



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECÁNICA**

**CONTROL INTELIGENTE DE UN SISTEMA UNDIMOTRIZ LINEAL  
PARA MAXIMIZAR LA CAPTURA DE LA ENERGÍA DE LAS OLAS**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
MECÁNICO**

**GARY ADOLFO OPORTU SALGADO**

**PROFESOR GUÍA:  
JUAN CRISTOBAL ZAGAL MONTEALEGRE**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
VIVIANA MERUANE NARANJO  
ALVARO VALENCIA MUSALEM**

**SANTIAGO DE CHILE  
2015**

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR**

**AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil Mecánico

**POR:** Gary Adolfo Oportu Salgado

**FECHA:** 18/11/2015

**PROFESOR GUÍA:** Juan Cristobal Zagal

Montealegre

**CONTROL INTELIGENTE DE UN SISTEMA UNDIMOTRIZ LINEAL PARA  
MAXIMIZAR LA CAPTURA DE LA ENERGÍA DE LAS OLAS**

En este documento se detalla el diseño, la construcción y el estudio de un sistema undimotriz a pequeña escala conformado por módulos dispuestos linealmente el cual flota y describe la forma de las olas, además acumula presión gracias a la presencia de actuadores neumáticos. El trabajo tiene como fin maximizar la acumulación energética bajo ciertas condiciones de oleaje en un laboratorio mediante el bloqueo automatizado de las articulaciones entre módulos.

Inicialmente se refiere de forma general la memoria de título “Diseño y Construcción de Sistema Undívago para la Conversión de Energía”, en él se describe el sistema denominado Nahuenrew, proyecto en el que esta memoria está basada. Luego se describen generalmente otros tipos de tecnologías undimotrices.

Se describe la metodología de desarrollo del proyecto el cual involucra el diseño con herramientas de fabricación digital, la construcción e implementación del sistema con marcadores para la captura de datos mediante un OptiTrack el cual graba su movimiento según las variaciones de la frecuencia de un generador de olas.

Una fase experimental fue intervenir en los grados de libertad del sistema bloqueando algunas articulaciones para analizar el comportamiento del sistema y comprar su comportamiento al estar con todos sus grados de libertad con el sistema con unos módulos bloqueados.

Finalmente se automatiza el sistema y se logra maximizar la carrera total de los actuadores del mecanismo bloqueando los módulos según la frecuencia con la que la ola hace oscilar el prototipo. Y se logra aumentar la carrera de un actuador

Los resultados de este proyecto validan que es posible aumentar la captura de aire presurizado al bloquear ciertos módulos.

## **Agradecimientos**

Mi mayor gratitud es hacia mi madre quien siempre me apoyo y me dio todo lo que necesité desde que tengo memoria. También a mi hermana quien siempre estuvo cuando necesite ayuda.

Gracias a mis amigos de la vida por alegrarme y divertirme en todo momento y en especial al Ñancu y a la Ale que con el paso del tiempo pasaron a ser parte de mi familia y me brindaron un grato hogar donde vivir.

También quiero darle las gracias a Max, Yi, Joao, Marco y a Edgardo, mis compañeros del laboratorio de robótica, quienes me ayudaron mucho en las materias prácticas de electrónica y me ayudaron a enfrentar muchos problemas.

Gracias a mis equipos de basket: al de Ingeniería, al del Bueras y al equipo del Instituto Nacional, todos esos partidos y entrenamientos me sirvieron mucho para relajarme, distraerme y pasarlo bien.

## Tabla de contenido

1.	Introducción .....	1
1.1.	Antecedentes Generales.....	1
1.1.1.	Primer prototipo de sistema undimotriz lineal .....	1
1.1.2.	Otras tecnologías.....	2
1.2.	Motivación.....	5
1.3.	Alcances .....	6
1.4.	Antecedentes Específicos .....	6
1.4.1.	Ondas .....	6
1.4.2.	Olas .....	8
1.4.3.	Modos de Vibración.....	11
1.4.4.	Flotación.....	12
1.4.5.	Herramientas de laboratorio.....	13
1.4.6.	Procesamiento de datos .....	17
2.	Metodología .....	19
2.1.	Revisión bibliográfica: .....	19
2.2.	Invencción del mecanismo de bloqueo .....	19
2.3.	Diseño.....	19
2.4.	Fabricación y obtención de piezas.....	19
2.5.	Construcción.....	20
2.6.	Estudio dinámico del sistema .....	20
2.7.	Automatización del sistema.....	20
2.8.	Estudio de desempeño del mecanismo de bloqueo .....	20
3.	Diseño y Construcción .....	21
3.1.	Invencción del Mecanismo de Bloqueo .....	21
3.2.	Diseño.....	21
3.2.1.	Sistema undimotriz .....	21
3.2.2.	Generador de olas.....	25

3.3.	Fabricación y obtención de piezas.....	26
3.4.	Construcción.....	27
3.4.1.	Sistema undimotriz .....	27
3.4.2.	Generador de olas.....	29
4.	Estudio del sistema.....	30
4.1.	Estudio dinámico del sistema .....	30
4.1.1.	Procedimiento .....	30
4.1.2.	Experimentos.....	31
4.2.	Automatización del sistema.....	37
4.3.	Estudio dinámico del sistema automatizado.....	38
5.	Resultados .....	39
6.	Discusión y Conclusiones .....	50
6.1.	Diseño y Construcción .....	50
6.2.	Pruebas y análisis de datos .....	50
6.3.	Trabajos futuros.....	54
7.	Bibliografía .....	55

## Índice de tablas

TABLA 1.1 CLASIFICACIÓN DE LAS OLAS SEGÚN SU RELACIÓN DE ALTURA DE OLA Y PROFUNDIDAD DE SUELO MARINO. ....	9
TABLA 1.2 RESUMEN DE ESCALA DOUGLAS. ....	10
TABLA 4.1 CLASIFICACIÓN DE DOUGLAS CORREGIDA POR EL FACTOR DE ESCALA $f$ .....	32
TABLA 4.2 FRECUENCIA DE LAS OLAS SEGÚN VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN DEL GENERADOR DE OLAS.....	32
TABLA 4.3 DIAGRAMAS DE LAS CONFIGURACIONES DE BLOQUEO. ....	34
TABLA 4.4 LONGITUDES DE OLAS SEGÚN VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN DEL GENERADOR DE OLAS. ....	35
TABLA 5.1 PRESIONES ACUMULADAS POR EL SISTEMA SIN BLOQUEOS DURANTE LOS PRIMEROS 10 MINUTOS DE PRUEBAS PARA CADA VOLTAJE. ....	43
TABLA 5.2 PRESIONES ACUMULADAS POR EL SISTEMA CON CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 246 DURANTE LOS PRIMEROS 10 MINUTOS DE PRUEBAS PARA CADA VOLTAJE. ....	43
TABLA 5.3 PRESIONES ACUMULADAS POR EL SISTEMA CON CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 25 DURANTE LOS PRIMEROS 10 MINUTOS DE PRUEBAS PARA CADA VOLTAJE. ....	44
TABLA 5.4 PRESIONES ACUMULADAS POR EL SISTEMA CON CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 35 DURANTE LOS PRIMEROS 10 MINUTOS DE PRUEBAS PARA CADA VOLTAJE. ....	44
TABLA 5.5 PRESIONES ACUMULADAS POR EL SISTEMA CON CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 36 DURANTE LOS PRIMEROS 10 MINUTOS DE PRUEBAS PARA CADA VOLTAJE. ....	45
TABLA 5.6 PRESIONES ACUMULADAS POR EL SISTEMA CON CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 4 DURANTE LOS PRIMEROS 10 MINUTOS DE PRUEBAS PARA CADA VOLTAJE. ....	45
TABLA 5.7 PRESIONES ACUMULADAS POR EL SISTEMA CON CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO AUTOMÁTICO DURANTE LOS PRIMEROS 10 MINUTOS DE PRUEBAS PARA CADA VOLTAJE. ....	46
TABLA 5.8 ACTUADORES QUE POSEEN MAYOR CARRERA PARA CADA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO Y CONDICIÓN DE OLEAJE. ....	46

FIGURA 1.1 UNIÓN DE SEIS MÓDULOS. FUENTE: [1].	1
FIGURA 1.2 A) CONTRACCIÓN DEL SISTEMA, B) EXPANSIÓN DEL SISTEMA. FUENTE: [1].	2
FIGURA 1.3 A) MECANISMO DE FUNCIONAMIENTO POR COLUMNA DE AGUA. B) MECANISMO DE FUNCIONAMIENTO POR REBASE. FUENTE: IMAGEN ADAPTADA DE [4].	4
FIGURA 1.4 A) DISPOSITIVO DEL TIPO ABSORBEDOR. B) DISPOSITIVO TIPO ATENUADOR. C) DISPOSITIVO TIPO TERMINADOR. FUENTE: IMAGEN ADAPTADA DE [5].	4
FIGURA 1.5 A) DESPLAZAMIENTO DE ONDA LONGITUDINAL B) DESPLAZAMIENTO DE ONDA TRANSVERSAL. FUENTE: [9]	7
FIGURA 1.6 PARÁMETROS QUE CARACTERIZAN UNA OLA. FUENTE: IMAGEN ADAPTADA DE [11].	9
FIGURA 1.7 MOVIMIENTO DE LAS PARTÍCULAS DE AGUA SEGÚN PROFUNDIDAD DEL SUELO MARINO. FUENTE: [13].	10
FIGURA 1.8 MODOS DE VIBRACIÓN DE UNA CUERDA FIJA EN AMBOS EXTREMOS PARA DISTINTOS N. FUENTE: [16].	11
FIGURA 1.9 DIAGRAMA DE FUERZAS PARA UN CUERPO FLOTANTE EN EQUILIBRIO ESTABLE. FUENTE: ADAPTACIÓN DE [17].	12
FIGURA 1.10 DIAGRAMA DE FUERZAS PARA UN CUERPO FLOTANTE EN EQUILIBRIO INESTABLE. FUENTE: ADAPTACIÓN DE [17].	13
FIGURA 1.11 DIAGRAMA DE FUERZAS PARA UN CUERPO FLOTANTE EN EQUILIBRIO NEUTRO. FUENTE: ADAPTACIÓN DE [17].	13
FIGURA 1.12 IMAGEN DEL HARDWARE OPTITRACK V120: TRIO. FUENTE: [18].	14
FIGURA 1.13 LED INFRARROJO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	15
FIGURA 1.14 PLACA DE ARDUINO. FUENTE: [20].	15
FIGURA 1.15 A) ELECTROIMÁN. B) ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE ELECTROIMÁN. FUENTE: IMAGEN ADAPTADA DE [21]	16
FIGURA 1.16 A) IMAGEN DE UN RELÉ. B) ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE UN RELÉ. FUENTE: IMAGEN ADAPTADA DE [22].	16
FIGURA 1.17 A) IMAGEN DE PROTOBOARD. B) ESQUEMA DE PROTOBOARD. FUENTE: [22].	17
FIGURA 1.18 GRÁFICOS DE FUNCIONES EN DOMINIO DE TIEMPO (A LA IZQUIERDA) Y SUS GRÁFICOS RESPECTIVOS EN DOMINIO DE FRECUENCIA (A LA DERECHA). FUENTE: [23]	18
FIGURA 3.1 DISEÑO CAD DE UN MÓDULO DEL Y SUS MEDIDAS PRINCIPALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	22
FIGURA 3.2 ARREGLO DE DOS MÓDULOS EN MÁXIMA COMPRESIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	22
FIGURA 3.3 ARREGLO DE DOS MÓDULOS EN MÁXIMA EXPANSIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	23
FIGURA 3.4 ARREGLO DE DOS MÓDULOS EN POSICIÓN NEUTRA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	23
FIGURA 3.5 ENSAMBLE EN UNA DISPOSICIÓN LINEAL DE SEIS MÓDULOS DEL SISTEMA UNDIMOTRIZ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	24
FIGURA 3.6 SISTEMA LINEAL DESCRIBIENDO UN PERFIL DE OLA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	24
FIGURA 3.7 SISTEMA LINEAL DESCRIBIENDO UN PERFIL DE OLA CRÍTICA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	24
FIGURA 3.8 ESQUEMA DE SISTEMA NEUMÁTICO DEL MECANISMO UNDIMOTRIZ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	25
FIGURA 3.9 OREJA CON AGUJERO PARA PASADOR PIVOTE DE LA ALETA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	25
FIGURA 3.10 DISEÑO DE LOS ELEMENTOS DINÁMICOS DEL GENERADOR DE OLAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	26
FIGURA 3.11 IMPRESORA MAKER BOT REPLICATOR 2 EN PROCESO DE IMPRESIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	26
FIGURA 3.12 CORTE DE PLANCHA DE ACRÍLICO PARA CONSTRUIR EL GENERADOR DE OLAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	27
FIGURA 3.13 MÓDULOS DEL SISTEMA UNDIMOTRIZ EN FASE DE CONSTRUCCIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	27
FIGURA 3.14 PROTOTIPO UNDIMOTRIZ LINEAL DE OCHO MÓDULOS A PEQUEÑA ESCALA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	28
FIGURA 3.15 PRUEBA DE FUGAS DEL TANQUE DE PRESIÓN EN UNA FUENTE CON AGUA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	28
FIGURA 3.16 MOTOR DE LIMPIAPARABRISAS UTILIZADO COMO MOTOR DE GENERADOS DE OLAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	29

FIGURA 3.17 CONJUNTO MOTOR LIMPIAPARABRISAS, ESTRUCTURA ESTÁTICA DEL GENERADOR DE OLAS Y OREJAS PARA EL PASADOR DE A ALETA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	29
FIGURA 4.1 MONTAJE DEL EXPERIMENTO EN EL LABORATORIO DE FLUIDODINÁMICA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	31
FIGURA 4.2 SOFTWARE MOTIVE PARA LA CAPTURA DE SERIES DE TIEMPO DE MARCADORES INFRARROJOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	33
FIGURA 4.3 ESQUEMA DE NOTACIÓN DE LOS ACTUADORES.....	34
FIGURA 4.4 EXPLICACIÓN DE LA SIMBOLOGÍA DE LA TABLA 4.3. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	34
FIGURA 4.5 IMAGEN DE PRUEBA DE SISTEMA CON UNA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 4 A 12V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLAJE DE 1,1921 [Hz], UNA ALTURA DE OLA DE 18 [MM] Y UNA LONGITUD DE OLA NO APRECIABLE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	35
FIGURA 4.6 IMAGEN DE PRUEBA DE SISTEMA CON UNA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 4 A 13V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLAJE DE 0,8911 [Hz], UNA ALTURA DE OLA DE 32 [MM] Y UNA LONGITUD DE OLA DE 1604 [MM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	36
FIGURA 4.7 IMAGEN DE PRUEBA DE SISTEMA CON UNA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 4 A 14V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLAJE DE 0,8911 [Hz], UNA ALTURA DE OLA DE 45 [MM] Y UNA LONGITUD DE OLA DE 1604 [MM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	36
FIGURA 4.8 IMAGEN DE PRUEBA DE SISTEMA CON UNA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 4 A 15V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLAJE DE 1,1881 [Hz], UNA ALTURA DE OLA DE 78 [MM] Y UNA LONGITUD DE OLA DE 1244 [MM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	36
FIGURA 4.9 IMAGEN DE PRUEBA DE SISTEMA CON UNA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 4 A 16V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLAJE DE 0,9934 [Hz], UNA ALTURA DE OLA DE 93 [MM] Y UNA LONGITUD DE OLA DE 1206 [MM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	37
FIGURA 4.10 IMAGEN DE PRUEBA DE SISTEMA CON UNA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 4 A 17V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLAJE DE 1,1921 [Hz], UNA ALTURA DE OLA DE 86 [MM] Y UNA LONGITUD DE OLA DE 1121 [MM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	37
FIGURA 4.11 ESQUEMA DE CONEXIÓN DE LOS ELEMENTOS ELECTRÓNICOS PARA REALIZAR EL BLOQUEO AUTOMÁTICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	38
FIGURA 5.1 SUMA DE LAS CARRERAS DE TODOS LOS ACTUADORES DE CADA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO PARA UN OLAJE ORIGINADO AL ALIMENTAR EL GENERADOR DE OLAS CON 17[V] , LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLAJE DE 1,1921 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 8,6 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	39
FIGURA 5.2 SUMA DE LAS CARRERAS DE TODOS LOS ACTUADORES DE CADA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO PARA UN OLAJE ORIGINADO AL ALIMENTAR EL GENERADOR DE OLAS CON 16[V] , LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLAJE DE 0,9934 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 9,3 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	40
FIGURA 5.3 SUMA DE LAS CARRERAS DE TODOS LOS ACTUADORES DE CADA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO PARA UN OLAJE ORIGINADO AL ALIMENTAR EL GENERADOR DE OLAS CON 15[V] , LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLAJE DE 1,1881 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 7,8 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	40
FIGURA 5.4 SUMA DE LAS CARRERAS DE TODOS LOS ACTUADORES DE CADA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO PARA UN OLAJE ORIGINADO AL ALIMENTAR EL GENERADOR DE OLAS CON 14[V] , LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLAJE DE 0,8911 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 4,5 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	41
FIGURA 5.5 SUMA DE LAS CARRERAS DE TODOS LOS ACTUADORES DE CADA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO PARA UN OLAJE ORIGINADO AL ALIMENTAR EL GENERADOR DE OLAS CON 13[V] , LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLAJE DE 0,8911 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 3,2 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	42



FIGURA 5.6 SUMA DE LAS CARRERAS DE TODOS LOS ACTUADORES DE CADA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO PARA UN OLEAJE ORIGINADO AL ALIMENTAR EL GENERADOR DE OLAS CON 12[V] , LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 0,7436 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 1,8 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	42
FIGURA 5.7 ACTUADOR DE MÁXIMA CARRERA PARA CADA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO A 17V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 1,1921 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 8,6 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	47
FIGURA 5.8 ACTUADOR DE MÁXIMA CARRERA PARA CADA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO A 16V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 0,9934 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 9,3 [CM] . FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	47
FIGURA 5.9 ACTUADOR DE MÁXIMA CARRERA PARA CADA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO A 15V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 1,1881 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 7,8 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	48
FIGURA 5.10 ACTUADOR DE MÁXIMA CARRERA PARA CADA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO A 14V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 0,8911 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 4,5 [CM] . FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	49
FIGURA 5.11 ACTUADOR DE MÁXIMA CARRERA PARA CADA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO A 13V. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	49
FIGURA 7.1 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO SB A UN VOLTAJE DE 17V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 1,1921 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 8,6 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	58
FIGURA 7.2 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 246 A UN VOLTAJE DE 17V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 1,1921 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 8,6 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	58
FIGURA 7.3 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 25 A UN VOLTAJE DE 17V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 1,1921 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 8,6 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	59
FIGURA 7.4 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 35 A UN VOLTAJE DE 17V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 1,1921 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 8,6 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	59
FIGURA 7.5 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 36 A UN VOLTAJE DE 17V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 1,1921 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 8,6 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	60
FIGURA 7.6 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 4 A UN VOLTAJE DE 17V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 1,1921 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 8,6 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	60
FIGURA 7.7 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO SB A UN VOLTAJE DE 16V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 0,9934 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 9,3 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	61
FIGURA 7.8 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 246 A UN VOLTAJE DE 16V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 0,9934 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 9,3 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	61
FIGURA 7.9 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 25 A UN VOLTAJE DE 16V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 0,9934 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 9,3 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	62
FIGURA 7.10 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 35 A UN VOLTAJE DE 16V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 0,9934 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 9,3 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	62

FIGURA 7.11 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 36 A UN VOLTAJE DE 16V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 0,9934 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 9,3 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	63
FIGURA 7.12 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 4 A UN VOLTAJE DE 16V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 0,9934 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 9,3 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	63
FIGURA 7.13 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO SB A UN VOLTAJE DE 15V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 1,1881 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 7,8 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	64
FIGURA 7.14 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 246 A UN VOLTAJE DE 15V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 1,1881 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 7,8 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	64
FIGURA 7.15 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 25 A UN VOLTAJE DE 15V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 1,1881 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 7,8 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	65
FIGURA 7.16 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 35 A UN VOLTAJE DE 15V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 1,1881 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 7,8 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	65
FIGURA 7.17 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 36 A UN VOLTAJE DE 15V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 1,1881 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 7,8 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	66
FIGURA 7.18 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 4 A UN VOLTAJE DE 15V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 1,1881 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 7,8 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	66
FIGURA 7.19 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO SB A UN VOLTAJE DE 14V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 0,8911 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 4,5 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	67
FIGURA 7.20 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 246 A UN VOLTAJE DE 14V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 0,8911 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 4,5 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	67
FIGURA 7.21 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 25 A UN VOLTAJE DE 14V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 0,8911 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 4,5 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	68
FIGURA 7.22 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 35 A UN VOLTAJE DE 14V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 0,8911 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 4,5 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	68
FIGURA 7.23 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 36 A UN VOLTAJE DE 14V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 0,8911 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 4,5 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	69
FIGURA 7.24 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 4 A UN VOLTAJE DE 14V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 0,8911 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 4,5 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	69

FIGURA 7.25 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO SB A UN VOLTAJE DE 13V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 0,8911 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 3,2 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	70
FIGURA 7.26 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 246 A UN VOLTAJE DE 13V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 0,8911 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 3,2 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	70
FIGURA 7.27 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 25 A UN VOLTAJE DE 13V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 0,8911 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 3,2 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	71
FIGURA 7.28 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 35 A UN VOLTAJE DE 13V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 0,8911 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 3,2 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	71
FIGURA 7.29 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 36 A UN VOLTAJE DE 13V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 0,8911 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 3,2 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	72
FIGURA 7.30 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 4 A UN VOLTAJE DE 13V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 0,8911 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 3,2 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	72
FIGURA 7.31 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO SB A UN VOLTAJE DE 12V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 0,7436 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 1,8 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	73
FIGURA 7.32 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 246 A UN VOLTAJE DE 12V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 0,7436 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 1,8 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	73
FIGURA 7.33 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 25 A UN VOLTAJE DE 12V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 0,7436 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 1,8 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	74
FIGURA 7.34 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 35 A UN VOLTAJE DE 12V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 0,7436 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 1,8 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	74
FIGURA 7.35 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 36 A UN VOLTAJE DE 12V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 0,7436 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 1,8 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	75
FIGURA 7.36 CARRERAS DE LOS ACTUADORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE BLOQUEO 4 A UN VOLTAJE DE 12V, LO QUE EQUIVALE A UNA CONDICIÓN DE OLEAJE DE 0.7436 [Hz] Y UNA AMPLITUD DE OLA DE 1,8 [CM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	75

# 1. Introducción

## 1.1. Antecedentes Generales

### 1.1.1. Primer prototipo de sistema undimotriz lineal

Esta memoria está basada en una memoria realizada en el Departamento de Mecánica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile llamada DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SISTEMA UNDÍVAGO PARA LA CONVERSIÓN DE ENERGÍA, en donde se logró diseñar y construir un prototipo de sistema undívago, lo que quiere decir que oscila con las olas. Este sistema consiste en una innovación en el área de generación de energía undimotriz. Su diseño es básicamente una serie de módulos piramidales de base cuadrada unidos por las aristas de la base en una disposición lineal, esta unión es articulada y posee un grado de libertad para permitir la rotación de un módulo con respecto a otro. Están unidos por las cúspides por bombines los cuales se encargan de acumular presión en un estanque cuando el sistema se articula [1].

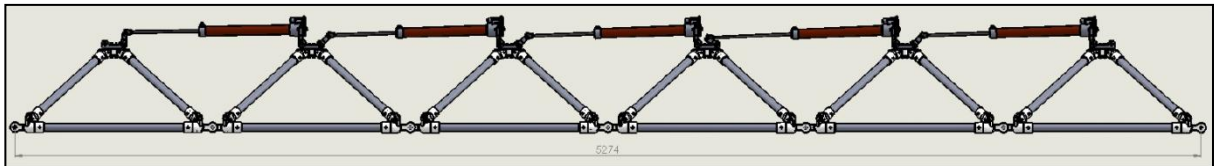


Figura 1.1 Unión de seis módulos. Fuente: [1].

La manera de cómo se genera la energía es por medio de la expansión y contracción del sistema de tal forma que los bombines actúen y acumulen presión en un estanque generando así energía potencial en forma de presión. La expansión y compresión del sistema se logra gracias a la flotación de este y a su capacidad de adaptarse al perfil de las olas como se muestra en la Figura 1.2 donde se aprecia el prototipo construido y operando en el mar.

Los bombines están conectados en serie a un estanque el cual fue capaz de acumular una presión de 4 psi. Considerando un aerogenerador ideal este sistema es capaz de generar una energía igual a 50[W].

El nombre de este prototipo es Nahuenrew cuyo significado en mapudungun es energía de olas.

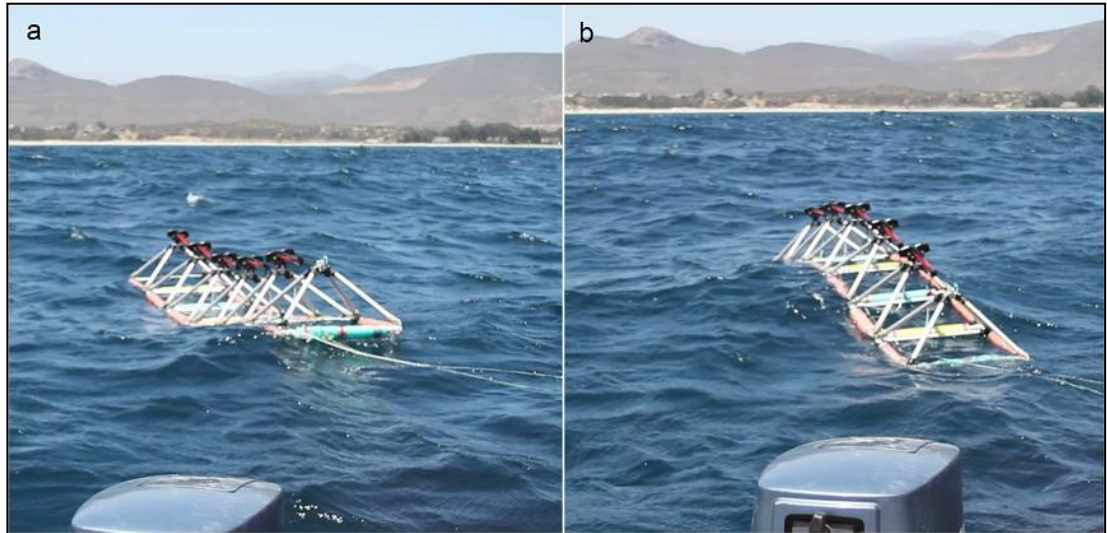


Figura 1.2 a) Contracción del sistema, b) Expansión del sistema. El mecanismo se muestra operando en la Paya de Pichidanguí. Fuente: [1].

### 1.1.2. Otras tecnologías

Hasta la fecha se ha logrado obtener de manera exitosa la energía del océano, se han inventado diversos sistemas los cuales se clasifican de diversas formas según la bibliografía que se estudie. Para decidir qué tecnología instalar en una zona del océano es importante conocer el requerimiento energético, las características meteorológicas y la geografía de la zona donde se quiere instalar el mecanismo y así aprovechar mejor el recurso y abaratar costos de operación, instalación y mantenimiento [2].

En general los dispositivos undimotrices se pueden clasificar de la siguiente forma:

#### Clasificación según ubicación

Las propiedades de las olas dependen de las características y de la profundidad del lecho marino. El suelo marino y sus irregularidades son factores que oponen resistencia al desplazamiento de la ola, por lo que las olas ubicadas sobre las mayores profundidades del mar poseen más energía, pues no se ven afectadas por la presencia del suelo marino [3]. Los sistemas que extraen energía de las olas pueden ubicarse, de forma general, en tres zonas geográficas:

- Sobre el borde costero: Son sistemas anclados a un muelle o al suelo de la costa, son fáciles de mantener y tienen un menor riesgo a ser sometido a condiciones extremas de tiempo. Las desventajas de este mecanismo es la poca energía de las olas en la orilla y por tanto la poca disponibilidad energética del recurso, las mareas son un factor adicional de diseño y se requiere de características geográficas específicas.
- Cerca de la costa o en aguas poco profundas: Estos se anclan al suelo marino. Poseen una dificultad y un costo alto de instalación y mantenimiento. Esto ocurre porque por lo general la mayor parte del sistema se encuentra inmerso en las aguas dificultando la intervención para corregir una falla.
- Aguas adentro o en aguas profundas: Son mecanismos flotantes. Las tecnologías de esta clasificación son las que pueden extraer un mayor potencial debido a la gran cantidad de energía de las olas dentro del mar. El problema es que estos mecanismos son difíciles de mantener debido a la misma presencia de las olas donde se sitúan, y es necesario una mayor inversión para diseñar y construir sistemas sometidos a grandes esfuerzos.

### **Clasificación según principio de funcionamiento**

A energía de las olas se puede aprovechar utilizando la energía mecánica del fluido mismo o transfiriendo energía a otro fluido para extraer a energía de este último [4].

- Columna de agua oscilante: Por lo general están ubicados en el borde costero y aprovechan las diferencias de presión de las olas para hacer subir una columna de aire el cual finalmente pasa por una turbina aerogeneradora.
- Rebalse: Se puede encontrar ancladas o flotando, su funcionamiento se basa aprovechar la energía potencial de las olas para reservar agua en un reservorio en altura y luego hacerla caer transformando la energía en cinética y luego hacer girar una turbina hidráulica de baja altura.
- Cuerpo oscilante: son cuerpos que se mueven por mecanismos de flotación y desplazamientos de las olas. Aprovechan la energía cinética y la variación de energía potencial mediante la implementación de actuadores que transforman la energía en presión. Se ilustran en la Figura 1.4.

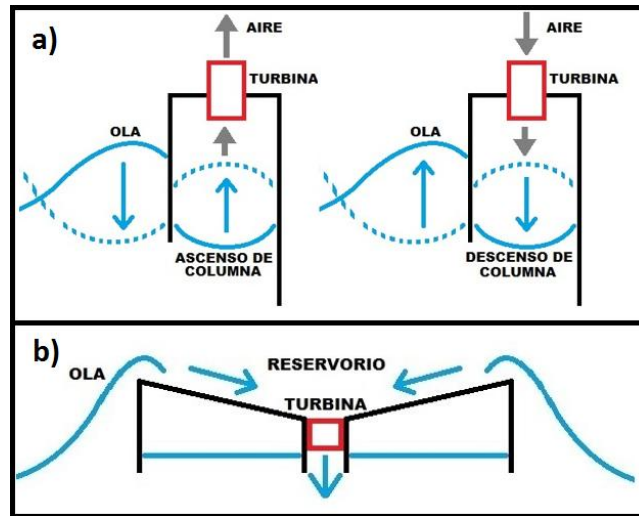


Figura 1.3 a) Mecanismo de funcionamiento por columna de agua. b) Mecanismo de funcionamiento por rebalse. Fuente: Imagen adaptada de [4].

### Clasificación según orientación del sistema

Esta clasificación se refiere básicamente al movimiento del dispositivo con respecto a la ola para absorber su energía [5].

- Absorbedor: El eje del dispositivo se encuentra ortogonal al plano al que pertenece el frente de ola, absorbe energía subiendo y bajando por su eje.
- Atenuador: El eje del dispositivo se encuentra perpendicular al frente de ola, absorbe energía de moldeando la forma del eje a la ola.
- Terminador: El eje del dispositivo se encuentra paralelo al frente de ola, absorbe energía rotando en torno al eje. También incluye los mecanismos de columna oscilante y de rebalse.

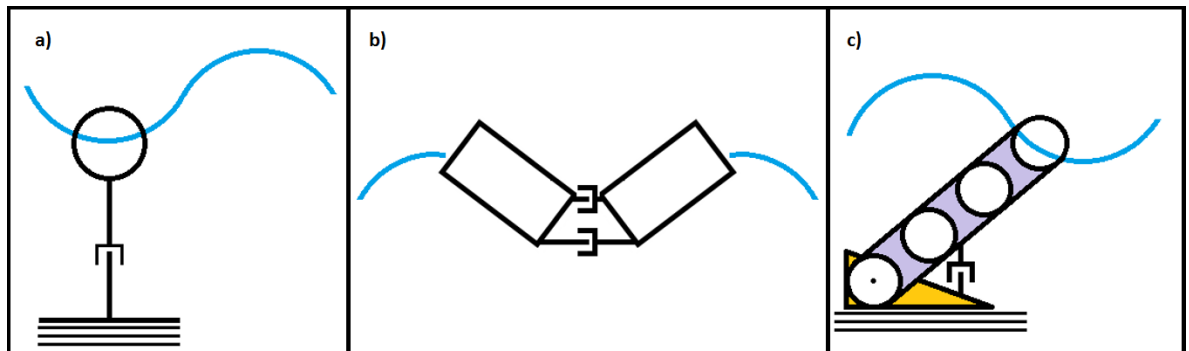


Figura 1.4 a) Dispositivo del tipo absorbedor. b) Dispositivo tipo atenuador. c) Dispositivo tipo terminador. Fuente: Imagen adaptada de [5].

## 1.2. Motivación

La generación de energía es una rama de la mecánica que se ha estado desarrollando desde el momento de la concepción de sistemas que requieren energía. Algunos de ejemplos de estos sistemas son máquinas a vapor, motores de combustión y dispositivos electrónicos.

El desarrollo de la tecnología y la industrialización han dado acceso al incremento exponencial de la cantidad artefactos para satisfacer diversas necesidades y todos ellos requieren cierto tipo de energía mecánica o eléctrica. En consecuencia han aumentado los requerimientos energéticos por parte de la sociedad en todo el mundo. Para generar la energía es necesario utilizar un recurso los cuales se clasifican en renovables y no renovables. La mayor cantidad de los recursos energéticos se trasforman en energía eléctrica para abastecer a las empresas y nuestros hogares [6], y el resto se transporta para ser utilizado directamente como fuente de calor, como las bencinas y el gas licuado entre otros.

Actualmente la generación de energía requiere una gran cantidad de combustibles fósiles, los cuales son materias primas no renovables, además se realiza mediante métodos altamente invasivos y/o dañinos al ecosistema, por esta razón, sumada con la creciente demanda energética, nuestro planeta ha sufrido serios daños medioambientales, que se ha traducido en empeoramiento de la calidad del aire, destrucción de la capa de ozono y principalmente el calentamiento global [7].

Una medida para desacelerar la degradación del medioambiente es el desarrollo de las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) la cual se genera mediante recursos inagotables o cíclicos. Hasta la fecha se pueden enumerar los siguientes recursos de energía renovable [8]:

- Hidráulico
- Solar
- Biocombustible
- Mar
- Viento
- Geotérmico

En este documento se estudia un sistema para la extracción de energía del mar, en particular la energía undimotriz la cual pertenece a la energía mecánica presente en las olas.



El objetivo general de este trabajo es diseñar y analizar un sistema inteligente que permita adaptar el funcionamiento de un sistema undimotriz lineal a las condiciones de oleaje. Estas condiciones son: frecuencia y amplitud del frente de ola.

Los objetivos específicos son:

- Instalar setup experimental con OptiTrack en el laboratorio de Fluido Dinámica del Departamento de Ingeniería Civil.
- Idear mecanismo de bloqueo para el sistema.
- Rediseñar sistema undimotriz lineal en función del sistema de bloqueo y de los elementos para obtención de aire presurizado.
- Diseñar y construir generador de olas para el canal de agua.
- Fabricar, construir e implementar sistema undimotriz lineal.
- Implementar un control manual de la estructura que permita bloquear o desbloquear distintos módulos.
- Recolectar series de tiempo de un conjunto de marcadores ubicados en los extremos de cada actuador
- Analizar los datos y relacionarlos con distintas condiciones de oleaje.
- Comparar dinámica de la estructura con control manual y la dinámica de la estructura sin el control.
- Implementar bloqueo automático controlado por computador.
- Evaluar desempeño del sistema con control inteligente y compararlo con el sistema sin bloqueo.

### **1.3. Alcances**

El fin de esta memoria es ver la efectividad de un sistema inteligente de bloqueo de módulos lo cual se evaluará estudiando la cinemática de un sistema. Para esto se limitará a comparar la cinemática de ambos sistemas en el laboratorio.

### **1.4. Antecedentes Específicos**

#### **1.4.1. Ondas**

Una onda es una perturbación que se propaga en forma de energía por un medio. La perturbación la ocasiona un agente perturbador el cual tiene la característica de poder interactuar con el medio quitándole o le cediéndole energía [9]. Las olas se clasifican de la siguiente forma:

### Según el medio por donde se propagan:

- Mecánicas: Necesitan un medio material para propagarse.
- Electromagnéticas: No necesitan un medio material para propagarse, se pueden desplazar en el vacío.

### Según el movimiento de sus partículas

- Longitudinales: En este tipo de onda las partículas se mueven paralelamente a la dirección de la propagación de la onda.
- Transversales: Las partículas se mueven perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda.

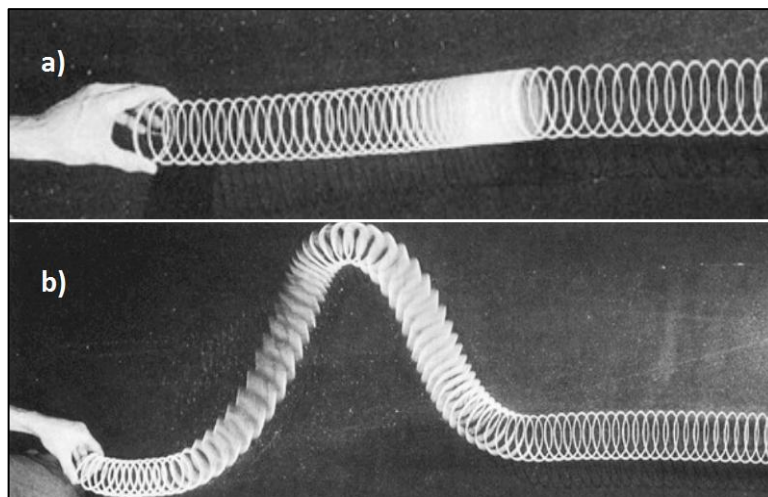


Figura 1.5 a) Desplazamiento de onda longitudinal b) Desplazamiento de onda transversal. Fuente: [9]

### Según la dirección de la propagación:

- Unidimensionales: Se desplazan en solo un eje o dirección. Ej.: onda propagándose por una cuerda.
- Bidimensionales o Superficiales: Se desplazan en dos dimensiones, por lo general su propagación es por una superficie plana de un volumen. Ej.: ondas en la superficie del agua.
- Tridimensionales o esféricas: Se desplazan en tres dimensiones. Ej.: onda sonora.

### Según su periodicidad:

- Periódicas: La perturbación que la genera lo hace cada cierto ciclo de tiempo y en un lugar constante. A esta perturbación se le da el nombre de pulso.
- No periódicas: La perturbación se origina de forma aleatoria. O sea en un lugar y un tiempo no constante.

La ecuación que representa la forma de una onda  $\phi$  se muestra en la ecuación 1.1.

$$\phi(x, t) = -A \sin(\omega t + kx) \quad 1.1$$

Dónde  $\phi$  es la posición de la onda respecto al eje  $x$  medido en metros,  $A$  es la amplitud de la onda medida en metros,  $\omega$  es la frecuencia de la onda medida en Hertz,  $t$  es el tiempo medido en segundos,  $k$  es el número de onda medido en unidades inversas a las unidades de  $x$  y  $x$  es la posición medida en metros.

### 1.4.2. Olas

Las olas son ondas que se desplazan por la superficie marítima, se producen principalmente por las fuerzas de corte del viento sobre la superficie del mar.

Las olas se caracterizan como ondas de la siguiente forma [10]:

- Mecánicas: Requieren un medio líquido para propagarse.
- Bidimensionales: Se propagan por la superficie marina. Es estricto rigor la superficie marina describe el casquete de un elipsoide correspondiente a la superficie del planeta Tierra, pero al trabajar en una pequeña porción de la superficie de este elipsoide se puede asumir que se trabaja en un plano diferencial de mismo donde no se aprecia curvatura de la superficie del mar.
- Transversales: Las olas transportan partículas de agua perpendicularmente al frente de propagación de la onda.
- No periódicas: Son producidas por perturbaciones no repetitivas o aisladas en el tiempo y las perturbaciones varían en la extensión de la superficie del mar.

Los parámetros que parametrizan una ola se muestran en la Figura 1.6. Se muestra la profundidad ( $h$ ) del nivel del agua con respecto al suelo marino, la longitud de onda ( $L$ ) y la amplitud ( $A$ ) de la ola.

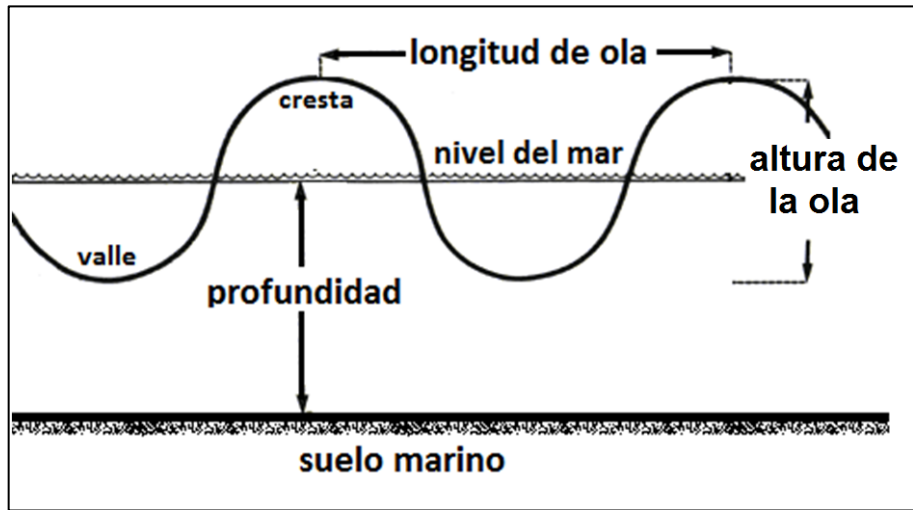


Figura 1.6 Parámetros que caracterizan una ola. Fuente: Imagen adaptada de [11].

Otra clasificación importante de las olas es aquella que las agrupa según la relación de la profundidad del suelo marino y la longitud de ola. Son tres tipos y se denominan como olas de agua profunda, de agua intermedia y de agua poco profunda. Esta clasificación se detalla en la Tabla 1.1 y se determina según la relación  $h/L$ .

Tabla 1.1 Clasificación de las olas según su relación de altura de ola y profundidad de suelo marino.

Relación $h/L$	Clasificación de la ola
$h/L > 1/2$	agua profunda
$1/20 < h/L \leq 1/2$	agua intermedia
$h/L \leq 1/20$	agua poco profunda

Fuente: [12].

La importancia de esta clasificación es el movimiento particular que describen las partículas de agua en cada una de estas ubicaciones. En las zonas de agua profunda las partículas de agua describen trayectorias circulares, a medida que el suelo comienza a afectar el movimiento natural, la ola se encuentra en la zona de agua intermedia donde las trayectorias circulares se achatan y comienzan a describir trayectorias elipsoidales. A medida que la profundidad disminuye la excentricidad de las elipses que describen las partículas aumentan hasta que el movimiento se transforma en uno lineal el cual en el sentido práctico es la zona donde revientan las olas. Este fenómeno se ilustra en la Figura 1.7.

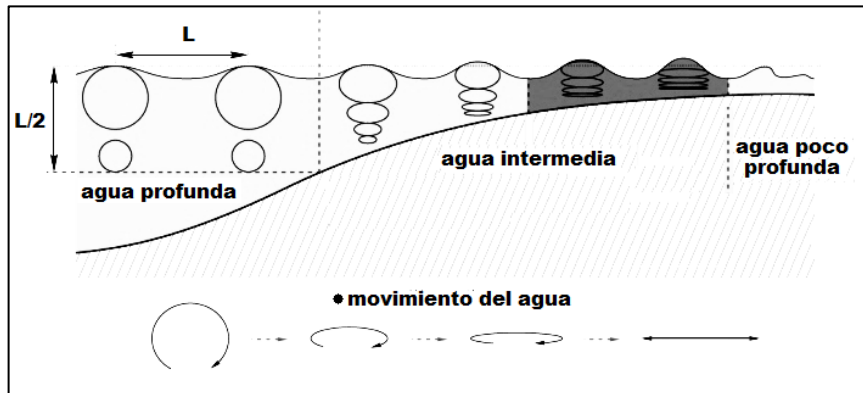


Figura 1.7 Movimiento de las partículas de agua según profundidad del suelo marino. Fuente: [13].

También se clasifican por su altura de ola según la escala de Douglas la cual se muestra en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Resumen de escala Douglas.

Grado	Altura de la ola [m]	Descripción
0	0	mar en calma
1	0,00 a 0,10	mar rizada
2	0,10 a 0,50	marejadilla
3	0,50 a 1,25	marejada
4	1,25 a 2,50	marejada fuerte
5	2,50 a 4,00	mar gruesa
6	4,00 a 6,00	muy gruesa
7	6,00 a 9,00	arbolada
8	9,00 a 14,0	montañosa
9	más de 14	enorme

Fuente: [14].

Según la escala Douglas, el estado normal de las aguas profundas, en un día soleado con condiciones de temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$  y velocidades del viento de 20 a 30 m/s en latitudes correspondiente al centro de Chile es el de marejada. Es importante notar que la altura de las olas aumenta a medida que la latitud aumenta, lo cual quiere decir que en playas cercanas a la Línea del Ecuador las payas poseen mar rizada y a medida que las latitudes se acercan a los polos el tamaño de las olas llega a ser mar gruesa a muy gruesa. En condiciones meteorológicas excepcionales como tormentas o temporales, las olas pueden tener un tamaño lo suficientemente grande como para clasificarse como montañosa o enorme.

### 1.4.3. Modos de Vibración

Los modos de vibración de un cuerpo corresponden a las maneras en las que este puede oscilar estacionariamente [15].

Para fines de este trabajo de título se hablará de los modos de vibración de una cuerda fija en ambos extremos ya que el sistema undimotriz estudiado en este trabajo se aproxima a la discretización de una cuerda continua en módulos.

En el caso de una cuerda fija en ambos extremos de largo  $L$  se cumple la condición mostrada en la ecuación (1.2).

$$\phi(x = 0) = \phi(x = L) = 0 \quad 1.2$$

Si se reemplaza la ecuación 1.2 en la ecuación 1.1 se obtiene como solución la ecuación 1.3.

$$kL = n\pi, \forall n \in \mathbb{Z} \quad 1.3$$

La longitud de onda  $\lambda$  queda determinada por la ecuación 1.4.

$$\lambda = \frac{2L}{n} \quad 1.4$$

Y la frecuencia de vibración  $\nu$  se determina por la ecuación 1.5.

$$\nu = n \frac{v}{2L} \quad 1.5$$

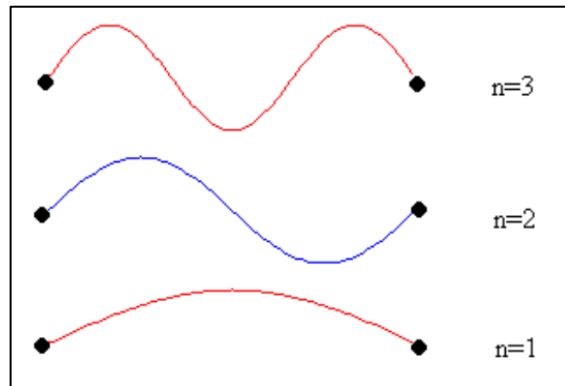


Figura 1.8 Modos de vibración de una cuerda fija en ambos extremos para distintos  $n$ . Fuente: [16].

### 1.4.4. Flotación

La flotación se refiere a la acción de un cuerpo al flotar en un medio. La física de los problemas de flotación se basa en la ubicación del centro de gravedad (CG) y la del centro de flotación (CF) del cuerpo. El centro de gravedad es el punto donde actúa el peso resultante en un cuerpo y el centro de flotación se ubica en el centro de gravedad del volumen de agua desplazado por el cuerpo [17]. Existen dos tipos de estabilidades en la flotación:

#### 1.4.4.1. Estabilidad lineal

Este tipo de estabilidad se refiere a la capacidad de un cuerpo flotante de volver a su estado inicial al ser sometido a un desplazamiento vertical. Esto se produce por la disminución o por el aumento del empuje al disminuir o aumentar el volumen de agua desplazado por el cuerpo al desplazarse verticalmente hacia arriba o hacia abajo respectivamente.

#### 1.4.4.2. Estabilidad rotacional

Se refiere a la capacidad de un cuerpo flotante de volver a su estado inicial al ser sometido a un desplazamiento angular.

En cuanto a la rotación de cuerpos flotantes se presentan tres estados de equilibrio:

##### Equilibrio estable

Ocurre cuando el centro de flotación está arriba de centro de gravedad del cuerpo. Esto causa que al perturbar el cuerpo angularmente este tenga la tendencia de contrarrestar el desplazamiento con un torque de origen conservativo.

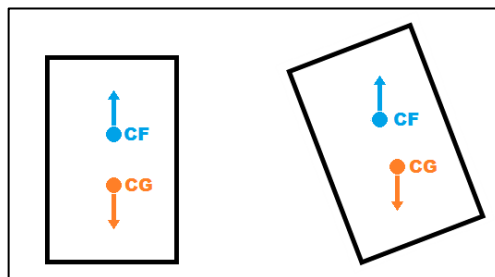


Figura 1.9 Diagrama de fuerzas para un cuerpo flotante en equilibrio estable. Fuente: Adaptación de [17].

### Equilibrio inestable

Ocurre cuando el centro de flotación está bajo de centro de gravedad del cuerpo. Esto causa que al perturbar el cuerpo angularmente este tenga la tendencia de favorecer el desplazamiento con un torque de origen conservativo.

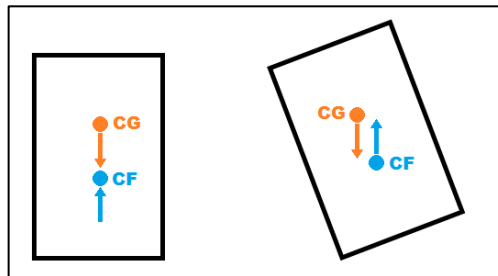


Figura 1.10 Diagrama de fuerzas para un cuerpo flotante en equilibrio inestable. Fuente: Adaptación de [17].

### Equilibrio neutro

Ocurre cuando el centro de flotación coincide con el centro de gravedad del cuerpo. Cuando hay equilibrio neutro no se generan torques de origen conservativo que favorezcan o que impidan el desplazamiento angular del cuerpo.

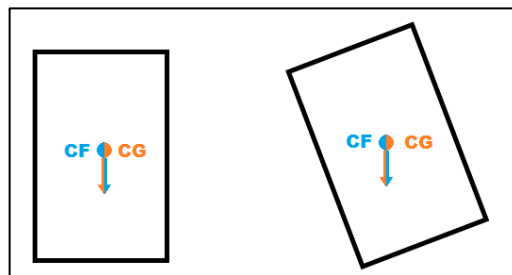


Figura 1.11 Diagrama de fuerzas para un cuerpo flotante en equilibrio neutro. Fuente: Adaptación de [17].

## 1.4.5. Herramientas de laboratorio

Para comprender la metodología de este trabajo de título es necesario describir los instrumentos y los software utilizados.

### 1.4.5.1. Software

Los programas para obtención de datos y para automatización se presentan a continuación:



**Motive: Traker**

Software controlador del OptiTrack. Con Motive se puede ajustar la configuración de las cámaras del OptiTrack y de la captura de datos. [18]

**Python**

Lenguaje de programación con el que se puede interactuar con varios software a la vez. En este trabajo se utiliza a versión Python 2.7. [19]

**Arduino**

Lenguaje de programación Processing con el cual se puede controlar el hardware Arduino [20].

**1.4.5.2. Instrumentos de obtención de datos****OptiTrack**

Sistema de captura de movimiento de marcadores. Su funcionamiento se basa en un software llamado Motive y un Hardware el cual es un sistema de cámaras.

En el laboratorio está implementado el modelo OptiTrack V120: Trio, el cual se muestra en la Figura 1.12. Posee 3 cámaras, conjuntas a 26 ampolletas LEDs emisoras infrarrojas cada una. La resolución de la captura es de 640x480 pixeles a una tasa de 120FPS y una latencia de 8.3ms. La precisión de la captura de los datos es del orden de los 10 [ $\mu m$ ] y la conexión al computador es por medio de un puerto USB 2.0.

La captura de datos puede realizarse mediante la grabación de la captura y luego la exportación de estos datos o se pueden capturar datos en tiempo real realizando la exportación de datos en paralelo al funcionamiento del OptiTrack.



Figura 1.12 Imagen del hardware OptiTrack V120: Trio. Fuente: [18].

## LED IRED

Es un diodo emisor de luz infrarroja. Tienen un alto uso en mecanismos de control ya que la señal que emite es fácilmente diferenciable. El diámetro de la ampolla es de 5 mm, la frecuencia de emisión es de 940-1000 [nm] y funciona con un voltaje de 3 [V].

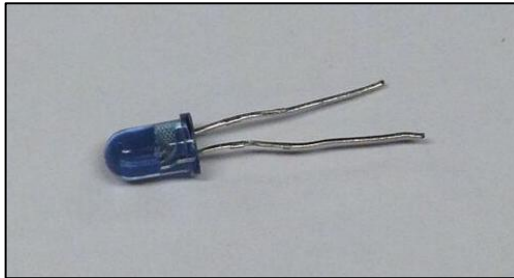


Figura 1.13 LED infrarrojo. Fuente: Elaboración propia

### 1.4.5.3. Instrumentos de Automatización

#### Arduino

Hardware de uso libre, es una placa implementada con un microcontrolador diseñado para desempeñar tareas en diversas áreas de la electrónica. Su función se programa en el software Arduino.

El laboratorio está equipado con el modelo Arduino Uno el cual posee el micro controlador ATmega328, el voltaje de entrada es de 7-12 [V], la frecuencia de reloj es de 16 MHz, el voltaje del sistema es de 5 [V], posee 6 entradas analógicas, 32 k de memoria Flash, 14 pines digitales de I/O con 6 salidas PWM y conexión al ordenador vía USB.

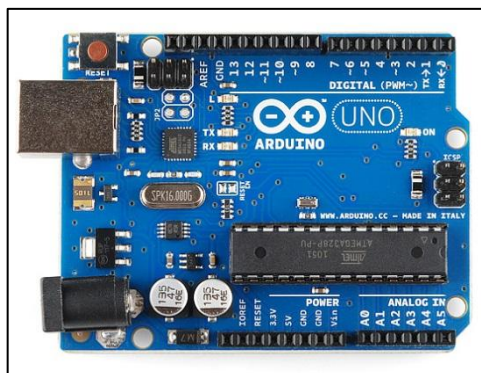


Figura 1.14 Placa de Arduino. Fuente: [20].

## Electroimanes

Es un imán que se acciona al pasar corriente eléctrica por una bobina. El modelo con el que cuenta el laboratorio es el ZYE1-P20/15 DC 24V el cual se muestra en la Figura 1.15 a).

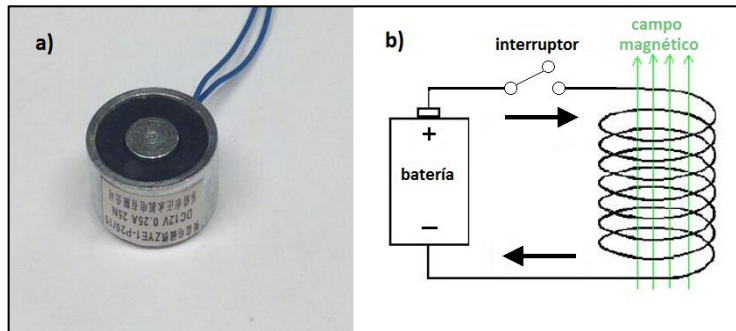


Figura 1.15 a) Electroimán. b) Esquema de funcionamiento de electroimán. Fuente: Imagen adaptada de [21]

## Relé

Es un interruptor accionado por un electroimán que requiere un bajo voltaje. El relé cumple la función de estimular la circulación de corriente un circuito donde el voltaje es mayor. En la Figura 1.16 b) se muestra un esquema de funcionamiento de un relé donde el voltaje V1 acciona el electroimán para cerrar el circuito donde actúa V2.

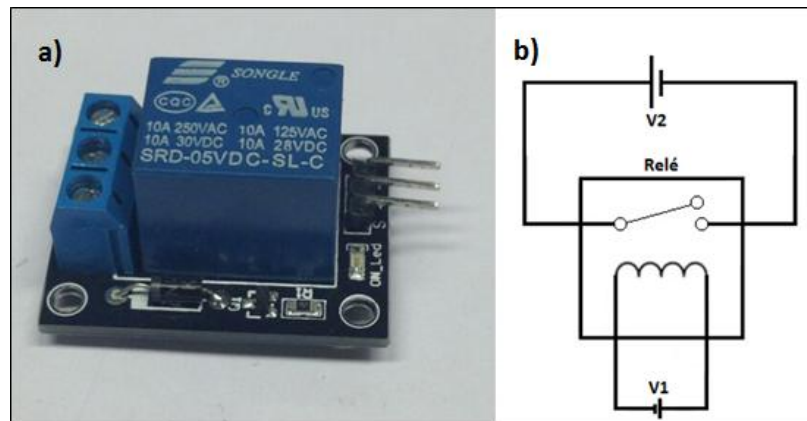


Figura 1.16 a) Imagen de un relé. b) Esquema de funcionamiento de un relé. Fuente: Imagen adaptada de [22].

## Protoboard

Tablero con orificios conectados electrónicamente. Se utiliza para crear configuraciones de conexiones eléctricas entre distintos elementos electrónicos. En la Figura 1.17 b) se muestra un esquema con la disposición de las conexiones del protoboard según la Figura 1.17 a).

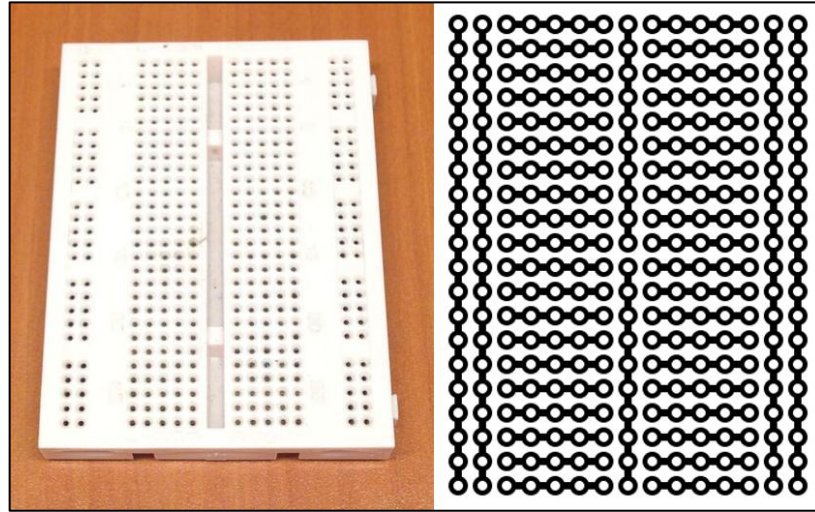


Figura 1.17 a) Imagen de protoboard. b) Esquema de protoboard. Fuente: [22].

## 1.4.6. Procesamiento de datos

### Transformada de Fourier Discreta (TFD)

Transformación matemática que convierte la señal de una onda en dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Es útil en el estudio de señales reales las cuales no se pueden detectar datos de forma continua [23].

Para  $N$  datos, una señal  $x(n)$  asociado a un tiempo  $t(n)$  con  $n \in [0, N - 1]$ , la TFD de  $x(n)$  se denota  $X_k$  y está determinada por la ecuación 1.6

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N}kn} \quad 1.6$$

Donde  $k \in [0, N - 1]$  y la frecuencia  $\omega_k$  se presenta en la ecuación 1.7

$$\omega_k = \frac{2\pi k}{N} \quad 1.7$$

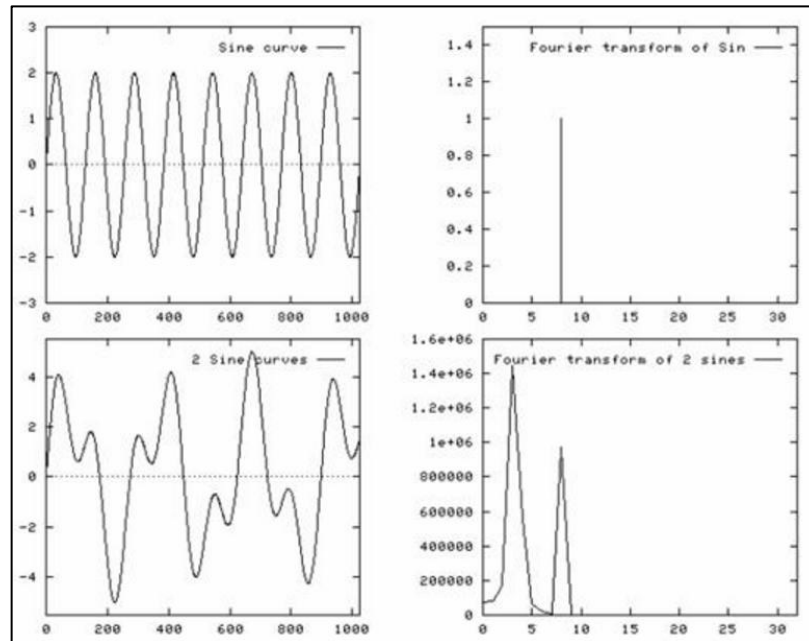


Figura 1.18 Gráficos de funciones en dominio de tiempo (a la izquierda) y sus gráficos respectivos en dominio de frecuencia (a la derecha). Fuente: [23]

## **2. Metodología**

### **2.1. Revisión bibliográfica:**

En este paso se estudian diversos sistemas undimotrices para comprender su principio de funcionamiento de esta forma poder abordar con herramientas teóricas los desafíos presentes en este trabajo

### **2.2. Invención del mecanismo de bloqueo**

Para idearán dos mecanismos de bloqueo entre los módulos del sistema undimotriz lineal: uno manual y otro automático, los cuales deben ser poco invasivos en el sistema tomando en cuenta los factores de escala. El sistema al ser pequeño puede causar que un mecanismo de bloqueo muy grande o pesado modifique la cinemática del sistema mediante inestabilidades o aportando rigidez.

### **2.3. Diseño**

Se utilizará el programa CAD SolidWorks para el diseñar el prototipo del sistema undimotriz lineal y el del generador de olas. Antes de comenzar a diseñar, será importante decidir los materiales y elementos para construir los prototipos.

El sistema undimotriz debe diseñarse en función del mecanismo de bloqueo y considerando la implementación de un sistema neumático que pueda captar aire presurizado en un tanque con el movimiento del sistema causado por el oleaje. El principio de funcionamiento debe ser el mismo que el del Nahuenrew, en otras palabras debe ser un diseño modular cuyos módulos deben tener una geometría piramidal de base cuadrada. Estos módulos tienen que estar unidos por pasadores ubicados en los extremos de las bases de las pirámides y por actuadores que unan sus vértices de tal manera de tal forma de que los actuadores puedan comprimirse y expandirse cuando el sistema describa la forma de las olas.

El generador de olas se debe diseñar en base al sistema motriz a seleccionar y a las restricciones geométricas del canal donde se realizarán las pruebas.

### **2.4. Fabricación y obtención de piezas**

Se fabricarán las piezas que conforman los diseños mediante la impresora 3D Maker Bot Replicator 2 y la cortadora láser Epilog's Legend 36EXT, para el sistema undimotriz y

para el generador de olas respectivamente. Además se utilizarán componentes existentes en el laboratorio y se conseguirán elementos comerciales según los requerimientos del diseño.

## **2.5. Construcción**

En la construcción se ensamblarán y se pegarán las piezas fabricadas digitalmente según corresponda, de ser posible este proceso se debe realizar medida de que las piezas son generadas.

Se deberá cuidar que el sistema neumático no tenga fugas. Se colocarán luces LED IRED a modo de marcadores en los extremos de cada actuador para obtener datos de su comportamiento en el tiempo. Finalmente se implementará un material de flotación.

El generador se alineará correctamente, se adecuará al tamaño del canal evitando que este no tenga interferencias en su movimiento.

## **2.6. Estudio dinámico del sistema**

Para lograr el estudio se aprenderá a utilizar el canal de agua y a operar la bomba. Después se implementará el montaje experimental. Luego se operará el generador de olas y los instrumentos de obtención de datos para grabar series de tiempo de los marcadores. Se grabarán diversas pruebas en las cuales se variarán las condiciones de oleaje y las configuraciones de bloqueo del mecanismo undimotriz, en paralelo se almacenará presión para cada una de estas condiciones. Se calcularán y estudiarán las carreras de los actuadores para cada configuración de bloqueo y condición de oleaje y se determinará que bloqueo maximiza la potencia y la capacidad de producción energética

## **2.7. Automatización del sistema**

Según los datos obtenidos en el estudio del sistema se automatizarán un mecanismo de bloqueo de tal forma de maximizar la potencia generada por él.

## **2.8. Estudio de desempeño del mecanismo de bloqueo**

Finalmente se comparará el desempeño del mecanismo de bloqueo automático con respecto al sistema sin bloqueo.

## **3. Diseño y Construcción**

### **3.1. Invención del Mecanismo de Bloqueo**

Uno de los desafíos de este proyecto fue la invención de un mecanismo de bloqueo ya que este debía ser compacto y poco invasivo al sistema por razones de escala. Además debía estar sostenido de una memoria de cálculo que estaba en función del diseño de sistema lo cual hizo este paso crítico en el avance del proyecto.

El mecanismo de bloqueo elegido fue uno accionado por la interacción de electroimanes y placas metálicas, esta acción se controla por un arduino y un relé.

Como se describió anteriormente este sistema de bloqueo cumple con la condición de ser compacto y además puede instalarse cerca de la base de las pirámides para no desestabilizar a flotación del sistema y el mecanismo de accionamiento son cables de conducción eléctrica, los cuales tienen bajo peso y rigidez, lo cual evita modificar en gran medida las características cinemáticas del sistema.

### **3.2. Diseño**

Se utilizó el programa CAD SolidWorks para el diseño de las piezas. Antes de comenzar a diseñar, fue importante decidir los materiales y elementos para construir el prototipo.

#### **3.2.1. Sistema undimotriz**

El diseño básico del sistema se hizo paralelamente a la invención del bloqueo, y después de seleccionar los materiales de construcción y los elementos neumáticos se inició la tarea de definir el diseño final. Al diseño del Nahuenrew se le hizo una pequeña modificación la cual es una expansión de la base para fijar un electroimán. Los módulos cuentan con un elemento ubicado a un lado de la pirámide donde se puede fijar el electroimán el cual interactúa con una placa metálica pivotada en el módulo vecino.

Por razones de costo y tiempo se utilizaron varillas de globo en vez de varillas de fibra de carbono. Al ser más débiles se utilizaron dos varillas por arista en vez de una.

En la Figura 3.1 se muestra el diseño de un módulo sin los elementos de sujeción de los actuadores, en esta figura se explicitan las medidas principales las cuales sirven para tener un orden de magnitud de las dimensiones del sistema. Los planos las piezas que



conforman el módulo se muestran en Anexos donde se detallan todos los componentes diseñados.

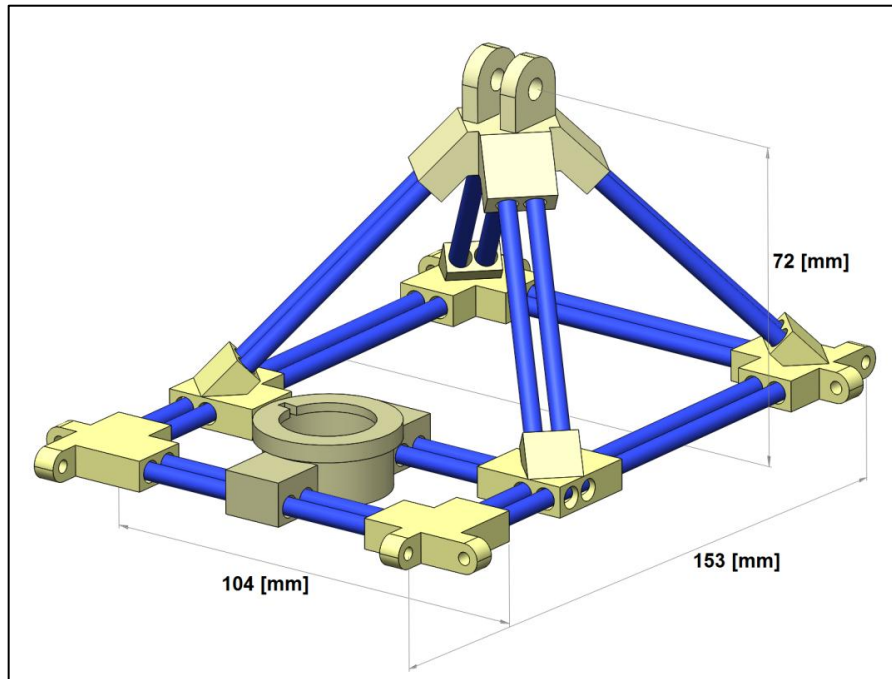


Figura 3.1 Diseño CAD de un módulo del y sus medidas principales. Fuente: Elaboración propia.

El diseño se realizó para que los actuadores logaran comprimirse y expandirse completamente. Estos estados de máxima compresión y expansión se ilustran en la Figura 3.2 y en la Figura 3.3 respectivamente.

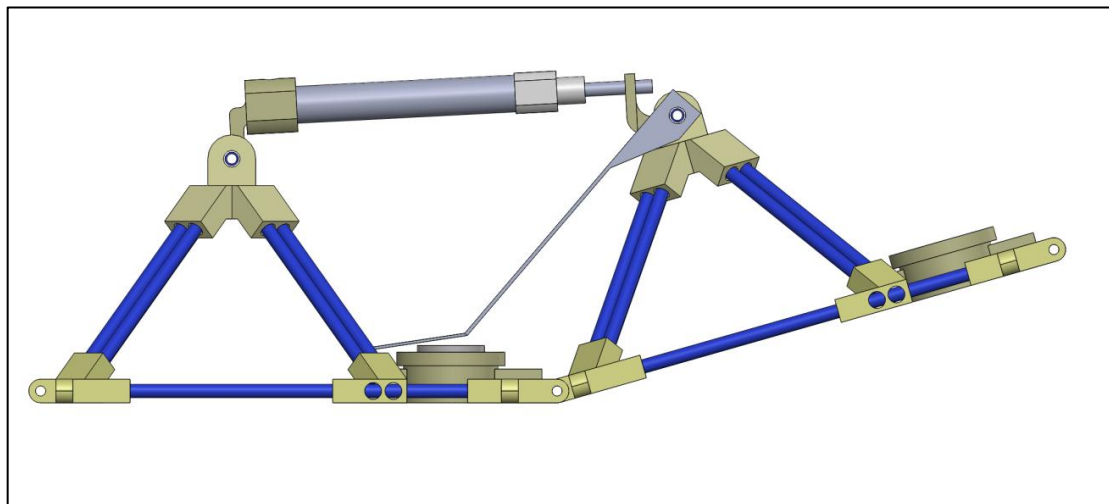
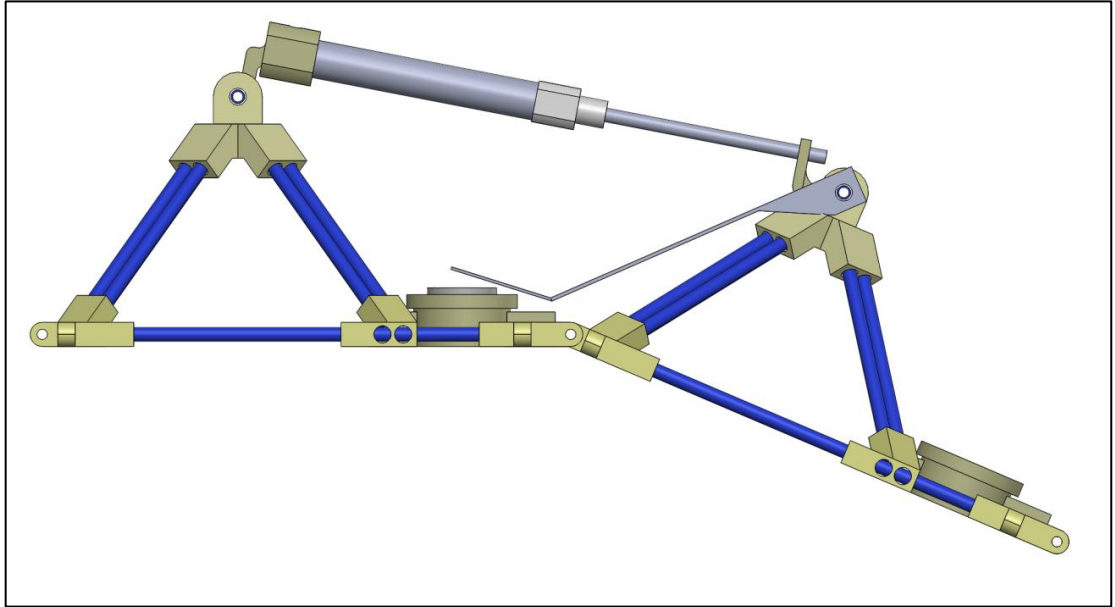
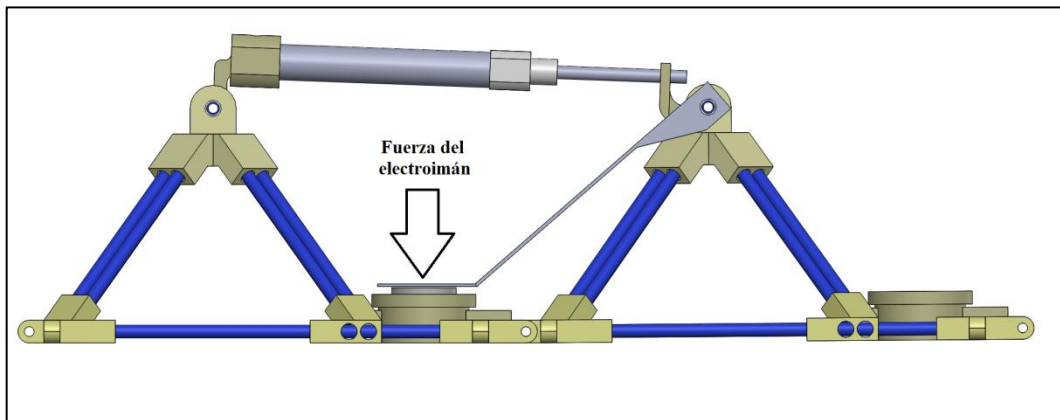


Figura 3.2 Arreglo de dos módulos en máxima compresión. Fuente: Elaboración propia.



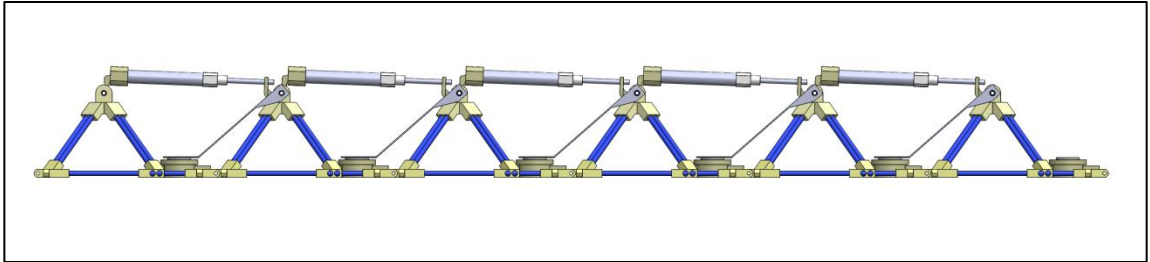
**Figura 3.3 Arreglo de dos módulos en máxima expansión. Fuente: Elaboración propia.**

El principio de funcionamiento del mecanismo de bloqueo es simplemente accionar un electroimán con corriente eléctrica. Una vez accionado, los módulos se bloquearán cuando pasen por la posición neutra como se ve en la Figura 3.4. Al pasar por la posición neutra, una parte de la placa metálica se dispone de forma paralela a la superficie del electroimán y en consecuencia el electroimán puede ejercer su fuerza magnética en una dirección normal a la placa metálica para restringir el movimiento de los dos módulos entre sí.

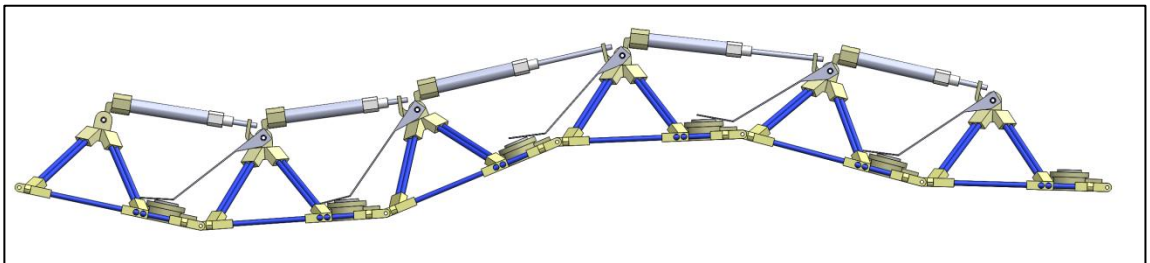


**Figura 3.4 Arreglo de dos módulos en posición neutra. Fuente: Elaboración propia.**

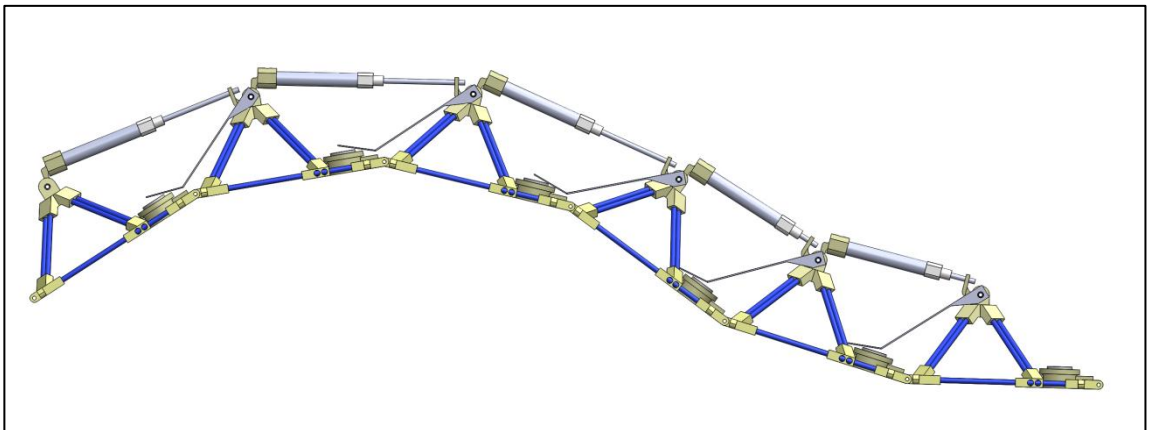
El sistema undimotriz lineal es la unión de varios módulos. Un sistema de seis módulos se ilustra en la Figura 3.5, este sistema se debe implementar con cinco electroimanes y cinco actuadores lineales, de esta forma se aprovecha la energía de cada articulación.



**Figura 3.5** Ensamble en una disposición lineal de seis módulos del sistema undimotriz. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 3.6** Sistema lineal describiendo un perfil de ola. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 3.7** Sistema lineal describiendo un perfil de ola crítica. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.7 se muestra un sistema lineal en condiciones de máxima expansión y compresión, esto quiere decir que la disposición que se muestra es la crítica ya que no puede deformarse más para aprovechar olas cuyo radio de curvatura es menor.

El sistema neumático consiste en ocho actuadores dispuestos de forma paralela, el esquema se presenta en la Figura 3.8. En esta ilustración las válvulas anti retorno permiten el flujo de aire solo en dirección a las flechas para poder acumular aire presurizado en el tanque de presión el cual está implementado con un manómetro.

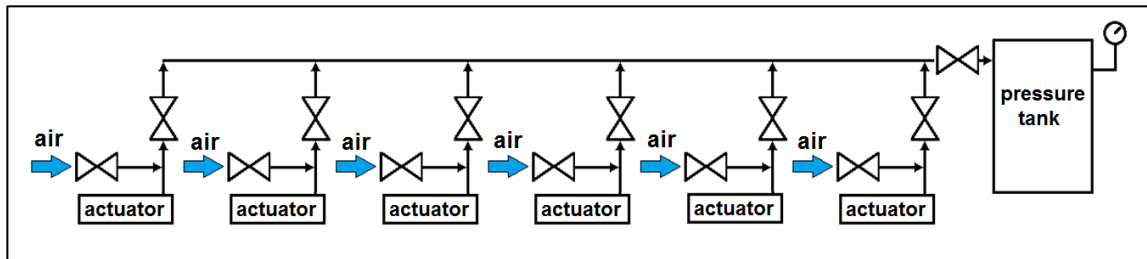


Figura 3.8 Esquema de sistema neumático del mecanismo undimotriz. Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.2. Generador de olas

También se diseñó el generador de olas en el mismo software el cual solo debía cumplir los requisitos geométricos del canal, que debía funcionar gracias a la rotación de un motor limpia parabrisas y la infraestructura que lo soportara debía ser de un material menos duro que el cristal del canal de agua para no rayarlo. Se eligió el acrílico para construir las partes dinámicas del generador de olas porque este material posee propiedades mecánicas suficientes para soportar las cargas ejercidas por el agua y el motor, este diseño se muestra en la Figura 3.9. Se eligió construir la estructura estática de soporte del generador de olas con tubos de pvc y uniones, la cual es fácil de dimensionar en función del espacio del canal por la facilidad de cortarlo. Finalmente se diseñó una oreja de pivote para la aleta, esta oreja se fija a la estructura estática, el conjunto de la oreja y de la estructura estática se ve en la Figura 3.17.

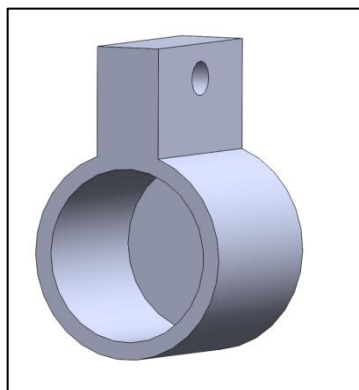


Figura 3.9 Oreja con agujero para pasador pivote de la aleta. Fuente: Elaboración propia.

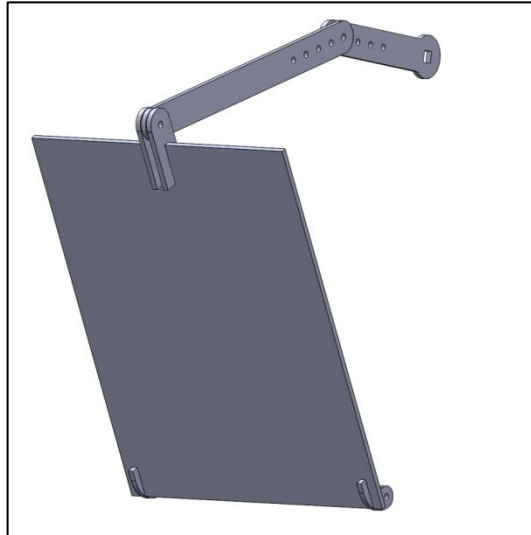


Figura 3.10 Diseño de los elementos dinámicos del generador de olas. Fuente: Elaboración propia.

### 3.3. Fabricación y obtención de piezas

Se fabricaron las piezas usando la impresora 3D Maker Bot Replicator 2. Se imprimieron piezas de las pirámides y se consiguieron elementos comerciales tales como válvulas, varillas, mangueras, taque de presión, imanes y uniones para mangueras. Finalmente se cortaron las varillas a la medida del diseño para fabricar las aristas del sistema.

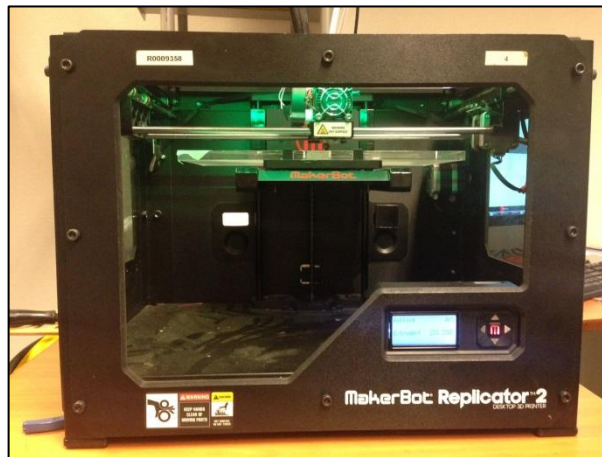


Figura 3.11 Impresora Maker Bot Replicator 2 en proceso de impresión. Fuente: Elaboración propia.

Las piezas para el conjunto dinámico del generador de olas se fabricaron en la cortadora láser utilizando una plancha de acrílico de 5 [mm], esto se ilustra en la Figura 3.12 y se

consiguió el motor limpia parabrisas. Se adquirieron los tubos de pvc en conjunto a las uniones para construir el conjunto estático del generador de olas.



Figura 3.12 Corte de plancha de acrílico para construir el generador de olas. Fuente: Elaboración propia.

## 3.4. Construcción

### 3.4.1. Sistema undimotriz

El proceso de construcción se realizó a medida que se terminaban de imprimir las piezas. Como se muestra en la Figura 3.13

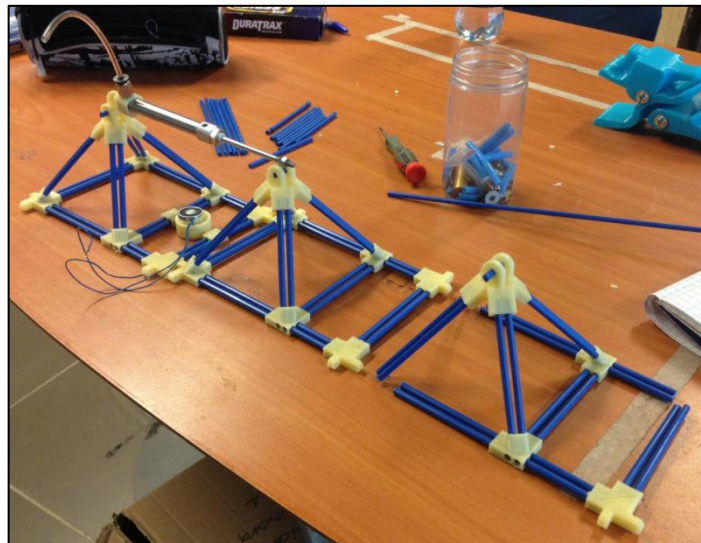
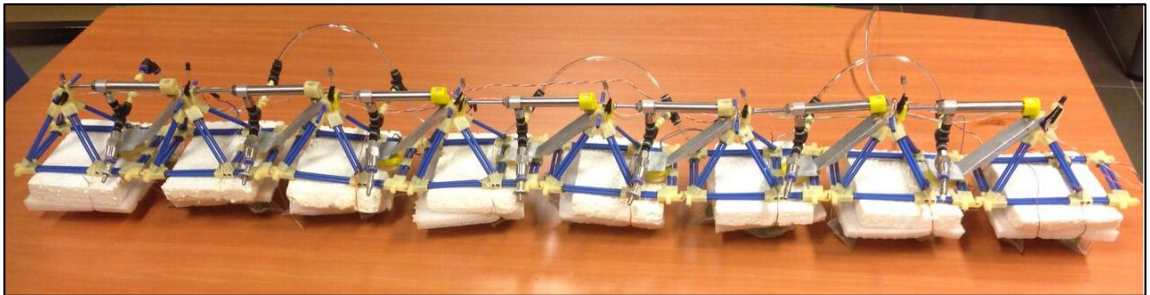


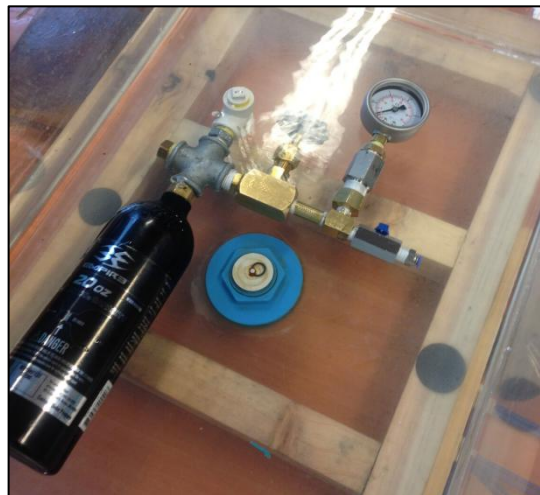
Figura 3.13 Módulos del sistema undimotriz en fase de construcción. Fuente: Elaboración propia.

El elemento de flotación seleccionado es el plumavit el cual se fijó bajo la base de las pirámides. Además del ensamble fue necesario añadir Poxipol a las uniones porque al someter el sistema a flexión o torsión, algunas uniones se salían. El sistema neumático se ubicó a un costado de sistema undimotriz para disminuir la inestabilidad de flotación del sistema la cual era mayor al situar la manguera en la parte superior. Otro medio para disminuir la inestabilidad fue la incorporación de pesos en el sistema los cuales fueron bolones, estos al hundirse bajan el centro de gravedad del sistema que flota en el agua.



**Figura 3.14** Prototipo undimotriz lineal de ocho módulos a pequeña escala. Fuente: Elaboración propia.

Fue muy importante montar el sistema neumático de tal manera de que las fugas fueran mínimas para lograr resultados con una mínima alteración. Las fugas eran detectadas al sumergir los cuerpos neumáticos en agua bajo presión y estas se eliminaron añadiendo teflón a las uniones que presentaban fugas.



**Figura 3.15** Prueba de fugas del tanque de presión en una fuente con agua. Fuente: Elaboración propia. u

### 3.4.2. Generador de olas

El movimiento del generador de olas se logra gracias a la acción del motor de limpiaparabrisas el cual es alimentado por la fuente de poder.



**Figura 3.16** Motor de limpiaparabrisas utilizado como motor de generados de olas. Fuente: Elaboración propia.

Se ensamblaron las piezas cortadas y se procedió a cortar y unir los pvc para la estructura de acuerdo a las dimensiones del canal de agua y de tal manera que el movimiento de los elementos dinámicos no sufra interferencias. Finalmente se monta el conjunto dinámico a la estructura estática del generador de olas.



**Figura 3.17** Conjunto motor limpiaparabrisas, estructura estática del generador de olas y orejas para el pasador de aleta. Fuente: Elaboración propia.



## **4. Estudio del sistema**

### **4.1. Estudio dinámico del sistema**

Para utilizar el canal primero se aprendió a ocupar el canal, luego se procedió a realizar el montaje de experimento:

#### **4.1.1. Procedimiento**

- Lo primero consiste en preparar el canal, esto es cerrar la compuerta de salida de agua para estancar el agua en el canal.
- Después se debe accionar la bomba de agua a cual se encarga de hacer circular el agua hacia el canal, una vez comienza el proceso de llenado hay que tener cuidado para que el nivel de agua se mantenga a una altura de 200 mm para realizar las pruebas en iguales condiciones, no se puede detener el flujo de agua ya que la compuerta no es hermética y existe una fuga considerable de agua.
- El la altura máxima de olas se determina por la altura de la compuerta y la altura mínima por el nivel del agua, es decir la cresta de la ola no puede superar la altura de la compuerta y análogamente el valle de la ola no puede ser menor a la profundidad de agua.
- Luego se ubica el generador de ola dentro de canal y se fija a presión contra las paredes del canal cuidando su alineación.
- El sistema undimotriz se coloca con cuidado sobre el agua de tal manera de evitar volcamientos y mojar dispositivos eléctricos instalados en el sistema lineal. Este se debió situar perpendicularmente al frente de las olas para lo cual se requirió amarrar el sistema para evitar su desplazamiento y rotación.
- Finalmente se instalan los artefactos electrónicos que permiten la captura de datos.



Figura 4.1 Montaje del Experimento en el Laboratorio de Fluidodinámica. Fuente: Elaboración propia.

### 4.1.2. Experimentos

El primer experimento consistió en analizar el comportamiento del canal al variar la frecuencia y la posición del generador de olas, se eligieron las potencias de operación del generador para las cuales este podía producir olas a escala según las condiciones reales de operación de un prototipo a escala de operación.

El prototipo a escala de referencia fue Nahuenrew y las condiciones de oleaje de referencia fueron las de naturaleza propia del mar las cuales corresponden a las olas de gado 2 y 3 de la escala Douglas. Se calculó un factor de escala el cual se determinó mediante la división del largo de un módulo de prototipo a pequeña escala (153 [mm]) por un módulo del Nahuenrew (879 [mm]). El valor de este factor  $f$  se muestra en la ecuación 2.1.

$$f = \frac{153}{880} \approx 0,174 \quad 2.1$$

La tabla de la escala Douglas de las olas corregida por el facto de escala  $f$  se muestra en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1 Clasificación de Douglas corregida por el factor de escala  $f$ .**

Grado	Altura de la ola (peak to peak) [mm]
0	0
1	0,00 a 1,74
2	1,74 a 87
3	87 a 217,5
4	217,5 a 435
5	435 a 696
6	696 a 1044
7	1044 a 1566
8	1566 a 2436
9	más de 2436

Fuente: Tabla modificada de [14].

La posición para fijar el generador de olas se determinó según la calidad de las olas que se podían generar para varios voltajes de alimentación ya que en ciertas posiciones ocurrían interferencias de oleaje para varios voltajes lo cual disminuye el número de frecuencias de olas para el estudio.

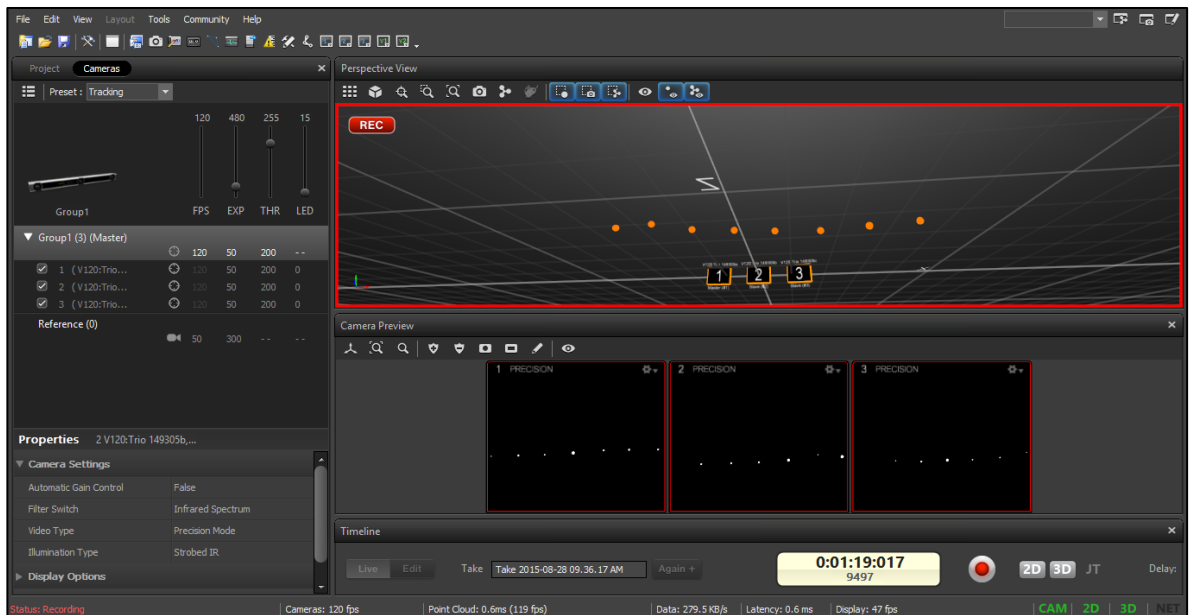
Las potencias de operación del generador de olas se determinaron según la capacidad del motor limpiaparabrisas y de la calidad de las olas que se podían generar para ciertos voltajes.

Se calculó la frecuencia de las olas según el voltaje de alimentación del generador de olas, esto se detalla en la Tabla 4.2. Los resultados arrojan que las condiciones de oleaje para los cuales se estudia este experimento pertenecen al rango entre el grado 2 y grado 3 de la escala Douglas.

**Tabla 4.2 Frecuencia y altura de las olas según voltaje de alimentación del generador de olas.**

Voltaje [V]	Frecuencia [Hz]	Altura de ola [mm]
17	1,1921	86
16	0,9934	93
15	1,1881	78
14	0,8911	45
13	0,8911	32
12	0,7463	18

La obtención de datos se realizó mediante el uso del programa Motive el cual es el software con el que opera la cámara OptiTrack. En la Figura 4.2 se muestra la interfaz del software motive en el momento de grabar datos. Una vez determinado el lugar donde fijar el generador se procedió a ubicar el OptiTrack y el sistema undimotriz de tal forma que los marcadores apunten hacia las cámaras y no desaparezcan para el programa al ondear el agua.



**Figura 4.2 Software Motive para la captura de series de tiempo de marcadores infrarrojos. Fuente: Elaboración propia.**

Se hicieron pruebas del sistema a distintas frecuencias por 10 minutos y se grabaron series de tiempo con la información del movimiento del mecanismo para estudiarlas posteriormente. Paralelamente se anotaron las presiones acumuladas cada dos minutos en cada prueba para evaluar de forma real la presión acumulada.

Del análisis del movimiento del sistema libre, se seleccionaron cinco configuraciones de bloqueo y se realizaron las pruebas para cada uno de ellos. La selección de los bloqueos se hizo de forma cualitativa viendo que actuadores eran los que más se desplazaban y cuales describían un recorrido menor, la idea fue bloquear los actuadores que poseían la menor carrera.

Los actuadores y los módulos se enumeraron de izquierda a derecha como se muestra en la Figura 3.7.

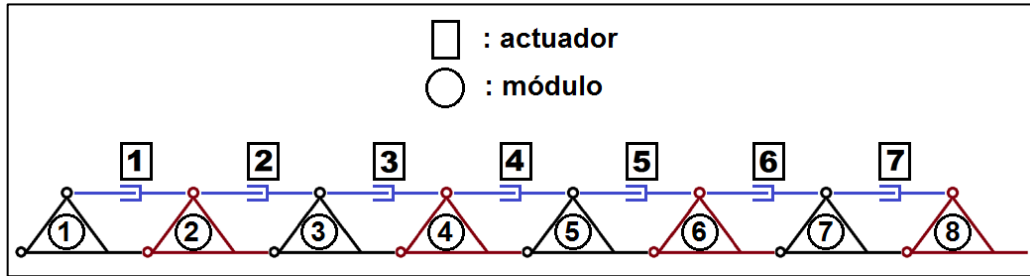


Figura 4.3 Esquema de notación de los actuadores.

La notación de cada configuración de bloqueo se denota por el número de los actuadores articulados respectivamente contándolos en orden de izquierda a derecha lo cual se detalla en la Tabla 4.3 y la simbología se explica en la Figura 4.4.

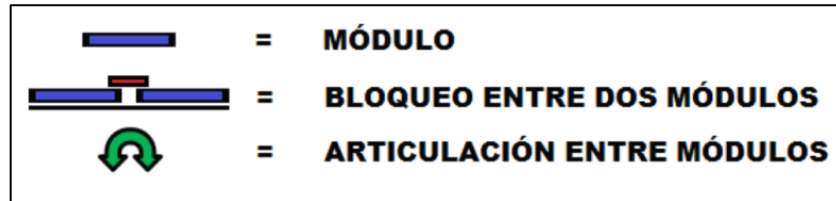


Figura 4.4 Explicación de la simbología de la tabla 4.3. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.3 Diagramas de las configuraciones de bloqueo.

Configuración de bloqueo	Diagrama
Sin Bloqueo (SB)	
246	
25	
35	
36	
4	

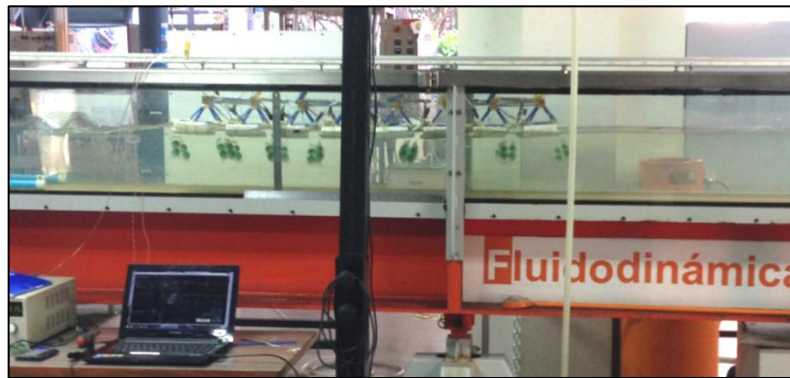
Fuente: Elaboración propia.

En la Figuras 4.5 a la 4.10 se muestra el sistema con una configuración de bloqueo 4 sometido a oleajes de 12V a 17V. Las longitudes de ola asociadas a cada voltaje da alimentación del generador de olas se muestra en la Tabla 4.4.

**Tabla 4.4 Longitudes de olas según voltaje de alimentación del generador de olas.**

Voltaje [V]	Longitud de ola [mm]
12	No se aprecia onda continua
13	1604
14	1604
15	1244
16	1206
17	1121

**Fuente: Elaboración propia.**



**Figura 4.5 Imagen de prueba de sistema con una configuración de bloqueo 4 a 12V, lo que equivale a una condición de oleaje de 1,1921 [Hz], una altura de ola de 18 [mm] y una longitud de ola no apreciable. Fuente: Elaboración propia.**

En la Figura 4.5 el sistema está asociado a una frecuencia de oleaje de 1,1921 [Hz] el cual se determinó calculando la frecuencia del generador de olas ya el programa no apreciaba claramente la frecuencia del sistema, al tratarse de una perturbación tan pequeña se confundía con los ruidos de la medición.

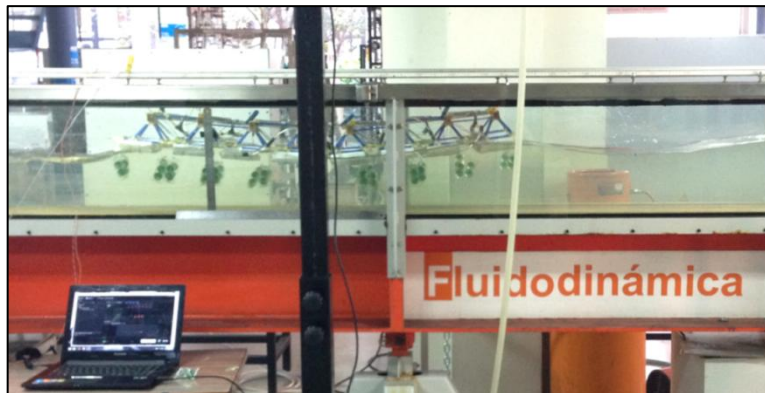
El oleaje comienza a tomar forma al alimentar el generador de olas con voltajes mayores a 12V lo cual se aprecia desde la Figura 4.6 a la Figura 4.10. También se muestra que a los 16V se producen las olas de mayor altura.



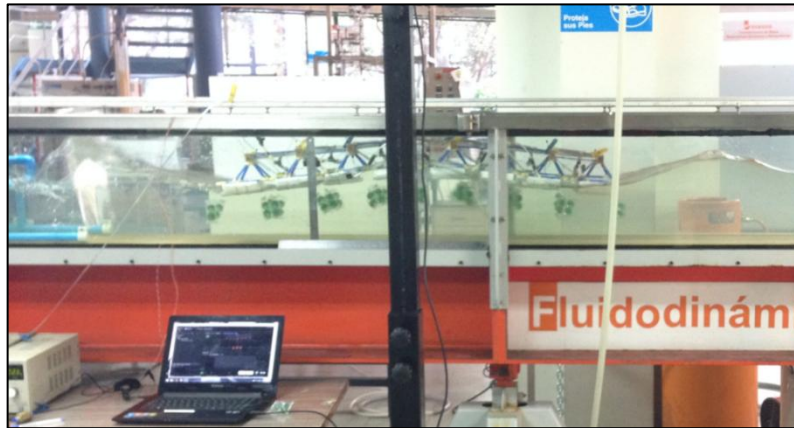
**Figura 4.6** Imagen de prueba de sistema con una configuración de bloqueo 4 a 13V, lo que equivale a una condición de oleaje de 0,8911 [Hz], una altura de ola de 32 [mm] y una longitud de ola de 1604 [mm]. Fuente: Elaboración propia.



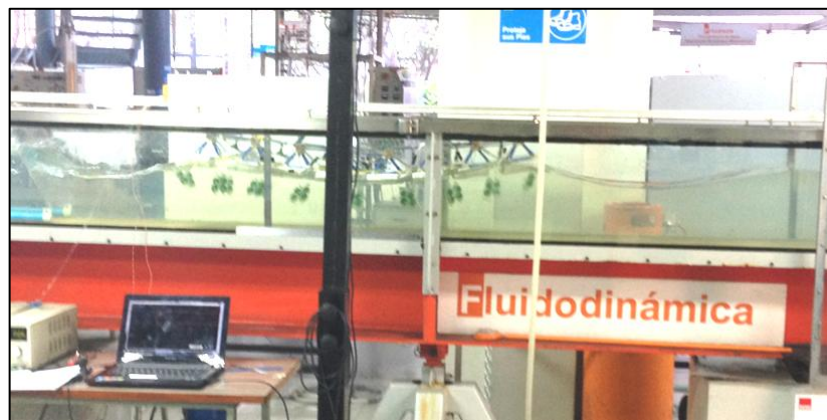
**Figura 4.7** Imagen de prueba de sistema con una configuración de bloqueo 4 a 14V, lo que equivale a una condición de oleaje de 0,8911 [Hz], una altura de ola de 45 [mm] y una longitud de ola de 1604 [mm]. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 4.8** Imagen de prueba de sistema con una configuración de bloqueo 4 a 15V, lo que equivale a una condición de oleaje de 1,1881 [Hz], una altura de ola de 78 [mm] y una longitud de ola de 1244 [mm]. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 4.9** Imagen de prueba de sistema con una configuración de bloqueo 4 a 16V, lo que equivale a una condición de oleaje de 0,9934 [Hz], una altura de ola de 93 [mm] y una longitud de ola de 1206 [mm]. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 4.10** Imagen de prueba de sistema con una configuración de bloqueo 4 a 17V, lo que equivale a una condición de oleaje de 1,1921 [Hz], una altura de ola de 86 [mm] y una longitud de ola de 1121 [mm]. Fuente: Elaboración propia.

## **4.2. Automatización del sistema**

Una vez hecho los ensayos con las distintas configuraciones de bloqueo se calcularon nuevamente las carreras de cada una de estas configuraciones. Se logró determinar los bloqueos que maximizan las carreras para aumentar la obtención energética.

La idea de la automatización es generar automáticamente el bloqueo que obtuvo la mayor carrera entre todas las configuraciones de bloqueo.

En Arduino se programó un código para activar los imanes para causar el bloqueo de algunos actuadores del sistema al presionar una tecla, este código se detalla en la sección



de Códigos en Anexos. El diagrama de conexión de los elementos electrónicos se muestra en la Figura 4.11.

De Python se importan los datos en tiempo real que se capturan con el programa Motive y son procesados para detectar la frecuencia de oscilación del sistema, finalmente según la frecuencia que detecte el programa de Python se le ordena al Arduino activar los bloqueos pertinentes para maximizar la carrera de los actuadores, el código encargado de esta operación se detalla en la sección de Códigos en Anexos.

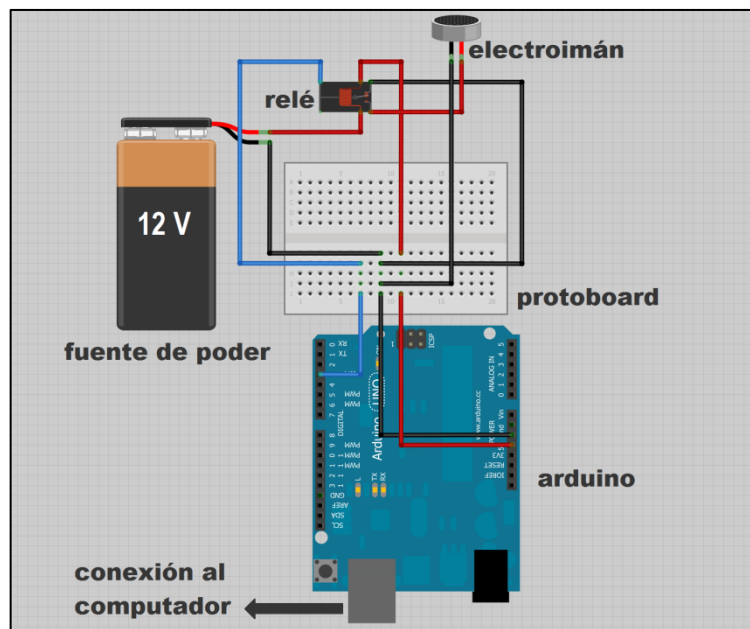


Figura 4.11 Esquema de conexión de los elementos electrónicos para realizar el bloqueo automático. Fuente: Elaboración propia.

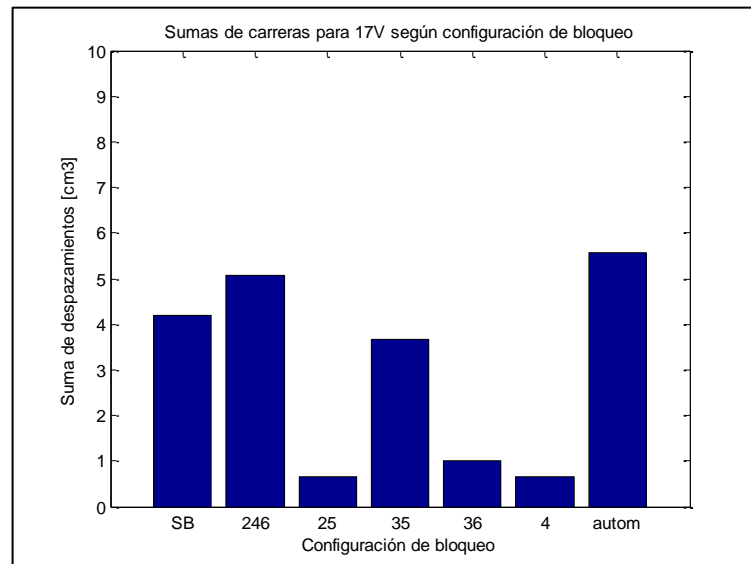
### 4.3. Estudio dinámico del sistema automatizado

En esta etapa se capturó el comportamiento de sistema implementado con el controlador detallado en la sección 4.2, las pruebas consistieron en probar el mecanismo al ser sometido a un oleaje controlado manualmente. Este control manual consistió en variar la potencia de alimentación de generador de olas mientras funcionaba paralelamente el controlador. Se grabaron los datos y se calculó nuevamente el desempeño del mecanismo el cual fue comparado con el resto de las configuraciones de bloqueo.

## 5. Resultados

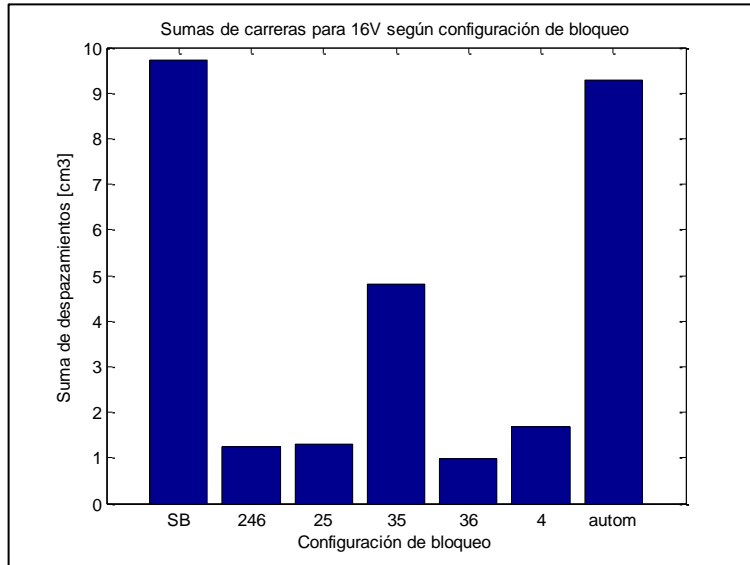
Con los datos de las elongaciones en el tiempo capturados por el sensor de movimiento se calculó la elongación promedio de cada uno de los actuadores para cada combinación de configuración de bloqueo y de voltaje, estos datos se muestran en la sección de Resultados en Anexos. Finalmente conociendo las elongaciones promedio de cada actuador para cada configuración se calcularon las carreras totales del sistema lo cual permitió comparar que configuración de bloqueo permite extraer mayor energía para cada frecuencia de oleaje.

Además de las configuraciones de bloqueo descritas en la Tabla 4.3, se añadió la configuración de bloqueo automatizada la cual se le denominó autom y corresponde a la activación automática del bloqueo que maximiza la suma de todas las carreras de los actuadores.



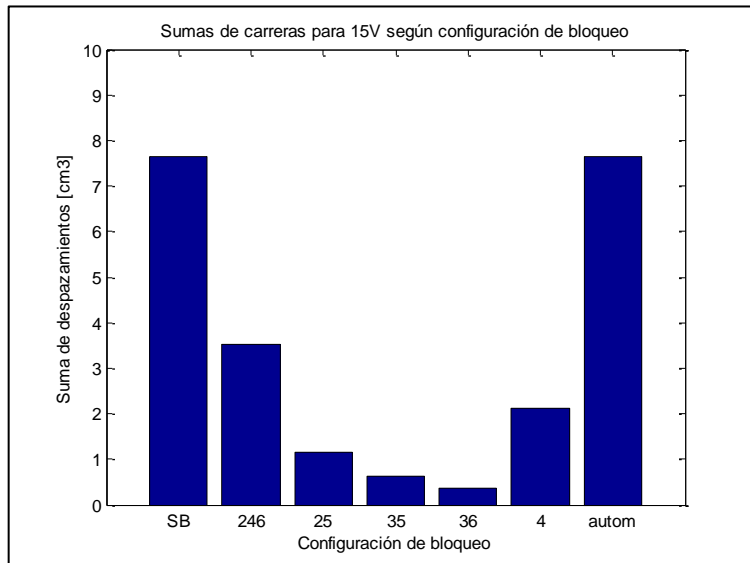
**Figura 5.1** Suma de las carreras de todos los actuadores de cada configuración de bloqueo para un oleaje originado al alimentar el generador de olas con 17[V], lo que equivale a una condición de oleaje de 1,1921 [Hz] y una amplitud de ola de 8,6 [cm]. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5.1 se muestra la suma de las carreras promedio de todos los actuadores sometidos a una condición de oleaje de 17 [V] para cada configuración de bloqueo. Esta sumatoria es mayor en la configuración de bloqueo 246.



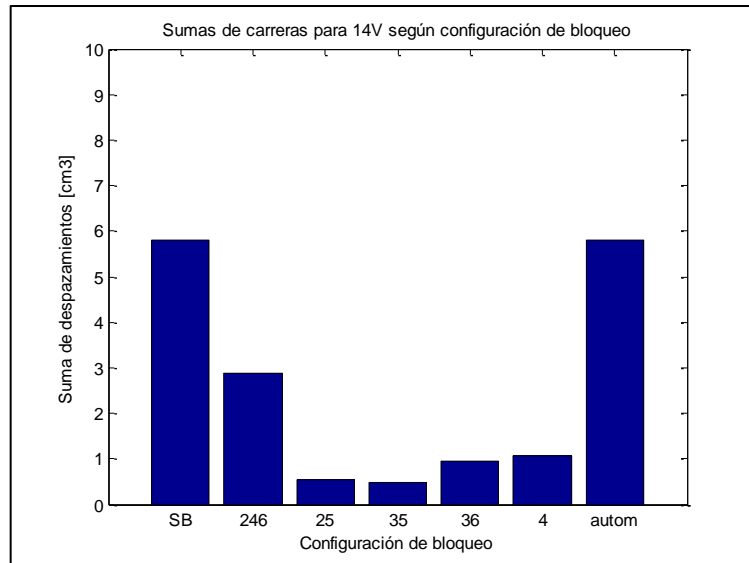
**Figura 5.2** Suma de las carreras de todos los actuadores de cada configuración de bloqueo para un oleaje originado al alimentar el generador de olas con 16[V], lo que equivale a una condición de oleaje de 0,9934 [Hz] y una amplitud de ola de 9,3 [cm]. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5.2 se muestra la suma de las carreras promedio de todos los actuadores sometidos a una condición de oleaje de 16 [V] para cada configuración de bloqueo. Esta sumatoria es mayor en la configuración de bloqueo SB.



**Figura 5.3** Suma de las carreras de todos los actuadores de cada configuración de bloqueo para un oleaje originado al alimentar el generador de olas con 15[V], lo que equivale a una condición de oleaje de 1,1881 [Hz] y una amplitud de ola de 7,8 [cm]. Fuente: Elaboración propia.

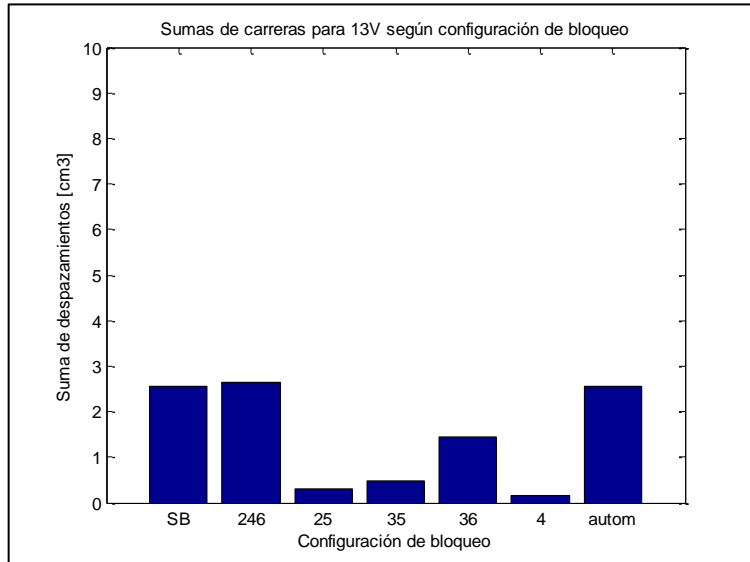
En la Figura 5.3 se muestra la suma de las carreras promedio de todos los actuadores sometidos a una condición de oleaje de 15 [V] para cada configuración de bloqueo. Esta sumatoria es mayor en la configuración de bloqueo SB.



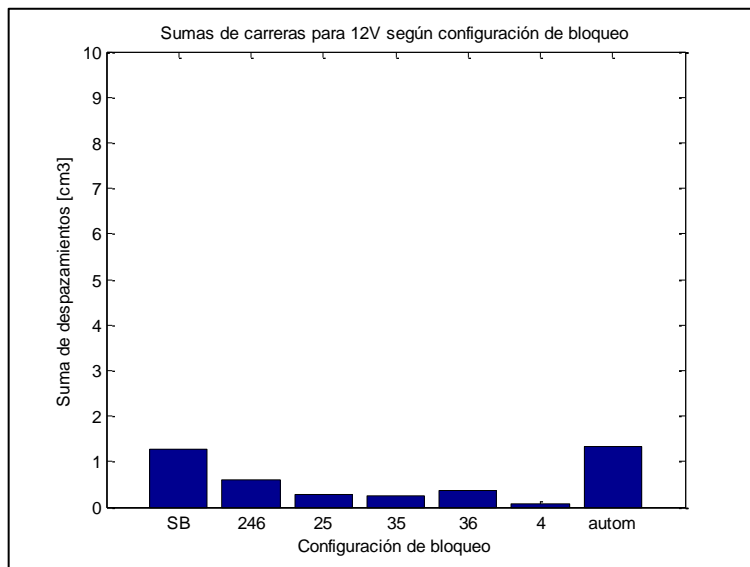
**Figura 5.4 Suma de las carreras de todos los actuadores de cada configuración de bloqueo para un oleaje originado al alimentar el generador de olas con 14[V], lo que equivale a una condición de oleaje de 0,8911 [Hz] y una amplitud de ola de 4,5 [cm]. Fuente: Elaboración propia.**

En la Figura 5.4 se muestra la suma de las carreras promedio de todos los actuadores sometidos a una condición de oleaje de 14 [V] para cada configuración de bloqueo. Esta sumatoria es mayor en la configuración de bloqueo SB.

En la Figura 5.5 se muestra la suma de las carreras promedio de todos los actuadores sometidos a una condición de oleaje de 13 [V] para cada configuración de bloqueo. Esta sumatoria es mayor en la configuración de bloqueo 246.



**Figura 5.5** Suma de las carreras de todos los actuadores de cada configuración de bloqueo para un oleaje originado al alimentar el generador de olas con 13[V], lo que equivale a una condición de oleaje de 0,8911 [Hz] y una amplitud de ola de 3,2 [cm]. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5.6** Suma de las carreras de todos los actuadores de cada configuración de bloqueo para un oleaje originado al alimentar el generador de olas con 12[V], lo que equivale a una condición de oleaje de 0,7436 [Hz] y una amplitud de ola de 1,8 [cm]. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5.6 se muestra la suma de las carreras promedio de todos los actuadores sometidos a una condición de oleaje de 12 [V] para cada configuración de bloqueo. Esta sumatoria es mayor en la configuración de bloqueo SB.

También se obtuvieron las presiones acumuladas para cada voltaje según configuración de bloqueo.

**Tabla 5.1 Presiones acumuladas por el sistema sin bloqueos durante los primeros 10 minutos de pruebas para cada voltaje.**

<b>Bloqueo</b>	<b>Voltaje [V]</b>					
<b>SB</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>
<b>t [min]</b>	<b>Presión [psi]</b>					
<b>2</b>	0	0	0	0	2,0	0
<b>4</b>	0	0	0	0	3,5	1,5
<b>6</b>	0	0	1,5	1,5	3,5	2,0
<b>8</b>	0	0	2,0	2,0	4,5	2,0
<b>10</b>	0	1,5	2,0	2,0	4,5	2,5

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 5.1 se muestran las presiones acumuladas con cada condición de oleaje para la configuración de bloqueo SB durante los primeros 10 minutos. Se aprecia que se logró acumular la mayor cantidad de presión en la condición de oleaje de 16V.

**Tabla 5.2 Presiones acumuladas por el sistema con configuración de bloqueo 246 durante los primeros 10 minutos de pruebas para cada voltaje.**

<b>Bloqueo</b>	<b>Voltaje [V]</b>					
<b>246</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>
<b>t [min]</b>	<b>Presión [psi]</b>					
<b>2</b>	0	0	0	0	0	2,0
<b>4</b>	0	0	0	0	0	3,5
<b>6</b>	0	0	0	1,5	0	3,5
<b>8</b>	0	0	1,5	1,5	0	4,5
<b>10</b>	0	1,5	1,5	1,5	1,5	4,5

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 5.2 se muestran las presiones acumuladas con cada condición de oleaje para la configuración de bloqueo 246 durante los primeros 10 minutos. Se aprecia que se logró acumular la mayor cantidad de presión en la condición de oleaje de 17V.

**Tabla 5.3 Presiones acumuladas por el sistema con configuración de bloqueo 25 durante los primeros 10 minutos de pruebas para cada voltaje.**

Bloqueo	Voltaje [V]					
	12	13	14	15	16	17
25						
t [min]	Presión [psi]					
2	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	1,5	1,5

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 5.3 se muestran las presiones acumuladas con cada condición de oleaje para la configuración de bloqueo 25 durante los primeros 10 minutos. Se aprecia que se logró acumular la mayor cantidad de presión en la condición de oleaje de 16V y 17V.

**Tabla 5.4 Presiones acumuladas por el sistema con configuración de bloqueo 35 durante los primeros 10 minutos de pruebas para cada voltaje.**

Bloqueo	Voltaje [V]					
	12	13	14	15	16	17
35						
t [min]	Presión [psi]					
2	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1,5	1,5
6	0	0	0	0	2,0	2,0
8	0	0	0	0	2,0	2,0
10	0	0	0	0	2,5	2,5

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 5.4 se muestran las presiones acumuladas con cada condición de oleaje para la configuración de bloqueo 35 durante los primeros 10 minutos. Se aprecia que se logró acumular la mayor cantidad de presión en la condición de oleaje de 16V y 17V.

**Tabla 5.5 Presiones acumuladas por el sistema con configuración de bloqueo 36 durante los primeros 10 minutos de pruebas para cada voltaje.**

Bloqueo	Voltaje [V]					
	12	13	14	15	16	17
36						
t [min]	Presión [psi]					
2	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	1,5	0
10	0	0	0	0	1,5	1,5

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 5.5 se muestran las presiones acumuladas con cada condición de oleaje para la configuración de bloqueo 36 durante los primeros 10 minutos. Se aprecia que se logró acumular la mayor cantidad de presión en la condición de oleaje de 16V y 17V.

**Tabla 5.6 Presiones acumuladas por el sistema con configuración de bloqueo 4 durante los primeros 10 minutos de pruebas para cada voltaje.**

Bloqueo	Voltaje [V]					
	12	13	14	15	16	17
4						
t [min]	Presión [psi]					
2	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
10	0	0	1,5	1,5	1,5	0

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 5.6 se muestran las presiones acumuladas con cada condición de oleaje para la configuración de bloqueo 4 durante los primeros 10 minutos. Se aprecia que se logró acumular la mayor cantidad de presión en la condición de oleaje de 15V, 16V y 17V.



**Tabla 5.7 Presiones acumuladas por el sistema con configuración de bloqueo automático durante los primeros 10 minutos de pruebas para cada voltaje.**

Bloqueo	Voltaje [V]					
	12	13	14	15	16	17
autom						
t [min]	Presión [psi]					
2	0	0	0	0	1,5	0
4	0	0	0	0	2,5	1,5
6	0	0	1,5	1,5	3,5	1,5
8	0	0	1,5	1,5	3,5	2,0
10	0	0	1,5	1,5	4,0	2,0

Fuente: Elaboración propia.

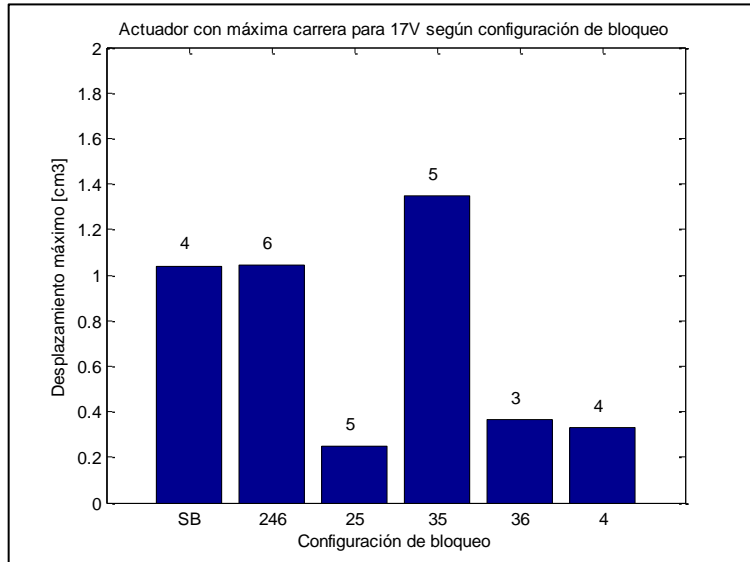
En la Tabla 5.7 se muestran las presiones acumuladas con cada condición de oleaje para la configuración de bloqueo automático durante los primeros 10 minutos. Se aprecia que se logró acumular la mayor cantidad de presión en la condición de oleaje de 16V.

**Tabla 5.8 Actuadores que poseen mayor carrera para cada configuración de bloqueo y condición de oleaje.**

Bloqueo	voltaje				
	17V	16V	15V	14V	13V
Actuador					
SB	4	2	1	4	2
246	6	4	6	4	6
25	5	5	5	5	2
35	5	5	3	5	5
36	3	6	6	3	6
4	4	4	4	4	4

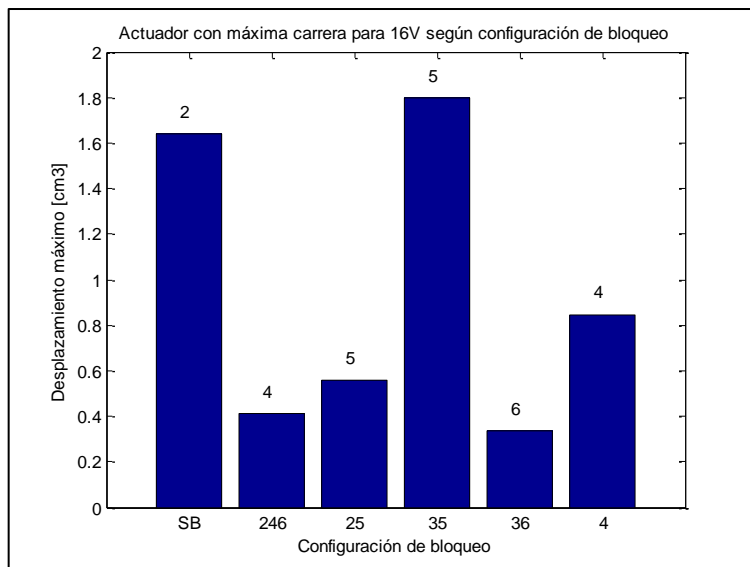
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 5.8 se denotan los actuadores que, poseen la mayor carrera para una condición de oleaje y configuración de bloqueo.



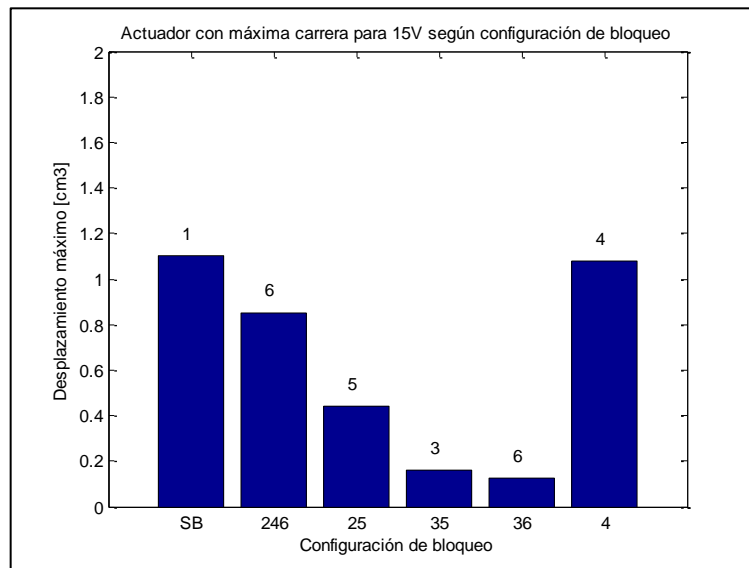
**Figura 5.7** Actuador de máxima carrera para cada configuración de bloqueo a 17V, lo que equivale a una condición de oleaje de 1,1921 [Hz] y una amplitud de ola de 8,6 [cm]. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.8 se comparan los actuadores que describen la mayor carrera para cada configuración de bloqueo a 17V. Esta comparación muestra que el actuador 5 de la configuración de bloqueo 35 posee mayor recorrido que el resto de los actuadores para el resto de las configuraciones de bloqueo a 17V.



**Figura 5.8** Actuador de máxima carrera para cada configuración de bloqueo a 16V, lo que equivale a una condición de oleaje de 0,9934 [Hz] y una amplitud de ola de 9,3 [cm] . Fuente: Elaboración propia.

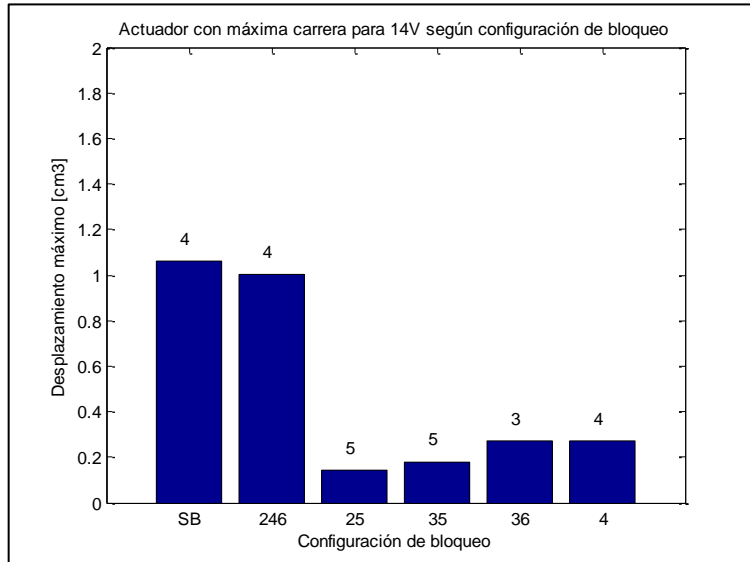
En la Figura 3.9 se comparan los actuadores que describen la mayor carrera para cada configuración de bloqueo a 16V. Esta comparación muestra que el actuador 56 de la configuración de bloqueo 35 posee mayor recorrido que el resto de los actuadores para el resto de las configuraciones de bloqueo a 16V.



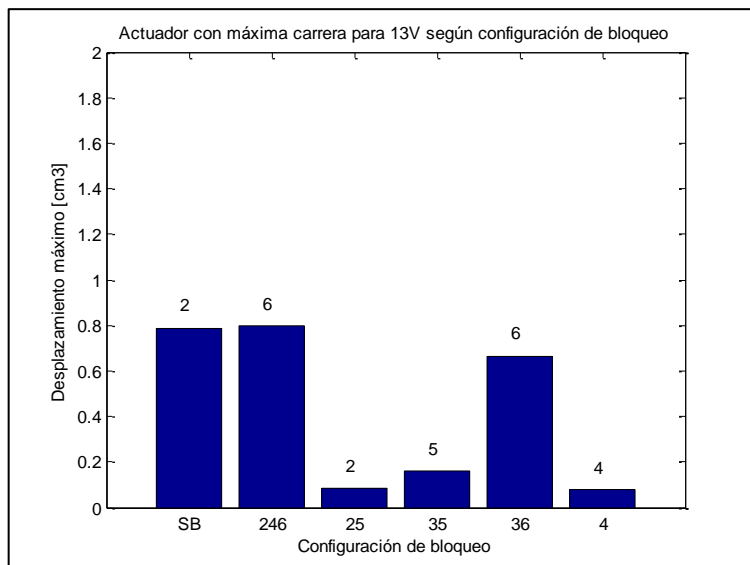
**Figura 5.9 Actuador de máxima carrera para cada configuración de bloqueo a 15V, lo que equivale a una condición de oleaje de 1,1881 [Hz] y una amplitud de ola de 7,8 [cm]. Fuente: Elaboración propia.**

En la Figura 3.10 se comparan los actuadores que describen la mayor carrera para cada configuración de bloqueo a 15V. Esta comparación muestra que el actuador 12 de la configuración de bloqueo SB posee mayor recorrido que el resto de los actuadores para el resto de las configuraciones de bloqueo a 15V.

En la Figura 3.11 se comparan los actuadores que describen la mayor carrera para cada configuración de bloqueo a 14V. Esta comparación muestra que el actuador 45 de la configuración de bloqueo SB posee mayor recorrido que el resto de los actuadores para el resto de las configuraciones de bloqueo a 14V.



**Figura 5.10 Actuador de máxima carrera para cada configuración de bloqueo a 14V, lo que equivale a una condición de oleaje de 0,8911 [Hz] y una amplitud de ola de 4,5 [cm] . Fuente: Elaboración propia.**



**Figura 5.11 Actuador de máxima carrera para cada configuración de bloqueo a 13V. Fuente: Elaboración propia.**

En la Figura 3.12 se comparan los actuadores que describen la mayor carrera para cada configuración de bloqueo a 13V. Esta comparación muestra que el actuador 67 de la configuración de bloqueo 246 posee mayor recorrido que el resto de los actuadores para el resto de las configuraciones de bloqueo a 13V.

## **6. Discusión y Conclusiones**

### **6.1. Diseño y Construcción**

Las pirámides se diseñaron de baja altura y con una base amplia para aumentar la estabilidad de flotación del sistema el cual pudo haberse volcado al ser excitado por el oleaje. Y el principal factor que determinó las dimensiones de estas pirámides fue el tamaño de los actuadores.

El conjunto neumático se dispuso asimétricamente en el mecanismo undimotriz desplazando un poco el centro de masa del eje de simetría del sistema. Otra asimetría causada por el sistema neumático es la función de anclaje que cumplió el tanque de presión para evitar que esta salga del rango de captura del OptiTrack. La fuerza a realizaba la manguera neumática que al estar fuera del eje de simetría del sistema ejercía torsión en el mecanismo.

Se trabajó con piezas de pequeña escala se perdió precisión al fabricarlas digitalmente, esto ocasionó pérdida de holguras y superficies rugosas que aportaron con pérdidas.

Los elementos comerciales como mangueras y uniones no son suficientemente firmes como para evitar que al sistema se le generen fugas de aire y no se pueden utilizar elementos de mejor calidad porque están diseñados para operar en rangos de alta presión.

### **6.2. Pruebas y análisis de datos**

Es conveniente realizar las pruebas con un generador de olas móvil ya que al modificar la distancia entre el generador de ola y la compuerta cambian los modos de vibración del agua del canal. La idea de esto es evitar la interferencia de las olas lo que puede traducirse en la generación de olas pequeñas o de la creación de un oleaje no útil para el estudio. En los ensayos, el canal entró en resonancia para olas generadas con 16 [V], lo cual generó olas de gran tamaño en comparación a otros voltajes de operación y el generador de olas disminuyó su frecuencia de giro porque la fuerza necesaria para mover la aleta con olas de mayor altura es superior.

No se pudo escalar a las condiciones de oleaje del sistema Nahuenrew el cual opera en aguas profundas, como se explicó anteriormente en aguas profundas la relación entre la profundidad del mar y el largo de la ola cumple que  $h/L > 1/2$ , En el canal se estaba

lejos de poder cumplir esta condición ya que la altura máxima del nivel de agua de canal es de 20 [cm] que comparado con las olas de menor longitud (las generadas por un voltaje de 17V) poseen un largo de ola de 112 [cm], calculando a relación  $\frac{h}{L} = \frac{20}{112} < \frac{1}{5} < \frac{1}{2}$  lo cual es claramente una condición de agua intermedia y el movimiento general que describen las partículas es elipsoidal.

El sistema neumático ancló el sistema undimotriz gracias a peso del tanque de presión, así se evitó que esta salga del rango de captura del OptiTrack. La fuerza a realizaba la manguera neumática que al estar fuera del eje de simetría del sistema ejercía torsión en el mecanismo alternado la alineación del mecanismo.

Las frecuencias de oscilación de las olas para los voltajes de 13[V] y 14[V] son muy similares y el programa no alcanza a diferenciar las frecuencias de ambas condiciones de oleaje y las aproxima a la misma frecuencia. Esto ocurre porque la transformada de Fourier discreta define el dominio de las frecuencias como múltiplos de la frecuencia fundamental  $\frac{2\pi}{N}$ . Debido a esta razón para maximizar la velocidad de captura de presión se decidió solo realizar el bloqueo para el voltaje de 17 [V] porque la ganancia por causar el bloqueo en los 13 [V] es mucho menor que la pérdida que se puede causar si se bloquea el sistema a los 14 [V].

El voltaje de 12 V no alcanzaba a generar un oleaje aprovechable porque se generaron ondas aisladas de muy poca amplitud, o sea, no ocasiona una oscilación apreciable en el sistema impidiendo realizar un estudio comparable con el resto de los casos.

No se pudo aprovechar completamente el recurso de los actuadores de doble efecto porque implementar un sistema neumático que aproveche ambos efectos es muy invasivo y ocasionaba el volcamiento del mecanismo. Este problema se puede evitar al construir un prototipo a escala del Nahuenrew donde el peso y la rigidez de las mangueras no alteran de forma significativa las características dinámicas del sistema.

El bloqueo automático tuvo una respuesta exitosa al someter el sistema a diversas condiciones de oleaje. Lamentablemente el generador de ola solo lograba modificar la velocidad del movimiento de la aleta sin la posibilidad de independizar la amplitud y la frecuencia de la ola. En otras palabras el estudio riguroso de un mecanismo undimotriz requiere de un generador de olas más avanzado, el cual pueda generar olas con las características que se requieran, o sea, olas que puedan variar su altura para una frecuencia constante o vice versa.

Para los 17V el sistema con bloqueo automático tuvo una mejor respuesta que el sistema con bloqueo manual. La diferencia entre estos experimentos fue la rigidez del bloqueo, para estas olas cuya energía es elevada, los electroimanes no fueron capaces de restringir a la perfección el movimiento de las articulaciones del sistema. De lo anterior se entiende que el bloqueo de los módulos cambia el modo de vibración del sistema, pero este al ser un cuerpo no elástico no puede adaptarse bien a la superficie oscilante del agua a cual se estira al aumentar la amplitud de la ola.

Al variar el voltaje del generador de olas, el oleaje sufría una perturbación irregular que causaba un desorden en la frecuencia de oscilación del sistema undimotriz, causando que la automatización generara el bloqueo automático en función de esta frecuencia que coincide con la frecuencia asociada a otro bloqueo. Sin embargo la orden del bloqueo se ejecuta cada 4 segundos y se demora otros 3 segundos en procesar, lo anterior implica que pueden pasar 7 segundos en el que el sistema no posee un bloqueo óptimo.

Las configuraciones de bloqueo que maximizaron las carreras de sistema completo fueron aquellas de características simétricas. Una explicación de esto es el número de módulos del sistema el cual es dividido exactamente por el bloqueo 246 pudiendo adaptarse a las olas las cuales también tienen características simétricas. Esta observación deja la interrogante sobre lo que pasaría si el número de módulos del sistema varía.

Originalmente se pensó en la posibilidad de una configuración de bloqueo más irregular donde en el caso crítico era independizar el controlador de todos los bloqueos. Se estima que este caso puede ocurrir en el caso de tener otro número de módulos. La solución a esto es implementar una conexión en paralelo de todos los sistemas de bloqueo a la fuente de potencia y colocar un relé en serie antes de cada sistema de bloqueo el cual es controlado por un Arduino, El programa tiene que activar los relés correspondientes según la frecuencia detectada del sistema.

Las presiones acumuladas en el tanque según configuración de bloqueo y de voltaje fueron coherentes con las carreras calculadas de los actuadores en la etapa de bloqueo manual. Sin embargo para lograr esto se debió cuidar rigurosamente en cada prueba las pérdidas por fugas las cuales se generan con el movimiento constante del cuerpo flotante.

Las presiones capturadas por el sistema implementado con el bloqueo automático no pudo recolectar la misma cantidad de presión que las capturadas por su equivalente de bloqueo manual. Una de las razones es el deterioro del sistema a estar sometido al agua y al constante movimiento, pues el lapso entre las pruebas manuales y la automatizada fue de tres semanas. Además el bloqueo al no ser perfecto permite una pequeña

compresión o expansión de los actuadores bloqueados, este pequeño movimiento causa una apertura y cierre de las válvulas conectadas a los actuadores cuyas carreras están dificultadas por la fuerza magnética y por lo tanto no son lo suficientemente largas como para ayudar a acumular presión, si no que por el contrario, la válvula se transforma en una fuga del sistema. Para solucionar este problema es recomendable utilizar válvulas de mejor calidad las cuales podrían aprovechar esta pequeña carrera para acumular energía, o que el bloqueo involucre el cierre de las válvulas conectadas a los actuadores bloqueados eliminando el problema de raíz.

El mecanismo de bloqueo para maximizar la potencia solo sirve para una condición de oleaje correspondiente a los 16V y no es eficiente en las otras condiciones estudiadas. Las olas generadas no poseían la longitud ni la altura suficiente para lograr adaptar el sistema a otros modos de vibración.

El mecanismo de bloqueo para maximizar la capacidad energética resulta exitoso ya que al realizar la configuración de bloqueo 35 para un voltaje de 17V y 16V, maximiza la carrera del actuador 5. Este actuador al poseer mayor carrera tiene una mayor capacidad de compresión, se estima que al generar un bloqueo la fuerza que causa la compresión del actuador aumenta proporcionalmente al empuje, si la articulación se genera entre un conjunto de tres módulos y otro conjunto de dos módulos, el empuje que limita la fuerza de compresión del actuador es el de dos módulos.

Si comparamos este conjunto de dos módulos con un módulo simple, por bloqueado aporta el doble de empuje hacia el actuador y el doble de torque lo cual cuadruplica la fuerza en el actuador lo cual explica por qué aumenta la carrera. Si asumimos el caso en que la máxima presión acumulada por el sistema libre fue de 4,5 [psi] a los 16V y se cumple la relación directa de presión y fuerza cuando el área donde se ejerce es constante, entonces el sistema con la configuración de bloqueo 35 puede cuadruplicar la presión acumulada para la misma condición de oleaje llegando a los 18 [psi]. Y análogamente si se pudo acumular 2,5 [psi] a los 17V, entonces la configuración de bloqueo 35 puede acumular 10 [psi].

Si se logra diseñar un mecanismo undimotriz con ausencia de fugas, este acumulará presión hasta llegar a un punto en el que el sistema comienza a rigidizarse debido a la presión acumulada en el sistema neumático, que evita el paso del aire hacia el tanque. Este caso es una aplicación directa de la razón para la cual conviene aumentar la obtención energética cuando la obtención de potencia llega a su límite.



### **6.3. Trabajos futuros**

En general hay que hacer un análisis de sensibilidad del comportamiento del sistema al tener como parámetros la altura, la frecuencia y la longitud de las olas para cada sistema con  $n$  módulos e implementar bloqueos que maximicen la obtención energética y de potencia de cada uno de estos sistemas.

También falta realizar la automatización del sistema para maximizar la carrera de un actuador y de esta forma aumentar la obtención energética. Y en conjunto a este trabajo, medir la presión de salida en cada actuador del sistema para conocer realmente la máxima presión que puede acumular cada uno de ellos de manera independiente.

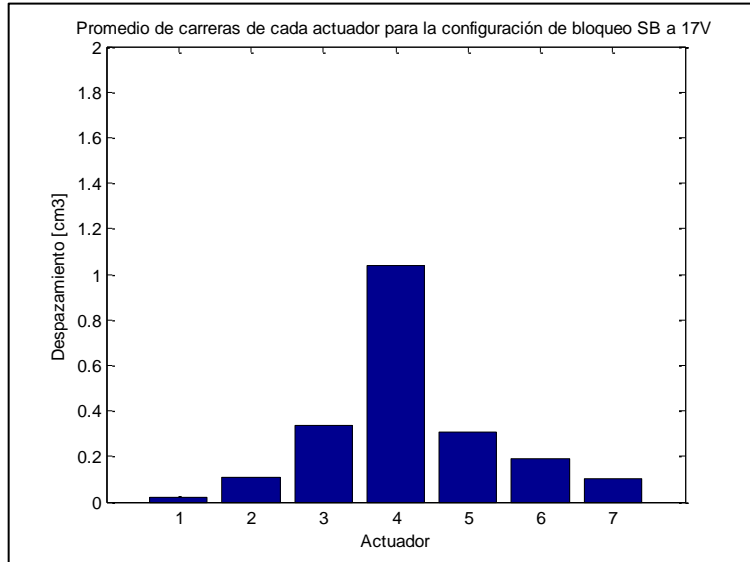
## 7. Bibliografía

- [1] **Díaz, Gustavo.** Diseño y construcción de sistema undivago para la conversión de energía. Santiago : s.n., 2014.
- [2] **Margheritini, Lucia.** *Simplified method for preliminary EIA of wave energy installation based on new technology classification.* 2010.
- [3] **Cifes.gob.cl,** (2015). Undimotriz | Tecnologías. [online] Available at: <http://cifes.gob.cl/tecnologias/marina/undimotriz/> [Accessed 10 Nov. 2015].
- [4] **Moral, L. Saenz, A.** (2010). System for generating energy from a pressure wave which comprises a mechanism which minimizes the wave disturbance. Google Books.
- [5] **Ibañez, P.** (2008). Energía de las olas: Situación y Futuro. Universidad da Coruña: Xornada sobre Enerxía que Ven do Mar.
- [6] **Greene, Graham.** *The power and the glory: a special report on energy.* s.l. : The Economist, 2008.
- [7] **Devia, Dianny.** *Deterioro ambiental ocasionado en los ultimos 10 años por actividades economicas que no cumplen los protocolos, acuerdos y normas ambientales.* Bogotá : s.n., 2013.
- [8] **Amundarin, Modesto.** *La energia renovable procedente de las olas.* España : s.n., 2011
- [9] **Arévalo, A.** (n. d.). Unidad de aprendizaje II: Ondas.
- [10] *Curso Geografía del Mar, Pontificia Universidad Católica de Chile*  
[http://www7.uc.cl/sw\\_educ/geo\\_mar/](http://www7.uc.cl/sw_educ/geo_mar/).
- [11] **Systems, e.** (2013). Características de las olas. Longitud de onda, altura, amplitud, dirección. / Oceanografía / Apuntes Náuticos / Guías / Portada - Guías Masmar. [online] [Guias.masmar.net](http://guias.masmar.net). Available at: <http://guias.masmar.net/Apuntes-N%C3%A1uticos/Oceanograf%C3%ADa/Caracter%C3%ADsticas-de-las-olas.-Longitud-de-onda,-altura,-amplitud,-direcci%C3%B3n> [Accessed 10 Nov. 2015].
- [12] **Petroni, R.** (2005). Hidráulica marítima y de estuarios . Buenos Aires: Editorial Dunken.

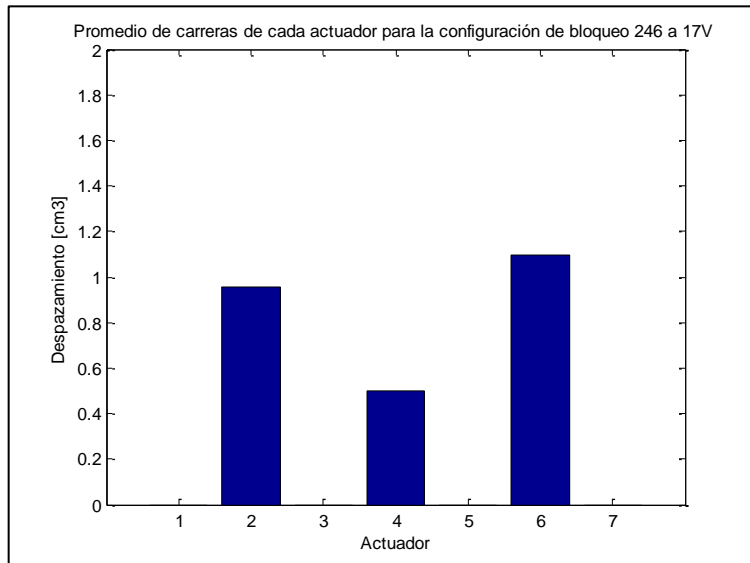
- [13] **Aw-energy.com**, (2015). *Surge phenomenon*. [online] Available at: <http://aw-energy.com/wave-energy-resources/surge-phenomenon> [Accessed 10 Nov. 2015].
- [14] **AEMet**, (2015). Agencia Estatal de Meteorología [online] Available at: [http://www.aemet.es/documentos/es/conocerlas/maritima/escalas\\_de\\_viento\\_y\\_oleaje.pdf](http://www.aemet.es/documentos/es/conocerlas/maritima/escalas_de_viento_y_oleaje.pdf) [Accessed 10 Nov. 2015].
- [15] **Meruane, Viviana**. *Vibraciones mecánicas. Departamento de Mecánica de la Universidad de Chile*.
- [16] **Crawford, F.** (1968). Berkeley physics course. New York: McGraw-Hill.
- [17] **Mederos, Luis**. *Teoría del Buque, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid*. 2008.
- [18] **Optitrack.com**, (2015). Motion Capture Systems - OptiTrack. [online] Available at: <http://www.optitrack.com/> [Accessed 10 Nov. 2015].
- [19] **Python.org**, (2015). [online] Available at: <https://www.python.org/> [Accessed 10 Nov. 2015].
- [20] **Arduino.cl**, (2015). [online] Available at: <http://arduino.cl/> [Accessed 10 Nov. 2015].
- [21] **Álvarez Pulido, M.** (2010) *Electroimanes*. España: Editorial Club Universitario.
- [22] **Senner, A.** (1994). *Principios de electrotecnia*. Barcelona: Reverté.
- [23] **Glen White**. *Introducción al Análisis de Vibraciones, Madrid*. 2010.

## **Anexos**

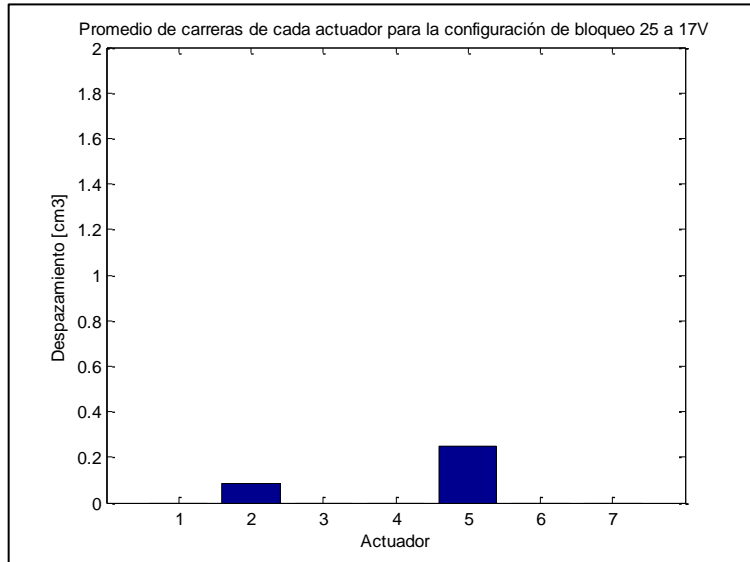
## Resultados



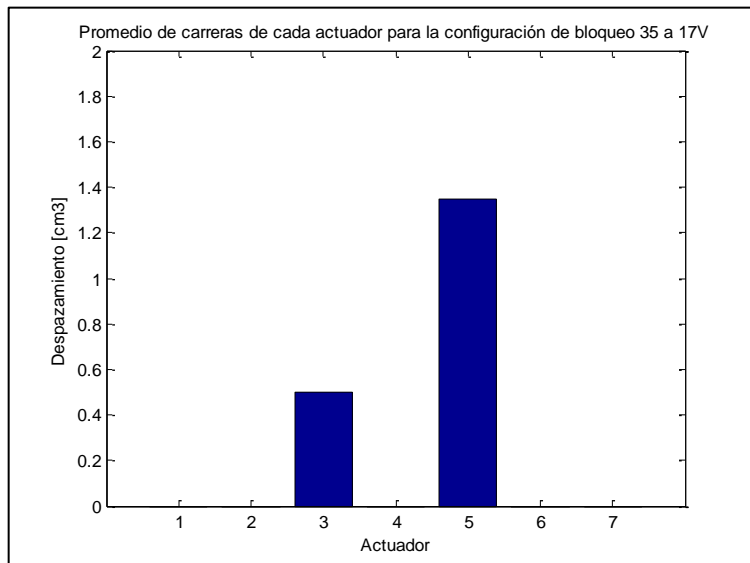
**Figura 1:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo SB a un voltaje de 17V, lo que equivale a una condición de oleaje de 1,1921 [Hz] y una amplitud de ola de 8,6 [cm]. Fuente: Elaboración propia.



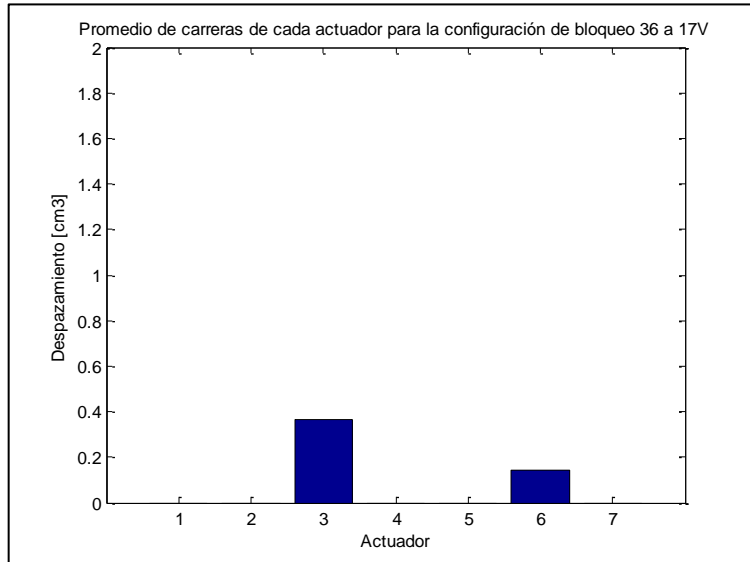
**Figura 2:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo 246 a un voltaje de 17V, lo que equivale a una condición de oleaje de 1,1921 [Hz] y una amplitud de ola de 8,6 [cm]. Fuente: Elaboración propia.



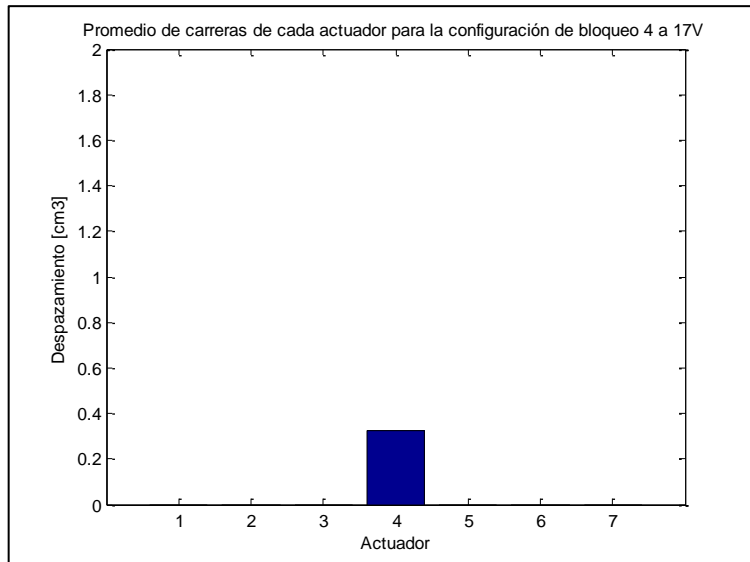
**Figura 3:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo 25 a un voltaje de 17V, lo que equivale a una condición de oleaje de 1,1921 [Hz] y una amplitud de ola de 8,6 [cm]. Fuente: Elaboración propia.



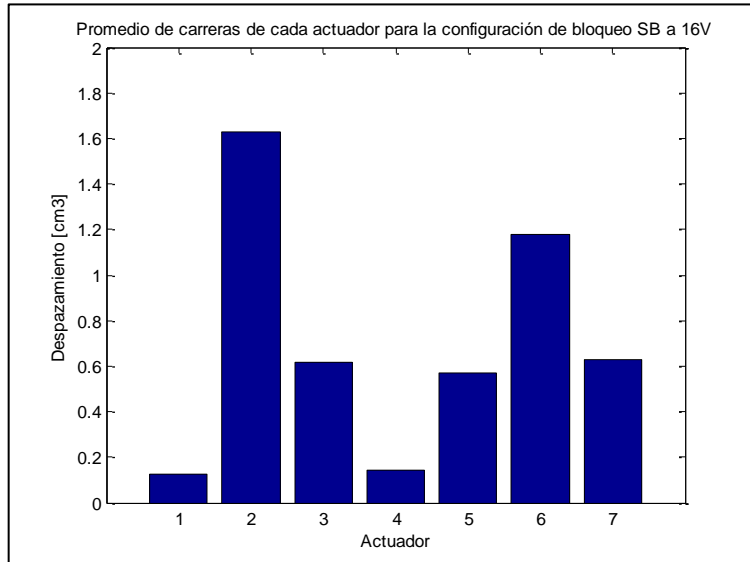
**Figura 4:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo 35 a un voltaje de 17V, lo que equivale a una condición de oleaje de 1,1921 [Hz] y una amplitud de ola de 8,6 [cm]. Fuente: Elaboración propia.



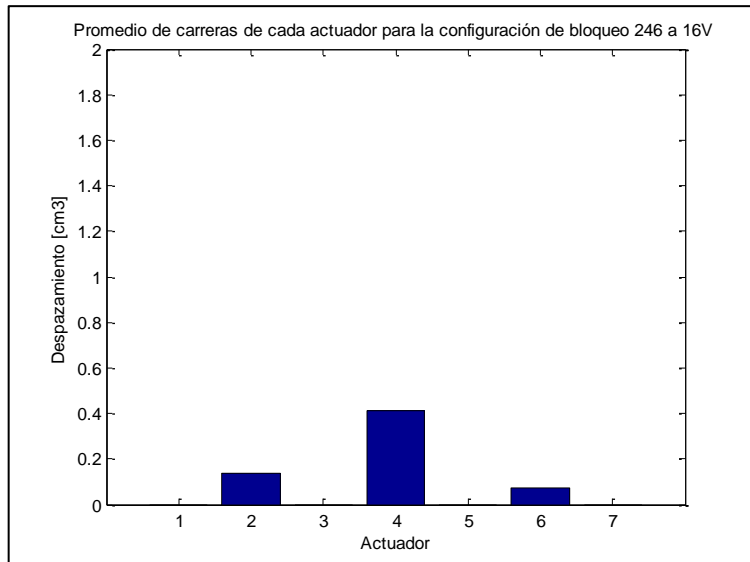
**Figura 5:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo 36 a un voltaje de 17V, lo que equivale a una condición de oleaje de 1,1921 [Hz] y una amplitud de ola de 8,6 [cm]. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 6:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo 4 a un voltaje de 17V, lo que equivale a una condición de oleaje de 1,1921 [Hz] y una amplitud de ola de 8,6 [cm]. Fuente: Elaboración propia.

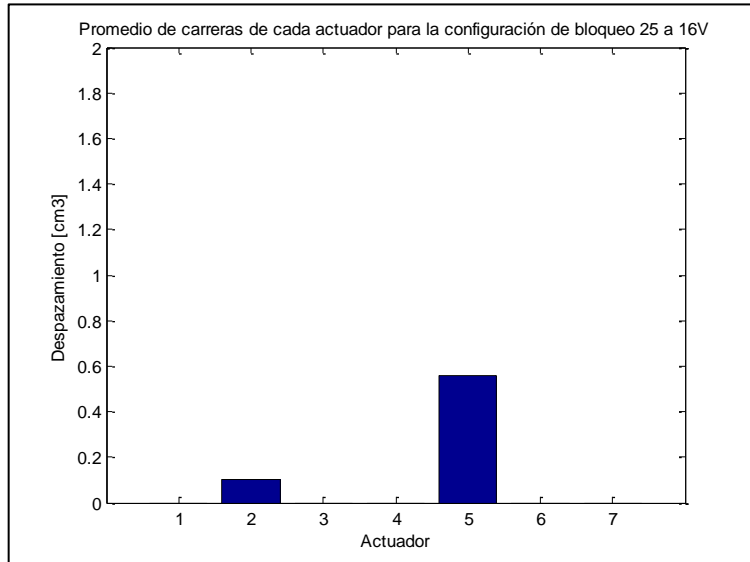


**Figura 7:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo SB a un voltaje de 16V, lo que equivale a una condición de oleaje de 0,9934 [Hz] y una amplitud de ola de 9,3 [cm]. Fuente: Elaboración propia.

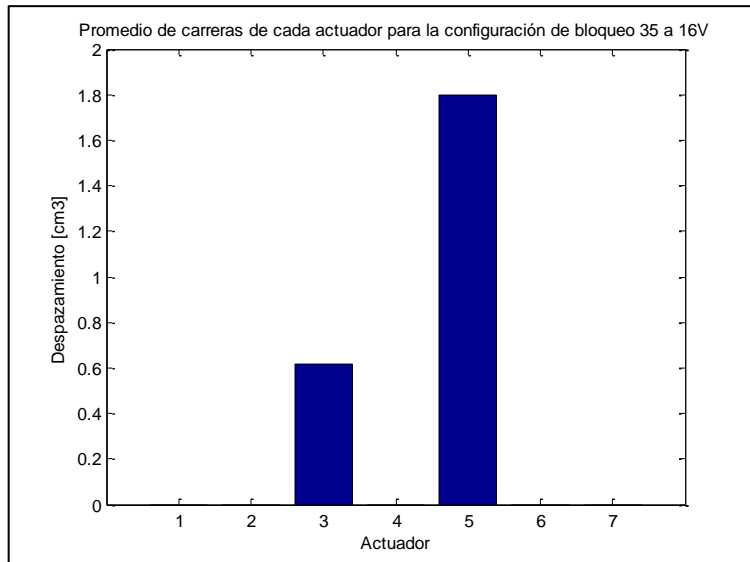


**Figura8:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo 246 a un voltaje de 16V, lo que equivale a una condición de oleaje de 0,9934 [Hz] y una amplitud de ola de 9,3 [cm]. Fuente: Elaboración propia.

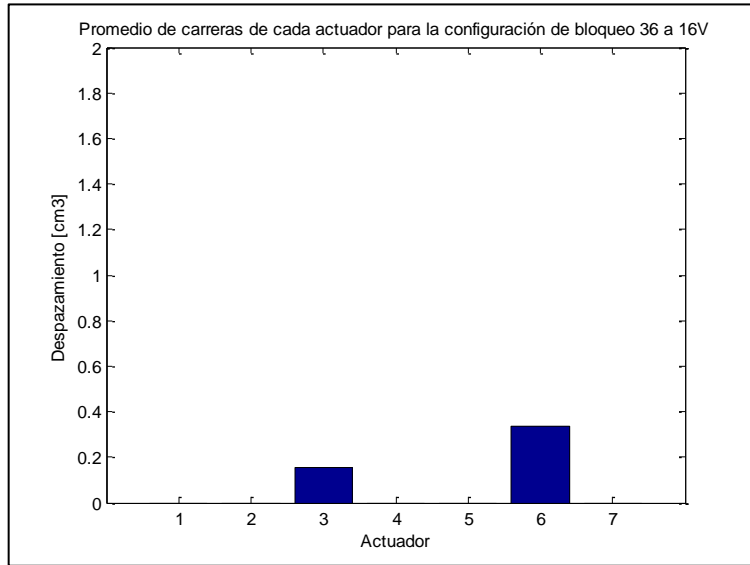




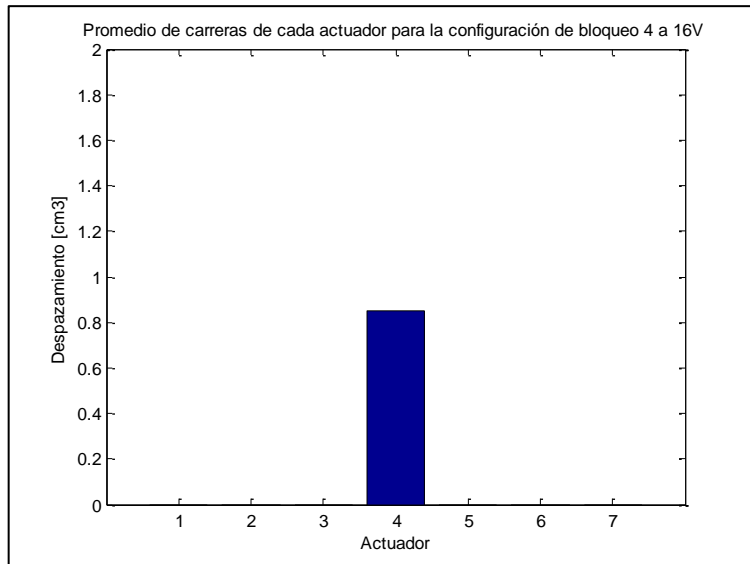
**Figura 9:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo 25 a un voltaje de 16V, lo que equivale a una condición de oleaje de 0,9934 [Hz] y una amplitud de ola de 9,3 [cm]. Fuente: Elaboración propia.



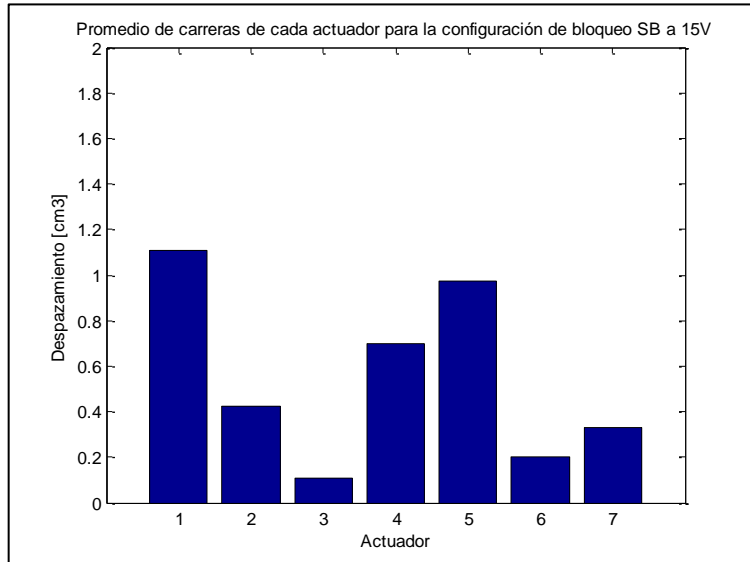
**Figura 10:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo 35 a un voltaje de 16V, lo que equivale a una condición de oleaje de 0,9934 [Hz] y una amplitud de ola de 9,3 [cm]. Fuente: Elaboración propia.



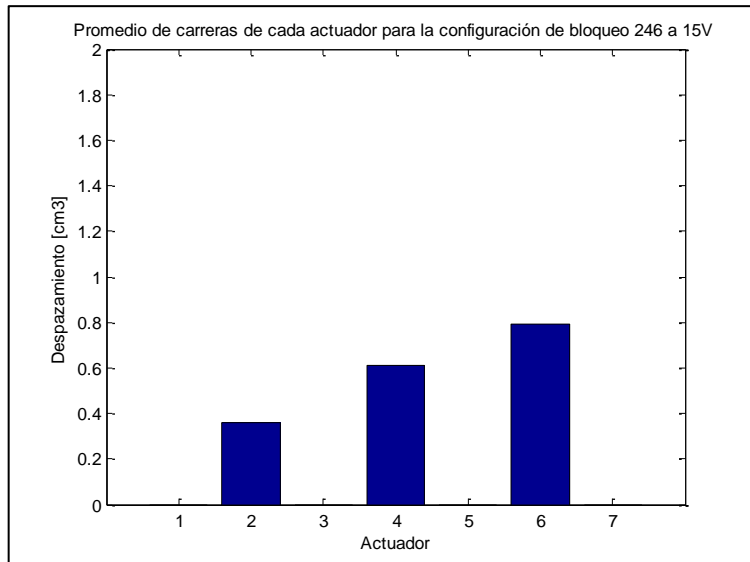
**Figura 11:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo 36 a un voltaje de 16V, lo que equivale a una condición de oleaje de 0,9934 [Hz] y una amplitud de ola de 9,3 [cm]. Fuente: Elaboración propia.



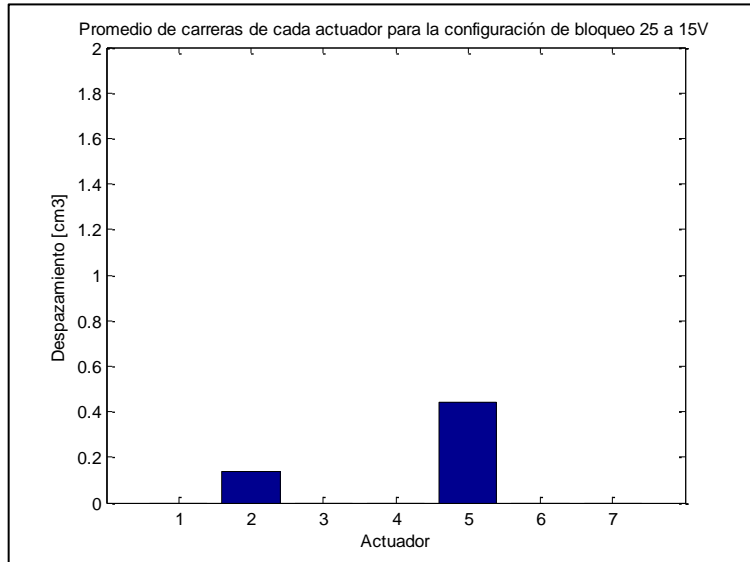
**Figura 12:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo 4 a un voltaje de 16V, lo que equivale a una condición de oleaje de 0,9934 [Hz] y una amplitud de ola de 9,3 [cm]. Fuente: Elaboración propia.



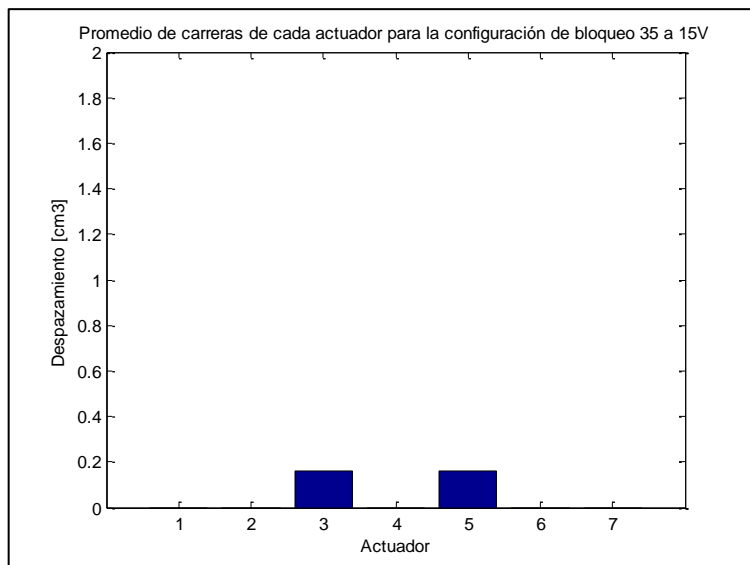
**Figura 13:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo SB a un voltaje de 15V, lo que equivale a una condición de oleaje de 1,1881 [Hz] y una amplitud de ola de 7,8 [cm]. Fuente: Elaboración propia.



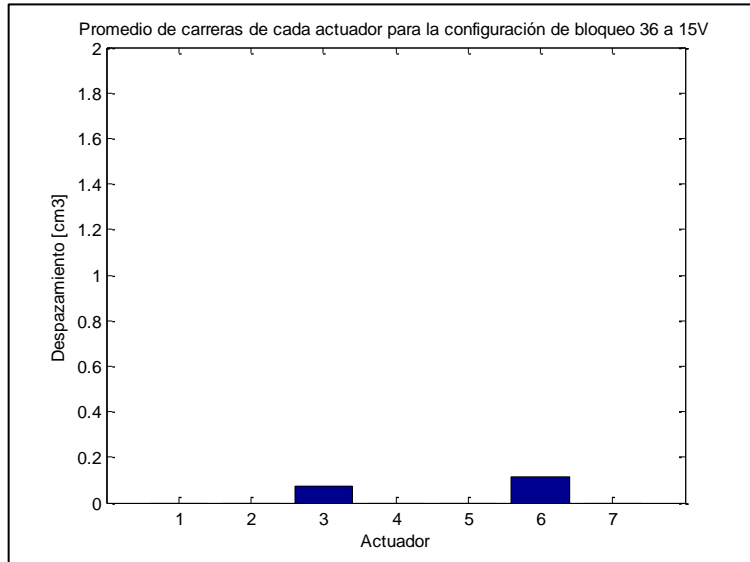
**Figura 14:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo 246 a un voltaje de 15V, lo que equivale a una condición de oleaje de 1,1881 [Hz] y una amplitud de ola de 7,8 [cm]. Fuente: Elaboración propia.



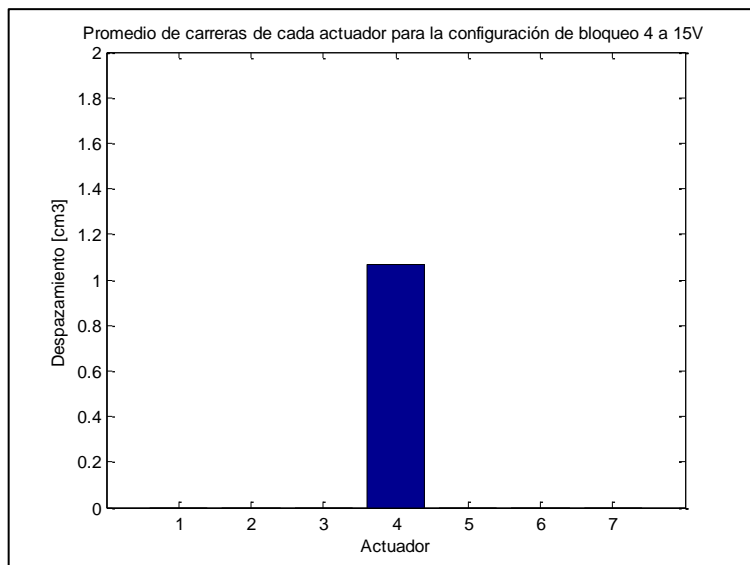
**Figura 15:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo 25 a un voltaje de 15V, lo que equivale a una condición de oleaje de 1,1881 [Hz] y una amplitud de ola de 7,8 [cm]. Fuente: Elaboración propia.



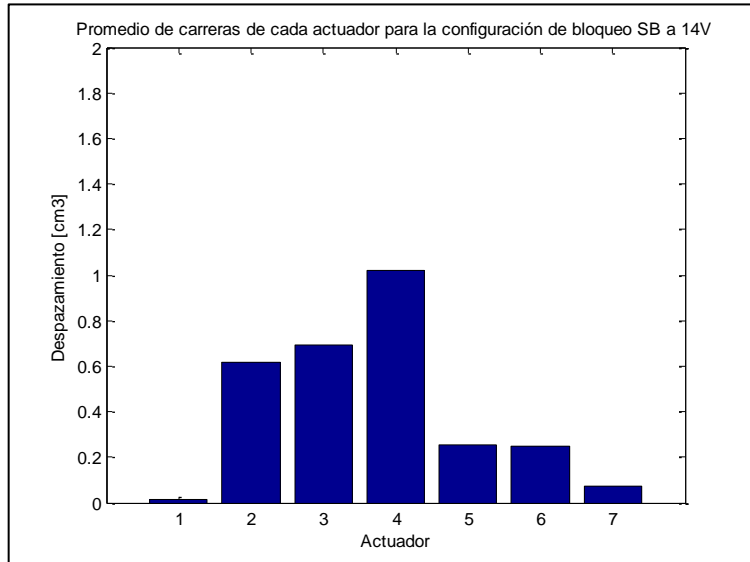
**Figura 16:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo 35 a un voltaje de 15V, lo que equivale a una condición de oleaje de 1,1881 [Hz] y una amplitud de ola de 7,8 [cm]. Fuente: Elaboración propia.



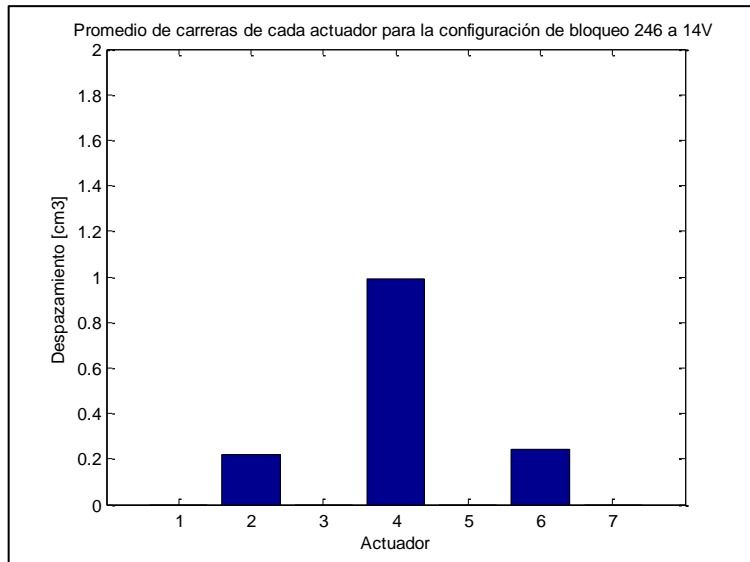
**Figura 17:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo 36 a un voltaje de 15V, lo que equivale a una condición de oleaje de 1,1881 [Hz] y una amplitud de ola de 7,8 [cm]. Fuente: Elaboración propia.



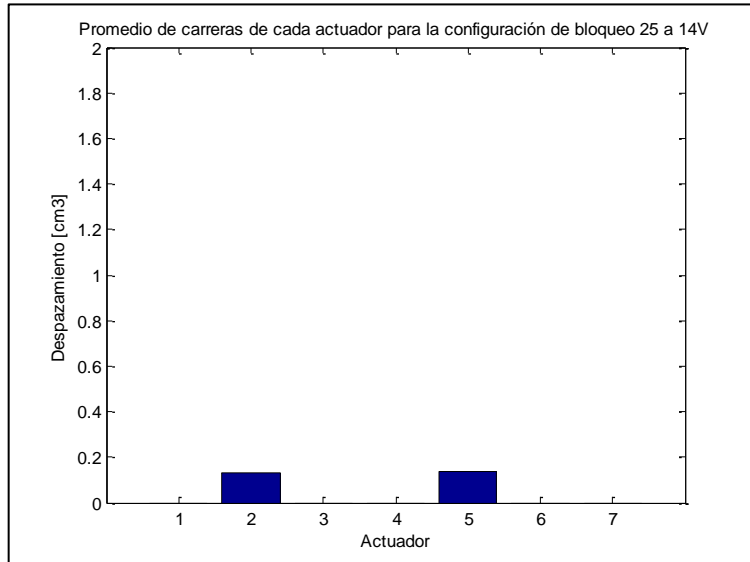
**Figura 18:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo 4 a un voltaje de 15V, lo que equivale a una condición de oleaje de 1,1881 [Hz] y una amplitud de ola de 7,8 [cm]. Fuente: Elaboración propia.



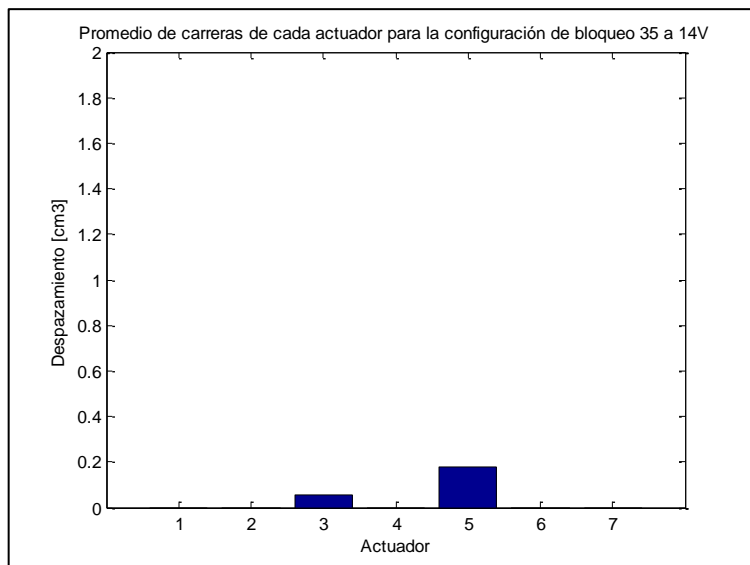
**Figura 19:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo SB a un voltaje de 14V, lo que equivale a una condición de oleaje de 0,8911 [Hz] y una amplitud de ola de 4,5 [cm]. Fuente: Elaboración propia.



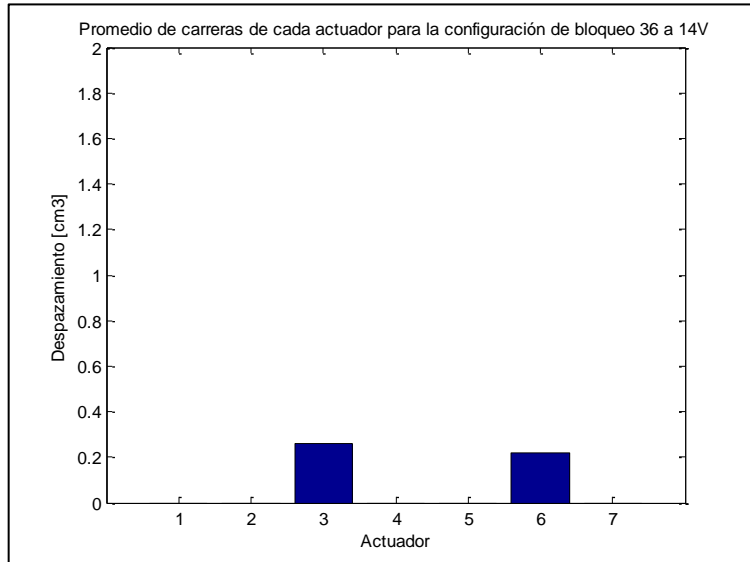
**Figura 20:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo 246 a un voltaje de 14V, lo que equivale a una condición de oleaje de 0,8911 [Hz] y una amplitud de ola de 4,5 [cm]. Fuente: Elaboración propia.



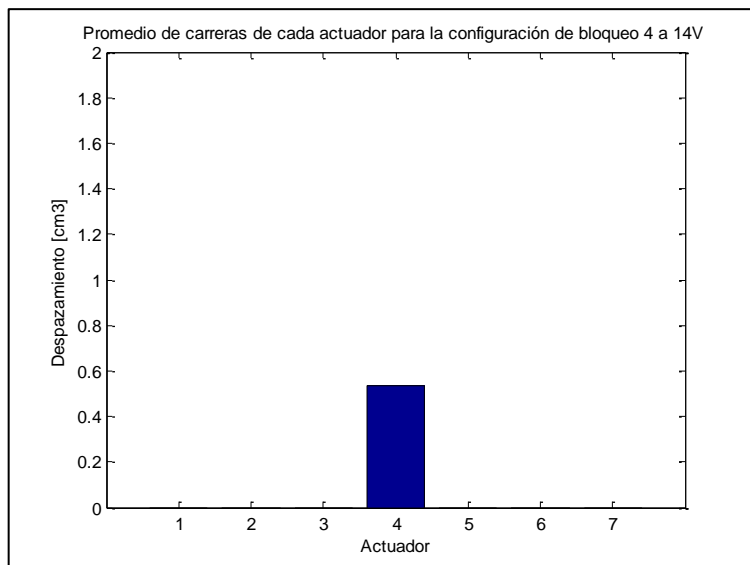
**Figura 21:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo 25 a un voltaje de 14V, lo que equivale a una condición de oleaje de 0,8911 [Hz] y una amplitud de ola de 4,5 [cm]. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 22:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo 35 a un voltaje de 14V, lo que equivale a una condición de oleaje de 0,8911 [Hz] y una amplitud de ola de 4,5 [cm]. Fuente: Elaboración propia.

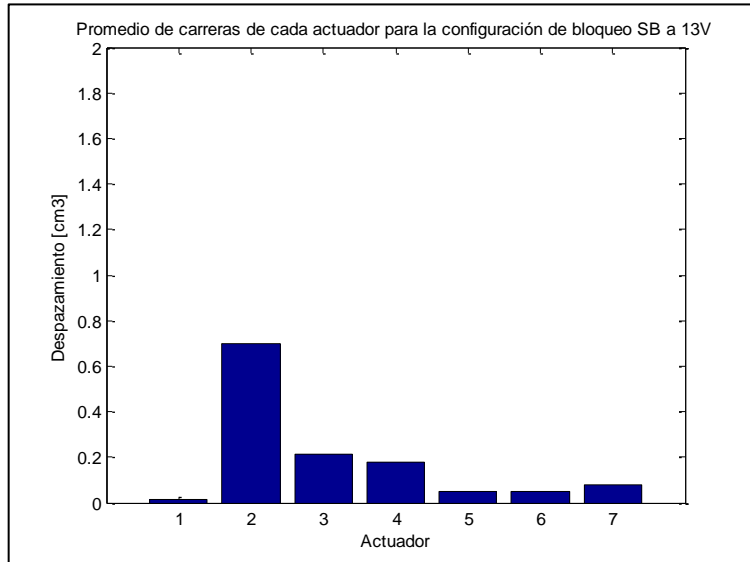


**Figura 23:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo 36 a un voltaje de 14V, lo que equivale a una condición de oleaje de 0,8911 [Hz] y una amplitud de ola de 4,5 [cm]. Fuente: Elaboración propia.

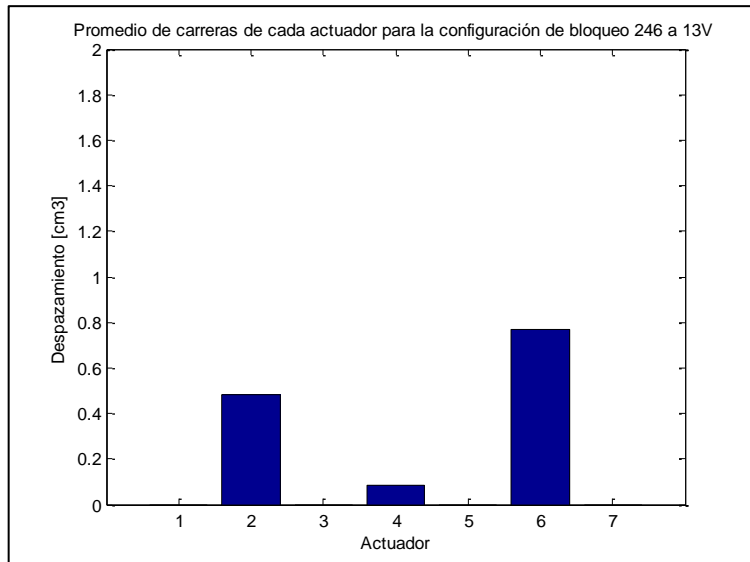


**Figura 24:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo 4 a un voltaje de 14V, lo que equivale a una condición de oleaje de 0,8911 [Hz] y una amplitud de ola de 4,5 [cm]. Fuente: Elaboración propia.

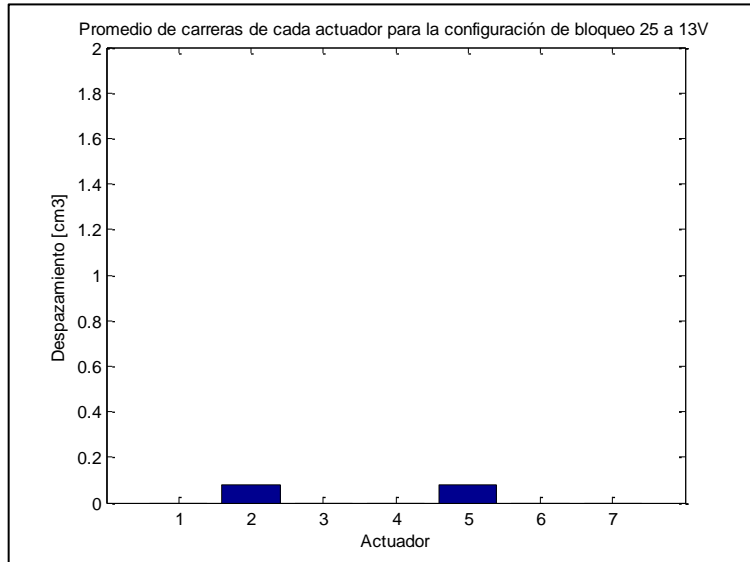




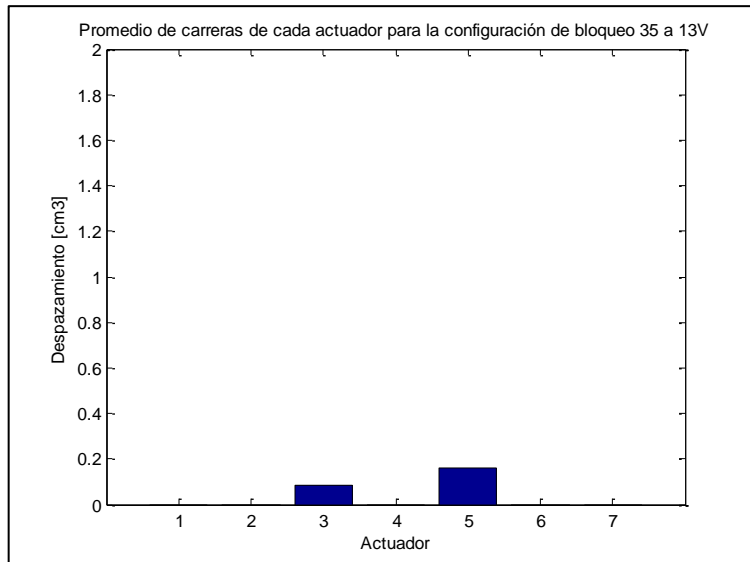
**Figura 25:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo SB a un voltaje de 13V, lo que equivale a una condición de oleaje de 0,8911 [Hz] y una amplitud de ola de 3,2 [cm]. Fuente: Elaboración propia.



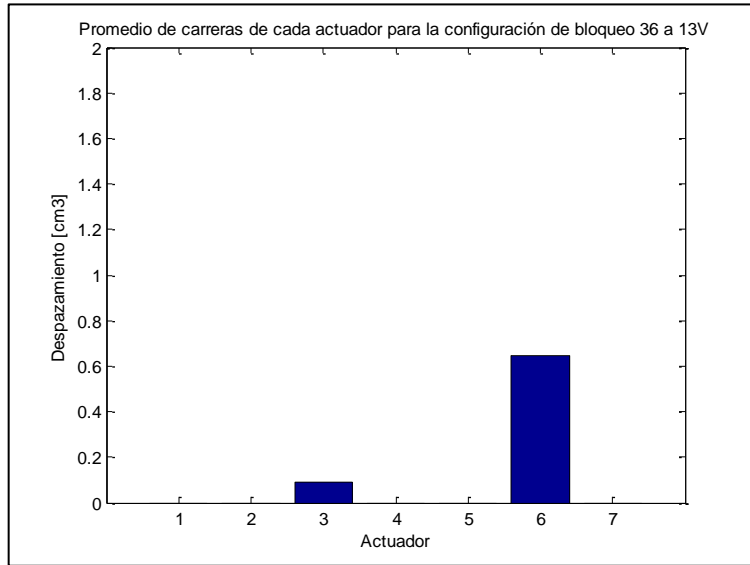
**Figura 26:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo 246 a un voltaje de 13V, lo que equivale a una condición de oleaje de 0,8911 [Hz] y una amplitud de ola de 3,2 [cm]. Fuente: Elaboración propia.



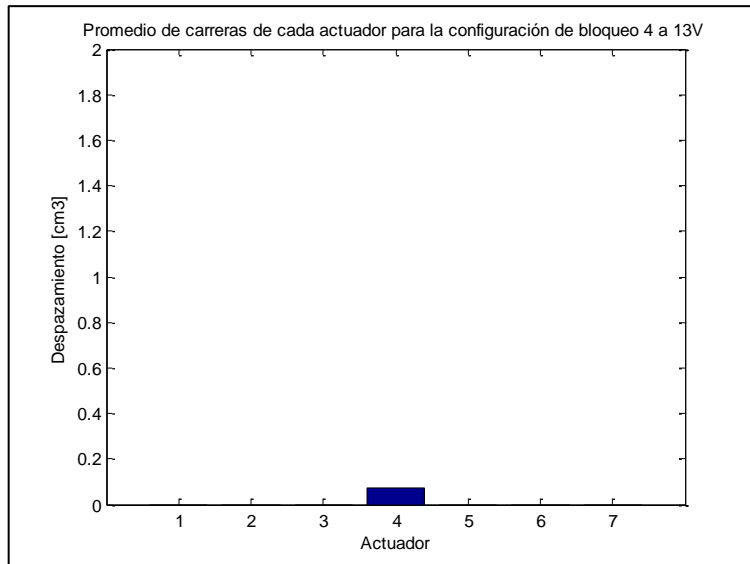
**Figura 27:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo 25 a un voltaje de 13V, lo que equivale a una condición de oleaje de 0,8911 [Hz] y una amplitud de ola de 3,2 [cm]. Fuente: Elaboración propia.



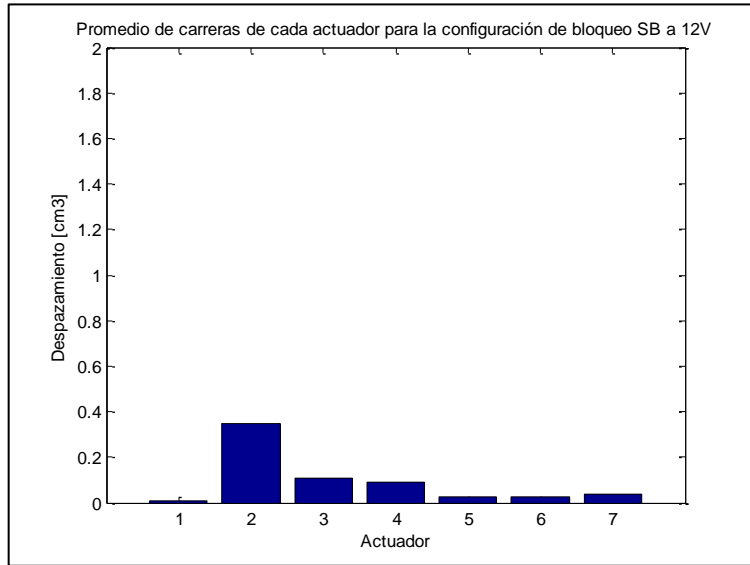
**Figura 28:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo 35 a un voltaje de 13V, lo que equivale a una condición de oleaje de 0,8911 [Hz] y una amplitud de ola de 3,2 [cm]. Fuente: Elaboración propia.



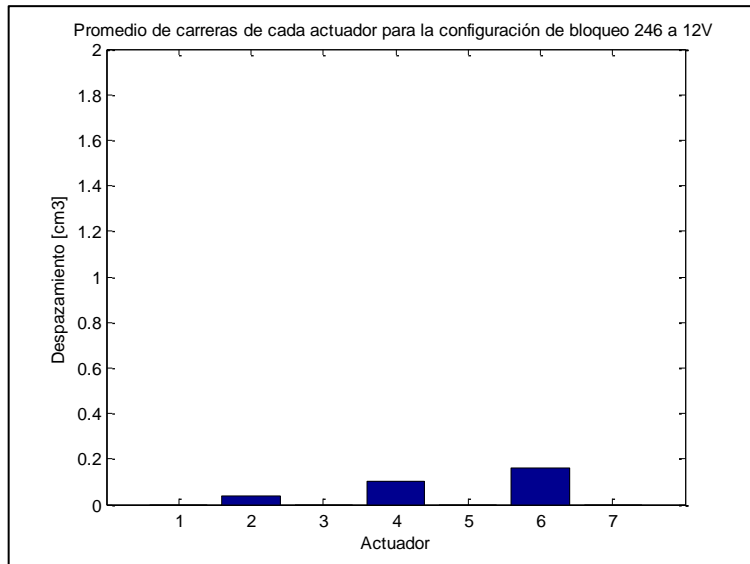
**Figura 29:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo 36 a un voltaje de 13V, lo que equivale a una condición de oleaje de 0,8911 [Hz] y una amplitud de ola de 3,2 [cm]. Fuente: Elaboración propia.



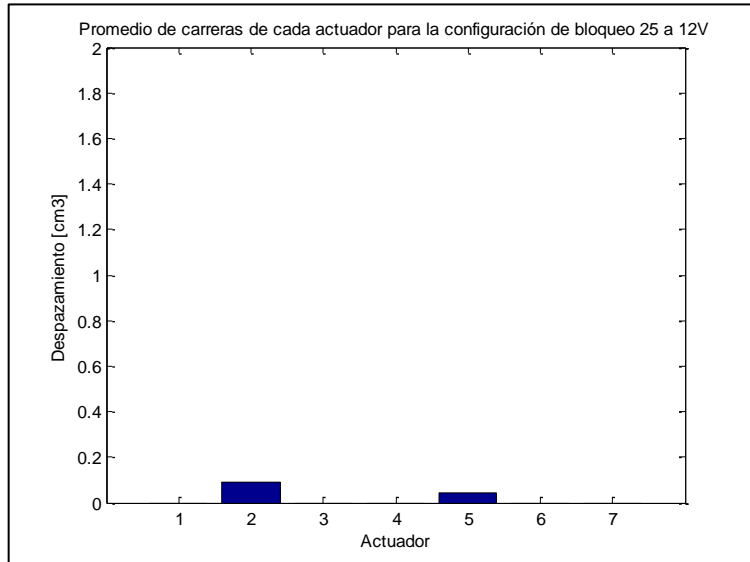
**Figura 30:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo 4 a un voltaje de 13V, lo que equivale a una condición de oleaje de 0,8911 [Hz] y una amplitud de ola de 3,2 [cm]. Fuente: Elaboración propia.



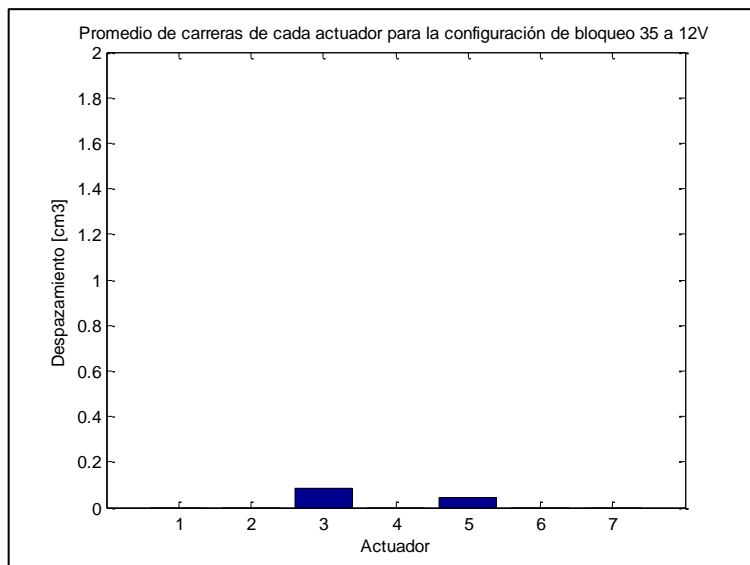
**Figura 31:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo SB a un voltaje de 12V, lo que equivale a una condición de oleaje de 0,7436 [Hz] y una amplitud de ola de 1,8 [cm]. Fuente: Elaboración propia.



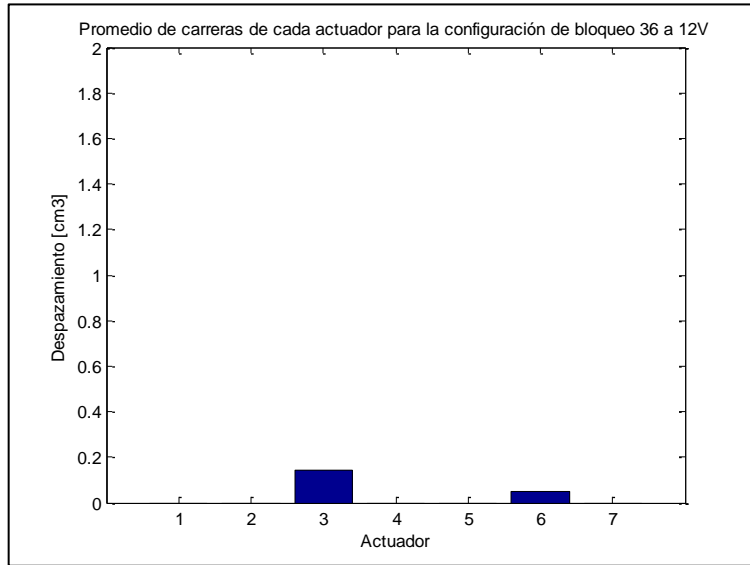
**Figura 32:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo 246 a un voltaje de 12V, lo que equivale a una condición de oleaje de 0,7436 [Hz] y una amplitud de ola de 1,8 [cm]. Fuente: Elaboración propia.



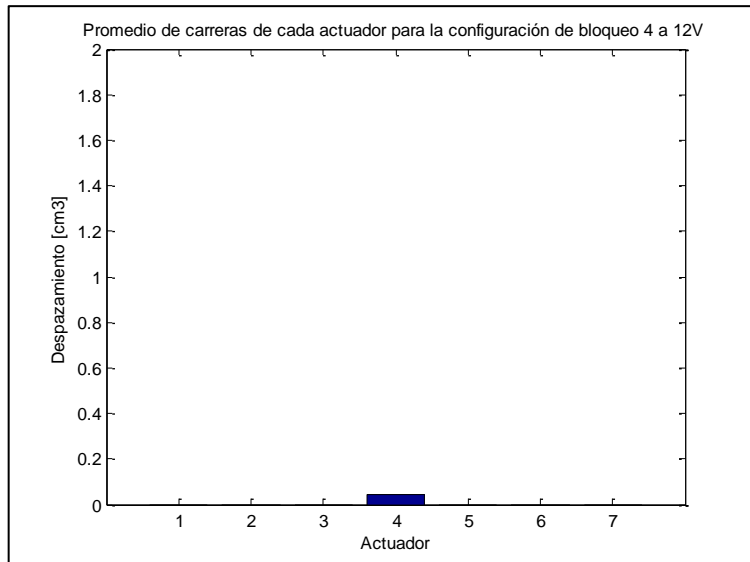
**Figura 33:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo 25 a un voltaje de 12V, lo que equivale a una condición de oleaje de 0,7436 [Hz] y una amplitud de ola de 1,8 [cm]. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 34:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo 35 a un voltaje de 12V, lo que equivale a una condición de oleaje de 0,7436 [Hz] y una amplitud de ola de 1,8 [cm]. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 35:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo 36 a un voltaje de 12V, lo que equivale a una condición de oleaje de 0,7436 [Hz] y una amplitud de ola de 1,8 [cm]. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 36:** Carreras de los actuadores para la configuración de bloqueo 4 a un voltaje de 12V, lo que equivale a una condición de oleaje de 0.7436 [Hz] y una amplitud de ola de 1,8 [cm]. Fuente: Elaboración propia.

## Códigos

### Arduino:

Básicamente permite el paso de corriente hacia los imanes al presionar la tecla “o” gracias a la acción del relé

```
boolean w = false;
int input = 0;
void setup() {

  pinMode(3, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  if (Serial.available()>0){
    input = Serial.read();
    if (input == 'o'){
      digitalWrite(3,HIGH);}
    else{
      digitalWrite(3,LOW);}
  }
}
```

## Python:

Código principal:

```
##inicializo los datos
NNVermajor=2
NNVerminor=0
xdata=[0.0,0.0];
ydata=[0.0,0.0];
n=8 #número de marcadores
px=[0.0]*n; py=[0.0]*n; pz=[0.0]*n; #vectores donde se guardan los datos de posición
px_=[0.0]*n; py_=[0.0]*n; pz_=[0.0]*n #variable auxiliar de los datos de posición

##se inicia el vector tiempo y frecuencia y sus diferenciales respectivos
datos=804 #Número de datos para hacer el análisis de frecuencia
t=[0.0]
dt=1/120
dw=1/(datos*dt)
w=[0.0]

##se inician los arreglos que guardarán las posiciones de los marcadores
posx=px[:]
posy=py[:]
posz=pz[:]

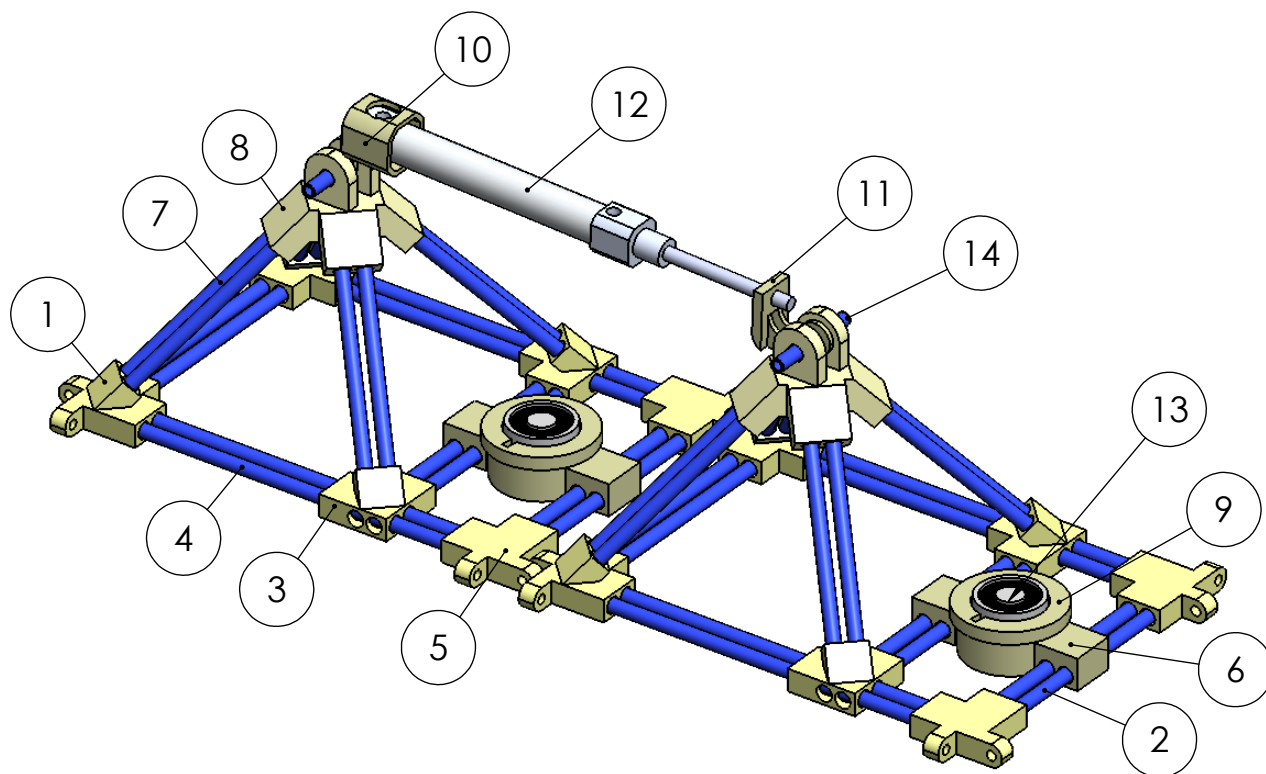
while True:
    commentsdata=True;
    #(Data Port en Motive)#
    data = sock.recv(1511)
    #print data;
    xdata,ydata=unPackData(NNVermajor,NNVerminor,data)
    #eo los datos del Motive
    for i in range(0,7):
        opti2px(px[i],py[i],pz[i])
        opti2px(px_[i],py_[i],pz_[i])
    #se crean las variables auxiliares ordenar los datos
    r1=px[:]
    r2=py[:]
    r3=pz[:]
    r1_=px_[:]
    r2_=py_[:]
    r3_=pz_[:]
    ## se ordenan los datos para no alterar la posición de los marcadores
```



```

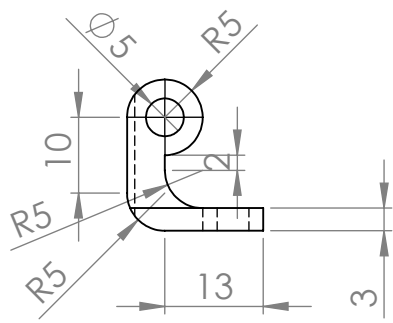
r1.sort()
for i in range(0,len(r1)):
    r2[i]=py[px.index(r1[i])]
    r3[i]=pz[px.index(r1[i])]
    r1_[i]=px_[px.index(r1[i])]
    r2_[i]=py_[px.index(r1[i])]
    r3_[i]=pz_[px.index(r1[i])]
    i+=1
## se crea un arreglo con las posiciones en "x" "y" y "z" de los marcadores
r1=[r1]
r2=[r2]
r3=[r3]
posx=posx.append(r1)
posy=posy.append(r2)
posz=posz.append(r3)
##cuando se obtengan 804 datos se realiza el análisis de frecuencia aplicando Fourier
t=t.append(dt)
w=w.append(dw)
if len(r1)==datos
    FA45=fft(r3[:,4]) #Se elige calcular la transformada de un punto central del sistema
    frq45=fftfreq(n,dt)
    for i in range(0,len(frq45)):
        if frq[i]== 1.1921
            arduino.write('o') #Se le ordena al arduino a generar el bloqueo

```

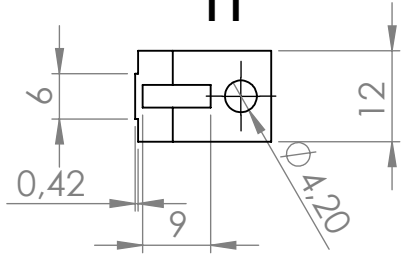


14	pasador	MANUFACTURADO/COMERCIAL	4
13	iman	COMERCIAL	3
12	actuador	COMERCIAL	1
11	adaptadoractuador2	IMPRESO	1
10	adaptadoractuador1	IMPRESO	1
9	tapaiman	IMPRESO	2
8	cúspide	IMPRESO	2
7	barra_3	MANUFACTURADO/COMERCIAL	16
6	portaiman	IMPRESO	2
5	vértice_3	IMPRESO	4
4	barra_2	MANUFACTURADO/COMERCIAL	8
3	vértice_2	IMPRESO	4
2	barra_1	MANUFACTURADO/COMERCIAL	12
1	vértice_1	IMPRESO	4
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	OBSERVACIÓN	CANTIDAD

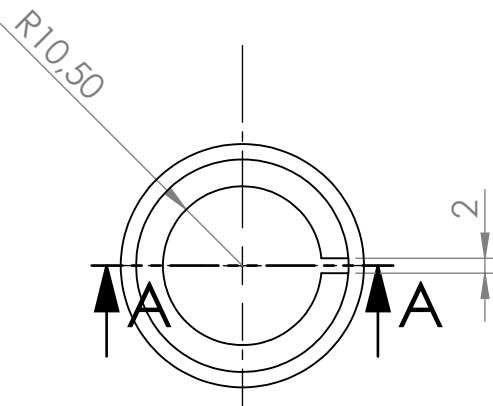
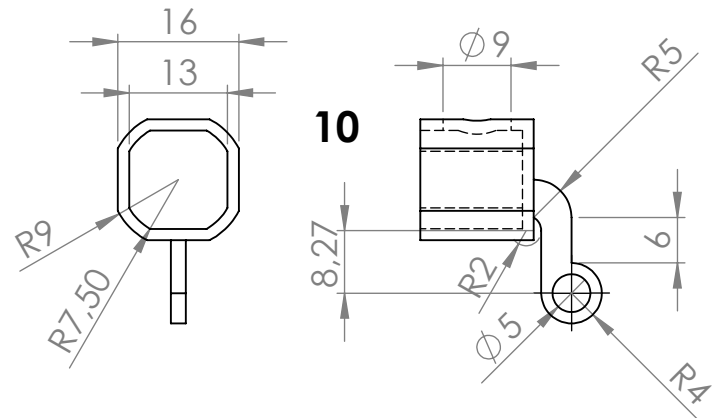
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.	Gary Oportu		15/11/2015	sistema de dos módulos y sus elementos	
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.					
				N.º DE DIBUJO	1-A
					A4
				ESCALA: 1:2	HOJA 1 DE 1



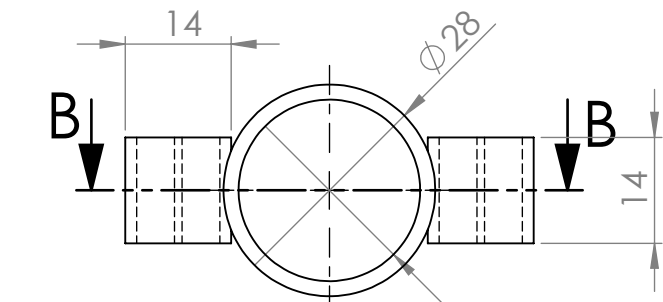
11



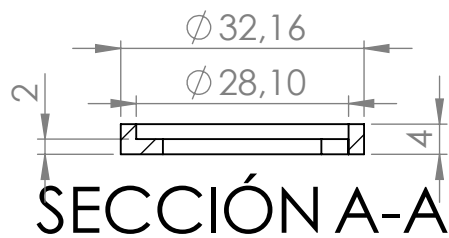
10



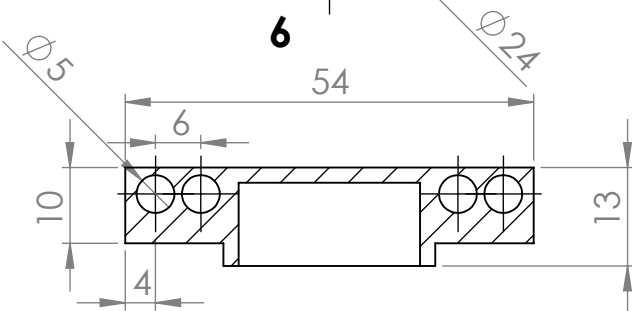
9



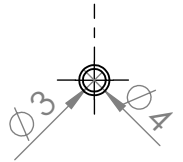
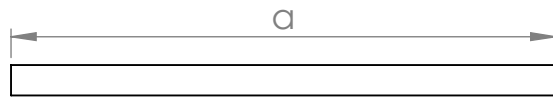
6



SECCIÓN A-A



SECCIÓN B-B

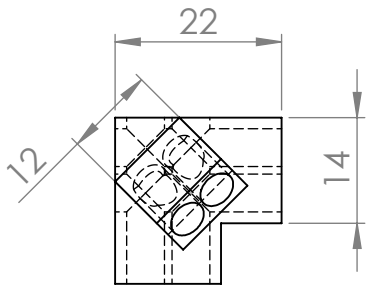


ID	a
14	30
2	72
4	120
8	80

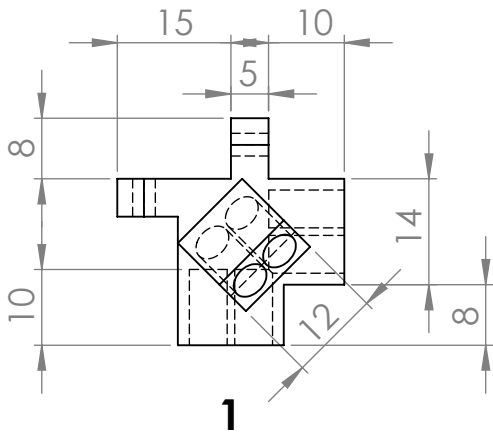
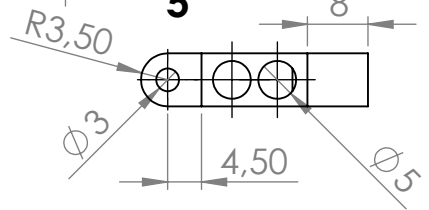
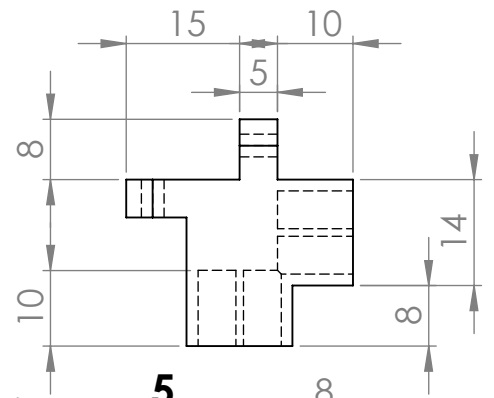
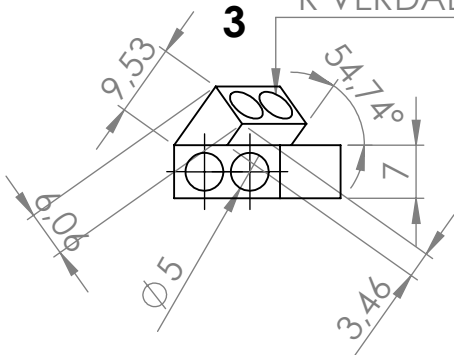
11	adaptadoractuador2	PLA	7
10	adaptadoractuador1	PLA	7
9	tapaiman	PLA	7
6	portaiman	PLA	7
ID	NOMBRE DE PIEZA	MATERIAL	CANTIDAD

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Gary Oportu		14/11/2015
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CAUID.			

TÍTULO:	Soportes de actuadores y soporte de iman	
N.º DE DIBUJO	2-A	A4
ESCALA: 1 : 2	HOJA 1 DE 1	

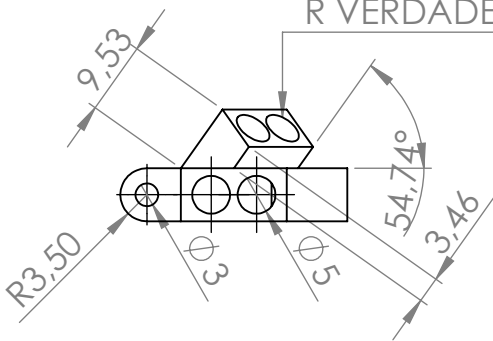


R VERDADERO 2,50



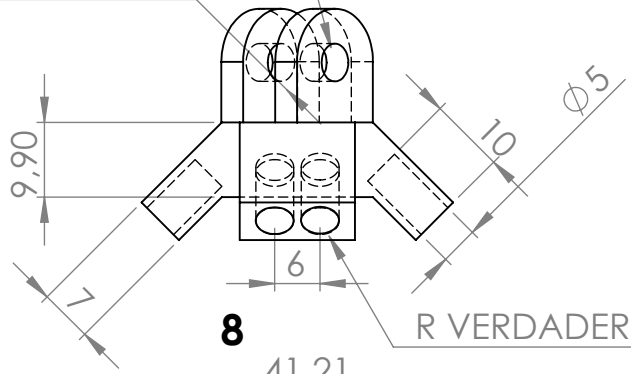
1

R VERDADERO 2,50



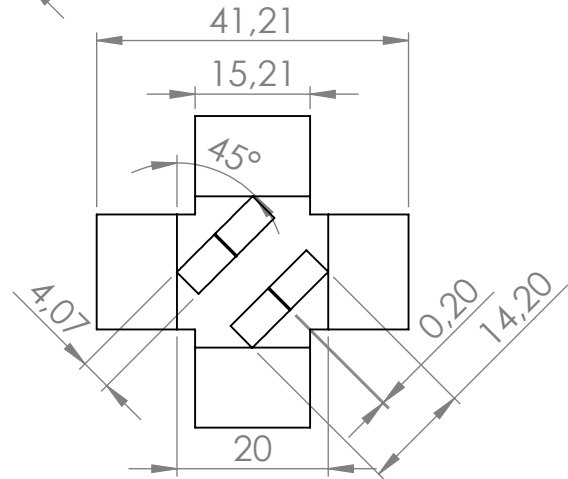
R VERDADERO 7

R VERDADERO 2,50



8

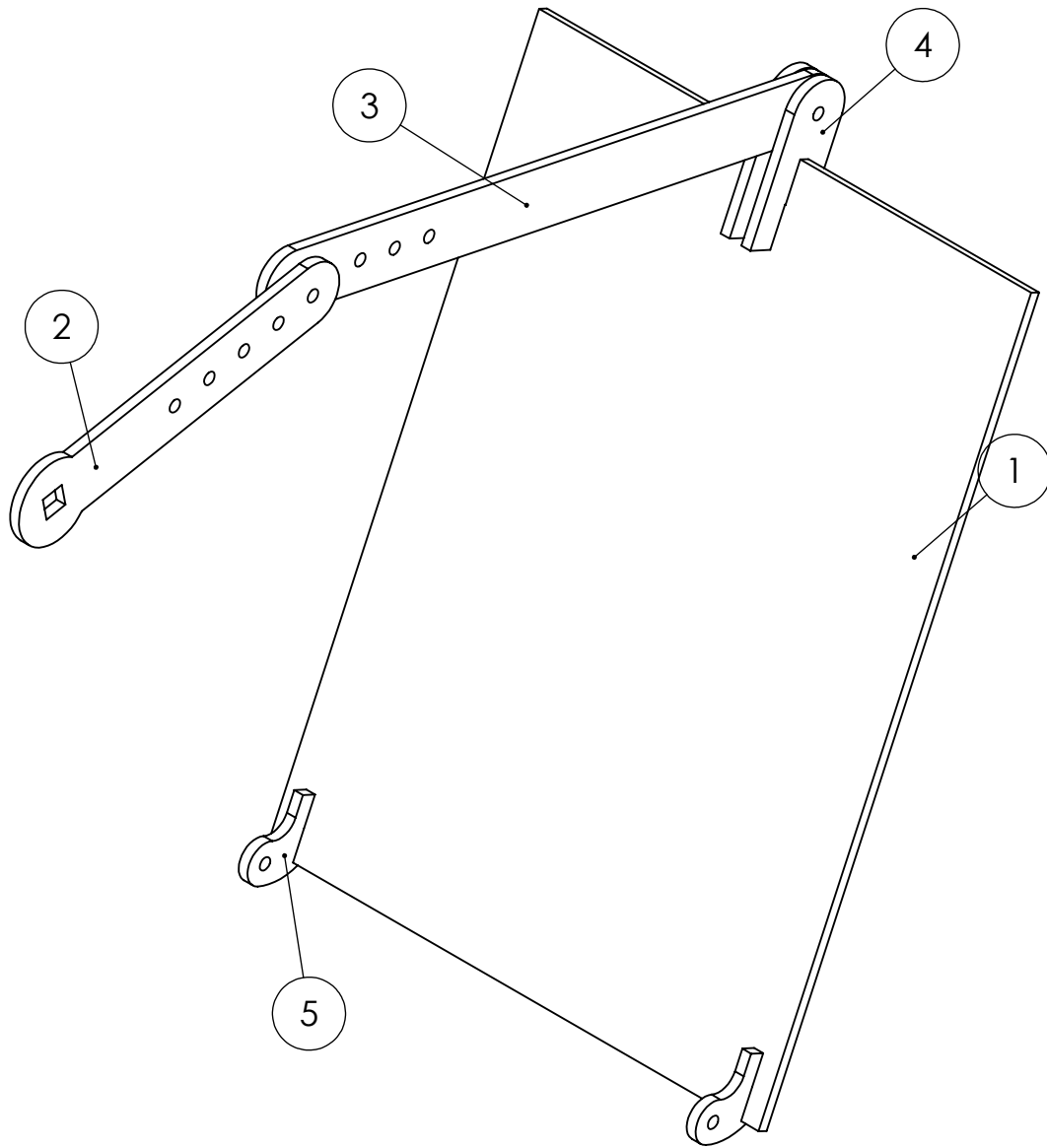
R VERDADERO 2,50



3	VÉRTICE_2	PLA	8
5	VÉRTICE_3	PLA	8
1	VÉRTICE_1	PLA	8
8	CÚSPIDE	PLA	8
ID	NOMBRE DE PIEZA	MATERIAL	CANTIDAD

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Gary Oportu		14/11/2015
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

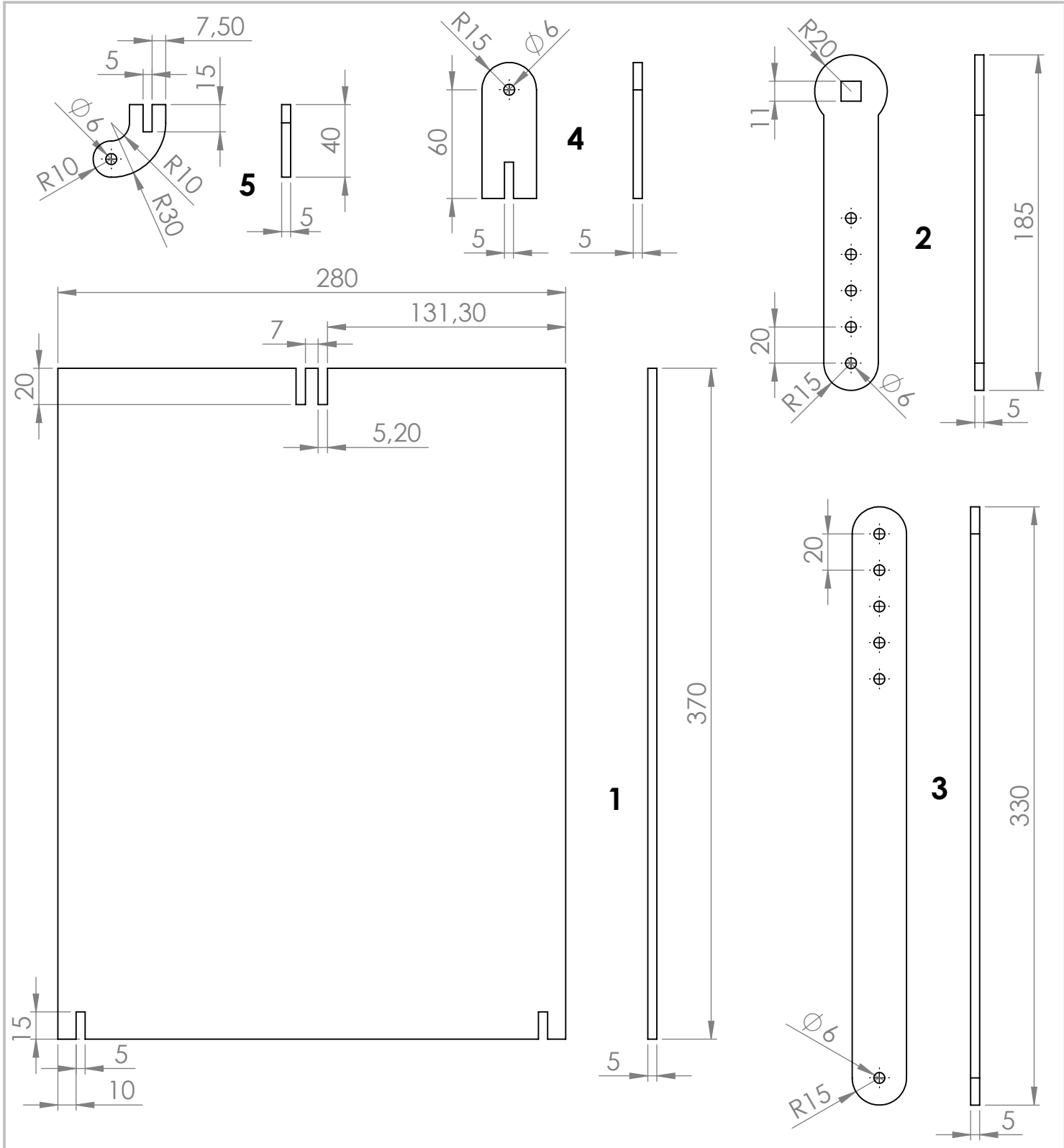
TÍTULO:	Vértices y aristas de las pirámides	
N.º DE DIBUJO	3-A	A4
ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1	



5	OREJA_2	MANUFACTURADO	2
4	OREJA_1	MANUFACTURADO	2
3	BARRA_2	MANUFACTURADO	1
2	BARRA_1	MANUFACTURADO	1
1	ALETA	MANUFACTURADO	1
ID	NOMBRE DE LA PIEZA	OBSERVACIÓN	CANTIDAD

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Gary Oportu		15/11/2015
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CAUID.			

TÍTULO:	
<h1>Generador de olas</h1>	
N.º DE DIBUJO	<h2>1-B</h2>
	A4
ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1



5	OREJA_2	ACRÍLICO	2
4	OREJA_1	ACRÍLICO	2
3	BARRA_2	ACRÍLICO	1
2	BARRA_1	ACRÍLICO	1
1	ALETÁ	ACRÍLICO	1
ID	NOMBRE DE LA PIEZA	MATERIAL	CANTIDAD

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Gary Oportu		15/11/2015
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CAUID.			

TÍTULO: **Generador de olas**

N.º DE DIBUJO: **2-B**

ESCALA: 1:1

HOJA 1 DE 1

A4