2
CSK30	8 x 2
CSK35	10 x 2.4
CSK40	10 x 2.4



CSK--P



CSK--PP