



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SISTEMA UNDÍVAGO PARA LA CONVERSIÓN DE
ENERGÍA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

GUSTAVO ANDRÉS DÍAZ FERRAN

PROFESOR GUÍA:
JUAN CRISTÓBAL ZAGAL MONTEALEGRE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JAMES GRIFFIN
EDUARDO RODRIGO GONZÁLEZ TAPIA

SANTIAGO DE CHILE
ABRIL DE 2014

Resumen ejecutivo

En el siguiente documento se muestra el proceso de diseño y construcción de un sistema undívago para extracción de energía de las olas del mar. El documento comienza con un acercamiento a esta materia destacando el recurso energético disponible en las olas del mar, las tecnologías que hoy lideran el mercado y su clasificación.

Luego se detalla el equipamiento experimental construido e instalado en el laboratorio, previo y necesario para el diseño del sistema undívago. Se construye un generador de olas y se deja instalado en el estanque de agua del laboratorio de Síntesis de Máquinas Inteligentes del DIMEC¹. El costo del generador de olas es de \$54.500.

La etapa de diseño está caracterizada por la elaboración de modelos a escala que se prueban en el estanque de agua y el generador de olas. Se selecciona una estructura a construir y se realizan modelos analíticos del comportamiento dinámico que tendría la estructura en el ambiente marino. Luego se diseña la estructura final con todos sus componentes mecánicos, procurando que pueda ser construida en los talleres de la FCFM y el laboratorio de Fabricación Digital (Fab Lab) de la Universidad. Se elaboran los planos de las piezas a fabricar y la lista de materiales a comprar.

El capítulo 5 muestra todos los procesos de manufactura utilizados para la construcción de las piezas diseñadas, adjuntando fotos y descripciones detalladas.

Se construye el sistema y se nombra Nahuenrew, que en la lengua Mapudungun significa energía de las olas. Se realiza una prueba a Nahuenrew en el ambiente marino, en la playa de Pichidanguí. Los resultados fueron más bajos de lo esperado pero satisfactorios pues se cumplen los objetivos propuestos para el trabajo. El costo del sistema Nahuenrew es de \$658.000.

Finalmente se analiza el comportamiento del sistema Nahuenrew durante la prueba en el ambiente marino y se propone mejoras que pueden ser ejecutadas tanto en el corto plazo como otras más elaboradas que requieren tiempo. Se estima también la potencia que sería posible generar mediante un aerogenerador ideal con la energía extraída durante la prueba. Esta potencia tiene un límite máximo de 50[W].

¹ DIMEC: Departamento de Ingeniería Mecánica.

Dedicatoria

A todas las mujeres y hombres imprescindibles que luchan toda su vida, a Bertolt Brecht, Luis Elmes, Emiliano Concha, Patricio Figueroa, Norma Campos, Enrique Vasconcellos, Rafael Terreros.

Agradecimientos

Agradezco mucho a mi familia, empezando por mi padre y mi madre que apoyan todos mis proyectos. A toda mi familia en general, con la cual me siento siempre gratamente acompañado.

Agradezco a mis amigas y amigos, tanto a l@s más cercan@s y a aquell@s que veo de vez en cuando para compartir unos mates o unos tragos.

Agradezco particularmente a Ricardo Parra, quien me enseñó la técnica de vaciado de resina en moldes de silicona, realizando un gran aporte a este trabajo. Doy gracias también a la gente del Centro de Energía, que me recibió amigablemente en su lugar de trabajo.

Con tod@s ell@s quiero compartir este trabajo y la alegría de haber culminado exitosamente esta etapa de mi educación. L@s quiero mucho.

Tabla de contenido

Resumen ejecutivo	i
Dedicatoria	ii
Agradecimientos.....	iii
Índice de ilustraciones.....	vii
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general.....	2
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Alcance	3
1.4. Estructura del trabajo	3
2. Antecedentes.....	4
2.1. Identificación del recurso.....	5
2.2. Tecnologías presentes en la actualidad	7
2.2.1. Clasificación de tecnologías según ubicación	8
2.2.2. Clasificación de tecnologías según principio de funcionamiento	9
2.2.3. Clasificación de tecnologías según tipo.....	10
2.3. Elementos de transformación de la energía.....	10
2.4. Estrategias de control.....	11
2.5. Proyectos destacados	11
2.5.1. AWS Ocean Energy Ltd.....	14
2.5.2. Oceanlinx Ltd.....	16
2.5.3. Ocean Power Technologies Ltd.....	16
2.5.4. Pelamis Wave Power Ltd.....	18

2.5.5. Wavegen	19
2.5.6. Wave Energy Centre	20
2.6. Potencia de un aerogenerador	22
3. Equipamiento experimental	23
3.1. Generador de olas.....	23
4. Diseño de componentes del sistema undívago	25
4.1. Diseño de la estructura	25
4.2. Diseño del absorbedor	33
4.3. Diseño de tanque y mangueras	38
5. Construcción del sistema undívago	40
5.1. Estructura.....	40
5.2. Actuadores	56
5.3. Sistema neumático.....	57
6. Pruebas al sistema	60
6.1. Protocolo de pruebas	60
6.1.1. Prueba a los modelos a escala.....	60
6.1.2. Prueba al sistema undívago de escala final	60
6.2. Resultado de pruebas	62
6.2.1. Resultado de prueba a los modelos a escala	62
6.2.2. Resultado de prueba al sistema undívago Nahuenrew	63
7. Análisis y discusión de resultados	72
7.1. Equipamiento experimental.....	72
7.2. Diseño del sistema undívago Nahuenrew	72
7.2.1. Diseño del modelo a escala.....	72
7.2.2. Modelo de respuesta dinámica	72
7.2.3. Diseño de la estructura final	73

7.3. Construcción del sistema undívago Nahuenrew	74
7.4. Funcionamiento en ambiente marino	75
7.5. Futuro.....	77
8. Conclusiones	79
9. Bibliografía.....	81
10. Anexos	82

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Promedio anual de la potencia de las olas	5
Ilustración 2: El agua en las olas de agua profunda se mueve en órbitas circulares que decrecen exponencialmente con la profundidad.	6
Ilustración 3: Diagrama de clasificación de las tecnologías WEC.	8
Ilustración 4: Diagrama clasificación de ecnologías WEC según principio de funcionamiento.	9
Ilustración 5: Tecnologías existentes en la actualidad diferenciadas por modo de funcionamiento. a) atenuador; b) absorbedor; c) terminador.	10
Ilustración 6: Sistema AWS I en funcionamiento en el mar.	15
Ilustración 7: Sistema Oceanlinx OWC funcionando en el mar.	16
Ilustración 8: PowerBuoy funcionando en el mar.	18
Ilustración 9: Pelamis funcionando en EMEC.....	19
Ilustración 10: LIMPET instalada y funcionando en ambiente marino.	20
Ilustración 11: Pico OWC instalada y funcionando en ambiente marino.	21
Ilustración 12: Curva de potencia de un aerogenerador [15].	22
Ilustración 13: Modelo en Solidworks del generador de olas montado en el estanque. .	23
Ilustración 14: Generador de olas implementado en el estanque.....	24
Ilustración 15: Electrónica de control para motor DC del generador de olas.....	24
Ilustración 16: Diseño de sistema undívago, dimensiones en mm.	25
Ilustración 17: Modelo a escala de sistema undívago: a) sistema estirado, b) sistema comprimiéndose, c) sistema totalmente comprimido, d) sistema totalmente estirado. ...	26
Ilustración 18: Esquema del sistema libre.	27
Ilustración 19: Esquema de movimiento de un elemento del sistema.	28
Ilustración 20: Dibujo de estructura a escala final, vista frontal, dimensiones en mm. ...	29
Ilustración 21: Dibujo de estructura a escala final, vista superior, dimensiones en mm.	30
Ilustración 22: Un módulo del sistema constituido por dos pirámides y un absorbedor.	30
Ilustración 23: Esquema virtual de sistema undívago completo, compuesto por cinco módulos.....	31
Ilustración 24: Esquema virtual de cómo el sistema undívago Nahuenrew se acopla a la forma de la superficie del agua. En la imagen a se aprecia el sistema en compresión y en la imagen b el sistema está en expansión.....	31

Ilustración 25: Esquema del sistema con absorbedor.	33
Ilustración 26: Actuador lineal escogido.	35
Ilustración 27: Desglose de piezas del actuador lineal escogido.....	36
Ilustración 28: Bombín de bicicleta escogido como absorbedor.....	37
Ilustración 29: Piezas de sujeción de bombín: a) soporte bombín tenaza, b) soporte bombín abajo, c) soporte bombín medio.	37
Ilustración 30: Diagrama neumático conceptual.....	38
Ilustración 31: Uniones rápidas para manguera neumática.	38
Ilustración 32: Tanque a utilizar en esta prueba.....	39
Ilustración 33: Piezas del sistema Nahuenrew que requieren construcción CNC u otro método. En la esquina inferior derecha de cada figura se encuentra el número de ítem que se corresponde con la Tabla 3.	40
Ilustración 34: Preparación de moldes en silicona de caucho con carriles de acero y aluminio.....	42
Ilustración 35: Preparación de la silicona de caucho.....	42
Ilustración 36: Moldes de silicona de caucho listos, con sus carriles.	43
Ilustración 37: Pieza obtenida con vaciado de resina en moldes de silicona de caucho.	44
Ilustración 38: Comparación entre copias y original obtenidas con vaciado de resina en moldes de silicona.....	44
Ilustración 39: Molde de silicona de caucho contituído de una sola parte más carriles..	45
Ilustración 40: Molde de silicona de caucho contituído de una sola parte más carriles..	45
Ilustración 41: Moldes simples de silicona de caucho junto a sus originales impresos en 3D.....	46
Ilustración 42: Moldes simples de silicona de caucho llenos de resina en proceso de solidificación. arriba se ve las piezas ya solidificadas y desmoldadas producidas en estos moldes respectivos.	46
Ilustración 43: Conjunto total de piezas construidas por vaciado de resina más otros elementos que constituyen el sistema undívago.	47
Ilustración 44: Molde constituido de dos partes más carriles. la parte superior es de silicona de caucho, la parte inferior es de yeso.....	48
Ilustración 45: Herramienta de corte para tubos de material blando como aluminio.	49

Ilustración 46: Los cortes no requieren ser refrentados en torno.	50
Ilustración 47: Tubos de aluminio cortados.	50
Ilustración 48: Ejes de acero inoxidable recién cortados.....	51
Ilustración 49: Ejes de acero inoxidable maquinados en el torno.....	51
Ilustración 50: Codo de tres ejes, dos fijos separados en 90° y un tercero que puede rotar.....	52
Ilustración 51: Rodamiento inoxidable en la unión entre pirámides.....	52
Ilustración 52: Los ejes de acero inoxidable de fijan con seguros seagers, también inoxidables.	53
Ilustración 53: Primera pirámide armada, las piezas quedaron con las dimensiones y ajustes requeridos.	53
Ilustración 54: Primera prueba de ensamblaje entre pirámides. Montaje de actuador (bombín) sin complicaciones.....	54
Ilustración 55: Unión entre pirámides. Se utiliza pernos, golillas y tuercas con seguro de poliéster.....	55
Ilustración 56: Estructura pirámide completamente armada, con flotadores y actuador.....	55
Ilustración 57: Acople entre bombines y estructura.....	56
Ilustración 58: Bombín montado entre dos pirámides.	57
Ilustración 59: Niple y unión rápida que permiten conectar la manguera al bombín.	57
Ilustración 60: Válvula antirretorno.	58
Ilustración 61: Sistema completamente armado.....	58
Ilustración 62: Vista del sistema neumático acoplado a la estructura de Nahuenrew. ...	59
Ilustración 63: Prueba al modelo a escala. Se aprecia la diferencia de las distancias relativas entre las puntas de las pirámides. en la parte a) el modelo a escala pasa por un valle de la ola alargando sus distancias relativas. en la parte b) el modelo a escala pasa por una cresta de la ola acortando algunas de sus distancias relativas.	62
Ilustración 64: Cargando el sistema Nahuenrew desarmado en la camioneta.	63
Ilustración 65: Etapas de ensamblaje del sistema Nahuenrew. a) se arma cada pirámide, b) se unen las pirámides, c)se instala las piezas que sujetan los bombines y los bombines, d) se instala los niples, válvulas y mangueras, e) se unen todas las mangueras, f) se conecta la manguera principal con el tanque.	64

Ilustración 66: Imagen izquierda: Gustavo Díaz corrobora que las pirámides se articulan bien. Imagen derecha: Eduardo González y Juan Cristóbal Zagal corroboran que aumenta la presión en el tanque y que no hay fugas de aire.	65
Ilustración 67: Bote con el cual se realizó la prueba en el mar.....	66
Ilustración 68: Ruta rastreada por GPS.....	66
Ilustración 69: Perfil de elevación y de velocidad de la ruta rastread por el GPS.....	67
Ilustración 70: Nahuenrew se acopla bien a la deformación de la superficie del mar, tanto en compresión (a), como en expansión (b).	68
Ilustración 71: Nahuenrew se alinea paralelo al frente de olas.	68
Ilustración 72: Nahuenrew montado una cresta de ola de longitud de onda muy superior al largo de la estructura.	69
Ilustración 73: Nahuenrew saliendo de un valle de ola cuya longitud de onda es mucho mayor al largo de la estructura.	69
Ilustración 74: Sistema Nahuenrew logra subir la presión del estanque hasta 4[PSI]. ...	70
Ilustración 75: Regreso a tierra firme después de realizada la prueba en el mar. A la izquierda: descarga de la estructura. A la derecha: desarme de la estructura.	71
Ilustración 76: Lugar donde se realizó la prueba. En la imagen izquierda se ve la ruta grabada por el GPS, en la imagen derecha se ve la predicción de olas según el Explorador Marino y se marca el punto donde se estuvo detenido por más tiempo realizando la prueba.	71

1. Introducción

1.1. Motivación

La posibilidad de convertir energía de las olas en energía aprovechable ha inspirado a numerosos inventores. En la década de 1980 había más de mil patentes registradas y este número sigue creciendo marcadamente desde entonces. La primera de este tipo de patentes fue registrada en Francia en el año 1799, por Girard, padre e hijo. En Japón hubo especial desarrollo de este tipo de tecnologías, encabezado por Yoshio Masuda, quien a partir de 1940 desarrolló una boya de navegación energizada con el movimiento de las olas, que en 1965 se comercializó en Japón y luego en USA. En ese entonces el conocimiento teórico del comportamiento de las olas estaba en una etapa temprana [1].

A partir de la crisis del petróleo en los años 1970 se ha ampliado el campo de aplicación de estos aparatos que recolectan energía de las olas del mar para aprovecharla como energía eléctrica con diversos fines. Es así como surgen los llamados Wave Energy Converters (WEC), dedicados exclusivamente a la recolección de energía undívaga² y su transformación a energía eléctrica. Este tipo de energía integra hoy lo que se conoce como Energía Renovable No Convencional (ERNC) y es materia de interés para el mundo contemporáneo dadas las problemáticas de calentamiento global y emisiones contaminantes, consecuencia de la producción energética a base de combustibles fósiles.

Actualmente en Chile existe un marcado aumento en la demanda energética, que va de la mano con el crecimiento económico. Al respecto, el gobierno actual considera como un pilar fundamental del desarrollo energético la incorporación creciente de este tipo de energías (ERNC) en la oferta eléctrica chilena, esto inspirado en la confiabilidad del sistema a largo plazo, el acceso y equidad para todos los chilenos, la visión de las regiones, la promoción de un mercado con mayores grados de competencia y menores precios, la seguridad e independencia energética nacional, la eficiencia y compromiso social, la protección medioambiental, los espacios de integración internacional y la innovación tecnológica, entre otros [2].

Es así que se ha creado en 2008 la ley 20.257, modificada en octubre de 2013 aumentando sus metas. Esta Ley obliga a los generadores convencionales con capacidad instalada superior a 200[MW] a comercializar un 20% de la energía proveniente de fuentes renovables no convencionales o de centrales hidroeléctricas con una potencia inferior a 40[MW], sean propios o contratados a partir del 1 de enero del año 2010. Esto rige para los sistemas SIC y SING. La normativa señala que este porcentaje exigido a las empresas eléctricas se logrará incrementando gradualmente el

² Undívago, ga: que ondea o se mueve como las olas. Fuente: Real Academia Española.

volumen de este tipo de energías, de forma tal que, entre los años 2010 y 2014 sea de 5%, incrementándose en un 0,5% anual a partir del 2015, hasta alcanzar el 10% en el año 2024, para los contratos celebrados con posterioridad al 31 de agosto de 2007 y con anterioridad al 1 de julio de 2013. Para los contratos firmados con posterioridad al 1 de julio de 2013, la obligación aludida será del 5% al año 2013, con incrementos del 1% a partir del año 2014 hasta llegar al 12% el año 2020, e incrementos del 1,5% a partir del año 2021 hasta llegar al 18% el año 2024, y un incremento del 2% al año 2025 para llegar al 20% el año 2025 [3].

Chile cuenta con variados recursos energéticos diferentes a los combustibles fósiles. Últimamente se ha buscado explotar el recurso solar, tanto fotovoltaico y calorífico, eólico y geotérmico, pero existen pocas iniciativas respecto al recurso marino, en particular al undimotriz, a pesar de que Chile posee más de seis mil kilómetros de borde costero con uno de los potenciales energéticos de oleaje más grandes del mundo [4]. En junio de 2013 el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile publicó la primera base de datos del recurso undimotriz de las costas de Chile, con el objetivo de ampliar el conocimiento público del recurso energético presente en las costas de este país, avanzando en la dirección de aumentar y diversificar su matriz energética [5]. Algunas iniciativas concretas son la futura instalación de una planta piloto undimotriz para entregar energía a la planta de osmosis inversa ubicada en Caleta de Hornos por un monto de 250 millones de pesos [6] y la participación de algunas empresas en fondos concursables, como Etymol WEC en el concurso de Inter-American Development Bank ganado en diciembre de 2013 que le aporta U\$100.000 más apoyo en recursos humanos [7], Metalmecánica Ausind limitada en el concurso de innovación del Banco BCI que otorga 200 millones de pesos [4] y el proyecto undimotriz Wilefko que ganó en octubre de 2012 un Empaquetamiento Tecnológico para Nuevo Negocios por parte CORFO por un total de U\$300.000 [8][9]. En la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile no se encuentra más que una iniciativa en esta dirección, desarrollada en la memoria para optar al título de ingeniero civil electricista de Nicolás Bravo publicada en octubre de 2008 [10].

1.2. Objetivos

Este trabajo de título propone los siguientes objetivos:

1.2.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es desarrollar un sistema undívago del tipo atenuador para conversión de energía. Se busca diseñar y construir un sistema que pueda ser sometido a pruebas de funcionamiento para así evaluar su potencial desarrollo futuro a nivel comercial.

1.2.2. Objetivos específicos

Para lograr lo anterior se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar un sistema innovador de bajo costo.
- Lograr que el sistema diseñado resuelva alguno de los problemas actuales de este tipo de tecnologías, en particular el que trata del acoplamiento en fase entre frecuencia natural del sistema con la frecuencia variable de las olas.
- Lograr que el sistema sea modular y que un módulo del sistema sea fácilmente transportable por el usuario.
- Construir el sistema utilizando herramientas presentes en el Laboratorio de Síntesis de Máquinas Inteligentes y en el Laboratorio de Fabricación Digital Fab Lab, de tal manera que pueda ser reproducido.
- Confeccionar protocolo de pruebas para luego someter el sistema a pruebas reales de funcionamiento y cuantificar la energía que almacena.

1.3. Alcance

En este trabajo se desarrolla un sistema undívago cuyas dimensiones no están basadas en una demanda energética determinada, por lo tanto la escala del sistema a construir es 1:1, lo que no quita que al analizar los resultados de las pruebas hechas al sistema se concluya agrandar o disminuir sus dimensiones con el objetivo de mejorar su desempeño.

Por otro lado, este trabajo no contempla hacer una segunda iteración del sistema undívago. Es decir, dados los resultados de la prueba realizada en el mar, éste no se mejorará en este trabajo, sino que quedará como trabajo propuesto.

1.4. Estructura del trabajo

Primero se diseña y construye el equipamiento experimental a utilizar dentro del laboratorio que consiste esencialmente en un generador de olas para el estanque del laboratorio. Luego se construyen modelos a escala de las diversas ideas que se tiene para desarrollar un sistema undívago. Estos modelos se prueban en el estanque de agua del laboratorio. Se elige una idea y se desarrolla el concepto a escala real. Se diseña entonces todas las partes que constituyen el sistema undívago pensando en el ambiente marino. Una vez hecho el diseño se comienza con la construcción. Para eso es necesario escoger un proceso de fabricación de piezas en lotes medianos. Se escoge el proceso que cumpla con las características de bajo costo y corto tiempo de elaboración. Se fabrica la totalidad de las piezas y se compran los materiales necesarios, luego se arma la estructura. Finalmente, se escoge un lugar en la costa chilena y se traslada el sistema undívago completo para realizar la prueba en el mar. Se toma todos los datos posibles y se analizan en Santiago.

2. Antecedentes

El ciclo energético de las olas del mar parte desde que los rayos del sol inciden sobre la Tierra. La energía del sol es almacenada directa o indirectamente en varias formas dentro del sistema marino. Directamente lo hace en forma de calor, e indirectamente como olas y corrientes creadas por las diferencias de temperatura entre las aguas polares y tropicales. La disponibilidad de mucha de esta energía es geográficamente específica. Con las tecnologías disponibles hoy en día es posible aprovechar la energía de las corrientes marinas, de las mareas, de los gradientes de salinidad y de las olas. La forma más visible de la energía del mar está contenida en las olas superficiales las que son ondas transversales o paquetes de energía acarreados desde un lugar a otro. Los sistemas que hoy en día aprovechan la energía de las olas tienen eficiencias de conversión relativamente bajas al ser comparados con otras tecnologías que aprovechan recursos renovables. Mientras muchos de estos sistemas han sido evaluados en pequeña escala, existe un enorme potencial para una contribución a la economía energética mundial y se manifiesta en un continuo interés en el desarrollo de nuevas tecnologías. Los más desarrollados son los sistemas de conversión de energía a partir de las olas y las corrientes marinas.

Las olas son ondas que se desplazan por la superficie de los mares y océanos, son puestas en marcha por el viento, y representan el principal agente modelador de las costas. Su altura y período son funciones de la velocidad del viento, la duración y la lejanía de las aguas sobre la cuales éste sopla. Tienen la ventaja de poseer mayor densidad energética que el viento.

Hay ciertos tipos de olas llamadas catastróficas, las cuales son resultado de condiciones no usuales, tales como tormentas intensas sobre o cerca del océano, las que generan las denominadas marejadas. También están las olas producidas por terremotos y/o derrumbes submarinos denominados tsunamis. Estas olas generalmente producen daños y pérdidas de vidas. No son en este caso foco de estudio para su aprovechamiento energético.

Las olas como energía son un recurso ambientalmente beneficioso y renovable. Los criterios generales para convertir la energía de las olas en electricidad pueden ser categorizados por su ubicación, formas de extracción y conversión. Los tipos de ubicación incluyen aquellas de flotadores en aguas profundas, aguas poco profundas y anclados al lecho marino. Formas de extracción y conversión de la energía incluyen las levas mecánicas, engranajes y palancas, bombas hidráulicas, turbinas neumáticas, columnas de agua oscilante y dispositivos de conexión [10].

2.1. Identificación del recurso

Hay tres puntos clave que juntos hacen sobresalir la energía de las olas como excelente potencial energético en Chile. Por un lado Chile posee 6.435[Km] de borde costero, de los cuales es soberano en una extensión de 200 millas marítimas al oeste desde la línea de marea baja. Esto representa una ventaja comparativa sobre muchos otros países del mundo. Por otro lado, las costas del pacífico sur poseen alta densidad energética comparada con el resto del mundo, como se puede ver en la siguiente Ilustración 1 obtenida de la Wiki The Lovett School. Y el tercer punto es que los lugares de consumo se encuentran cerca de estas costas con alta densidad energética.

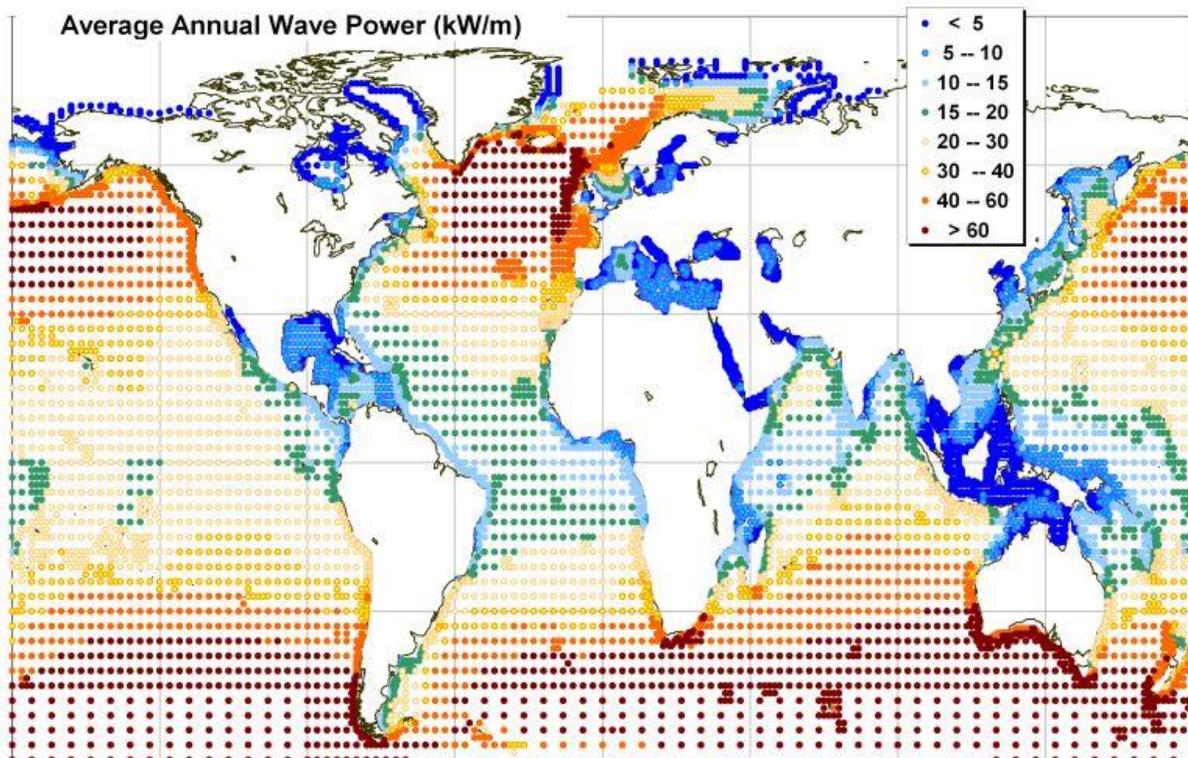


ILUSTRACIÓN 1: PROMEDIO ANUAL DE LA POTENCIA DE LAS OLAS ³

Las dos componentes de energía presentes en las olas son la energía potencial y la cinética. La energía potencial es asociada con la forma o elevación de la ola y la cinética está asociada al movimiento o velocidad de las partículas de agua que la constituye. Para olas regulares se tiene que:

$$E = \frac{\rho g H^2}{8} \quad \text{EC. 1}$$

³ Imagen obtenida de <http://interdisciplinaryenergystudy.wiki.lovett.org/Tidal+Power>

donde E es la energía total por unidad superficial de agua, ρ es la densidad del agua, g es la aceleración de gravedad y H es la altura de la ola.

A partir de las ecuaciones de Navier-Stokes y la ecuación de continuidad se puede deducir para un patrón de olas armónicas y en agua profunda que el movimiento de las partículas de agua en la ola es como una órbita circular y que esta órbita decrece exponencialmente con la profundidad del agua, como se aprecia en Ilustración 2. Para mayor descripción de la derivación de estas ecuaciones ver [11].

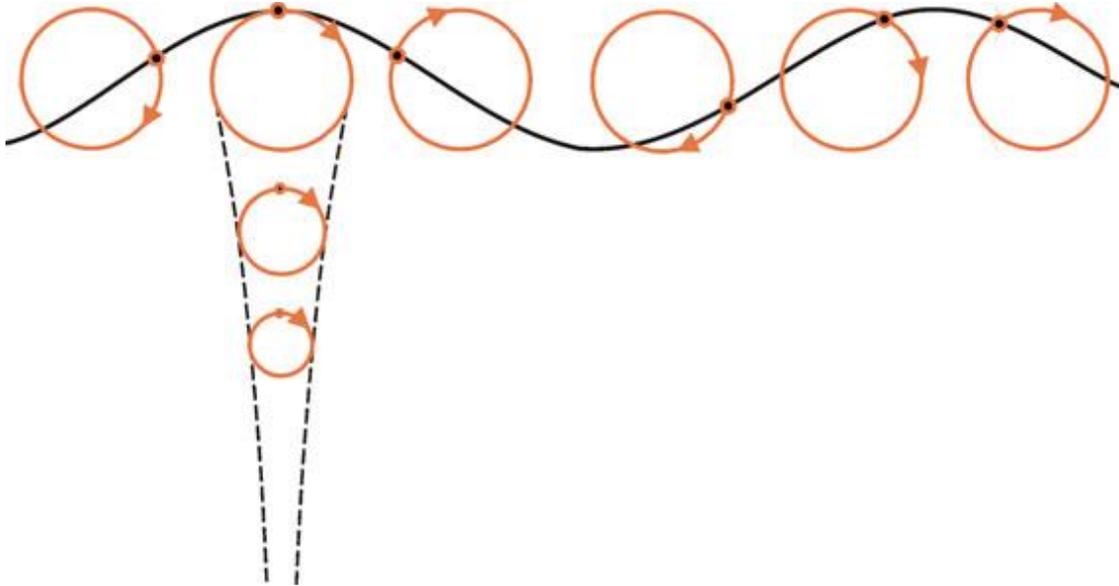


ILUSTRACIÓN 2: EL AGUA EN LAS OLAS DE AGUA PROFUNDA SE MUEVE EN ÓRBITAS CIRCULARES QUE DECRETEN EXPONENCIALMENTE CON LA PROFUNDIDAD.

El parámetro H puede ser tomado como la altura significativa de la ola (H_s) que corresponde a la media aritmética del tercio de las olas más altas de un conjunto de olas [5], comúnmente utilizado por los oceanógrafos, o como el valor cuadrático medio de la elevación de las olas (H_{rms}) lo cual es equivalente a la desviación estándar de la superficie del agua con respecto a su posición principal. En este caso se asume H_s como cuatro veces H_{rms} [12]. Cabe destacar que sobre el 95% de la energía de la ola se encuentra entre la superficie y un cuarto de su longitud de onda, hacia abajo [13].

La relación entre el período (T) y la longitud de la ola (L) está dada por:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad \text{EC. 2}$$

La transferencia de energía de las olas es conocida como flujo de energía. El flujo de energía se comporta diferente en aguas profundas o en aguas poco profundas. Respecto a esto, existe poco consenso en determinar qué quiere decir agua “profunda”.

“Decenas de metros” es una definición, siendo otras “más de 40 metros” o “profundidad que excede un tercio la longitud de la ola” [13].

Las olas de pequeña amplitud en aguas profundas tienen una energía por unidad de onda de:

$$P = E \left(\frac{c}{2} \right) = E \left(\frac{L}{2T} \right) = \frac{\rho g^2 H_{rms}^2 T_e}{4\pi} \left[\frac{W}{m} \right] \approx \frac{1}{2} H_s^2 T_e \left[\frac{kW}{m} \right] \quad \text{EC. 3}$$

donde c es la velocidad de la ola o velocidad de fase. Se distingue T de T_e por la siguiente definición: el período T_e de un espectro de olas caracterizadas por cierto H_{rms} y cierta densidad energética es equivalente al período T de un espectro de olas regulares que tienen el mismo valor de H_{rms} y densidad energética.

Para $H_{rms} = 1[m]$ y $T_e = 10[s]$ en agua profunda, la potencia de la ola es aproximadamente $80[KW]$ por metro lineal de la cresta de la ola [12].

Es importante notar que a medida que la ola se propaga hacia la costa ésta se modifica de una manera compleja debido a efectos en el fondo (refracción, difracción, fricción y rompimiento de la ola) y a interacciones con la geografía de mayor escala como son cabos, golfos, islas, etc. Por estas razones, el recurso energético de las olas en aguas poco profundas (menos de 50 metros de profundidad) se ha caracterizado sólo en zonas específicas donde se han implementado proyectos [1].

Actualmente existe en Chile una herramienta potente para recolectar datos de olas calculados meteorológicamente, desarrollada por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile. Esta herramienta se llama “Explorador de energía marina” y está disponible a través de internet desde junio de 2013 en la página <http://ernc.dgf.uchile.cl/Explorador/Marino/>. Este explorador entrega datos para todo el territorio chileno continental, dentro de 1 km de distancia desde la costa hacia el oeste [5].

2.2. Tecnologías presentes en la actualidad

Hoy en día es posible encontrar más de mil patentes sobre tecnologías WEC, sólo en Japón, América del norte y Europa. A pesar del gran número de patentes, éstas se pueden clasificar en pocas categorías de acuerdo a tres criterios diferentes: ubicación, tipo y principio de funcionamiento. Según la ubicación éstas se agrupan en Dispositivos sobre borde costero, Dispositivos cercanos a la costa y Dispositivos fuera de la costa. Según principio de funcionamiento éstas se pueden agrupar en Columna de Agua Oscilante (Oscillating Water Column, OWC), de Cuerpo Oscilante (Oscillating Bodies) y de Rebalse (Overtopping). Por último, existe tres tipos predominantes de WEC: Atenuador, Absorbedor Puntual y Terminador.

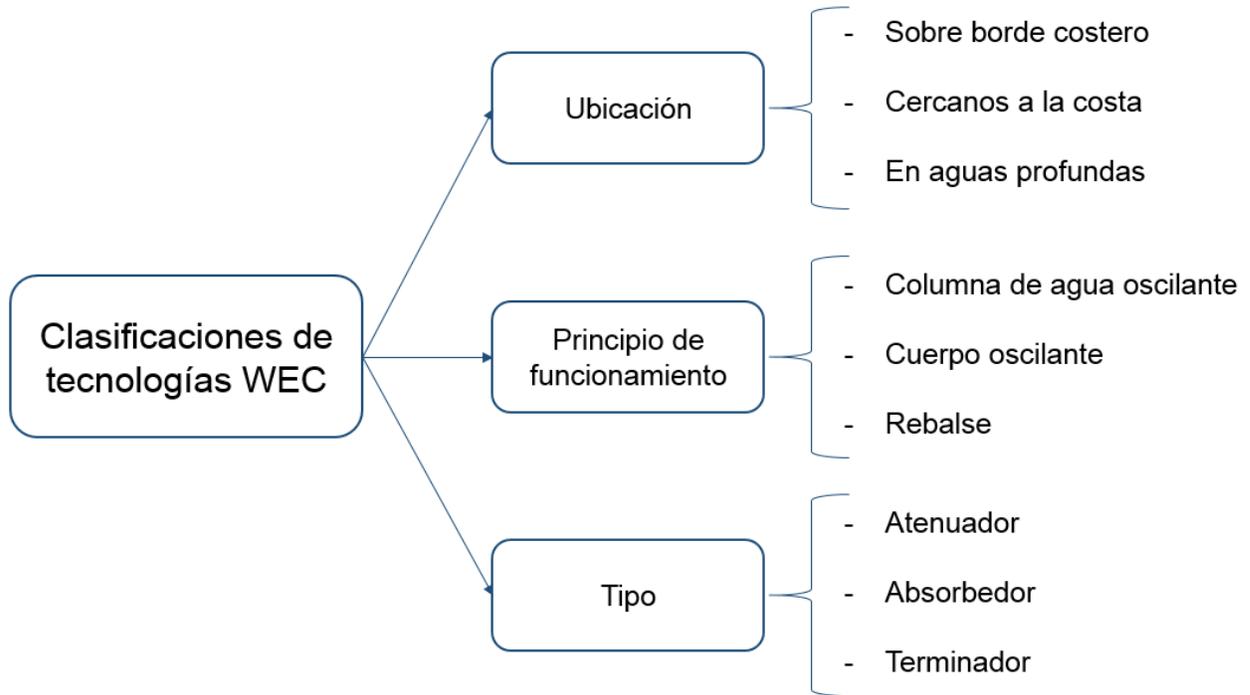


ILUSTRACIÓN 3: DIAGRAMA DE CLASIFICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS WEC.

2.2.1. Clasificación de tecnologías según ubicación

2.2.1.1. *Dispositivos sobre borde costero:*

Estos dispositivos tienen la ventaja de estar cerca del lugar donde se procesa la energía, son fáciles de mantener y, como a medida que las olas entran a la costa atenúan su energía, tienen menos riesgo de ser dañados por condiciones extremas de tiempo. Lo anterior también representa una desventaja en cuanto la energía de las olas que estos aparatos reciben portan menos energía que las olas en agua profunda. Otro aspecto que podría ser un problema son las mareas. Además, por la naturaleza de esta ubicación, existen generalmente requerimientos específicos de cada sitio que incluyen geometría, geología de la costa y preservación del entorno visible, por lo que se dificulta su fabricación en masa.

2.2.1.2. *Dispositivos cercanos a la costa*

Se definen como los dispositivos que se ubican en agua poco profunda. Estos dispositivos están normalmente anclados al suelo marino, lo que otorga una base estacionaria apta contra la cual un cuerpo oscilante puede trabajar. Como en los dispositivos sobre el borde costero, se tiene la misma desventaja, que las olas que llegan a estos lugares han reducido su energía, luego disminuye el potencial de energía que se puede recolectar.

2.2.1.3. Dispositivos fuera de la costa

Estos dispositivos se ubican generalmente en agua profunda. La ventaja de esto es que pueden recolectar mayor cantidad de energía debido al mayor contenido energético de las olas en agua profunda. Sin embargo, estos dispositivos son más difíciles de construir y mantener, además que deben ser diseñados para soportar grandes concentraciones de energía en el caso de condiciones extremas, lo que lleva a un aumento en los costos de producción. A pesar de esto, se argumenta que con olas más poderosas, los dispositivos flotantes en agua profunda ofrecen mejores economías de escala.

2.2.2. Clasificación de tecnologías según principio de funcionamiento

La clasificación según principio de funcionamiento es más compleja de categorizar y se considera como un nivel más lejano de clasificación. Existen ejemplos significativos de algunas tecnologías que están en fase de prototipo de escala final y otras que ya son producto comercializable. La Ilustración 4 resume algunas tecnologías de acuerdo a su principio de funcionamiento. Los ejemplos mostrados no son una lista exhaustiva sino que corresponden a proyectos que han alcanzado el nivel de prototipo o que al menos han sido objeto de extensos esfuerzos en su desarrollo [1].

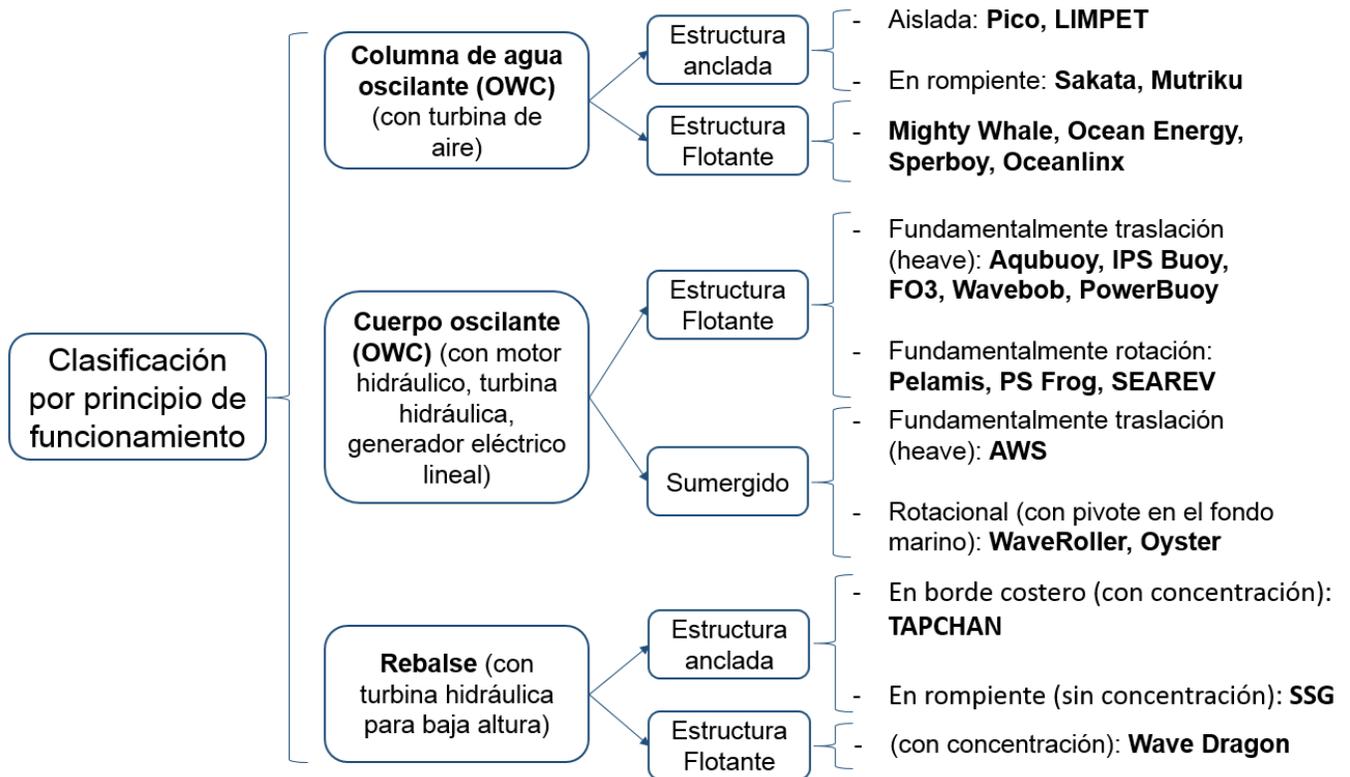


ILUSTRACIÓN 4: DIAGRAMA CLASIFICACIÓN DE ECNOLOGÍAS WEC SEGÚN PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.

2.2.3. Clasificación de tecnologías según tipo

2.2.3.1. Atenuador

Un atenuador yace paralelo a la dirección de avance de la ola y “monta” las olas. Un ejemplo de atenuador es Pelamis, desarrollada por Ocean Power Delivery Ltd. Existe una granja de estas máquinas en Portugal y otra en Escocia. La Ilustración 5.a) es una representación de una granja de Pelamis.

2.2.3.2. Absorbedor puntual

Un absorbedor puntual es un dispositivo de dimensión pequeña en relación a la longitud de la ola. Éste puede consistir en un cuerpo flotante cuyo movimiento es de vaivén hacia arriba y hacia abajo, en la superficie del agua o sumergido, donde el movimiento se debe a diferencias de presión. Debido a su dimensión pequeña, no resulta importante la dirección de la ola. Existen varios ejemplos de este tipo. Uno a nivel comercial es la PowerBuoy, desarrollada por Ocean Power Technology. La Ilustración 5.b) representa una granja de PowerBuoys.

2.2.3.3. Terminador

Estos dispositivos tienen su eje principal paralelo al frente de la ola (perpendicular a la dirección de avance de la ola) y físicamente interceptan la ola. Un ejemplo de terminador es el Salter’s Duck, desarrollado en la Universidad de Edimburgo, que se presenta en la Ilustración 5.c).



ILUSTRACIÓN 5: TECNOLOGÍAS EXISTENTES EN LA ACTUALIDAD DIFERENCIADAS POR MODO DE FUNCIONAMIENTO. A) ATENUADOR; B) ABSORBEDOR; C) TERMINADOR.

2.3. Elementos de transformación de la energía

En todos los casos considerados acá, el producto final es energía eléctrica susceptible de ser integrada a la red de potencia. Esta energía debe generarse en alguna máquina eléctrica, ya sea un generador rotacional (como en aplicaciones minihidro o de viento) o un generador lineal directamente. En el primer caso se requiere una interface mecánica que convierta un movimiento alternativo en movimiento rotacional unidireccional. Las interfaces mecánicas mayormente usadas o propuestas son turbinas de aire, turbinas hidráulicas de alta o baja altura y motores hidráulicos

(movidos por aceite altamente presurizado). En el segundo caso se prescinde de esta interfaz mecánica. Esta solución fue propuesta tempranamente en los años 1970 y ha sido implementada en varios dispositivos ya testeados en el mar, pero no ha logrado superar la etapa de prototipo.

Una característica muy deseable en tecnologías WEC es la capacidad de almacenar energía. Esta característica puede ser provista de diferentes maneras, como la inercia de un volante en turbinas de aire, reservas de agua en turbinas hidráulicas, y acumuladores de gas o circuitos hidráulicos de alta presión (agua y aceite). También se ha concebido el uso de grandes capacitancias eléctricas en conexión con generadores lineales [1].

2.4. Estrategias de control

Dado que el recurso energético de las olas no es regular ni predecible, resulta necesario elaborar estrategias de control que permitan aumentar el aprovechamiento del recurso energético. Como se trata de ondas, se sabe que la mayor transferencia de energía es cuando olas y dispositivo actúan en resonancia. Las estrategias de control utilizadas hoy en día que permiten acoplar la frecuencia natural del dispositivo a la frecuencia variable de las olas son *Phase Control*, *Reactive Phase Control*, *Lutching* y *Unclutching*. La estrategia de Phase Control consiste en actuar directamente sobre el mecanismo que transmite la potencia. En el modelo matemático que estudia la interacción entre ola y sistema WEC, el mecanismo de transmisión de potencia (PTO: Power Take Off) se modela como la suma de fuerzas entre un resorte de constante K y un amortiguador de constante C . La estrategia de Reactive Phase Control consiste en considerar la constante K negativa, lo cual es físicamente impracticable. La estrategia de Lutching consiste en detener el movimiento del sistema WEC en un punto fijo durante algún lapso de tiempo, para luego soltarlo de manera que se acople a la frecuencia de la ola. La estrategia de Unclutching consiste en desconectar la transmisión de potencia dentro del sistema WEC en un punto fijo, para luego conectarla de manera que el régimen de operación del sistema WEC se acople con la frecuencia de la ola.

Para tecnologías WEC del tipo atenuador y de grandes longitudes, como por ejemplo Pelamis, se estudia la posibilidad de reconocer la ola al inicio del sistema para que cuando ésta avance, el sistema pueda acomodarse a la ola en sus puntos finales. Esto no es factible en las tecnologías WEC que absorben puntualmente, a no ser que estén dispuestos en configuración de granja y puedan “conversar” entre ellos.

2.5. Proyectos destacados

En el año 2009 la consultora Garrad Hassan America, Inc realiza un estudio de mercado de las empresas que desarrollan tecnología WEC alrededor del mundo,

solicitado por la empresa Oregon Wave Energy Trust. El estudio identifica a 73 desarrolladores de tecnología WEC agrupados en 20 nacionalidades. Para seleccionar aquellos emprendimientos que de alguna manera lideran el desarrollo se utiliza criterios tales como:

- Desarrollo del proyecto
 - Historia de la compañía (>5 años)
 - Personal (>10 a tiempo completo)
 - Inversión (>U\$1,5M)
 - Inversión (>U\$15M)
- Clasificación de la tecnología
 - Power Take-Off (PTO)
 - Estrategia de despliegue (Deployment)
 - Estrategia de operación y mantenimiento (O&M)
- Evidencia de programa de modelamiento
 - Modelamiento numérico
 - Modelamiento experimental
 - Prototipo desplegado en el mar (escala >1:5)
- Diseño escala 1:1
 - Verificación independiente
 - Prototipo escala 1:1

Si más de cinco de estos criterios se satisfacen con evidencia de actividad, el concepto es incluido en una pequeña lista de desarrolladores de tecnología y se estudian más detalladamente. Esta lista selecciona 22 emprendimientos, los cuales siguen el siguiente patrón estadístico:

TABLA 1:
RESUMEN ESTADÍSTICO DE DESARROLLADORES DE TECNOLOGÍA WEC EN 2009

Número total de desarrolladores	22
Nacionalidades	13
Cantidad promedio de subcategorías realizadas	7,45 de 12
Desviación estándar	2,05
○ Historia de la compañía (>5 años)	77,27%
○ Personal (>10 a tiempo completo)	54,55%
○ Inversión (>U\$1,5M)	29,17%
○ Inversión (>U\$15M)	45,45%
○ Power Take-Off (PTO)	86,36%
○ Estrategia de despliegue (Deployment)	36,36%
○ Estrategia de operación y mantenimiento (O&M)	13,64%
○ Modelamiento numérico	81,82%
○ Modelamiento experimental	100%
○ Prototipo desplegado en el mar (escala >1:5)	68,18%
○ Verificación independiente	29,55%
○ Prototipo escala 1:1	27,27%

Los nombres de las compañías y sus respectivos conceptos se detallan en la Tabla 2.

TABLA 2:
22 DESARROLLADORES LÍDERES DE TECNOLOGÍA WEC EN 2009

Compañía	Dispositivo/Concepto	Nacionalidad
Aquamarine Power Ltd	Oyster	UK
AW-Energy Oy	WaveRoller	Finlandia
AWS Ocean Energy Ltd	AWS	UK
Carnegie Corporation Ltd	CETO	Australia
Columbia Power Technologies LLC	SeaBeav I	USA
Ecofys BV	Wave Rotor	Holanda
Ecole Centrale de Nantes	SEAREV	Francia
Fred Olsen Renewables	Buldra	Noruega
Hidroflot SL	Hidroflot	España
MARTIFER Energy Systems SA	FLOW	Portugal
Ocean Energy Ltd	OE Buoy	Irlanda
Oceanlinx Ltd	Oceanlinx OWX	Australia
Ocean Power Technologies Inc	PowerBuoy	USA
ORECon Ltd	MRC1000	UK
Pelamis Wave Power Ltd	Pelamis	UK
Seabased AB	Seabased Point Absorber	Suecia
SyncWave Energy Inc.	SyncWave	Canadá
Trident Energy Ltd	Trident Energy Converter	UK
Wave Dragon ApS	Wave Dragon	Dinamarca/UK
Wavebob Ltd	Wavebob	Irlanda
Wave Energy Centre	Pico OWC	Portugal
Wavegen (Voith Siemens Hydro Power Generation)	Limpet	UK

Como se menciona en la Tabla 1 el 68,18% de los 22 conceptos listados ha alcanzado la fase de prueba en el mar. Los 15 desarrolladores que cumplen este criterio son:

- Aquamarine Power,
- AW-Energy,
- AWS Ocean Energy (en la versión AWS Mk I),
- CETO,
- Columbia Power Technologies,
- Fred Olsen Renewables,
- Ocean Energy,
- Oceanlinx,
- Ocean Power Technologies,
- Pelamis Wave Power,

- Seabased,
- Wavebob,
- Wave Dragon,
- Wavegen,
- Wave Energy Centre – Pico OWC.

Este porcentaje se reduce a 27,27% si se limita a los desarrolladores que han alcanzado el nivel de escala 1:1 (con conexión a la red eléctrica). Las seis compañías desarrolladoras que caben en esta categoría son:

- AWS Ocean Energy (en la versión AWS Mk I),
- Oceanlinx,
- Ocean Power Technologies,
- Pelamis Wave Power,
- Wavegen,
- Wave Energy Centre – Pico OWC.

Por ser estos últimos seis emprendimientos los más avanzados en la extracción de la energía de las olas se hace una presentación resumida pero detallada de cada uno de ellos.

2.5.1. AWS Ocean Energy Ltd

Nombre del sistema: AWS (Archimedes Wave Swing)

Clasificación: Absorbedor puntual sumergido anclado en aguas profundas

Sitio web: www.awsoccean.com

Historia: La compañía fue fundada en el año 2004 para desarrollar el sistema AWS. Situada en Escocia, construye bajo el liderazgo de Teamwork Technology BV, compañía holandesa responsable del desarrollo del proyecto desde su concepción en 1994 hasta la prueba del prototipo escala 1:1 en las costas de Portugal en 2004. Se realizaron pruebas a modelos escala 1:50 y 1:20 en HMRC (University College Cork) y WL Delft Hydraulics, respectivamente. Amplias simulaciones numéricas fueron llevadas a cabo en IST (Technical University Lisbon). En 1997 se forma AWS BV, de la mezcla de NUON, ECN, Delft Hydraulics, Teamwork Technology e inversionistas privados. En 1999 el diseño de AWS ya estaba listo. La planta piloto, pensada para 2[MW], fue ensamblada en Rumania, con dos agregados importantes sobre el concepto original: un pontón usado como soporte para las operaciones bajo el agua y una estructura guía vertical para ayudar el movimiento de los flotadores. Ambas características fueron pensadas para agregar control adicional al operar con el prototipo. Antes de la operación exitosa de sumergir el sistema en 2004 hubo dos intentos fallidos. Luego, la planta piloto fue probada bajo diversos estados del mar y condiciones de operación.

Principio de funcionamiento: La planta pilote AWS consiste en una cámara de aire fijada al fondo marino y abierta al cielo (el silo), cerrada por otro cilindro (el flotador). Se crea una cámara de aire entre los dos cilindros la cual no permite entrada de agua al silo. El flotador se puede mover hacia arriba y abajo, debido a los cambios de presión que producen las olas que pasan sobre el sistema. Sincronizando la frecuencia del sistema con la frecuencia predominante del patrón de olas es posible hacer la carrera del flotador más larga que la altura de la ola. En la planta piloto AWS, el actuador incluye un generador lineal magneto-permanente, pero el nuevo diseño de AWS Ocean utiliza aceite hidráulico altamente presurizado como etapa anterior a la generación de energía eléctrica. Otra diferencia se encuentra en la conexión del sistema con el fondo marino, pero el resto del mecanismo de conversión de energía se mantiene igual.

Hitos importantes: Conexión a la red eléctrica de un prototipo escala 1:1 de 2[MW] en la costa de Póvoa de Varzim (Portugal) en 2004; establecimiento de AWS Ocean Ltd, situada en Inverness, Escocia; portafolio de inversionistas incluyendo a RAB Capital plc, Isleburn Group, Tersus Energy plc, STV Fund y Tudor Group; subvención de U\$3,5M por parte del Gobierno Escocés para el despliegue de un prototipo de 250[kW] en EMEC⁴.



ILUSTRACIÓN 6: SISTEMA AWS I EN FUNCIONAMIENTO EN EL MAR.

⁴ EMEC: European Marine Energy Centre.

2.5.2. Oceanlinx Ltd

Nombre del sistema: Oceanlinx OWC

Clasificación: Columna de agua oscilante cercano a la costa anclado al fondo

Sitio web: www.oceanlinx.com

Historia: Anteriormente conocida como Energetech Australia Pty Ltd, la compañía fue fundada en 1997 por el Dr. Tom Denniss. Creció alrededor de los U\$5,8M hacia 2007 con la importante colaboración de tres grupos de inversionistas europeos situados en Alemania especializados en tecnología energética innovadora RWE Dynamics. A comienzos del 2007 cambió su nombre y creció por sobre los U\$9,9M.

Principio de funcionamiento: es similar a los sistemas de columna de agua oscilante anclados al fondo marino diseñados para el borde costero (las olas que pasan sobre el sistema presurizan y rarifican la columna de agua dentro de la cámara y un volumen de aire es forzado a pasar a través de una turbina). La diferencia con otros sistemas OWC es el tipo de turbina: Oceanlinx desarrolló una innovadora turbina (turbina Denniss-Auld) la cual, con ángulos de álabes variables, busca optimizar la eficiencia de la planta. Se ha concebido también una versión para desalinización.

Hitos importantes: Desarrollo, construcción y prueba de una innovadora turbina (turbina Denniss-Auld); despliegue y operación de una demostración de 300[kW] en el puerto de Kembla; venta del 60% de la compañía a New Energy Fund (Portugal).



ILUSTRACIÓN 7: SISTEMA OCEANLINX OWC FUNCIONANDO EN EL MAR.

2.5.3. Ocean Power Technologies Ltd

Nombre del sistema: PowerBuoy

Clasificación: Absorbedor puntual flotante en aguas profundas

Sitio web: www.oceanpowertechnologies.com

Historia: Ocean Power Technologies fue formado en 1994 para desarrollar la tecnología PowerBuoy. Desde 1997 se han realizado viajes marinos en las costas de New Jersey. La tecnología está dentro de las que alcanzan un nivel pre-comercial; ejemplo reciente

de ello son las PowerBuoys de 40[kW] instaladas en Hawaii y New Jersey. La compañía Ocean Power Technologies salió a flote en el mercado London Stock Exchange's AIM en octubre de 2003 siguiendo una exitosa IPO⁵ y se comercia en el mercado AIM bajo el símbolo "OPT". La compañía completó su IPO en Estados Unidos para enlistarse luego en Nasdaq en abril de 2007 (dentro del cual ha crecido sobre los U\$90M) y se comercializa en Nasdaq bajo el símbolo de "OPTT".

OPT ha comenzado la fase inicial de instalación de una granja de 1,39[MW] de potencia en la costa norte de España. El proyecto es una unión aventurada con la fábrica española Iberdrola SA. Se planea una planta de demostración escala 1:1 de capacidad 5[MW] en las aguas de UK.

Principio de funcionamiento: Absorbedor puntual de movimiento ascendente y descendente que reacciona contra el fondo del mar. Se ha hecho público que el actuador funciona con aceite hidráulico, y que la potencia de cada prototipo es 10, 40 y 100[kW].

Hitos importantes: Gana una subvención de U\$1M por parte del Ejecutivo Escocés para la construcción, instalación y prueba en ambiente marino de un prototipo de 150[kW] de potencia; seleccionado para ocupar una posición en el proyecto South West Wave Hub con la instalación de una estación de 5[MW]; firma de contrato con Iberdrola SA para la construcción e instalación de una granja de 1,25[MW] de capacidad en la costa norte de España; firma de contrato con Total S.A. (Francia) para desarrollar una estación en la costa oeste de Francia; instalación de una PowerBuoy de 40[kW] de potencia en Tuckerton, New Jersey, como parte del programa New Jersey Board of Public Utilities Renewable Energy and Economic Development; adicionalmente, OPT ha logrado un acuerdo con PNGC, una cooperativa de generación de potencia del noroeste de Estados Unidos, para el despliegue de una conexión con la red eléctrica en Reedsport, Oregon, Estados Unidos.

⁵ IPO: Initial Public Offering.



ILUSTRACIÓN 8: POWERBUOY FUNCIONANDO EN EL MAR.

2.5.4. Pelamis Wave Power Ltd

Nombre del sistema: Pelamis

Clasificación: Atenuador flotante en aguas profundas

Sitio web: www.pelamiswave.com

Historia: Pelamis Wave Power Ltd (PWP) fue fundada en 1998 bajo el nombre Ocean Power Delivery Ltd. Desde su creación ha sido su único objetivo el desarrollo del sistema undívago Pelamis y ha seguido un riguroso programa de modelación numérica y experimental. Este programa condujo a una demostración sobre la costa de un módulo escala 1:1 en 2002 y luego a la construcción y despliegue de un prototipo completo escala 1:1 en 2004 en EMEC. PWP recibió la primera orden de máquinas Pelamis en 2005 por parte de un consorcio portugués liderado por Enersis. El prototipo escala 1:1 fue modificado en 2006 lo que crea una nueva generación de máquinas y desde entonces ha sido probado en EMEC y en el mar. Los resultados del prototipo escala 1:1 permitieron la validación de las simulaciones numéricas sobre la misma escala. La compañía se ha reestructurado con el nombramiento de un nuevo CEO y ahora cuenta con más de 70 miembros en su personal. A la fecha PWP ha recibido más de U\$66M de inversiones privadas y ha recibido prestigiosos premios.

Principio de funcionamiento: Pelamis es una estructura articulada semi-sumergida compuesta de secciones cilíndricas unidas por bisagras que es sostenida por un sistema de anclaje dócil, el cual permite a la máquina alinearse por sí misma perpendicular al frente de olas con ayuda de aletas (toma referencia abarcando crestas de olas sucesivas). A medida que las olas viajan a lo largo de la máquina éstas causan que la estructura se articule rotando en las bisagras. Este movimiento inducido es resistido por presión hidráulica de aceite altamente comprimido que circula a través motores hidráulicos en cantidades discretas y suaves. Los motores hidráulicos mueven

generadores eléctricos para producir electricidad. La potencia generada en todas las bisagras es conducida al fondo marino por medio de un solo cable umbilical.

Hitos importantes: Construcción y prueba de un módulo de conversión escala 1:1 en 2002; construcción, instalación y prueba de un prototipo escala 1:1 en 2004; primera orden comercial de Enersis SGPS en 2005; anuncio de fondos de parte del gobierno escocés por más de U\$6,6M para una granja de Pelamis (4 máquinas) en EMEC, 2007; primera máquina P-2 (segunda generación) a escala para E-on en 2009.



ILUSTRACIÓN 9: PELAMIS FUNCIONANDO EN EMEC.

2.5.5. Wavegen

Nombre del sistema: LIMPET (Land Installed Marine Power Energy Transmitter)

Clasificación: OWC sobre la costa

Sitio web: www.wavegen.co.uk

Historia: Inicialmente llamada Applied Research & Technology Ltd, Wavegen ha ido desarrollando proyectos undívagos desde 1990. Proyectos destacados con una planta piloto OWC de 75[kW] instalada en Islay y LIMPET, inicialmente pensada para una capacidad de 500[kW] pero subsecuentemente reducida a la mitad pues se hizo claro que la captura de potencia neumática había sido sobreestimada en la etapa de diseño. En 2005 Wavegen fue adquirida por Voith Siemens Hydro (Alemania). Proyectos más recientes incluyen una planta OWC de 300[kW] en el norte de España, encargada por

Basque Energy Board, Ente Vasco de Energía (EVE), y otro proyecto con npower Renewables off Lewis (Escocia).

Principio de funcionamiento: Mismo principio de otros sistemas OWC (Oceanlinx por ejemplo). Se han probado diferentes tipos y configuraciones de turbinas.

Hitos importantes: Récord de monitoreo sobre LIMPET; adquisición de la compañía por Voith Siemens Hydro; proyectos con EVE (Mutriku) y npower (Siadar).



ILUSTRACIÓN 10: LIMPET INSTALADA Y FUNCIONANDO EN AMBIENTE MARINO.

2.5.6. Wave Energy Centre

Nombre del sistema: PICO OWC

Clasificación: OWC sobre la costa

Sitio web: www.pico-owc.net

Historia: El Wave Energy Centre (WavEC) es una organización sin fines de lucro fundada en 2003 que promueve la energía de las olas en Portugal. Tiene diversos

Diseño y construcción de sistema undívago para la conversión de energía.

miembros, incluyendo a EDP (Energías de Portugal) y EDA, su filial en las Islas Azores. La planta Pico OWC, también conocida como la European Pilot Plant, fue construida en 1998 con fondos de la Unión Europea pero debido a diversos problemas de construcción y operación funcionó raramente hasta 2004. Luego fue sometida a un programa de reconstrucción patrocinado por el gobierno portugués y desde entonces ha funcionado exitosamente durante períodos cortos de prueba, entregando electricidad (intermitentemente) a la red eléctrica de Azores.

Principio de funcionamiento: Mismo principio de otros sistemas OWC (Oceanlinx por ejemplo). Se han probado diferentes tipos y configuraciones de turbinas.

Hitos importantes: Primera planta piloto europea; programa de reconstrucción financiado con una subvención DEMTEC (del gobierno portugués) [14].



ILUSTRACIÓN 11: PICO OWC INSTALADA Y FUNCIONANDO EN AMBIENTE MARINO.

Es importante notar que para todos los casos mencionados los costos de inversión son altos respecto a las tecnologías clásicas de producción de energía. Dependiendo del caso, la inversión puede duplicar o triplicar el costo de inversión de una central térmica de potencia (medida en $[\$/kW]$). La ventaja de estas tecnologías y de todas las tecnologías ERNC es que el combustible es “gratis” lo que permite recuperar la inversión a largo plazo y obtener utilidades.

Otro punto importante a destacar es que la construcción, instalación y mantenimiento de estas máquinas WEC requiere de instalaciones y herramientas

adecuadas, lo que podría dificultar su producción en países en vías de desarrollo. Del estudio se desprende que este tipo de tecnología la producen sólo países desarrollados.

2.6. Potencia de un aerogenerador

Los aerogeneradores se diseñan para operar dentro de ciertos límites de velocidad. Existe una velocidad mínima de puesta en marcha para el aerogenerador, un rango de velocidades del viento donde no hay ganancia en potencia y una velocidad límite a la cual el aerogenerador deja de funcionar como generador y comienza a funcionar como motor si sigue conectado (consumiendo energía del sistema). Gráficamente esto se conoce como la curva de potencia de un aerogenerador.

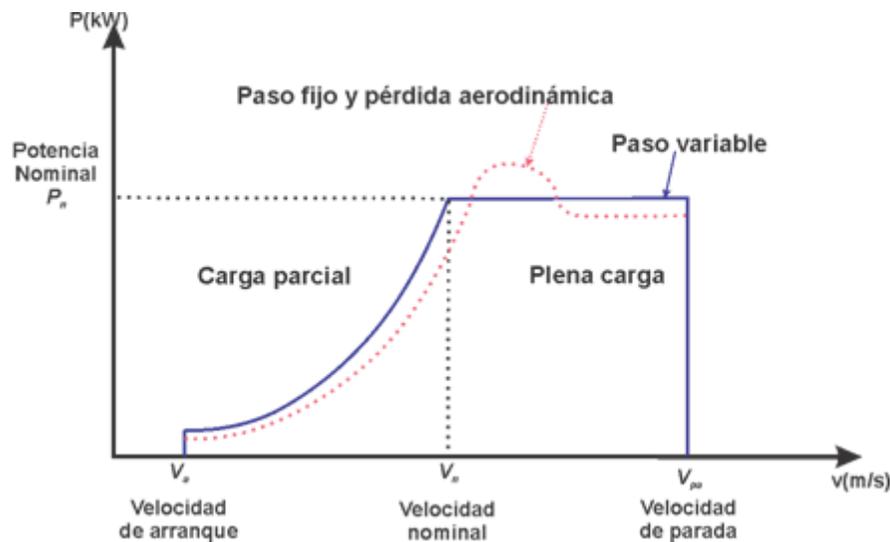


ILUSTRACIÓN 12: CURVA DE POTENCIA DE UN AEROGENERADOR [15].

Normalmente, la velocidad de arranque para los aerogeneradores modernos está en torno a los 5[m/s], la velocidad nominal entre los 10[m/s] y 15[m/s] y la velocidad de parada en torno a los 25[m/s].

Además, existe una diferencia entre la potencia a la entrada y la salida (la potencia útil) del aerogenerador. La potencia a la entrada es una función que depende de la velocidad del viento al cubo, de la sección circular que cubren las aspas del rotor y de la densidad del aire. A temperatura ambiente se toma la densidad del aire igual a 1,25[kg/m³].

$$p_{entrada} = \frac{1}{2} \rho * v^3 * \pi r^2 \quad \text{EC. 4}$$

Para calcular la potencia de salida o potencia útil de la turbina debe considerarse que existe un límite máximo equivalente al 59% de la potencia de entrada. Este límite se conoce como la Ley de Betz y considera una turbina ideal [16].

3. Equipamiento experimental

3.1. Generador de olas

El laboratorio de Síntesis de Máquinas Inteligentes del Dimec cuenta con un estanque de $0,136[m^3]$ donde se ha instalado un generador de olas. El generador de olas cumple la función de permitir probar diferentes modelos a escala de sistemas undívagos. Con esto se confirman o desechan ideas y conceptos físicos de funcionamiento. El costo total del generador de olas fue de \$54.500.

Para la implementación del generador de olas se utilizó un motor DC de $12[V]$, $2[A]$ máx., bajas revoluciones y alto torque, una correa dentada, dos poleas y un carro de movimiento vertical ascendente y descendente que es el que genera las olas. Este carro se guía por dos pilares de acero inoxidable. Para controlar el movimiento del carro se debe controlar el giro del motor con ayuda de un puente H. El puente H se controla mediante de un Arduino, el cual permite además controlar la amplitud y período del movimiento del carro a través del computador. El Puente H es un controlador de motor DC dual, de capacidad máxima de $2[A]$.

El diseño del generador de olas está basado en el carro de la impresora Fab@Home. El generador de olas es una estructura independiente del estanque por lo que es fácilmente montable y desmontable. En la Ilustración 13 se aprecia un modelo virtual hecho en SolidWorks del generador de olas montado en el estanque.

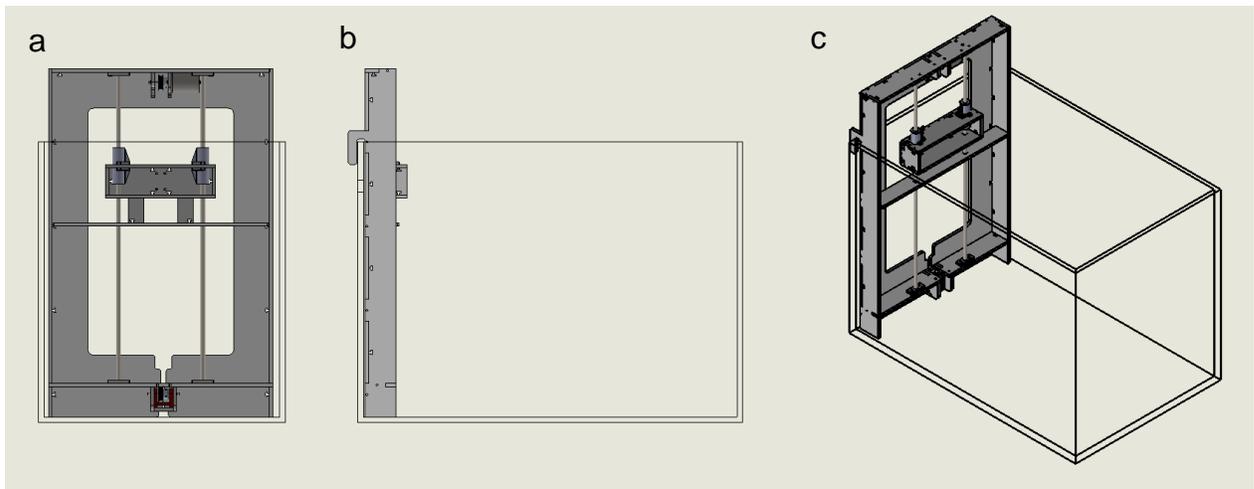


ILUSTRACIÓN 13: MODELO EN SOLIDWORKS DEL GENERADOR DE OLAS MONTADO EN EL ESTANQUE.

El generador de olas instalado en el estanque y con todo lo necesario para funcionar se aprecia en la Ilustración 14. En esta Ilustración se observa que para alimentar el motor se utiliza una fuente de poder, la que permite monitorear visualmente el consumo de voltaje y corriente del sistema.

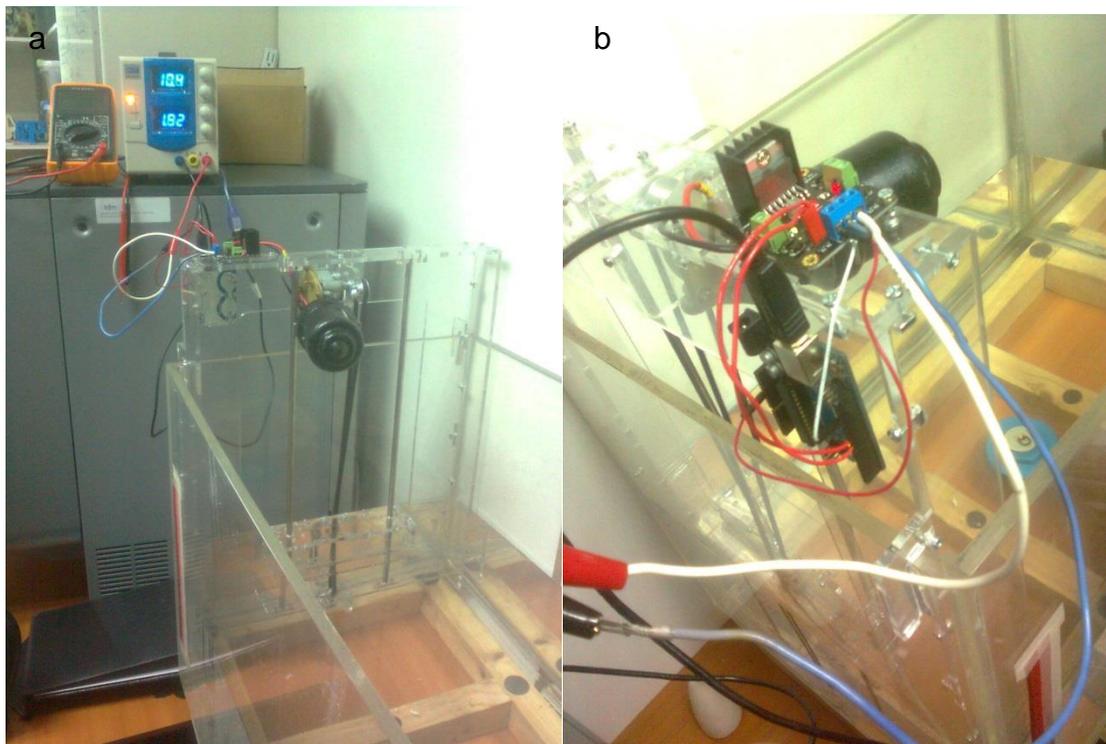


ILUSTRACIÓN 14: GENERADOR DE OLAS IMPLEMENTADO EN EL ESTANQUE.

Para monitorear con mayor certeza el consumo energético del sistema se pueden utilizar sensores conectados a la misma placa Arduino con la que se controla el puente H. Monitorear el consumo de potencia del sistema permite estimar la potencia de las olas generadas, para luego estudiar el porcentaje de potencia absorbida por el modelo a escala de sistema undívago.

Los planos de corte del generador de olas y el código utilizado para controlar el puente H se adjuntan en los Anexos.

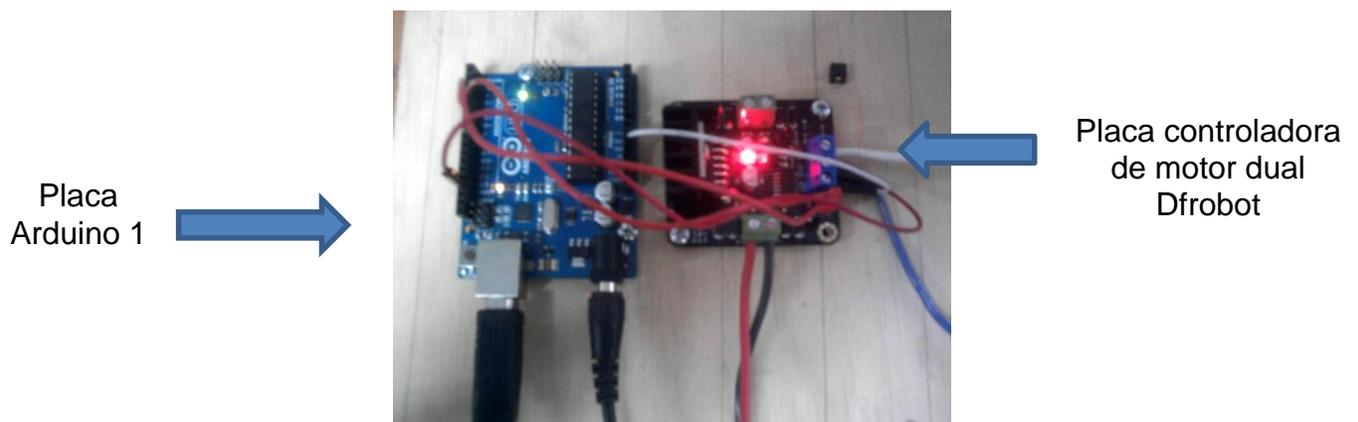


ILUSTRACIÓN 15: ELECTRÓNICA DE CONTROL PARA MOTOR DC DEL GENERADOR DE OLAS.

4. Diseño de componentes del sistema undívago

El sistema undívago construido es del tipo atenuador que se ubica aguas adentro y su principio de funcionamiento es de cuerpo oscilante. El movimiento relativo del sistema permite mover pistones que comprimen masas de aire, las que se acumulan en uno o varios tanques. El aire presurizado puede hacerse pasar a través de una turbina de aire o puede utilizarse directamente como aire comprimido. El tanque acumulador permite además acoplar varias unidades de sistema undívago, ajustándose así a demandas de potencia específicas.

4.1. Diseño de la estructura

Se diseñaron estructuras móviles ensamblables capaces de flotar lo más cerca a la superficie. El movimiento relativo entre cada una de estas estructuras es lo que se aprovecha para extraer energía. La Ilustración 16 muestra el diseño de la estructura y cómo ésta se ensambla con otras estructuras. En la Ilustración se aprecia también el movimiento permitido. La estructura consta de una pirámide de base cuadrada. Los parámetros geométricos que se ajustan al movimiento requerido son el ángulo de elevación y la base de la pirámide. El parámetro físico que permite ajustarse a la energía entregada por el agua es la masa del sistema, dado lo cual podría variarse el ancho de las columnas o el material.

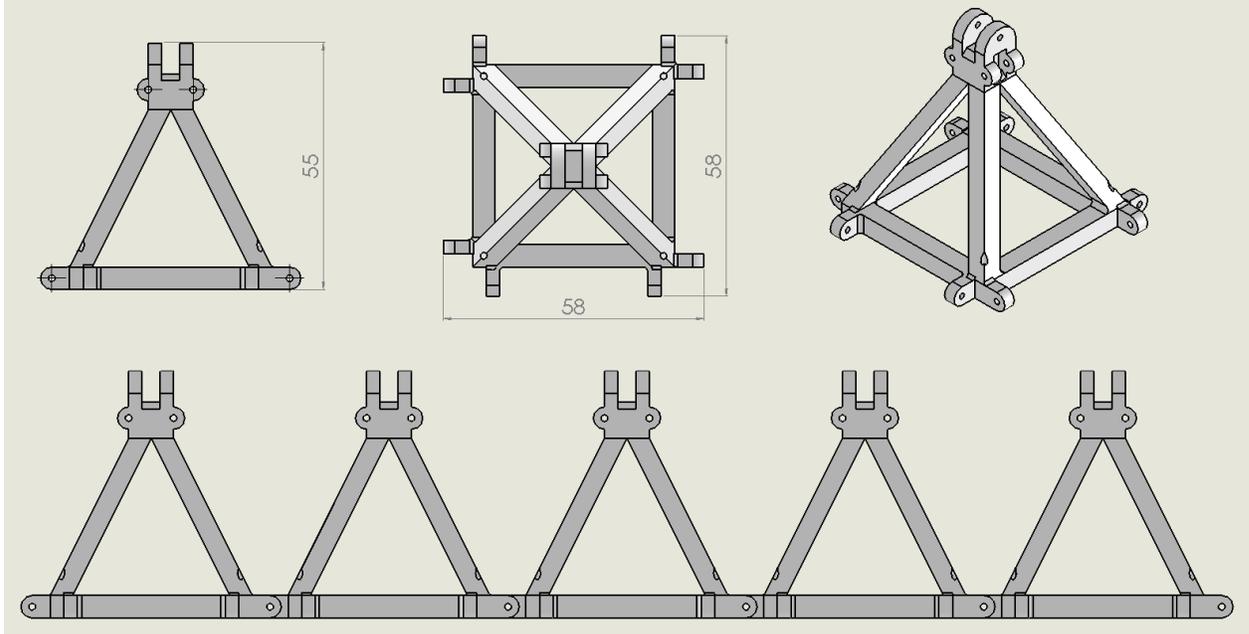


ILUSTRACIÓN 16: DISEÑO DE SISTEMA UNDÍVAGO, DIMENSIONES EN MM.

La estructura puede flotar de dos maneras diferentes: una forma es con las puntas de las pirámides hacia arriba y la otra manera es al revés. Por otro lado, independiente de la manera elegida para que la estructura flote, se debe procurar que

la estructura no se de vuelta por causa de las olas. Para esto es necesario considerar la razón de aspecto del sistema completo, de tal manera que el sistema flote en un punto de equilibrio estable.

Un modelo a escala del sistema undívago se presenta en la Ilustración 17. En esta Ilustración se aprecia la estructura estirada y los movimientos que el sistema permite. Para mantener el sistema a flote en la superficie se utiliza esferas de poliestireno expandido, que reemplazan a los flotadores del sistema final.

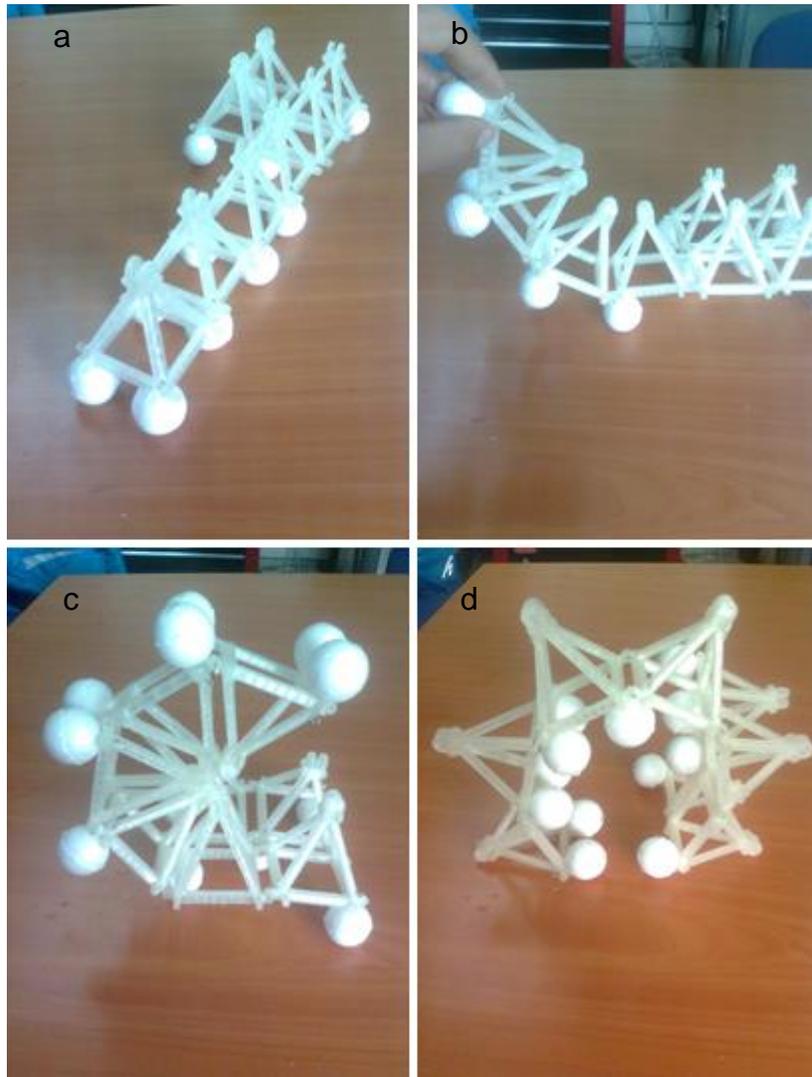


ILUSTRACIÓN 17: MODELO A ESCALA DE SISTEMA UNDÍVAGO: A) SISTEMA ESTIRADO, B) SISTEMA COMPRIMIÉNDOSE, C) SISTEMA TOTALMENTE COMPRIMIDO, D) SISTEMA TOTALMENTE ESTIRADO.

Al introducir el modelo a escala al estanque del laboratorio y generar olas se observa que el sistema se comporta mejor flotando con las puntas de las pirámides hacia abajo.

Para estudiar el comportamiento del sistema libre (sin el absorbedor instalado) se modela como sigue, con las puntas de las pirámides apuntando hacia abajo:

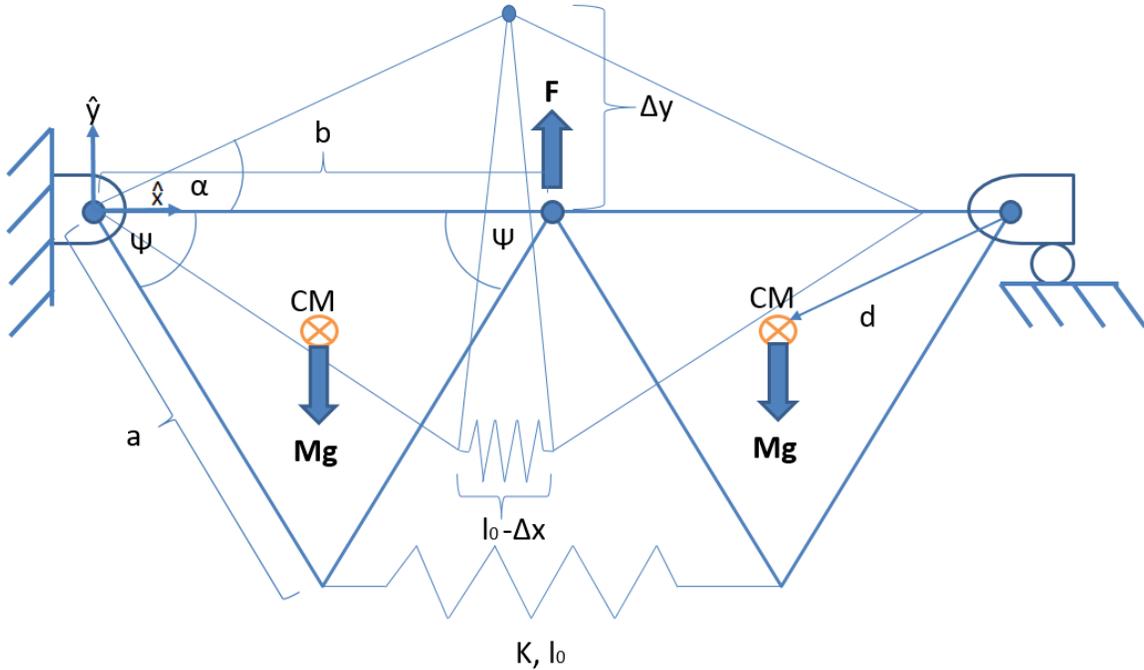


ILUSTRACIÓN 18: ESQUEMA DEL SISTEMA LIBRE.

$$\Delta y_{CM} = d \cdot \sin(\alpha) \quad \text{EC. 5}$$

$$\Delta x = 2\sqrt{2} \cdot a \sqrt{1 - \cos(\alpha)} \cdot \sin\left(\psi - \frac{\alpha}{2}\right) \quad \text{EC. 6}$$

$$\Delta y = b \cdot \sin(\alpha) \quad \text{EC. 7}$$

$$T = 2 \cdot \left(\frac{1}{2} M(d\dot{\alpha})^2\right) + 2 \cdot \left(\frac{1}{2} I\dot{\alpha}^2\right) \quad \text{EC. 8}$$

$$U = \frac{1}{2} K(l_0 - \Delta x)^2 + 2Mg\Delta y_{CM} \quad \text{EC. 9}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta \dot{\alpha}}\right) - \frac{\delta T}{\delta \alpha} + \frac{\delta U}{\delta \alpha} = \frac{\delta W}{\delta \alpha} \quad \text{EC. 10}$$

$$W = F \cdot \Delta y \quad \text{EC. 11}$$

$$\bullet \quad \frac{\delta T}{\delta \dot{\alpha}} = 2Md\dot{\alpha} + 2I\dot{\alpha} = 2\dot{\alpha}(Md + I) \Rightarrow \frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta \dot{\alpha}}\right) = 2(Md + I)\ddot{\alpha} \quad \text{EC. 12}$$

$$\bullet \quad \frac{\delta T}{\delta \alpha} = 0 \quad \text{EC. 13}$$

$$\bullet \quad \frac{\delta U}{\delta \alpha} = 2Mgd \cos(\alpha) + K \left(l_0 - 2\sqrt{2}a\sqrt{1 - \cos(\alpha)} \sin\left(\psi - \frac{\alpha}{2}\right) \right) \cdot \left(\frac{\sqrt{2}a \sin\left(\psi - \frac{\alpha}{2}\right) \sin(\alpha)}{\sqrt{1 - \cos(\alpha)}} - \sqrt{2}a \cos\left(\psi - \frac{\alpha}{2}\right) \sqrt{1 - \cos(\alpha)} \right) \quad \text{EC. 14}$$

$$\bullet \quad W = F \cdot \Delta y = F \cdot b \sin(\alpha); \text{ Sea } F := F_0 \sin(\omega t) \quad \text{EC. 15}$$

$$\Rightarrow W = F_0 \sin(\omega t) b \sin(\alpha) \Rightarrow \frac{\delta W}{\delta \alpha} = F_0 \sin(\omega t) b \cos(\alpha) \quad \text{EC. 16}$$

$$\begin{aligned}
 &\Rightarrow 2(Md + I)\ddot{\alpha} + 2Mgd \cos(\alpha) \\
 &\quad + K \left(l_0 - 2\sqrt{2}a\sqrt{1 - \cos(\alpha)} \sin\left(\Psi - \frac{\alpha}{2}\right) \right) \\
 &\quad \cdot \left(\frac{\sqrt{2}a \sin\left(\Psi - \frac{\alpha}{2}\right) \sin(\alpha)}{\sqrt{1 - \cos(\alpha)}} \right) \\
 &\quad - \sqrt{2}a \cos\left(\Psi - \frac{\alpha}{2}\right) \sqrt{1 - \cos \alpha} \Big) \\
 &= F_0 b \sin(\omega t) \cos(\alpha)
 \end{aligned}
 \tag{EC. 17}$$

lo que entrega una ecuación diferencial de segundo orden para alfa. Esta ecuación representa la ecuación de movimiento del sistema libre. Al resolver esta ecuación se encuentra la relación entre rotación de cada estructura en función de la forma y fuerza de la ola. El resorte en este caso representa el empuje del agua sobre el sistema.

La demostración de la relación entre ángulo de rotación y contracción del resorte es como sigue:

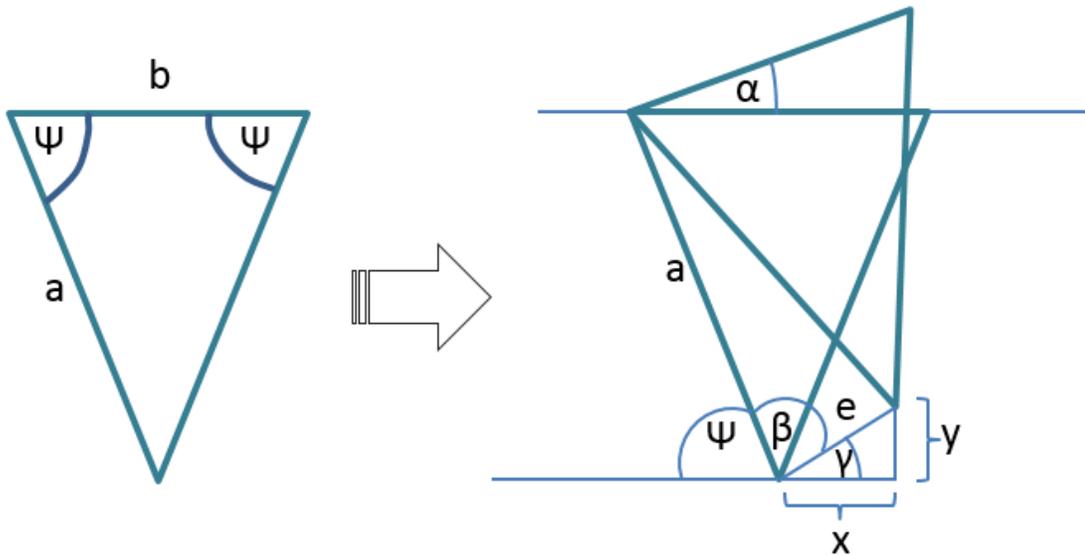


ILUSTRACIÓN 19: ESQUEMA DE MOVIMIENTO DE UN ELEMENTO DEL SISTEMA.

$$e = \sqrt{2a^2 - 2a^2 \cos(\alpha)} \tag{EC. 18}$$

$$\beta = \frac{180 - \alpha}{2} \tag{EC. 19}$$

$$x = e \cos(\gamma) \tag{EC. 20}$$

$$\Psi + \beta + \gamma = 180 \Rightarrow \gamma = 90 - \left(\Psi - \frac{\alpha}{2}\right) \tag{EC. 21}$$

$$\Rightarrow x = \sqrt{2a^2 - 2a^2 \cos(\alpha)} \cos\left(90 - \left(\Psi - \frac{\alpha}{2}\right)\right) \quad \text{EC. 22}$$

$$\Rightarrow x = \sqrt{2}a\sqrt{1 - \cos(\alpha)} \sin\left(\Psi - \frac{\alpha}{2}\right) \quad \text{EC. 23}$$

Para el caso del esquema de la Ilustración 18 se tiene que Δx equivale a dos veces la distancia x calculada con la Ec. 23.

En la primera iteración de pruebas en el mar se prefiere trabajar esta vez con las puntas de las pirámides hacia arriba y fuera del agua, ya que los absorbedores podrían presentar dificultades para trabajar sumergidos. El sistema a escala final se compone de varias piezas diferentes. Cada pirámide está compuesta por 124 piezas, de 16 tipos diferentes, lo que incluye codos y uniones, tubos de aluminio, elementos de unión tales como pernos, ejes, tuercas, seguros seagers, golillas y rodamientos. La siguiente Ilustración muestra un dibujo hecho en el programa Solidworks, las dimensiones están en milímetros. Planos más detallados se encuentran en la sección de Anexos.

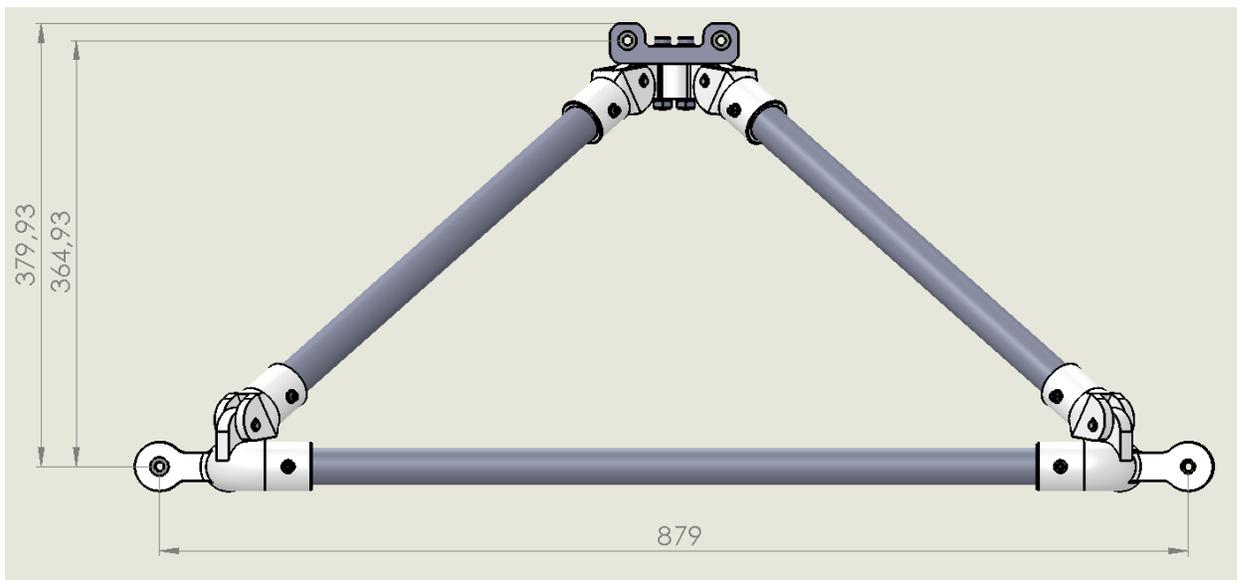


ILUSTRACIÓN 20: DIBUJO DE ESTRUCTURA A ESCALA FINAL, VISTA FRONTAL, DIMENSIONES EN MM.

La pieza que se ubica arriba de la pirámide permite acoplar cualquiera de los dos absorbedores propuestos para este trabajo, pues lo que varía es la pieza de sujeción que va directo al absorbedor.

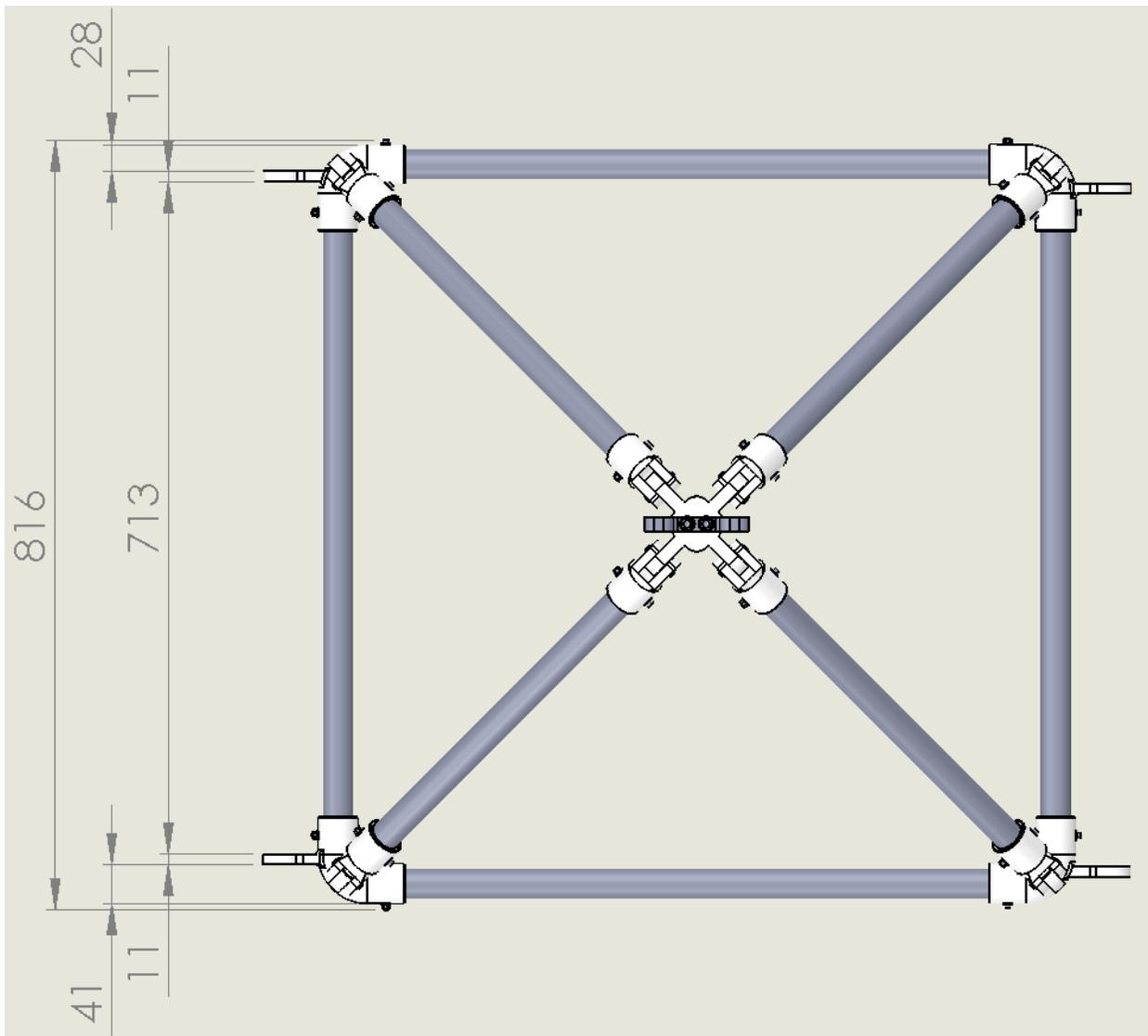


ILUSTRACIÓN 21: DIBUJO DE ESTRUCTURA A ESCALA FINAL, VISTA SUPERIOR, DIMENSIONES EN MM.

Un módulo se constituye de dos pirámides y un absorbedor entre ellas. Para agregar otro módulo sólo basta agregar una pirámide y un absorbedor entremedio.

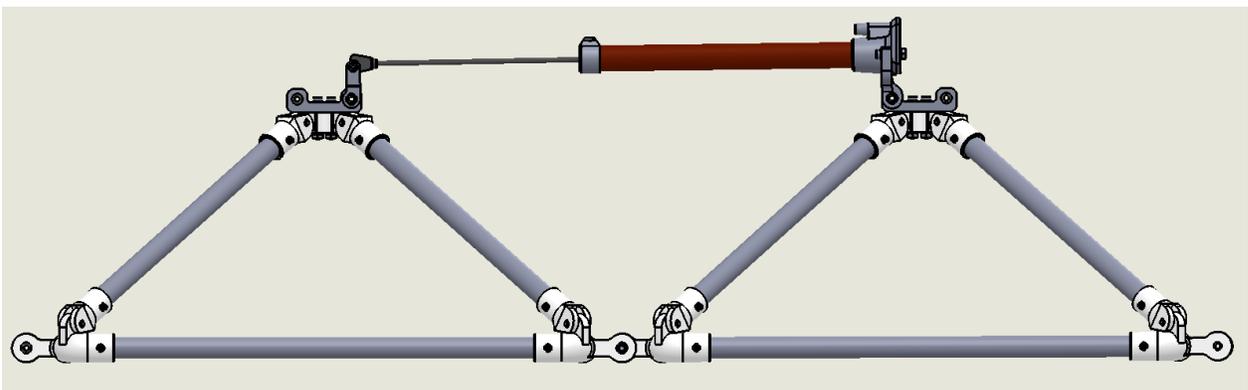


ILUSTRACIÓN 22: UN MÓDULO DEL SISTEMA CONSTITUÍDO POR DOS PIRÁMIDES Y UN ABSORBEDOR.

Diseño y construcción de sistema undívago para la conversión de energía.

Para este trabajo se ha decidido construir el sistema undívago utilizando cinco módulos, es decir, cinco absorbedores y seis pirámides. De esta forma el sistema completo queda como lo muestra la siguiente Ilustración.

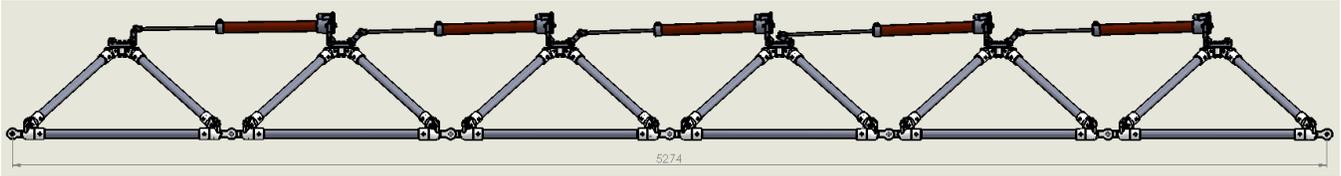


ILUSTRACIÓN 23: ESQUEMA VIRTUAL DE SISTEMA UNDÍVAGO COMPLETO, COMPUESTO POR CINCO MÓDULOS.

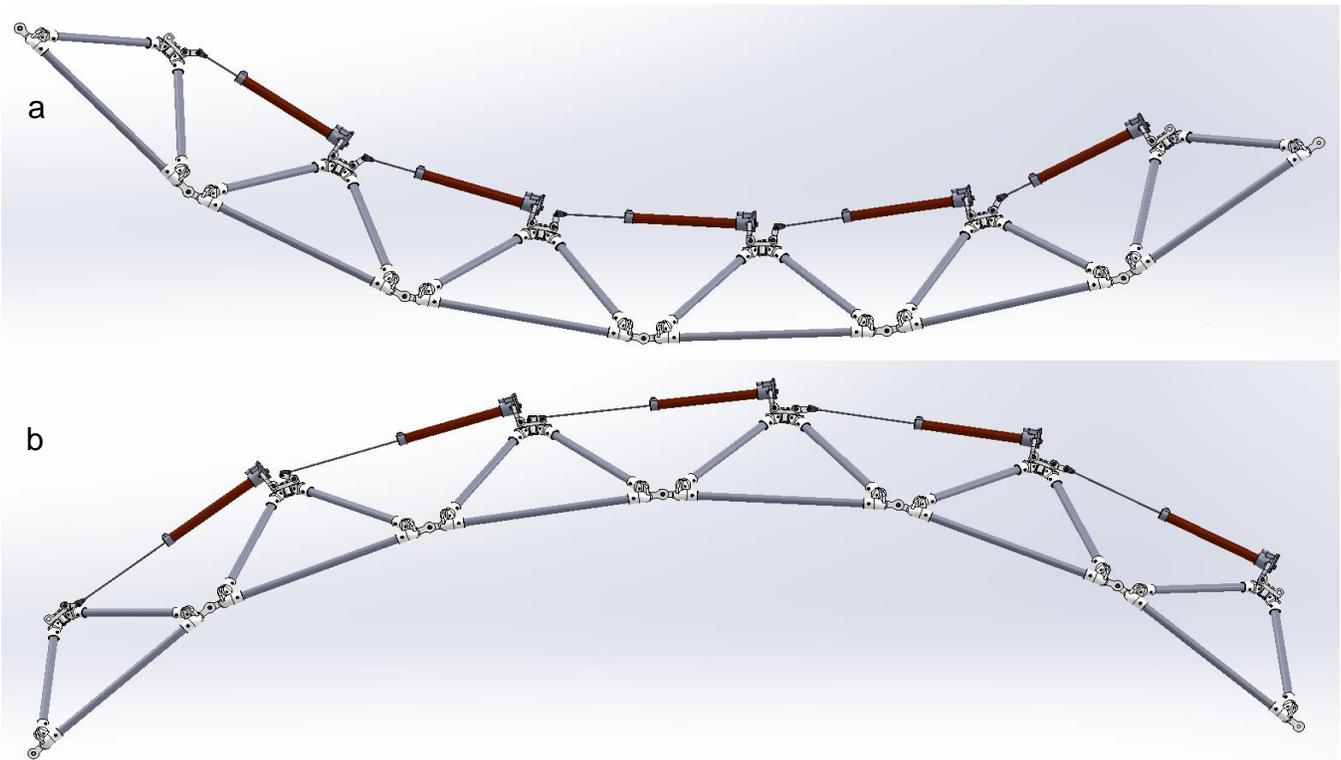


ILUSTRACIÓN 24: ESQUEMA VIRTUAL DE CÓMO EL SISTEMA UNDÍVAGO NAHUENREW SE ACOPLA A LA FORMA DE LA SUPERFICIE DEL AGUA. EN LA IMAGEN A SE APRECIA EL SISTEMA EN COMPRESIÓN Y EN LA IMAGEN B EL SISTEMA ESTÁ EN EXPANSIÓN.

En la Ilustración 24 se aprecia cómo, virtualmente, el sistema Nahuenrew se acopla a la deformación de la superficie del agua, aprovechando esta deformación para comprimir y expandir los émbolos de los bombines, comprimiendo aire. Este es el principio de recolección de la energía de las olas.

Finalmente, la lista de materiales necesarios para construir el sistema undívago es la que se muestra en la Tabla 3. Esta Tabla incluye materiales y piezas, donde la totalidad de las piezas hay que fabricarlas. Es importante notar que todas las componentes del sistema undívago deben ser de materiales resistentes a la oxidación de manera de prolongar la vida útil del sistema. Los planos detallados de las piezas fabricadas se adjuntan en la sección Anexos.

TABLA 3:
LISTA DE MATERIALES DE SISTEMA UNDÍVAGO COMPLETO

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	junta triple 1	FABRICADA	12
2	perno M4x50 parquer, inox	COMPRADA	96
3	tuerca M4 inox	COMPRADA	96
4	golilla plana M4 inox	COMPRADA	192
5	junta triple 2	FABRICADA	12
6	rodamiento de bolas 16x8x5mm inox	COMPRADA	50
7	tubo 3, 32x700 e1,2mm aluminio	COMPRADA	24
8	tubo 4, 32x500 e1,2mm aluminio	COMPRADA	24
9	junta triple parte 2	FABRICADA	48
10	eje 1, 8x40mm acero AISI 316	FABRICADA	58
11	seguro seagers 8mm inox	COMPRADA	116
12	junta cuádruple	FABRICADA	6
13	soporte bombín medio	FABRICADA	6
14	perno M8x55 parquer, inox	COMPRADA	12
15	golilla plana M8 inox	COMPRADA	84
16	tuerca M8 con seguro plástico inox	COMPRADA	32
18	soporte bombín abajo	FABRICADA	5
19	perno M8x35 parquer, inox	COMPRADA	20
20	bombín	COMPRADA	5
21	soporte bombín tenaza	FABRICADA	5
22	eje 3, 1/4'x85mm hilo ambos extremos acero AISI 316	FABRICADA	5
23	tuerca 1/4' con seguro plástico inox	COMPRADA	10
24	golilla plana 1/4' inox	COMPRADA	10

4.2. Diseño del absorbedor

Para diseñar el elemento que aprovecha el desplazamiento relativo del sistema se modela la estructura como en el caso anterior pero se agrega un amortiguador junto al resorte.

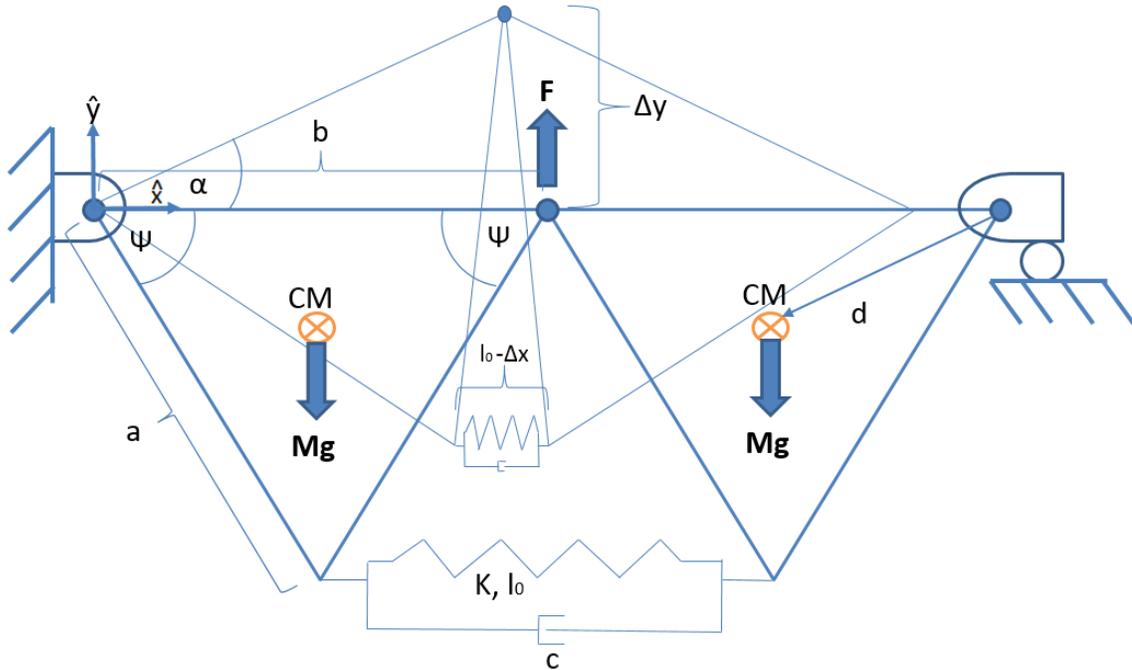


ILUSTRACIÓN 25: ESQUEMA DEL SISTEMA CON ABSORBEDOR.

De esta manera las ecuaciones que describen el movimiento son

$$\Delta y_{CM} = d \cdot \sin(\alpha) \quad \text{EC. 24}$$

$$\Delta x = 2\sqrt{2} \cdot a \sqrt{1 - \cos(\alpha)} \cdot \sin\left(\varphi - \frac{\alpha}{2}\right) \quad \text{EC. 25}$$

$$\Delta y = b \cdot \sin(\alpha) \quad \text{EC. 26}$$

$$T = 2 \cdot \left(\frac{1}{2} M (d\dot{\alpha})^2\right) + 2 \cdot \left(\frac{1}{2} I \dot{\alpha}^2\right) \quad \text{EC. 27}$$

$$U = \frac{1}{2} K (l_0 - \Delta x)^2 + 2Mg \Delta y_{CM} \quad \text{EC. 28}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta \dot{\alpha}}\right) - \frac{\delta T}{\delta \alpha} + \frac{\delta U}{\delta \alpha} = Q; \text{ con } Q = \frac{\delta W}{\delta \alpha} - \frac{\delta F_a}{\delta \dot{\alpha}} \quad \text{EC. 29}$$

Es decir, en este punto se incluye la fuerza del amortiguador F_a , caracterizada por la función de disipación de Rayleigh.

$$W = F \cdot \Delta y \quad \text{EC. 30}$$

$$F_a = \frac{1}{2} c \Delta \dot{x} \quad \text{EC. 31}$$

$$\bullet \frac{\delta T}{\delta \dot{\alpha}} = 2Md\dot{\alpha} + 2I\dot{\alpha} = 2\dot{\alpha}(Md + I) \Rightarrow \frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta \dot{\alpha}} \right) = 2(Md + I)\ddot{\alpha} \quad \text{EC. 32}$$

$$\bullet \frac{\delta T}{\delta \alpha} = 0 \quad \text{EC. 33}$$

$$\bullet \frac{\delta \Delta x}{\delta \alpha} = \frac{\sqrt{2}a \sin(\Psi - \frac{\alpha}{2}) \sin(\alpha)}{\sqrt{1 - \cos(\alpha)}} - \sqrt{2}a \sqrt{1 - \cos(\alpha)} \cos\left(\Psi - \frac{\alpha}{2}\right) \quad \text{EC. 34}$$

$$\bullet \frac{\delta U}{\delta \alpha} = 2Mgd \cos(\alpha) + K \left(l_0 - 2\sqrt{2}a \sqrt{1 - \cos(\alpha)} \sin\left(\Psi - \frac{\alpha}{2}\right) \right) \cdot \left(\frac{\sqrt{2}a \sin(\Psi - \frac{\alpha}{2}) \sin(\alpha)}{\sqrt{1 - \cos(\alpha)}} - \sqrt{2}a \cos\left(\Psi - \frac{\alpha}{2}\right) \sqrt{1 - \cos(\alpha)} \right) \quad \text{EC. 35}$$

$$\bullet W = F \cdot \Delta y = F \cdot b \sin(\alpha); \text{ Sea } F := F_0 \sin(\omega t) \quad \text{EC. 36}$$

$$\Rightarrow W = F_0 \sin(\omega t) b \sin(\alpha) \Rightarrow \frac{\delta W}{\delta \alpha} = F_0 \sin(\omega t) b \cos(\alpha) \quad \text{EC. 37}$$

$$\bullet \frac{d\Delta x}{dt} = \sqrt{2}a\dot{\alpha} \left(\frac{\sin(\Psi - \frac{\alpha}{2}) \sin(\alpha)}{\sqrt{1 - \cos(\alpha)}} - \cos\left(\Psi - \frac{\alpha}{2}\right) \sqrt{1 - \cos(\alpha)} \right) \quad \text{EC. 38}$$

$$\bullet \frac{\delta F_a}{\delta \dot{\alpha}} = c \left[\sqrt{2}a \left(\frac{\sin(\Psi - \frac{\alpha}{2}) \sin(\alpha)}{\sqrt{1 - \cos(\alpha)}} - \cos\left(\Psi - \frac{\alpha}{2}\right) \sqrt{1 - \cos(\alpha)} \right) \right]^2 \dot{\alpha} \quad \text{EC. 39}$$

$$\begin{aligned} &\Rightarrow 2(Md + I)\ddot{\alpha} + 2Mgd \cos(\alpha) \\ &\quad + K \left(l_0 - 2\sqrt{2}a \sqrt{1 - \cos(\alpha)} \sin\left(\Psi - \frac{\alpha}{2}\right) \right) \\ &\quad \cdot \left(\frac{\sqrt{2}a \sin\left(\Psi - \frac{\alpha}{2}\right) \sin(\alpha)}{\sqrt{1 - \cos(\alpha)}} \right. \\ &\quad \left. - \sqrt{2}a \cos\left(\Psi - \frac{\alpha}{2}\right) \sqrt{1 - \cos(\alpha)} \right) \\ &= F_0 b \sin(\omega t) \cos(\alpha) \\ &\quad - c \left[\sqrt{2}a \left(\frac{\sin\left(\Psi - \frac{\alpha}{2}\right) \sin(\alpha)}{\sqrt{1 - \cos(\alpha)}} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \cos\left(\Psi - \frac{\alpha}{2}\right) \sqrt{1 - \cos(\alpha)} \right) \right]^2 \dot{\alpha} \end{aligned} \quad \text{EC. 40}$$

La Ec. 40 es una ecuación diferencial de segundo orden para alfa que representa el comportamiento del sistema junto al absorbedor, considerando que el sistema está conformado sólo por dos pirámides.

Diseño y construcción de sistema undívago para la conversión de energía.

Se ha considerado como primera alternativa trabajar con actuadores lineales que funcionen como absorbedores. Los actuadores lineales escogidos tienen las siguientes características:

TABLA 4:
CARACTERÍSTICAS DE ACTUADOR LINEAL

Marca	Micro Automatización
Diámetro del émbolo	40[mm]
Carrera	400[mm]
Amortiguación	Neumática PPV, regulable a ambos lados
Funcionamiento	Doble efecto
Masa total	3.672 [g]

Los actuadores escogidos están construidos en acero inoxidable de aleación fina para asegurar su vida útil en ambientes difíciles como el marino. Además son de doble efecto, es decir, comprimen aire tanto al contraer su émbolo como al expandirlo. El tipo de actuador y sus detalles se aprecia en las siguientes ilustraciones.



ILUSTRACIÓN 26: ACTUADOR LINEAL ESCOGIDO.

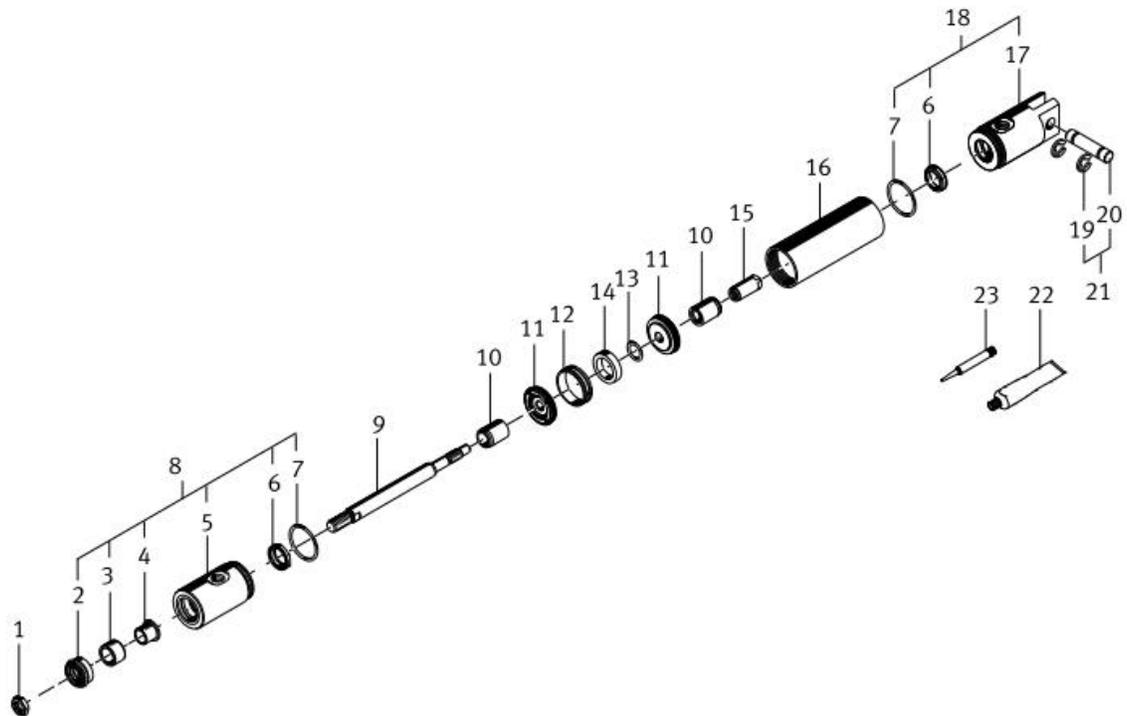


ILUSTRACIÓN 27: DESGLOSE DE PIEZAS DEL ACTUADOR LINEAL ESCOGIDO.

La segunda alternativa que se ha considerado es utilizar bombines de bicicleta como absorbedores. La ventaja de usar bombines es que éstos son más baratos y están disponibles más rápidamente. La desventaja es que son de efecto simple, es decir, trabajan comprimiendo aire en sólo una dirección y que sus componentes no son inoxidable, entonces durarán poco tiempo operativos en el ambiente marino.

Los bombines seleccionados son de marca Bell modelo Airatack construidos en acero, capacidad de 400[cc], émbolo de 38[mm] y altura del pistón de 18,5[in], presión máxima de 100[PSI]. Se ha considerado modificar su tenaza superior para sujetarlo a las pirámides a través de piezas de sujeción que habrá que fabricar.



ILUSTRACIÓN 28: BOMBÍN DE BICICLETA ESCOGIDO COMO ABSORBEDOR.

Las piezas que sujetan los bombines a las pirámides se muestran en la Ilustración 29.

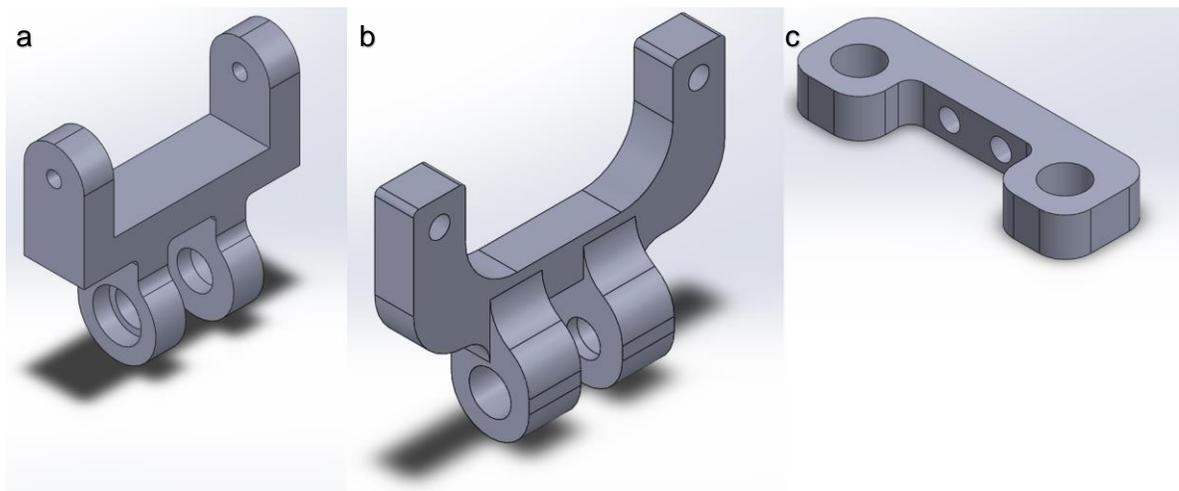


ILUSTRACIÓN 29: PIEZAS DE SUJECCIÓN DE BOMBÍN: A) SOPORTE BOMBÍN TENAZA, B) SOPORTE BOMBÍN ABAJO, C) SOPORTE BOMBÍN MEDIO.

4.3. Diseño de tanque y mangueras

Para recolectar la energía de las olas comprimiendo aire es necesario contar con un tanque y mangueras que unan los bombines con el tanque, además de válvulas y un manómetro para medir la presión en el tanque. El diagrama conceptual de esta instalación se presenta en la Ilustración 30.

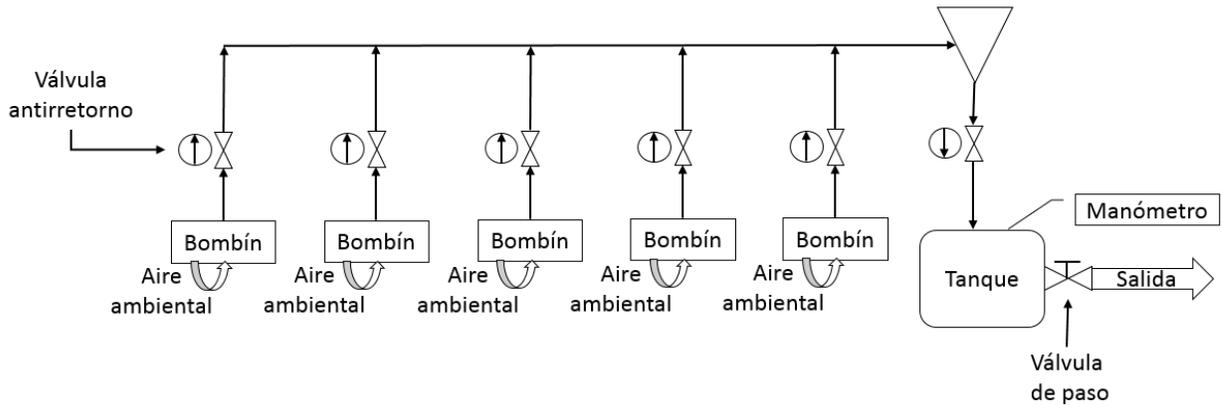


ILUSTRACIÓN 30: DIAGRAMA NEUMÁTICO CONCEPTUAL.

La manguera que se utilizará es manguera neumática de $\frac{1}{4}$ ' de largo 10[m] para poder llevar el tanque en el bote con el cual se probará el sistema. Para las uniones entre mangueras se usará uniones rápidas como los que se muestran en la Ilustración 31.



ILUSTRACIÓN 31: UNIONES RÁPIDAS PARA MANGUERA NEUMÁTICA.

Para la prueba del sistema se utilizará un tanque pequeño ya que sólo se busca medir la presión que alcanza a comprimir el sistema undívago y eventualmente medir el tiempo que tarda en llegar a cierta presión. El tanque a utilizar es uno que está disponible en el laboratorio, de alrededor de un litro de capacidad que soporta hasta 800[PSI]. A este tanque se le acopla un manómetro que lee hasta 160[PSI], una válvula antirretorno en la entrada y una válvula de paso en la salida.



ILUSTRACIÓN 32: TANQUE A UTILIZAR EN ESTA PRUEBA.

5. Construcción del sistema undívago

La construcción del sistema completo tomó ocho semanas. La razón principal de este tiempo es porque se requería piezas complejas en lotes grandes y para evitar aumentar los gastos externalizando la construcción de estas piezas se optó por fabricarlas en la Universidad utilizando técnicas poco desarrolladas en el Departamento de Mecánica. El costo total del sistema undívago fue de \$658.000.

A partir de este momento el sistema undívago toma el nombre de Nahuenrew, nombre proveniente del Mapundugun que significa energía de las olas.

5.1. Estructura

Para construir el sistema Nahuenrew se requiere de una serie de piezas iguales de complejidad constructiva que no permite maquinas en tornos y fresas convencionales, que son las disponibles en el taller del Departamento, sino en máquinas CNC o algún otro tipo de producción en serie.

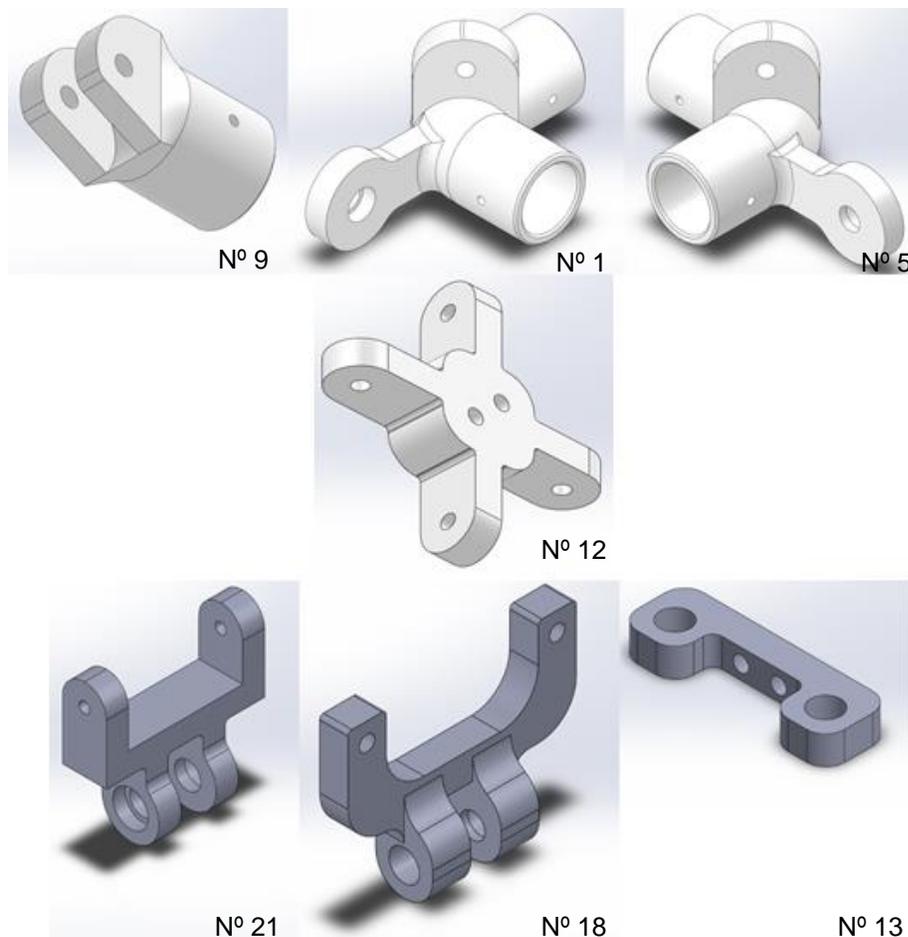


ILUSTRACIÓN 33: PIEZAS DEL SISTEMA NAHUEENREW QUE REQUIEREN CONSTRUCCIÓN CNC U OTRO MÉTODO. EN LA ESQUINA INFERIOR DERECHA DE CADA FIGURA SE ENCUENTRA EL NÚMERO DE ÍTEM QUE SE CORRESPONDE CON LA TABLA 3.

Dado que el plazo para la construcción es poco y se cuenta con sólo una máquina CNC cuya disponibilidad no es total se opta por método de construcción en serie de vaciado de resina, en combinación con prototipado de impresión 3D.

El proceso de producción en serie de vaciado de resina consta de varios pasos que se detallan a continuación:

- Construcción del original: Para esto se utilizó la impresión 3D en cada una de las piezas difíciles. Las piezas impresas son de las medidas requeridas pero no tienen resistencia mecánica suficiente como para permitir la construcción del sistema undívago. La construcción completa del original tarda alrededor de un día por pieza, dependiendo de la complejidad de la pieza. El Fab Lab cuenta con seis impresoras 3D por lo que se puede imprimir piezas en paralelo lo que disminuye los tiempos de producción.
- Construcción del molde a partir de la pieza original: Se construyen moldes de silicona de caucho, uno para cada pieza. Estos moldes permiten crear piezas idénticas a la original en resina de poliéster, con una tasa de producción de una pieza cada 3 horas aproximadamente dependiendo del tamaño de la pieza. Por lo tanto, en caso de requerir apurar el proceso global basta confeccionar más moldes. Los moldes además contienen *carriles*, que son los encargados de dejar las perforaciones listas, de las dimensiones requeridas y en sus lugares. Dependiendo de la cantidad de carriles necesarios y de la ubicación de éstos los moldes se constituyen de dos a tres partes. Siempre se trata de disminuir la cantidad de partes que constituyen el molde pues así se agiliza el proceso de preparación del molde para el vaciado. Cada molde debe tener una entrada para el líquido a verter y al menos una salida para el aire. Dependiendo de la geometría de la pieza y de la estrategia de vaciado puede ser necesario emplear varios escapes de aire para evitar que queden burbujas dentro de la estructura que restan resistencia mecánica a la pieza. La construcción completa de cada molde tarda un día por cada parte que lo constituye. Así, un molde constituido por dos partes tarda dos días en estar listo para ser vaciado. Este tiempo es el necesario para que la silicona se haga sólida.



ILUSTRACIÓN 34: PREPARACIÓN DE MOLDES EN SILICONA DE CAUCHO CON CARRILES DE ACERO Y ALUMINIO.

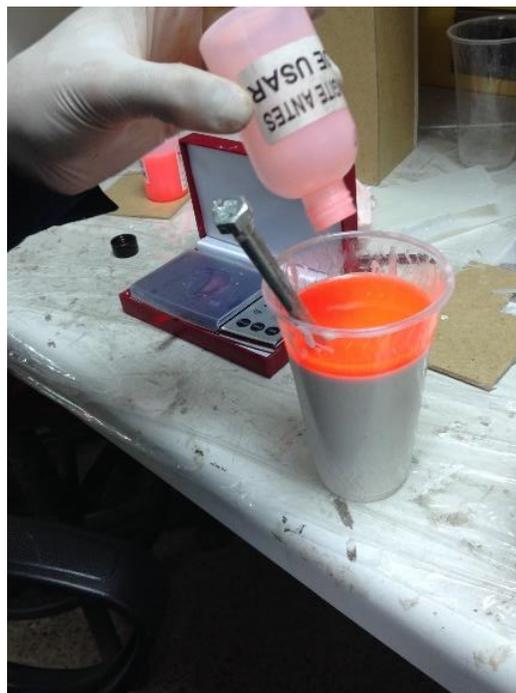


ILUSTRACIÓN 35: PREPARACIÓN DE LA SILICONA DE CAUCHO.

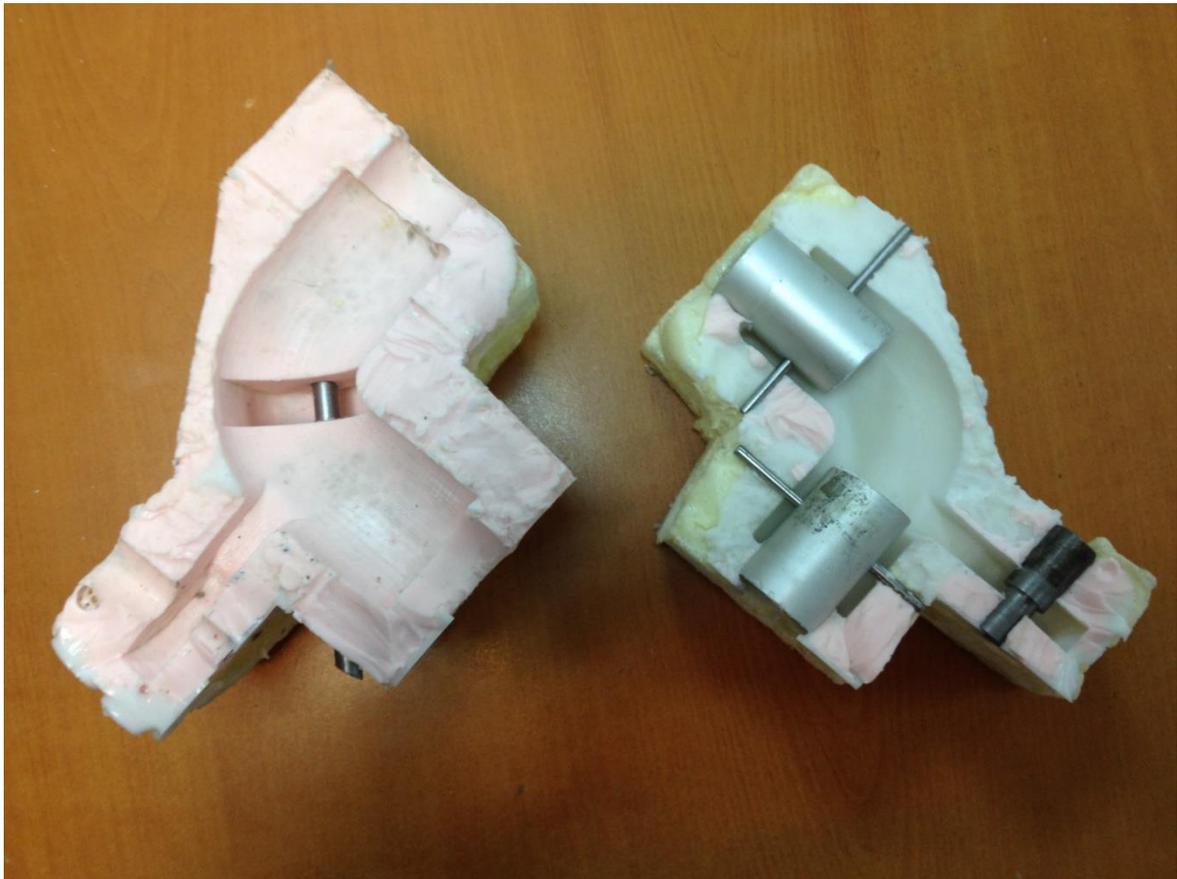


ILUSTRACIÓN 36: MOLDES DE SILICONA DE CAUCHO LISTOS, CON SUS CARRILES.

- Preparación del molde para vaciado: se debe agregar cera desmoldante y PVA (Polyvinyl Acetate) a los carriles, luego sellar el molde bien, procurando que no haya fugas de resina cuando ésta se vierta. Para sellarlos se usó silicona caliente por los bordes externos de las uniones, como también moldadientes para mantener unidas las partes del molde.
- Vaciado de resina: Cuando ya se tiene el molde preparado se prepara la mezcla de resina para vaciar dentro de éste. En este caso se utilizó resina de poliéster del fabricante Plástiquímica mezclada con carbonato de calcio en proporción 2:1. El carbonato de calcio logra que la pieza de resina sea menos frágil. A la resina es necesario agregar acelerante y catalizador para que endurezca. Las proporciones de estos componentes influyen en el tiempo de solidificación y en la fragilidad de la pieza final. En este caso se utilizó 8 gotas de catalizador (cobalto) por cada 100 gr de resina y 28 gotas de acelerante (peróxido orgánico) por cada 100 gr de resina.

El resultado de las piezas obtenidas con este proceso es bueno y se puede apreciar en las siguientes Ilustraciones.



ILUSTRACIÓN 37: PIEZA OBTENIDA CON VACIADO DE RESINA EN MOLDES DE SILICONA DE CAUCHO.

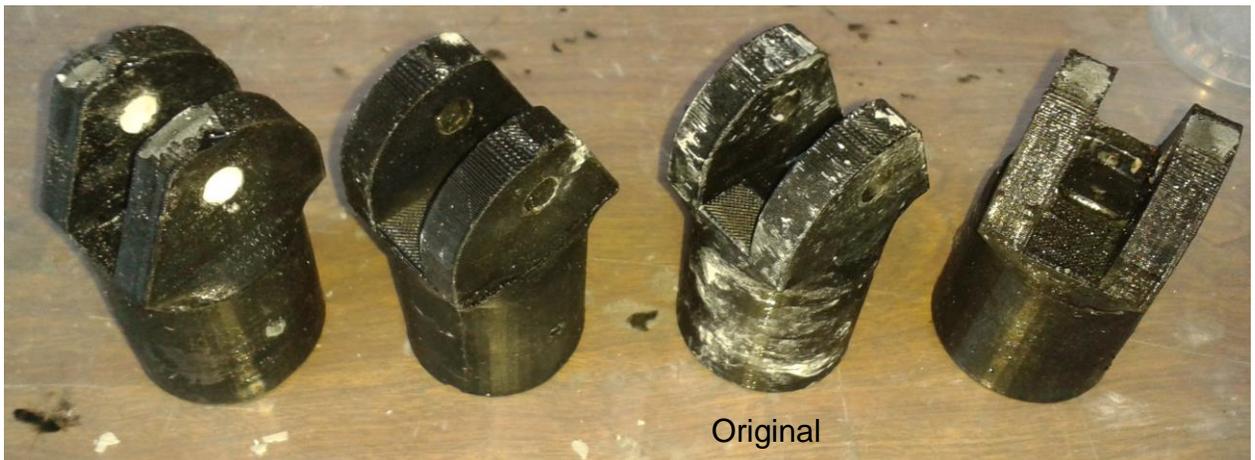


ILUSTRACIÓN 38: COMPARACIÓN ENTRE COPIAS Y ORIGINAL OBTENIDAS CON VACIADO DE RESINA EN MOLDES DE SILICONA.

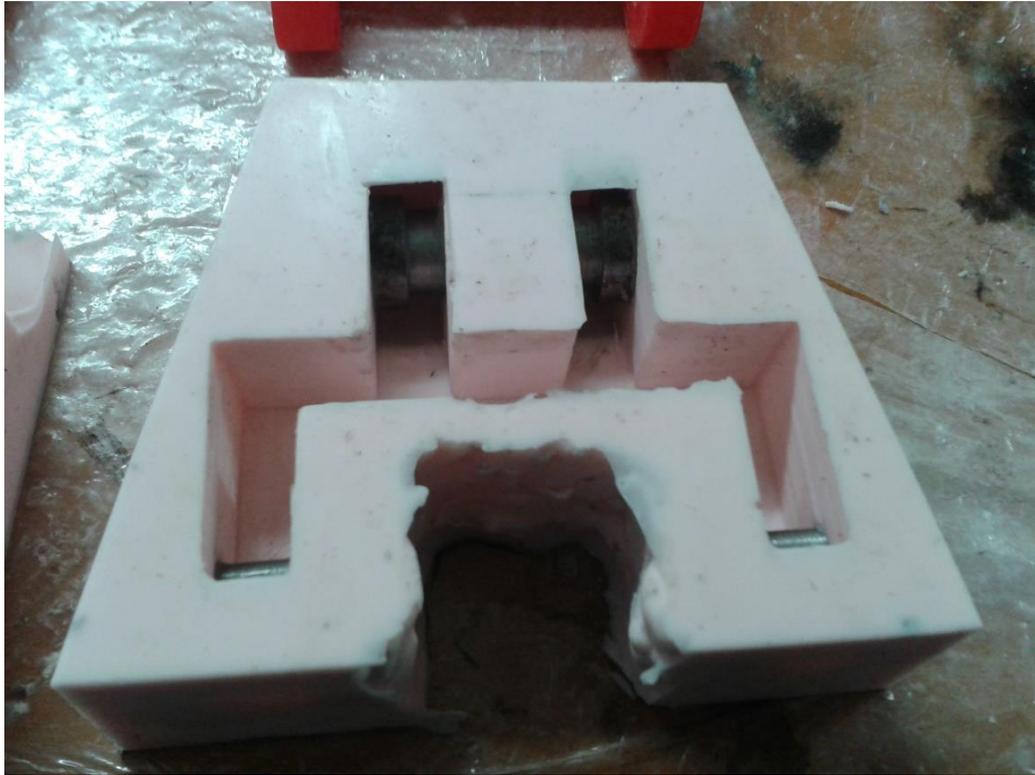


ILUSTRACIÓN 39: MOLDE DE SILICONA DE CAUCHO CONTITUÍDO DE UNA SOLA PARTE MÁS CARRILES.

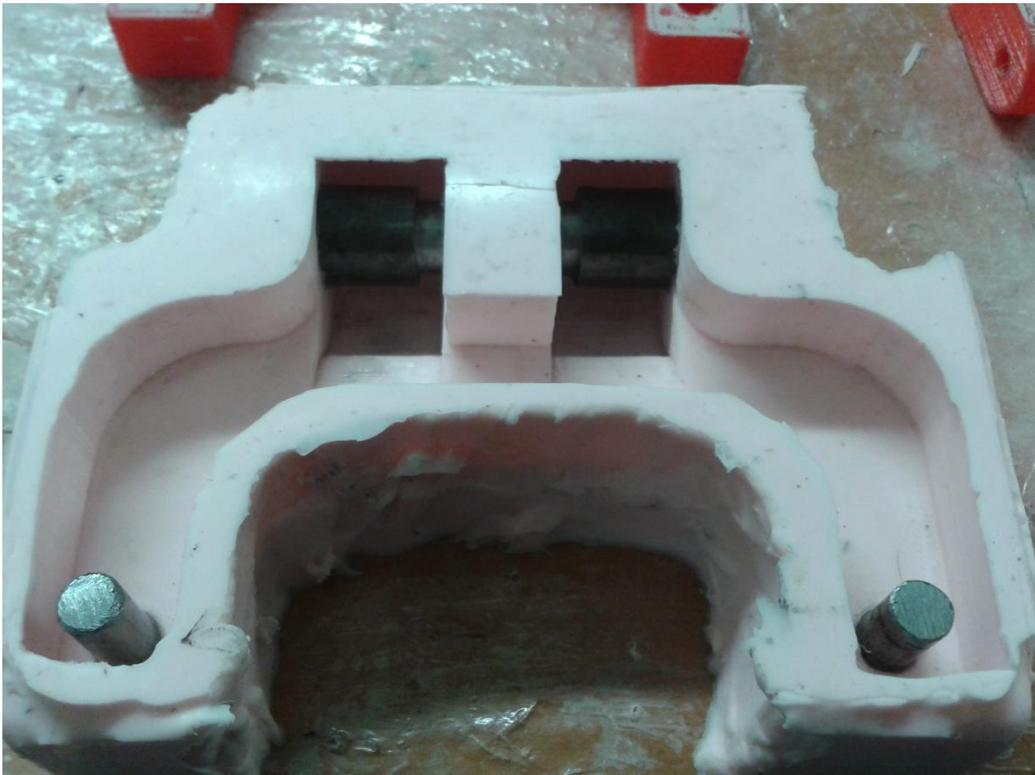


ILUSTRACIÓN 40: MOLDE DE SILICONA DE CAUCHO CONTITUÍDO DE UNA SOLA PARTE MÁS CARRILES.

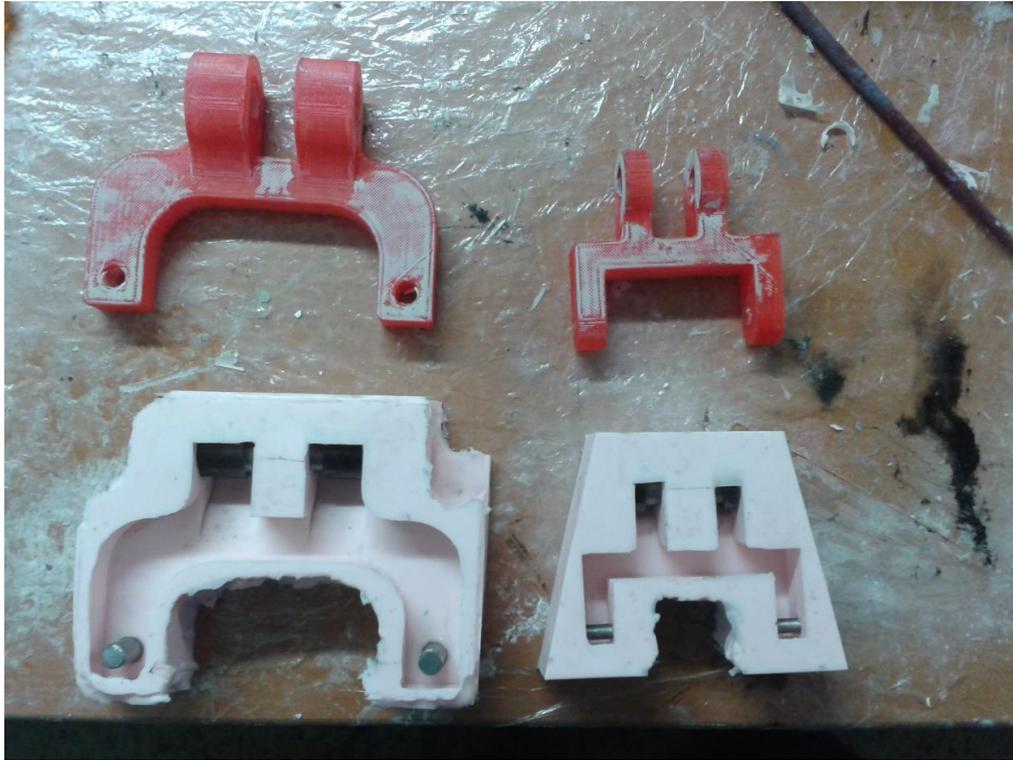


ILUSTRACIÓN 41: MOLDES SIMPLES DE SILICONA DE CAUCHO JUNTO A SUS ORIGINALES IMPRESOS EN 3D.

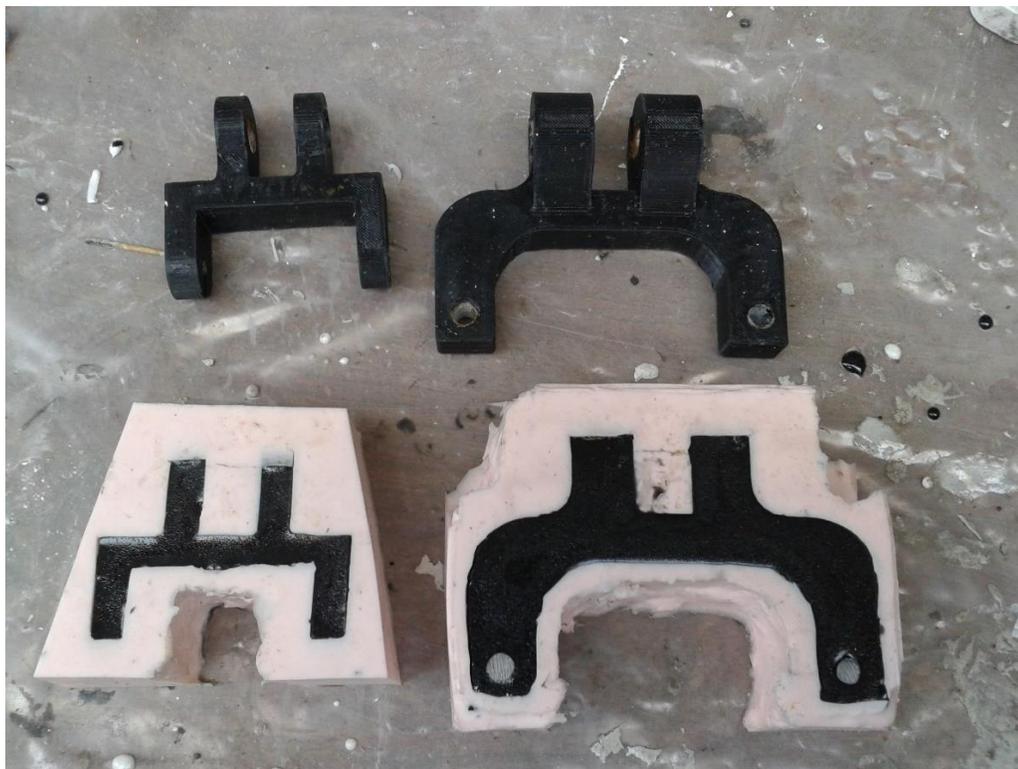


ILUSTRACIÓN 42: MOLDES SIMPLES DE SILICONA DE CAUCHO LLENOS DE RESINA EN PROCESO DE SOLIDIFICACIÓN. ARRIBA SE VE LAS PIEZAS YA SOLIDIFICADAS Y DESMOLDADAS PRODUCIDAS EN ESTOS MOLDES RESPECTIVOS.



ILUSTRACIÓN 43: CONJUNTO TOTAL DE PIEZAS CONSTRUIDAS POR VACIADO DE RESINA MÁS OTROS ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN EL SISTEMA UNDÍVAGO.

Se utilizó silicona de caucho para los moldes porque ésta es flexible y duradera, por lo que permite fabricar lotes grandes de piezas iguales sin destruirse, además que facilita el desmoldaje de las piezas que en este caso es difícil por la geometría compleja de ellas. En primera instancia se exploró utilizar moldes de yeso, pero éstos dieron como resultado piezas de dimensiones erróneas y debían romperse los moldes para desmoldar la pieza. Por lo tanto, si bien la silicona es un insumo caro respecto al yeso, ésta tiene muchas más ventajas.

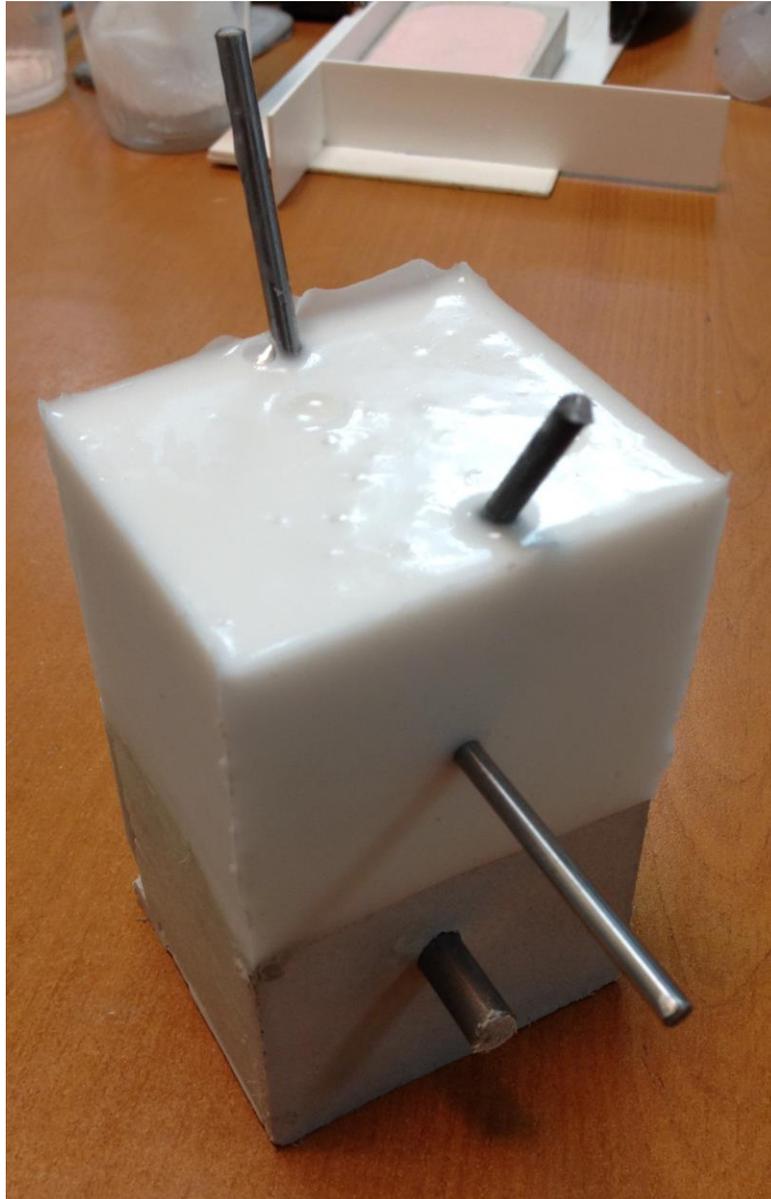


ILUSTRACIÓN 44: MOLDE CONSTITUIDO DE DOS PARTES MÁS CARRILES. LA PARTE SUPERIOR ES DE SILICONA DE CAUCHO, LA PARTE INFERIOR ES DE YESO.

Para la totalidad de las piezas construidas en resina de poliéster se utilizó siete kilogramos de resina y cuatro kilogramos de silicona de caucho. El proceso de vaciado requiere de otros insumos como vasos plásticos, guantes de látex, moldadientes, silicona caliente, colorante, mascarilla, cartón piedra, pinceles, balanza y otros menores, por lo que se gastó en total para esta etapa alrededor de \$170.000 pesos.

Otra etapa de la construcción del sistema undívago es cortar los tubos de aluminio. Para esto se tiene dos opciones: una es cortarlos con sierra y luego refrentar sus extremos en un torno; la otra opción es cortarlos con una herramienta especial para cortar tubos de material blando como aluminio, cobre, bronce, etc. Se optó por cortarlos con esta herramienta especial, ya que hay una disponible en el taller del Departamento

y por la clara ventaja de no requerir un proceso posterior al corte como lo es el refrentado.



ILUSTRACIÓN 45: HERRAMIENTA DE CORTE PARA TUBOS DE MATERIAL BLANDO COMO ALUMINIO.

Con esta herramienta de corte se pierde menos de un milímetro de material y la terminación es suficientemente buena para esta aplicación.

Los tubos se compran en largos de 1,22[m] y de cada tubo en bruto se obtiene uno de 70[cm] y otro de 50[cm]. Para el sistema undívago diseñado se requiere 24 tubos de cada uno de los largos recientemente descritos, por lo que en total se requiere hacer 48 cortes. Con la herramienta especial de corte este proceso tomó sólo cuatro horas.

El gasto en tubos de aluminio fue de \$60.000 correspondiente al 9,1% del total de costos del sistema undívago.



ILUSTRACIÓN 46: LOS CORTES NO REQUIEREN SER REFRENTADOS EN TORNO.



ILUSTRACIÓN 47: TUBOS DE ALUMINIO CORTADOS.

Lo siguiente que se construyó fueron los ejes. Para construir los ejes se compró una barra de acero AISI 316 de diámetro 5/16" y de 3[m] de largo. Luego esta barra se

cortó con sierra en 58 partes de 58[mm] y 10 partes de 12[mm]. Estas partes de 12[mm] serían utilizados inicialmente para la unión entre pirámides pero luego, en la etapa de ensamblaje, se cambió estos ejes por pernos, tuercas y golillas ya que permitían un ensamblaje más rápido y fiable.

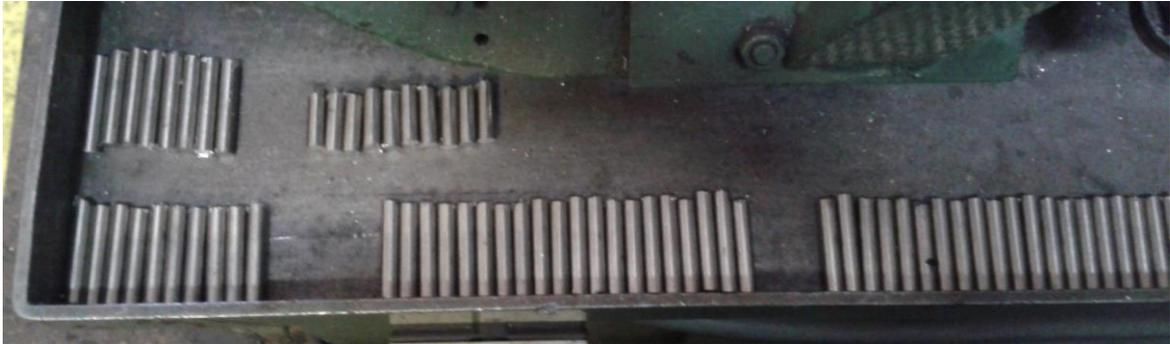


ILUSTRACIÓN 48: EJES DE ACERO INOXIDABLE RECIÉN CORTADOS.

Las partes cortadas se maquinaron en un torno del taller del Departamento. En el torno se refrentó sus caras y se dejó cada eje de sus medidas finales, para luego hacer las ranuras donde encajan los seguros seagers y finalmente limar los cantos. Este proceso de fabricación de ejes tomó dos jornadas completas de trabajo, es decir, alrededor de 16 horas.



ILUSTRACIÓN 49: EJES DE ACERO INOXIDABLE MAQUINADOS EN EL TORNO.

La etapa final de la construcción del sistema Nahuenrew es el ensamblaje de la estructura. Primero se corroboró que las perforaciones fueran del tamaño adecuado y que las componentes que debían caber en ellas efectivamente cupieran. Se repasó algunas perforaciones con lija pues estaban demasiado ajustadas. Se probó que los rodamientos y los ejes entraran bien, además de que los seguros seagers afirmaran bien a los codos.



ILUSTRACIÓN 50: CODO DE TRES EJES, DOS FIJOS SEPARADOS EN 90° Y UN TERCERO QUE PUEDE ROTAR.



ILUSTRACIÓN 51: RODAMIENTO INOXIDABLE EN LA UNIÓN ENTRE PIRÁMIDES.



ILUSTRACIÓN 52: LOS EJES DE ACERO INOXIDABLE SE FIJAN CON SEGUROS SEAGERS, TAMBIÉN INOXIDABLES.



ILUSTRACIÓN 53: PRIMERA PIRÁMIDE ARMADA, LAS PIEZAS QUEDARON CON LAS DIMENSIONES Y AJUSTES REQUERIDOS.



ILUSTRACIÓN 54: PRIMERA PRUEBA DE ENSAMBLAJE ENTRE PIRÁMIDES. MONTAJE DE ACTUADOR (BOMBÍN) SIN COMPLICACIONES.

Para la unión entre pirámides se utilizó pernos, golillas y tuercas con seguro de poliéster para asegurar que no se suelten. Los pernos se apoyan en rodamientos inoxidables para disminuir el roce al girar. El gasto en pernos y elementos de fijación fue alrededor de \$116.500 lo que corresponde al 17,7% del costo total del sistema.

Parte de la estructura también lo son los flotadores. En primera instancia se pensó en utilizar pelotas de poliestireno expandido proporcionales a la estructura, como se hizo con el modelo a escala probado en el generador de olas. Sin embargo, acoplar pelotas de poliestireno expandido al sistema a escala final se hacía difícil por lo que se optó por adecuar flotadores tipo *tallarín* a los tubos de aluminio en cada base de la pirámide afirmándolos con cinta de embalaje gris. Se probó la flotabilidad de la estructura con estos flotadores en la pileta de la Universidad con buenos resultados. La estructura con flotadores se aprecia en la Ilustración 56. El gasto en flotadores fue de \$23.940, lo que corresponde al 3,6% del costo total del sistema.

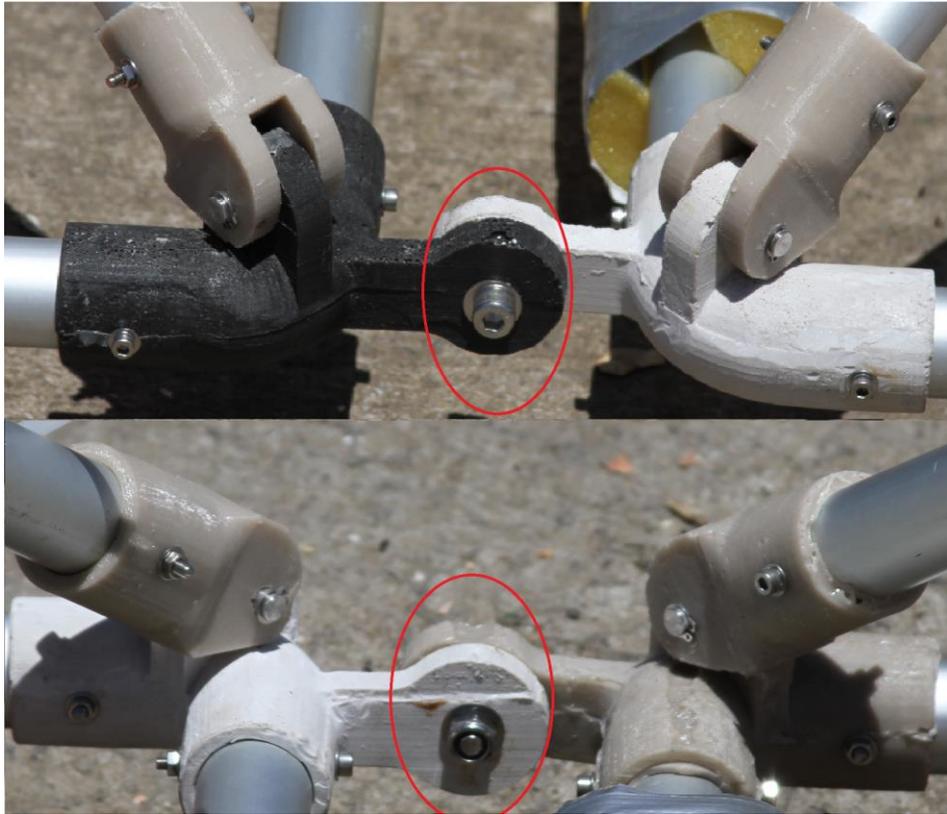


ILUSTRACIÓN 55: UNIÓN ENTRE PIRÁMIDES. SE UTILIZA PERNOS, GOLILLAS Y TUERCAS CON SEGURO DE POLIESTER.



ILUSTRACIÓN 56: ESTRUCTURA PIRÁMIDE COMPLETAMENTE ARMADA, CON FLOTADORES Y ACTUADOR.

5.2. Actuadores

Fue necesario utilizar bombines en vez de actuadores lineales neumáticos porque estos últimos no habían llegado aún al momento del ensamblaje de Nahuenrew. Por lo tanto se decidió hacer la primera prueba en ambiente marino con bombines y dejar propuesto hacer una prueba con los actuadores lineales neumáticos.

Se contaba con dos bombines en el laboratorio por lo que sólo fue necesario comprar tres de ellos. Los bombines fueron ligeramente modificados para lograr acoplarlos a la estructura. Se perforó el pedestal y se acortó la manilla superior, la cual ya venía previamente perforada de fábrica. En la Ilustración 57 se aprecia las modificaciones hechas a los bombines. Los bombines se acoplan a las pirámides a través de piezas especialmente diseñadas para ello. Estas piezas son las descritas en la sección 4.2, mostradas en la Ilustración 29 a) y b). Estas piezas van acopladas a cada pirámide por medio de ejes y seguros seagers que se apoyan en rodamientos, para disminuir el roce al girar. El gasto total en bombines fue de \$30.860 lo que corresponde al 4,7% del costo total del sistema.



ILUSTRACIÓN 57: ACOPLÉ ENTRE BOMBINES Y ESTRUCTURA.



ILUSTRACIÓN 58: BOMBÍN MONTADO ENTRE DOS PIRÁMIDES.

5.3. Sistema neumático

El sistema neumático queda completo cuando se conectan los bombines al tanque. Para esto se compró las válvulas antirretorno, manguera, uniones rápidas y se mandó a fabricar niples que permiten conectar la manguera a los bombines. Para las pruebas hechas en este trabajo se utilizó el tanque disponible en el laboratorio descrito en la sección 4.3 que se aprecia en la Ilustración 32.

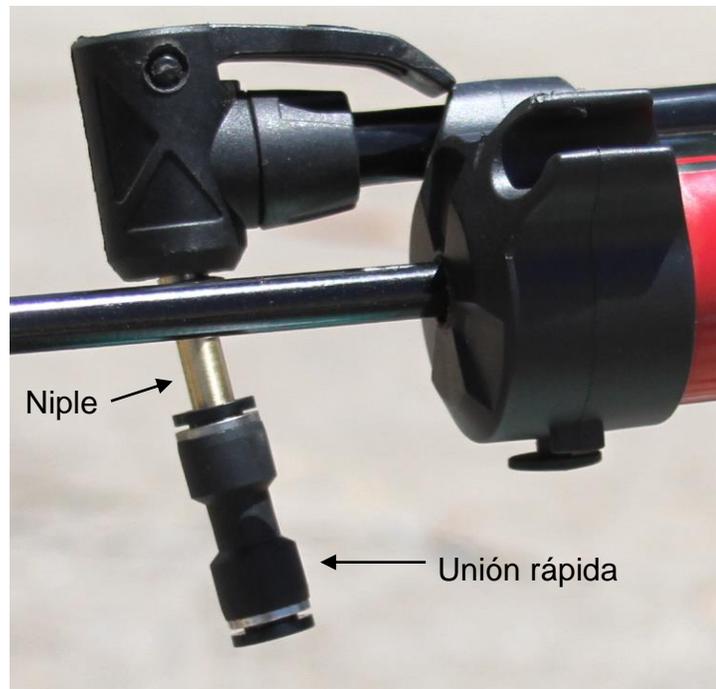


ILUSTRACIÓN 59: NIPLE Y UNIÓN RÁPIDA QUE PERMITEN CONECTAR LA MANGUERA AL BOMBÍN.



ILUSTRACIÓN 60: VÁLVULA ANTIRRETORNO.



ILUSTRACIÓN 61: SISTEMA COMPLETAMENTE ARMADO.



ILUSTRACIÓN 62: VISTA DEL SISTEMA NEUMÁTICO ACOPLADO A LA ESTRUCTURA DE NAHUENREW.

El costo total de los elementos neumáticos comprados fue de \$99.300 lo que corresponde al 15,1% del costo total de Nahuenrew.

En resumen se gastó \$658.730 en materiales para construir el sistema Nahuenrew, donde la distribución de gastos se aprecia en el Gráfico 1.

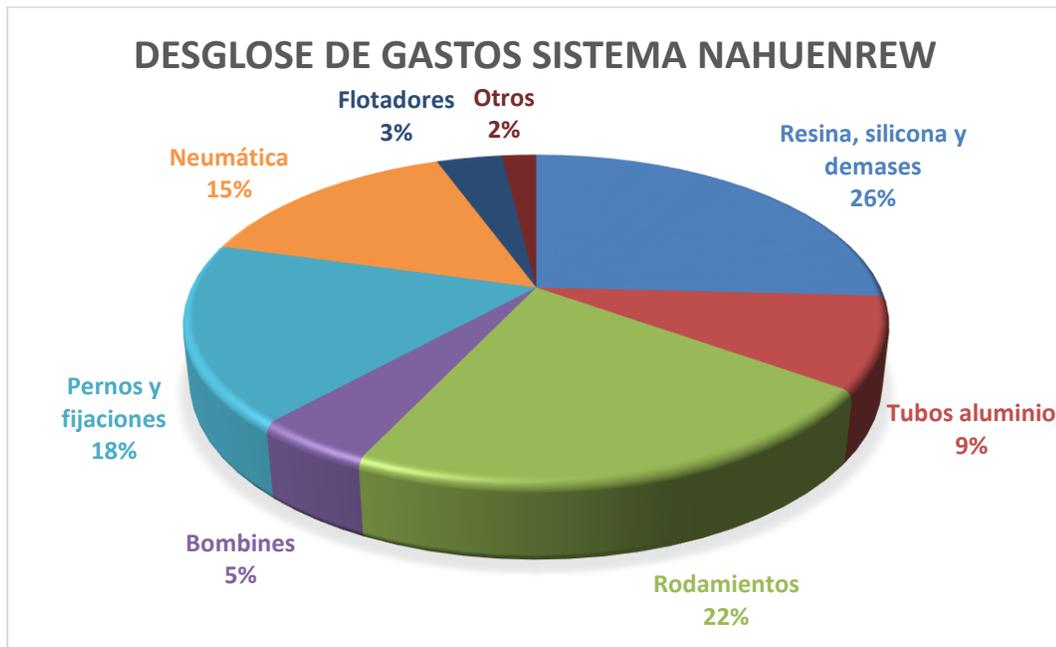


GRÁFICO 1: DISTRIBUCIÓN DE GASTOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE NAHUENREW SEGÚN PORCENTAJES.

6. Pruebas al sistema

6.1. Protocolo de pruebas

En este trabajo se realizan dos tipos de pruebas. Un tipo de prueba es a los modelos a escala, los que se prueban en el estanque donde se ha instalado el generador de olas. El otro tipo de prueba es al sistema undívago a escala final, prueba que se realiza en el mar.

6.1.1. Prueba a los modelos a escala

Para estudiar los modelos a escala éstos se dejan en el estanque donde primero se estudia su flotabilidad. Luego se prueba el sistema libre, es decir sin absorbedores, y se observa cómo se comporta en un ambiente con olas, poniendo especial énfasis en cómo se acopla la estructura a la deformación de la superficie.

Las pruebas a los modelos a escala pueden ser mucho más profundas que la sola observación visual. Se deja como trabajo propuesto estudiar la dinámica del movimiento de los modelos a escala sometidos a diferentes patrones de olas. Esto se puede hacer marcando ciertos puntos clave del prototipo a escala y rastreándolos con una Optitrack, herramienta diseñada para captar y monitorear el movimiento en el espacio 3D, disponible en el Laboratorio de Síntesis de Máquinas Inteligentes. De esta manera se tiene datos de trayectoria para el sistema libre completo sobre algún patrón de olas dado, permitiendo calcular el límite máximo de desplazamiento aprovechable por el sistema. Se puede calcular entonces un límite máximo de compresión de aire dado cierto absorbedor caracterizado por un coeficiente de amortiguación y un rendimiento global aproximado de la estructura. Estos resultados se pueden contrastar con el modelo de respuesta dinámica propuesto en la sección 4.2, Ec. 40 y así validar o mejorar el modelo propuesto.

6.1.2. Prueba al sistema undívago de escala final

El sistema undívago a escala final se prueba en el mar ya que no se dispone de alguna instalación de la envergadura suficiente para recrear el ambiente marino donde pueda caber el sistema undívago construido. Por lo tanto, se debe escoger un lugar en la costa chilena para realizar la prueba. Una vez escogido el lugar es necesario arrendar un bote. El permiso para zarpar se puede pedir directamente a la Capitanía de Puerto o lo puede pedir el dueño del bote, dependiendo de si cuenta con licencia para zarpar en esa zona. En este caso se escogió la bahía de Pichidangui pues resulta más cómodo para los profesores de la comisión poder asistir a este lugar, además que cuenta con oleaje suficiente para realizar la prueba. En la bahía de Pichidangui se arrienda un bote a un pescador local, el cual se encarga de pedir los permisos respectivos para zarpar en la bahía. La prueba se realiza el día 3 de enero de 2014,

zarpando a las 13:00 desde la Caleta de pescadores de Pichidangui. El recorrido es registrado con GPS y se graban los acontecimientos más importantes de la prueba con cámaras filmadoras, también se hacen varias fotografías.

Ese mismo día, antes de realizar la prueba, el sistema undívago se encuentra en Santiago desarmado. Por lo tanto se carga en una camioneta o auto particular en la misma mañana, para luego descargarlo y armarlo en la bahía antes de zarpar. Se miden los tiempos que demora la carga, descarga, armado y desarmado de la estructura.

Cuando el sistema está armado en la bahía, antes de zarpar, se hace una prueba en tierra firme de los componentes del sistema undívago. Se revisa así que el sistema se mueva conforme a lo esperado, que entregue presión al tanque y que no haya fugas en el sistema neumático. Una vez revisado el buen funcionamiento el sistema undívago, éste está listo para realizar la prueba.

Para llevar el sistema undívago al lugar de oleaje primero se mete el sistema al agua empujándolo entre dos o tres personas, luego cuando ya está flotando se tira el sistema con un cordel amarrado desde el tubo de aluminio delantero, avanzando lentamente con el bote. Ya ubicados en el mar se realizan pruebas de dos configuraciones del sistema undívago: la primera configuración es con el sistema undívago sin restricciones, es decir, todas las uniones entre las pirámides pueden rotar libremente; la segunda configuración es bloqueando la rotación de las uniones entre las pirámides de los extremos del sistema, dejando en funcionamiento sólo un bombín, el que se ubica en el medio, alargando así el brazo que empuja al único actuador que ahora está funcionando.

Terminada la prueba en el mar se devuelve el sistema undívago a tierra firme. Esto se puede hacer tirándolo con un cordel como se hace al entrar al mar o se puede subir el sistema undívago al bote, lo que es más rápido y seguro, ya que se ha dejado de realizar mediciones. En tierra firme se desarma el sistema undívago y se vuelve a guardar en la camioneta para regresarlo al laboratorio de la Universidad.

Los datos de oleaje promedio del lugar se obtienen del Explorador Marino desarrollado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, luego los resultados de potencia extraída por el sistema undívago se contrastan con el potencial promedio disponible obtenidos del Explorador Marino.

6.2. Resultado de pruebas

6.2.1. Resultado de prueba a los modelos a escala

Se realizó esta prueba a varios modelos a escala, que representan diversas ideas del prototipo final. A continuación se presenta los resultados del modelo a escala que prosperó y que evolucionó a escala final.

La geometría que finalmente se escogió para desarrollar el sistema undívago Nahuenrew es la de pirámides de base cuadrada unidas en la base, con la idea de acoplar absorbedores entre la puntas de las pirámides. Se hizo un modelo virtual de esta estructura y se imprimió en las impresoras 3D del Fab Lab. Con estas impresiones se hizo un modelo a escala de la estructura final que se probó en el estanque donde se ha instalado el generador de olas. El modelo a escala puede flotar en dos posiciones diferentes: una es con las puntas de las pirámides hacia arriba y la otra es con las puntas de las pirámides hacia abajo sumergidas en el agua. Ambas posiciones son posiciones de equilibrio estable para la estructura. Se observó que el modelo a escala se acopla mejor a la superficie del agua cuando flota con las puntas de las pirámides hacia abajo. De todas maneras, en ambos casos los desplazamientos relativos entre las puntas de las pirámides son amplios y claramente observables. En la siguiente ilustración se aprecia cómo varían las distancias relativas entre las puntas de las pirámides cuando el modelo a escala está sometida a oleaje.

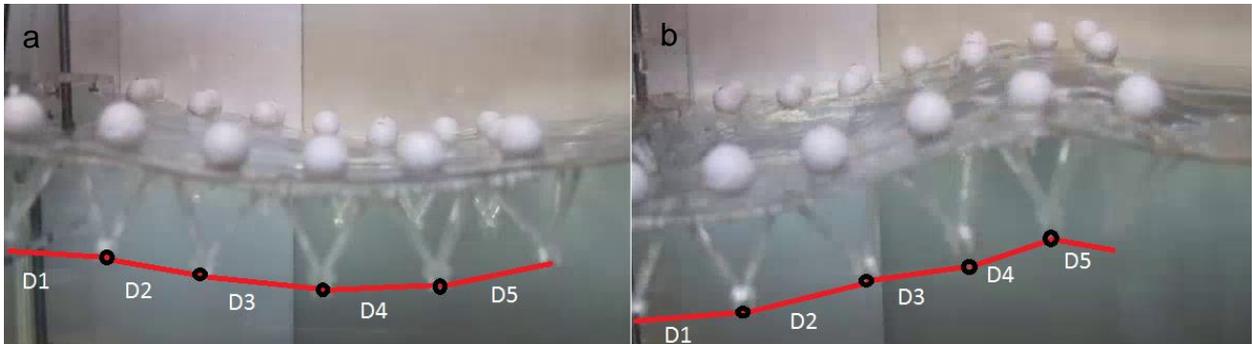


ILUSTRACIÓN 63: PRUEBA AL MODELO A ESCALA. SE APRECIA LA DIFERENCIA DE LAS DISTANCIAS RELATIVAS ENTRE LAS PUNTAS DE LAS PIRÁMIDES. EN LA PARTE A) EL MODELO A ESCALA PASA POR UN VALLE DE LA OLA ALARGANDO SUS DISTANCIAS RELATIVAS. EN LA PARTE B) EL MODELO A ESCALA PASA POR UNA CRESTA DE LA OLA ACORTANDO ALGUNAS DE SUS DISTANCIAS RELATIVAS.

De la Ilustración 63, entre la imagen a) y la imagen b) se puede ver cómo varían las distancias entre las puntas de las pirámides cuando el modelo a escala monta diferentes fases de la ola. Mientras D2 se agranda, D3, D4 y D5 disminuyen. D1 permanece similar en ambas imágenes. La variación de estas distancias depende tanto de la amplitud de la ola como de la longitud de onda. Puede ocurrir el caso en que la longitud de onda de la ola es mucho más grande que la longitud del sistema undívago luego éste no alcanza a deflectarse lo suficiente como para notarlo, es decir, para que

los absorbedores lo perciban y puedan recoger energía, o en este caso el modelo a escala mantiene las distancias D_i constantes. También puede ocurrir que la longitud de onda de la ola es tanto o más pequeña que la distancia entre las puntas de las pirámides en equilibrio estático, entonces el absorbedor tampoco es capaz de percibir a la ola y no puede recoger su energía, independiente de la amplitud de esa ola. Todas estas situaciones se observaron al realizar la prueba en el estanque del laboratorio. Al mismo tiempo se considera que en el ambiente marino las olas están constituidas por muchas longitudes y amplitudes de onda diferentes, por lo tanto pueden ocurrir estas tres situaciones antes descritas dentro de un patrón de olas.

6.2.2. Resultado de prueba al sistema undívago Nahuenrew

El día 3 de enero de 2014 a las 10:00 AM se carga el sistema Nahuenrew desarmado en la camioneta, lo que demora 20 minutos aproximadamente. Luego, en la bahía de Pichidangui se descarga el sistema y se comienza a ensamblar en la rampla cercana al bote.



ILUSTRACIÓN 64: CARGANDO EL SISTEMA NAHUENREW DESARMADO EN LA CAMIONETA.

El orden de armado de Nahuenrew es primero armar las pirámides cada una por separado, luego juntar todas las pirámides. Cuando están todas las pirámides unidas se instala las piezas que soportan a los bombines en cada pirámide, luego se instalan los bombines. Una vez instalados los bombines se instala el sistema neumático, es decir,

Diseño y construcción de sistema undívago para la conversión de energía.

se conectan los nipples a los bombines, luego las válvulas se conectan cercanas a cada bombín por medio de mangueras cortas y racores rápidos. Después de la válvula se conecta la manguera que conecta con la manguera principal que une todos los flujos de aire y que va a dar al tanque donde se guarda el aire presurizado. Por seguridad se le da un apriete final a todos los pernos de la estructura.



ILUSTRACIÓN 65: ETAPAS DE ENSAMBLAJE DEL SISTEMA NAHUENREW. A) SE ARMA CADA PIRÁMIDE, B) SE UNEN LAS PIRÁMIDES, C) SE INSTALAN LAS PIEZAS QUE SUJETAN LOS BOMBINES Y LOS BOMBINES, D) SE INSTALAN LOS NIPLES, VÁLVULAS Y MANGUERAS, E) SE UNEN TODAS LAS MANGUERAS, F) SE CONECTA LA MANGUERA PRINCIPAL CON EL TANQUE.

El ensamblaje realizado entre tres personas tarda aproximadamente una hora. Después del ensamblaje se cerciora que el sistema se mueva como se espera y que al

moverse efectivamente entregue presión al tanque. En este momento también se corrobora que el tanque y el sistema neumático en general no tengan fugas de aire.



ILUSTRACIÓN 66: IMAGEN IZQUIERDA: GUSTAVO DÍAZ CORROBORA QUE LAS PIRÁMIDES SE ARTICULAN BIEN. IMAGEN DERECHA: EDUARDO GONZÁLEZ Y JUAN CRISTÓBAL ZAGAL CORROBORAN QUE AUMENTA LA PRESIÓN EN EL TANQUE Y QUE NO HAY FUGAS DE AIRE.

Luego se ata la estructura con un cordel al tubo de aluminio delantero y se empuja al mar, entre tres personas. Todas las personas se suben a bordo del bote y se comienza el recorrido hacia un sector de oleaje mayor. La estructura es tirada por el bote por lo que es mejor avanzar lento, al orden de 4[km/hr]. Mientras se avanza se mide si el sistema entrega presión al tanque con las olas pequeñas del camino, siendo la respuesta negativa, pues la presión que entrega no alcanza a sobrepasar las pérdidas en las válvulas, sin embargo se puede sentir aire en la manguera principal fluyendo en dirección al tanque cuando éste no está conectado.

La ruta hecha por el bote se registra con un GPS. Esta ruta se muestra en la Ilustración 68, y en la Ilustración 69 se aprecia los perfiles de elevación y de velocidad de la ruta realizada por el bote. Se puede notar que el GPS no es capaz de notar las variaciones de altura cuando se está en el mar, pues el perfil de elevación marca siempre altura cero. En el perfil de velocidad se aprecia que la velocidad de ida hacia el lugar de prueba es de 3[km/hr] aproximadamente mientras que la velocidad de la vuelta es en promedio 12,5[km/hr] pues a la vuelta Nahuenrew es subido a bordo del bote y ya no es necesario mantener una velocidad baja. La prueba en el mar dura en total 1[hr] y 28[min].



ILUSTRACIÓN 67: BOTE CON EL CUAL SE REALIZÓ LA PRUEBA EN EL MAR.



ILUSTRACIÓN 68: RUTA RASTREADA POR GPS.

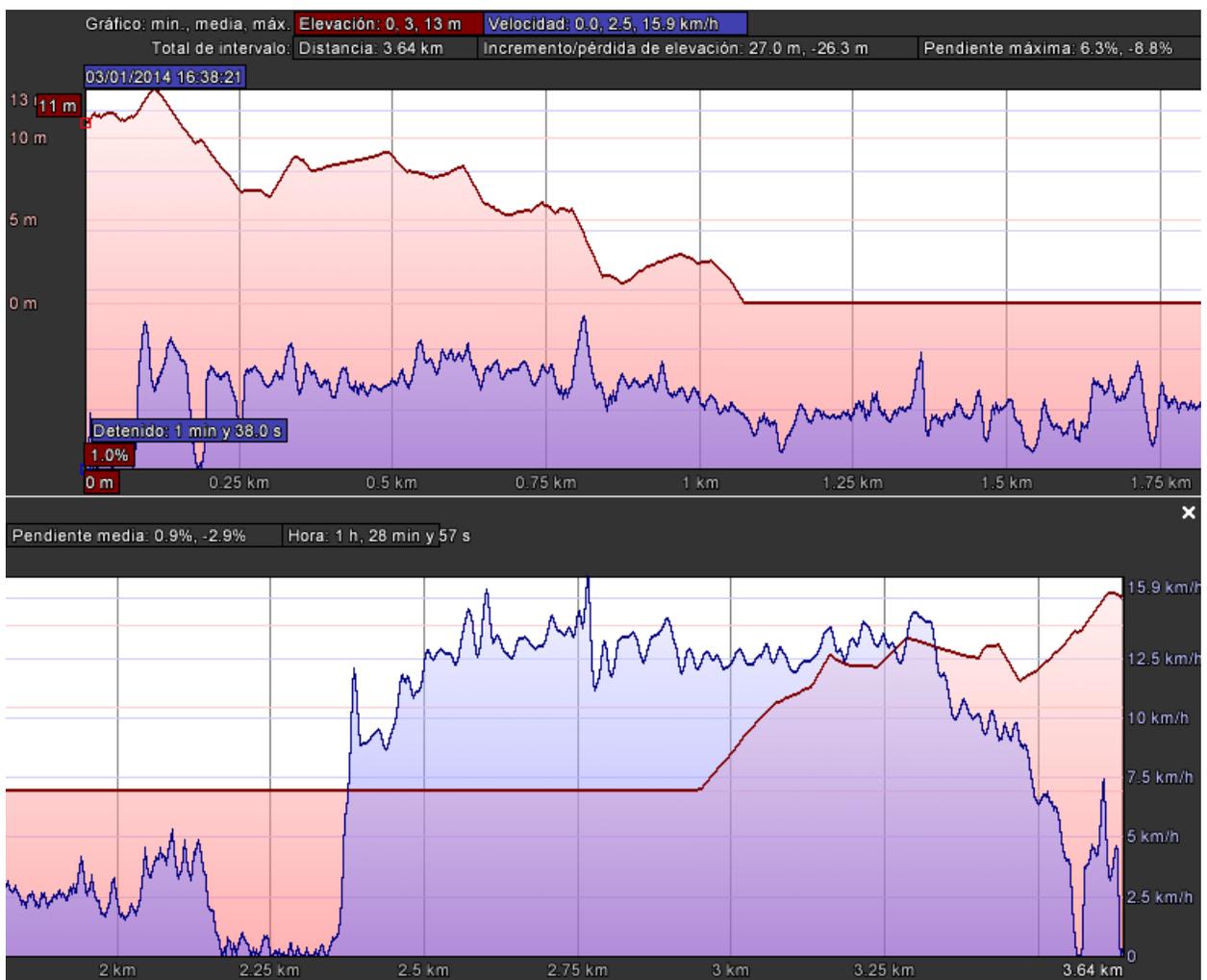


ILUSTRACIÓN 69: PERFIL DE ELEVACIÓN Y DE VELOCIDAD DE LA RUTA RASTREAD POR EL GPS.

Al llegar al lugar de oleaje alto el bote deja caer su ancla para mantener su posición. En este lugar se realiza los dos tipos de prueba descritos en la sección 6.1.2. La primera prueba es dejando rotar a todas las pirámides libremente. En este caso el sistema undívago se acopla muy bien a la deformación de la superficie del mar pero no es capaz de elevar la presión del tanque. Se cree que es porque las longitudes de onda de la mayoría de las olas son mucho mayores a la longitud del sistema undívago y las amplitudes en general no son tan altas (se aprecian menores a 1[m]), entonces los desplazamientos entre las puntas de las pirámides no son suficientemente grandes para comprimir los bombines por completo. Este tipo de olas se aprecian en la Ilustración 72 y la Ilustración 73.



ILUSTRACIÓN 70: NAHUENREW SE ACOPLA BIEN A LA DEFORMACIÓN DE LA SUPERFICIE DEL MAR, TANTO EN COMPRESIÓN (A), COMO EN EXPANSIÓN (B).

En algunas ocasiones sucede que la estructura se alinea paralela al frente de olas, desaprovechando la oportunidad de deformarse. Esto se ve en la Ilustración 71.



ILUSTRACIÓN 71: NAHUENREW SE ALINEA PARALELO AL FRENTE DE OLAS.



ILUSTRACIÓN 72: NAHUENREW MONTADO UNA CRESTA DE OLA DE LONGITUD DE ONDA MUY SUPERIOR AL LARGO DE LA ESTRUCTURA.



ILUSTRACIÓN 73: NAHUENREW SALIENDO DE UN VALLE DE OLA CUYA LONGITUD DE ONDA ES MUCHO MAYOR AL LARGO DE LA ESTRUCTURA.

Después de unos 30 minutos probando el sistema Nahuenrew según el primer tipo de prueba se cambia al segundo tipo de prueba, la que consiste en bloquear la

rotación de las pirámides de los extremos, dejando operativo sólo un bombín, el que se encuentra al medio de la estructura. Con esto se logra aumentar el brazo que realiza la fuerza sobre el bombín y además Nahuenrew se adapta mejor a las longitudes de onda de las olas que están presentes en ese momento. Según esta configuración el sistema undívago es capaz de elevar la presión del tanque hasta 4[PSI] en alrededor de 5 minutos. Sin embargo la presión se queda estancada en ese valor y no sigue aumentando a pesar de que el sistema sigue captando olas.



ILUSTRACIÓN 74: SISTEMA NAHUEENREW LOGRA SUBIR LA PRESIÓN DEL ESTANQUE HASTA 4[PSI].

Finalmente, se sube la estructura completa al bote y se regresa a tierra firme. En tierra firme se desarma Nahuenrew y se vuelve a cargar en la camioneta. Desarmar la estructura entre tres personas toma alrededor de 45 minutos.

Es importante notar que la estructura no sufrió ningún daño con la prueba, a pesar de que se temía que las olas pudieran torcer la estructura si esta se alineaba paralela al frente de olas, o que tirarla muy rápidamente podía tensionarla demasiado hasta romperse. Todas las componentes soportaron las cargas a las que fueron sometidas en el ambiente marino durante el tiempo que duró la prueba.

La ruta registrada por el GPS se contrasta con el mapa del Explorador Marino. En la Ilustración 76 se hace esta comparación, donde en la imagen de la izquierda se aprecia la ruta registrada por el GPS y visualizada en Google Earth y la imagen de la

Diseño y construcción de sistema undívago para la conversión de energía.

derecha muestra en el mapa del Explorador Marino el punto donde se estuvo detenido por más tiempo durante la prueba, imagen que además muestra la altura significativa promedio de la bahía para el mes de enero, según datos recopilados en enero de 2010. En el mapa del Explorador Marino se puede ver que la altura significativa promedio de las olas en el lugar donde se realizó la prueba es baja y se acerca a cero.

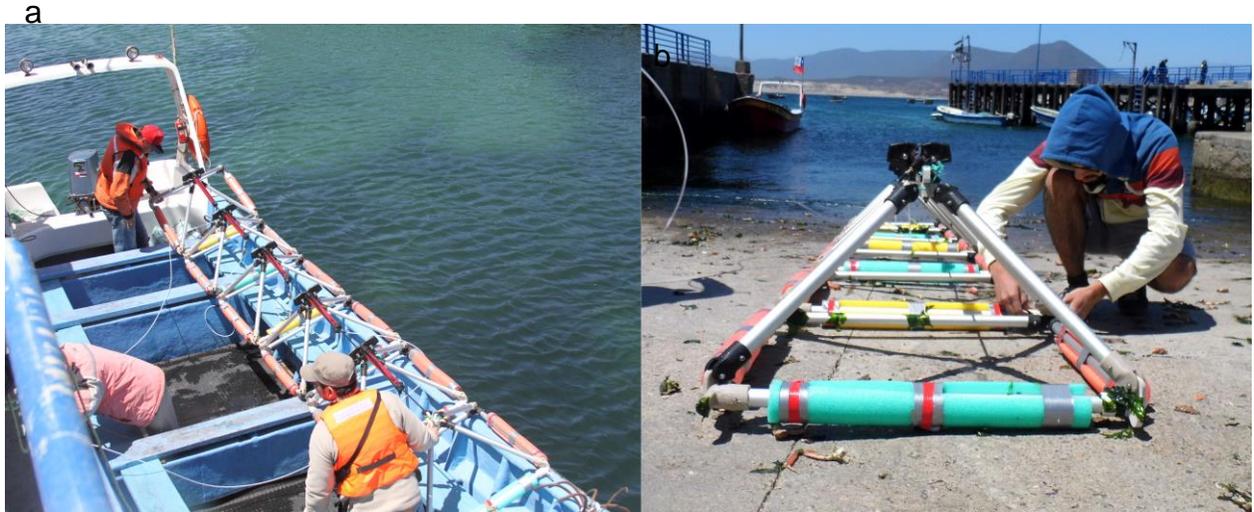


ILUSTRACIÓN 75: REGRESO A TIERRA FIRME DESPUÉS DE REALIZADA LA PRUEBA EN EL MAR. A LA IZQUIERDA: DESCARGA DE LA ESTRUCTURA. A LA DERECHA: DESARME DE LA ESTRUCTURA.

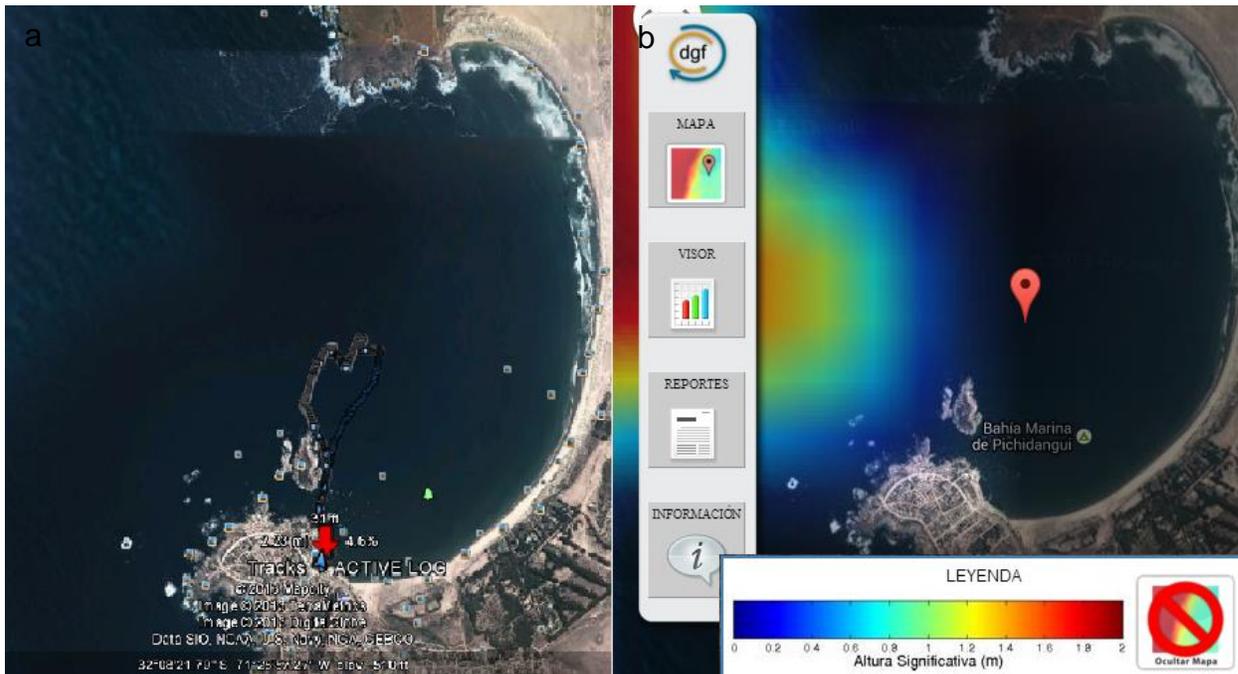


ILUSTRACIÓN 76: LUGAR DONDE SE REALIZÓ LA PRUEBA. EN LA IMAGEN IZQUIERDA SE VE LA RUTA GRABADA POR EL GPS, EN LA IMAGEN DERECHA SE VE LA PREDICCIÓN DE OLAS SEGÚN EL EXPLORADOR MARINO Y SE MARCA EL PUNTO DONDE SE ESTUVO DETENIDO POR MÁS TIEMPO REALIZANDO LA PRUEBA.

El costo total de la prueba en Pichidangui fue de \$90.000, lo que incluye traslado y arriendo de bote..

7. Análisis y discusión de resultados

7.1. Equipamiento experimental

El generador de olas instalado en el estanque del laboratorio permite generar olas con amplitudes iguales o menores a 5[cm] y por otro lado también es pequeño el volumen disponible dentro del estanque, por lo tanto es limitado el espectro de pruebas que se pueden realizar con los modelos a escala. Aun así se considera provechoso pues las pruebas que allí se realizaron permiten tomar decisiones. Al complementar el generador de olas con una Optitrack⁶ se puede enriquecer mucho más el estudio sobre los modelos a escala.

En el caso de desarrollar más el área de los Wave Energy Converters en la Universidad se hace imperante la necesidad de instalación de una zona donde probar los prototipos, es decir, un estanque con un generador de olas que sea capaz de generar patrones de olas no sólo uniformes y continuos sino similares a las olas del mar que distan mucho de ser predecibles. Una instalación con estas características serviría no sólo para el área de los WECs sino también para el área de robótica y otras máquinas para la generación de energía.

7.2. Diseño del sistema undívago Nahuenrew

7.2.1. Diseño del modelo a escala

El modelo a escala fabricado representa muy bien al prototipo finalmente construido en cuanto a la dinámica del mecanismo y las respuestas frente a las olas. Las problemáticas previstas en las pruebas hechas al modelo a escala sucedieron también con la estructura a escala final, a pesar de que se probó el modelo a escala sin absorbedores de energía.

A pesar de que los modelos a escala construidos no contienen todos los elementos mecánicos que forman la estructura final, resulta muy importante no saltarse esta etapa en el proceso de construcción de un sistema porque sirve para tomar decisiones de desarrollo. Además, con las herramientas disponibles en el laboratorio, especialmente las impresoras 3D, la fabricación de un modelo a escala tarda entre uno a dos días, lo cual es muy rápido.

7.2.2. Modelo de respuesta dinámica

Se desarrolló dos modelos de respuesta dinámica del sistema compuesto por dos módulos. Un modelo contempla los absorbedores y el otro no. Queda como trabajo

⁶ Optitrack es una cámara capaz de rastrear el movimiento de cuerpos y vectorizarlos en un computador, logrando registrar trayectoria, velocidad y aceleración del cuerpo en el espacio 3D.

propuesto resolver las ecuaciones de movimiento propuestas en cada modelo y luego validarlas o mejorarlas. Se propone también desarrollar un modelo de respuesta dinámica para el sistema completo compuesto por cinco absorbedores, que es el sistema probado en el mar. Luego es posible desarrollar también un modelo de respuesta dinámica para un sistema compuesto por n módulos.

7.2.3. Diseño de la estructura final

El diseño de las componentes de la estructura final se reconoce como satisfactorio pues el sistema Nahuenrew no resultó dañado después de realizada la prueba. Y principalmente se reconoce como satisfactorio porque es capaz de recoger energía de las olas y almacenarla como energía potencial. El diseño del sistema Nahuenrew es también satisfactorio porque cumple los objetivos específicos planteados al principio de este proyecto, los cuales se resumen en la siguiente Tabla.

TABLA 5:
RESUMEN DE OBJETIVOS Y LOGROS DEL TRABAJO

OBJETIVO	LOGRO
Diseñar un sistema innovador de bajo costo.	Cumple con las expectativas de costo pues se ajusta a la restricción presupuestaria del proyecto. Incluso se visualizan alternativas para disminuir los costos del sistema, como por ejemplo reemplazar algunos rodamientos en uniones donde la rotación es poca. Se puede disminuir su uso desde 10 a 4 unidades por pirámide, dejando de utilizarlos en las uniones de las piezas que sujetan los absorbedores y reemplazándolos por bujes, pues la rotación en estos puntos es mínima y lenta. Haciendo este reemplazo el gasto en rodamientos disminuiría a la mitad, lo cual tiene un alto impacto en el costo global de la estructura ya que el gasto actual corresponde al 22% del total. Es innovador, ya que no se conocen publicaciones de un sistema undívago para recolección de energía de las olas que cumpla con las características antes mencionadas.
Lograr que el sistema diseñado resuelva alguno de los problemas actuales de este tipo de tecnologías, en particular el que trata del	El diseño del sistema Nahuenrew es capaz de adaptarse a diferentes longitudes de onda del mar. Es potencialmente apto para hacerlo en

acoplamiento en fase entre frecuencia natural del sistema con la frecuencia variable de las olas.	tiempo real si se agrega un sistema de control.
Lograr que el sistema sea modular y que un módulo del sistema sea fácilmente transportable por el usuario.	Es modular y fácilmente transportable. El sistema Nahuenrew completo compuesto por cinco módulos se puede cargar y trasladar en un auto o camioneta particular.
Construir el sistema utilizando herramientas presentes en el Laboratorio de Síntesis de Máquinas Inteligentes y en el Laboratorio de Fabricación Digital Fab Lab, de tal manera que pueda ser reproducido.	Es posible construirlo con las herramientas disponibles en los laboratorios del Departamento. Es más, es posible fabricarlo en cualquier otro Fab Lab del mundo.
Confeccionar protocolo de pruebas para luego someter el sistema a pruebas reales de funcionamiento y cuantificar la energía que almacena.	Se confeccionó un protocolo de pruebas para el sistema, donde se establece las variables a medir y una base de datos con la cual contrastar los resultados obtenidos.

7.3. Construcción del sistema undívago Nahuenrew

Para la estructura final es vital la elección del proceso de fabricación, ya que esto hace la diferencia tanto en el tiempo de construcción como en los costos del sistema. Se requiere fabricar piezas en lotes medianos para lo cual el proceso de vaciado de resina de poliéster en moldes de silicona de caucho ha sido satisfactorio, tanto en el tiempo que tomó como en el acabado de las piezas. Se logró construir lotes de piezas similares que responden bien a las exigencias mecánicas. Por otro lado los moldes quedan disponibles para seguir produciendo las piezas para las que fueron hechos, en caso de querer construir más módulos del sistema Nahuenrew.

En esta etapa de fabricación de piezas los moldes de silicona de caucho son los que más contribuyen a los costos. Este costo se amortigua en la medida que más se exploten los moldes, es decir, que se saque la mayor cantidad de piezas de ellos. También hay que decir que la etapa de fabricación de piezas es la que más tiempo toma dentro la etapa de construcción, pues para el resto de elementos que se compra se necesita no más de cuatro días para cortarlos, perforarlos, pulirlos etc. y dejarlos listos para su uso.

Se deja propuesto fabricar estas mismas piezas con la fresadora CNC Shopbot disponible en el Fab Lab de la Facultad en algún material blando como madera o plástico, para estudiar su acabado, costo y el tiempo que toma hacerlo de esta manera.

7.4. Funcionamiento en ambiente marino

Se realizó una prueba en el mar al sistema Nahuenrew. Esta prueba constó de dos partes. Los resultados de la primera parte de la prueba no fueron exitosos en términos de conversión de energía, es decir, el sistema no fue capaz de entregar presión al estanque. La segunda parte de la prueba sí fue exitosa y se logró levantar la presión en el estanque de aire a 4[PSI], es decir, se pudo transformar la energía de las olas en energía potencial almacenada como aire comprimido. Si bien la presión que se alcanzó en el estanque de aire aún es poca se piensa que es posible mejorar la captura de energía implementando control sobre el sistema o cambiando la geometría de las pirámides.

Se cree que la principal causa de la baja presión alcanzada por Nahuenrew es que en ningún momento los bombines lograron ser comprimidos completamente, ya sea por un bajo torque sobre ellos o porque la rotación entre las pirámides no fue suficiente. En otras palabras, los bombines no alcanzaron su recorrido mínimo, por lo que hubo aire que se presionó dentro del cilindro del bombín pero no fue expulsado fuera de éste y al descomprimir el émbolo esta presión simplemente se perdía.

Para atacar el problema del torque sobre los actuadores se propone una estrategia de control activa. La estrategia de control propuesta es bloquear la rotación de ciertos módulos de la estructura con tal de poder alargar el brazo que ejerce torque sobre los absorbedores, pues fue así como se logró éxito en la segunda prueba. Al bloquear la rotación de ciertas pirámides no sólo se alarga el brazo que ejerce torque sobre los absorbedores sino que también se logra que la estructura se adapte mejor a la longitud de onda predominante del frente de olas cuando esta longitud de onda es mayor al largo de cada pirámide.

Para aumentar el rango de compresión de los actuadores se propone modificar la geometría de las pirámides. Por un lado se puede acortar la posición de los bombines cuando se está en estado estático, con ayuda de brazos fijos por ejemplo. De esta forma la diferencia de distancia entre los nuevos soportes sí lograría ser capaz de comprimir completamente los bombines y así se alcanzaría su recorrido mínimo. Por otro lado se propone modificar la altura de las pirámides manteniendo las dimensiones de la base, ya que a mayor altura, mayor es el rango de deformación del actuador para un rango de rotación dado. Esto se desprende de la Ec. 23 de la sección 4.1, donde al aumentar los valores para a y para Ψ manteniendo la relación $a * \text{sen}(\Psi) = \text{cte}$ (se mantiene la dimensión de la base) aumenta el rango permitido para x en función de α . Luego esto cumple el mismo rol que acortar la posición de los bombines cuando se está en estado estático, logrando una mayor compresión de los bombines para cierto grado de rotación relativa entre pirámides. Para entender mejor esto se presenta una Tabla

con cuatro pirámides de igual base pero distinta altura y un gráfico que muestra el rango de compresión x para distintos valores de rotación α .

TABLA 6:
DIFERENTES CONFIGURACIONES GEOMÉTRICAS DE PIRÁMIDES, SE MANTIENE LA BASE CONSTANTE

Pirámide	a [cm]	Psi	b [cm]
1	70	69,08	50
2	80	71,79	50
3	90	73,87	50
4	100	75,52	50

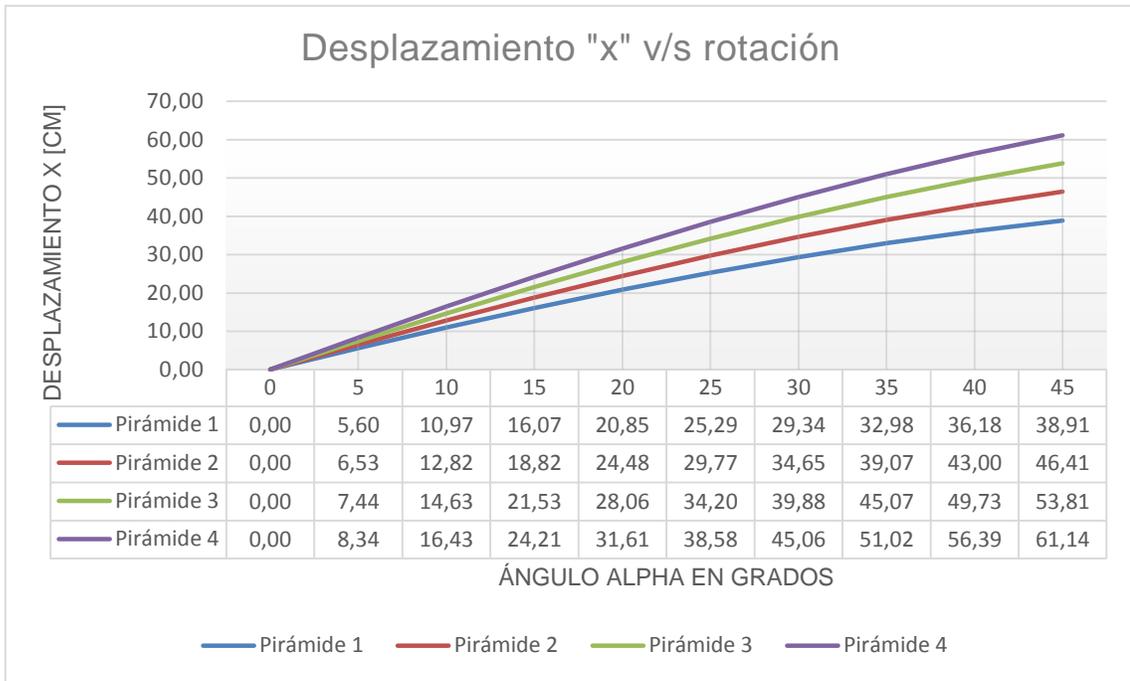


GRÁFICO 2: DESPLAZAMIENTO DE COMPRESIÓN SOBRE ACTUADOR LINEAL EN FUNCIÓN DE LA ROTACIÓN ENTRE DOS PIRÁMIDES. SE OBSERVA EL COMPORTAMIENTO PARA DIFERENTES CONFIGURACIONES GEOMÉTRICAS DE PIRÁMIDES.

Considerando que el oleaje presenciado durante la prueba permitía un máximo de rotación α en torno a los 15 grados y que la carrera de los actuadores es alrededor de 400[mm] sería conveniente probar una geometría de pirámide tipo 3 ó 4, ya que se confía en que olas mayores no destruirán la estructura.

Se deja propuesto estudiar cómo mejora la captura de energía del sistema trabajando con actuadores lineales de doble efecto como absorbedores. Se han comprado cinco unidades a través de la Universidad que están disponibles en el laboratorio. Estos actuadores lineales son construidos con materiales inoxidables y fueron comprados específicamente para esta aplicación. En caso de utilizar estos actuadores lineales el costo total del sistema Nahuenrew asciende a 2,8 millones de pesos pues cada actuador lineal cuesta \$440.000. Al usarlos hay que reemplazar los

flotadores utilizados o incluso cambiar la estrategia de flotabilidad de la estructura, pues el peso de los actuadores lineales es considerablemente más alto que el de los bombines.

Otro aspecto importante que no se logra apreciar con la prueba realizada en el mar es que los materiales elegidos para construir el sistema podrían no ser los ideales. Pues en conversaciones con el Capitán⁷ de la embarcación que se utilizó para realizar la prueba se dijo que el aluminio sería el primer material en corroerse críticamente en el entorno marino. Junto con el aluminio hay otros elementos del sistema que pueden sufrir corrosión temprana como lo son los rodamientos y los absorbedores. Para saber esto con certeza es necesario hacer una prueba larga del sistema Nahuenrew en el ambiente marino e ir monitoreando el estado de cada elemento que lo compone. En el caso del aluminio y los rodamientos la solución es simple pues se puede reemplazar el aluminio por madera o materiales compuestos como fibra de vidrio o fibra de carbono; y los rodamientos se pueden reemplazar por bujes. Pero en el caso de los absorbedores es difícil que no sufran daño debido al entorno de trabajo y no son reemplazables. Por lo tanto en el caso de usar actuadores lineales como absorbedores es importante estudiar el tiempo de funcionamiento antes de la fatiga ya que éstos absorberían la mayor parte del costo total de Nahuenrew.

Respecto a la presión alcanzada y la potencia asociada al considerar un aerogenerador ideal. De la ecuación de Bernoulli es posible calcular que el aire que se encuentra dentro del tanque a 4[PSI] sale a 210[m/s] idealmente. Teniendo en cuenta la curva de potencia de un aerogenerador mencionada en la sección 2.6 se escoge arbitrariamente alcanzar una velocidad de operación de 10[m/s] con la ayuda de un tubo con cambio de sección. Para lograr esto se debe cambiar de sección circular desde la salida del tanque ($\Phi 1/4''$) a 13,34[cm²], calculado según la ecuación de continuidad o de conservación de masa. Con estos datos y utilizando la Ec. 5 es posible calcular la potencia ideal a la entrada de un aerogenerador. Esto da una potencia de

$$p_{entrada} = \frac{1}{2} * 1,25 * 10^3 * 0,1334 = 83,38[W] \quad \text{EC. 41}$$

Luego, tomando en cuenta el límite de Betz, sería posible extraer 50[W] de potencia. Esto es el límite superior del caso ideal. Para mejorar (aumentar) este límite superior es necesario aumentar la presión alcanzada en el tanque.

7.5. Futuro

Seguir con el mismo principio de funcionamiento para continuar desarrollando el sistema Nahuenrew es un camino abierto. Si bien se obtuvo resultados menores a los esperados se tiene confianza en que las mejoras están al alcance de los estudiantes de

⁷Danton Repiso, Capitán de la embarcación "Vale Popi" de Pichidangui.

esta Facultad y se confía en que estas mejoras aumentarán varias veces el rendimiento de la máquina. Es importante tener siempre los objetivos inicialmente planteados en consideración, de otra manera es muy fácil perder el norte en esta materia donde se es pionero. En Chile no se ha instalado ningún sistema undívago que recolecte energía útil para algún poblado o que se inyecte a la red de potencia, a pesar del gran potencial energético disponible y de los esfuerzos de las autoridades de integrar los diversos tipos de energía renovable no convencional. Por lo tanto aún se tiene la oportunidad de ser pioneros como Facultad en esta materia y competir o dominar el mercado de energía undimotriz en Chile.

En resumen, los caminos propuestos para mejorar el rendimiento de Nahuenrew en su recolección de energía son:

- Resolver los modelos de respuesta dinámica propuestos e integrarlos al diseño del sistema,
- Agregar control a los absorbedores y explorar diversas estrategias de control,
- Modificar los soportes de los bombines para acortar el recorrido permitido para éstos,
- Aumentar la altura de las pirámides manteniendo la base constante para aumentar el rango de compresión de los actuadores,
- Utilizar actuadores lineales de doble efecto en vez de bombines de bicicleta,
- Extraer datos de olas de un lugar específico donde se pueda realizar varias pruebas, de manera de estandarizar estas pruebas, tal como lo aconseja en [1],
- Cambiar el fluido de trabajo por uno incompresible.

Por otro lado queda también como trabajo propuesto desarrollar la etapa siguiente a la recolección de energía, que es la conversión de esta energía en otra de uso más fácil como lo es la energía eléctrica. Con esto se cerraría el ciclo de recolección-conversión-utilización de la energía de las olas.

8. Conclusiones

Los objetivos de esta memoria fueron exitosamente logrados ya que se diseñó, construyó y probó un sistema undívago capaz de recolectar energía de las olas del mar y transformarla en energía potencial. El sistema diseñado es innovador dentro del tipo de sistemas atenuadores que hoy existen en el mercado de la energía undimotriz.

El sistema construido funciona aguas adentro y es de cuerpo oscilante. Además es modular y se puede adaptar a demandas específicas de potencia. Cada módulo tiene forma de pirámide de base cuadrada, mide 88[cm] de largo, 81,6[cm] de ancho, 38[cm] de alto, pesa aproximadamente 4[kg] y está compuesto por 124 piezas. El sistema Nahuenrew completo está compuesto por 6 pirámides y 5 absorbedores, mide 5,2[m] de largo y pesa en total alrededor de 24[kg]. Este sistema es armable en 1[hr] y desarmable en 45[min], además puede ser transportado en una camioneta o auto. El sistema completo costó \$658.000 y tardó 8 semanas en ser construido, sin contar la etapa de diseño, con las herramientas disponibles en los laboratorios de la Universidad.

También se diseñó, construyó e instaló un generador de olas en el estanque del Laboratorio de Síntesis de Máquinas Inteligentes con el cual se pudo probar los modelos a escala y tomar decisiones para la construcción del sistema Nahuenrew. Este generador de olas queda en el Laboratorio como equipamiento para seguir experimentando con nuevas ideas.

La prueba a Nahuenrew realizada en el mar sugiere mejoras urgentes, como lo es implementar una estrategia de control que permita acoplar el movimiento del sistema a la longitud de onda predominante del patrón de olas, pues fue así como se logró éxito en la recolección de energía. La prueba también sugiere construir una estructura más larga o agregar más módulos al sistema. Otra posible mejora es cambiar la geometría de Nahuenrew. Una opción es acortar el recorrido permitido para los bombines reemplazando los soportes de los bombines en las pirámides. Otra opción es aumentar la altura de las pirámides manteniendo la base, aumentando así el rango de compresión y extensión de los actuadores.

Es posible estimar la potencia máxima que se puede convertir a energía eléctrica considerando un aerogenerador ideal. Para los resultados obtenidos en la prueba realizada a Nahuenrew en el ambiente marino sería posible generar 50[W] de potencia idealmente. Este límite podría aumentar logrando mayor presión en el tanque.

Se propone explorar el funcionamiento del sistema Nahuenrew reemplazando los bombines de bicicleta por actuadores lineales de doble efecto, que se encuentran disponibles en la Facultad. Se propone también resolver los modelos de respuesta dinámica elaborados en la etapa de diseño, para integrar los resultados al diseño de la estructura, ya sea utilizando bombines o actuadores lineales.

Se considera importante extraer datos de olas en algún lugar específico para lograr estandarizar las pruebas y poder contrastar los resultados con datos más precisos.

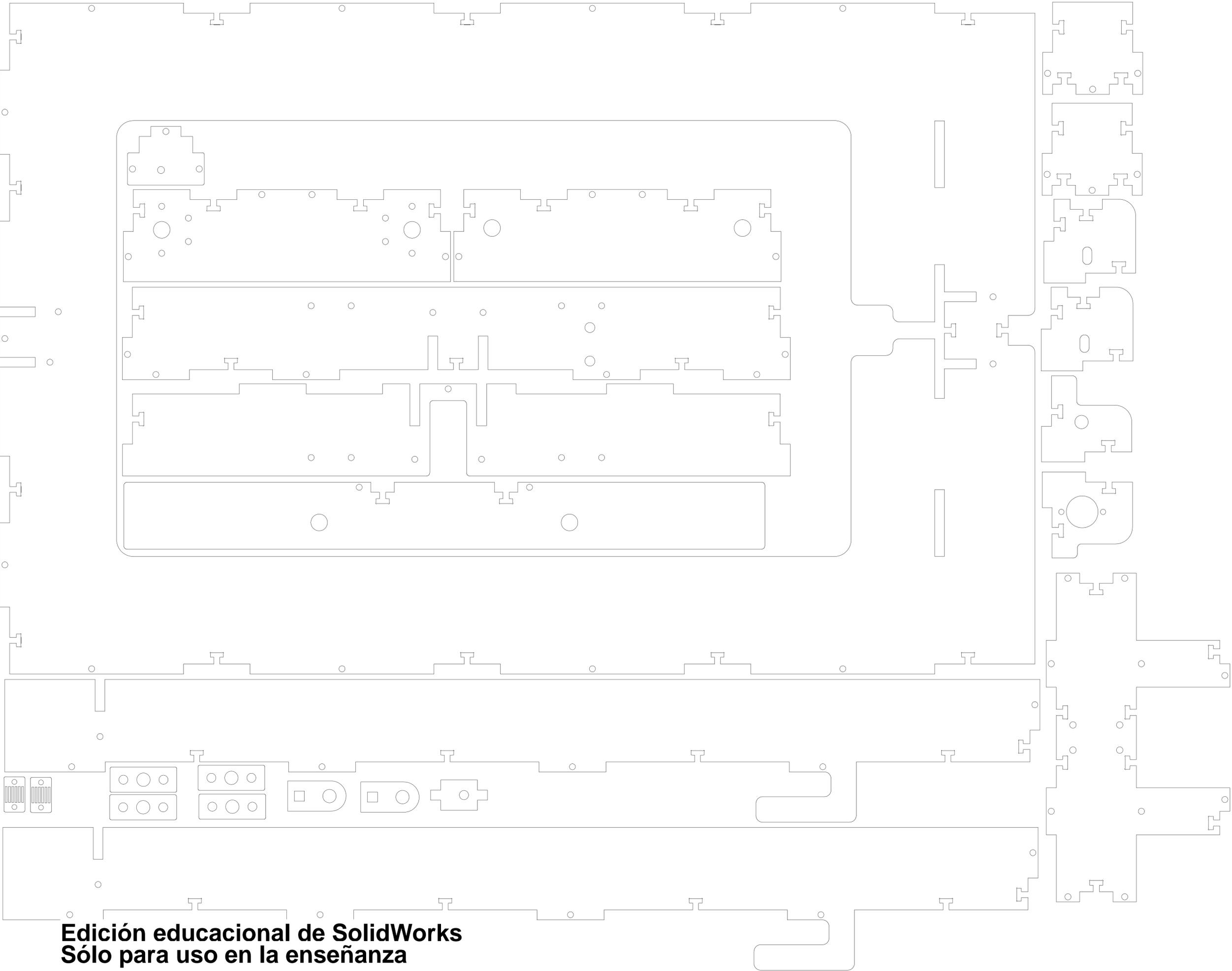
Por último se deja abierto el tema de desarrollar la siguiente etapa a la recolección que es la etapa de conversión de energía, primordialmente convertirla a energía eléctrica para su uso más fácil o su integración a la red de potencia.

9. Bibliografía

- [1] A. F. D. O. Falcão, “Wave energy utilization: A review of the technologies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 3, pp. 899–918, Apr. 2010.
- [2] MinEnergía, “energía futuro,” 2012.
- [3] Congreso Nacional de Chile, “Ley 20.257,” pp. 1–4, 2013.
- [4] Emol, “Fuente inagotable de fuerza limpia , renovable e ilimitada,” pp. 1–2, 2013.
- [5] D. de G. Uchile, “Explorador Marino Undimotriz,” 2013.
- [6] C. Riffo, “En La Higuera se ubicará planta piloto para generar electricidad gracias a las olas,” *El Día Coquimbo*, pp. 1–3, 2013.
- [7] IDB, “IDEAS announces the winners of Energy Innovation Contest 2013,” 2013.
- [8] INNOVO, “Noticias,” 2014. [Online]. Available: <http://www.innovo.cl/new/noticias/proyecto-wilefko-del-centro-innovo-forma-parte-de-la-cartera-de-poyectos-de-inversion-extranjera-del-cie-en-sector-energia/>.
- [9] Colegio de Ingenieros Chile, “Categoría | Actualidad , Artículos Ingeniero Mayor , Destacados , Noticias de Último Minuto,” 2013. [Online]. Available: <http://www.ingenieros.cl/proyecto-innovador-de-energia-undimotriz-transformara-el-mercado-de-las-ernc/>.
- [10] N. Bravo, “Sistema de conversión mecánica eléctrica para un generador undimotriz,” 2008.
- [11] R. Waters, *Energy from Ocean Waves*. 2008.
- [12] Edinburgh University, “Electricity Generation,” no. February, 2006.
- [13] B. Drew, a R. Plummer, and M. N. Sahinkaya, “A review of wave energy converter technology,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part A J. Power Energy*, vol. 223, no. 8, pp. 887–902, Dec. 2009.
- [14] Garrad Hassan America, “Garrad Hassan Wave Energy Technology Review,” 2009.
- [15] K. P. Ramírez, “Aerogeneradores : Generadores de electricidad y productores de agua,” 2011.
- [16] L. R. Luis Vargas, Jannik Haas, Fabián Barria, “Generación de Energía Eléctrica con Fuentes Renovables.”

10. Anexos

A continuación se adjuntan el plano para corte láser del generador de olas en estructura de acrílico, el código Arduino que controla el puente H para el motor DC y los planos de las piezas que fue necesario fabricar para construir el sistema Nahuenrew. Los documentos se adjuntan en el orden descrito.



Edición educacional de SolidWorks
Sólo para uso en la enseñanza

```

// # Editor      : Lauren from DFRobot
// # Date       : 17.02.2012

// # Product name: L298N motor driver module DF-MD v1.3
// # Product SKU : DRI0002
// # Version     : 1.0

// # Description:
// # The sketch for using the motor driver L298N
// # Run with the PWM mode

// # Connection:
// #      M1 pin  -> Digital pin 4
// #      E1 pin  -> Digital pin 5
// #      M2 pin  -> Digital pin 7
// #      E2 pin  -> Digital pin 6
// #      Motor Power Supply -> Centor blue screw connector(5.08mm 3p connector)
// #      Motor A  -> Screw terminal close to E1 driver pin
// #      Motor B  -> Screw terminal close to E2 driver pin
// #
// # Note: You should connect the GND pin from the DF-MD v1.3 to your MCU control
// #

int E1 = 9;
int M1 = 8;
//int      E2      =      6;
//int      M2      =      7;

void setup()
{
    pinMode(M1, OUTPUT);
    //pinMode(M2, OUTPUT);
}

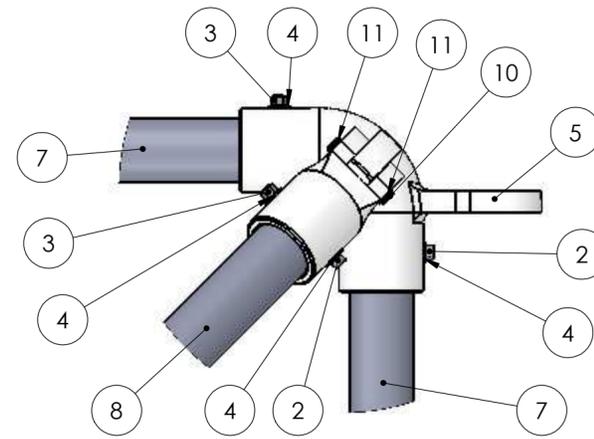
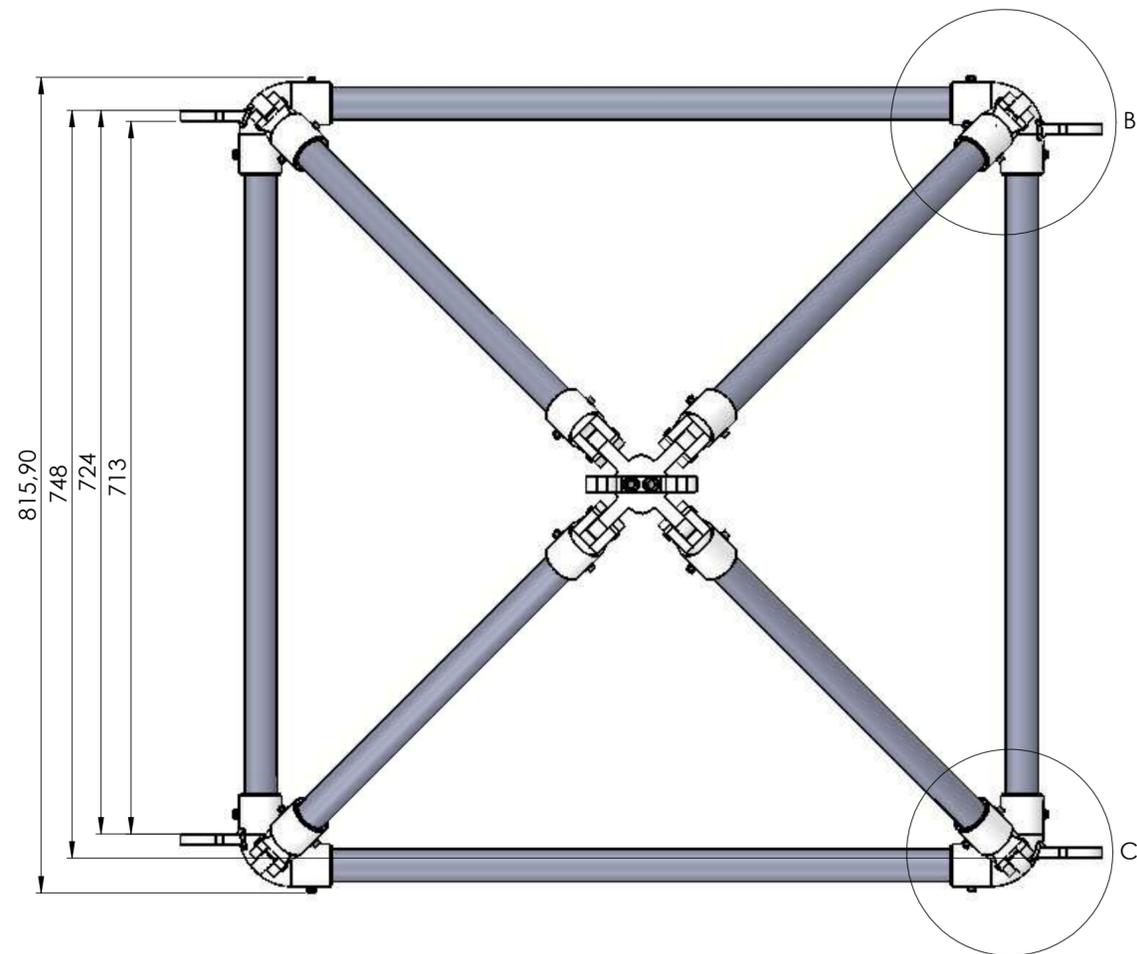
void loop()
{
    digitalWrite(M1,HIGH);
    analogWrite(E1, 255); //PWM Speed Control
    delay(800);
    analogWrite(E1, 0); //PWM Speed Control
    delay(10);

    digitalWrite(M1,LOW);
    analogWrite(E1, 255); //PWM Speed Control
    delay(800);
    analogWrite(E1, 0); //PWM Speed Control

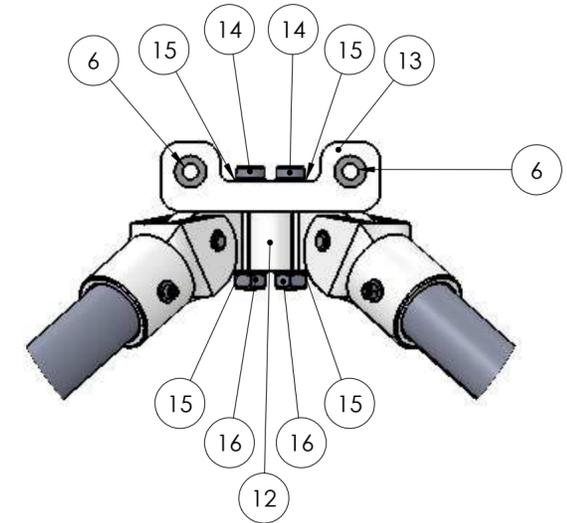
```

```
delay(10);
```

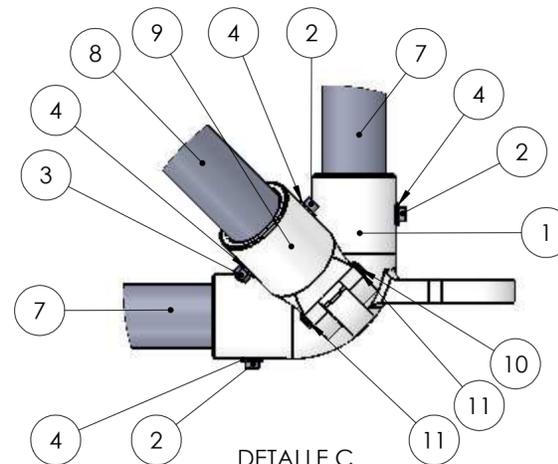
```
}
```



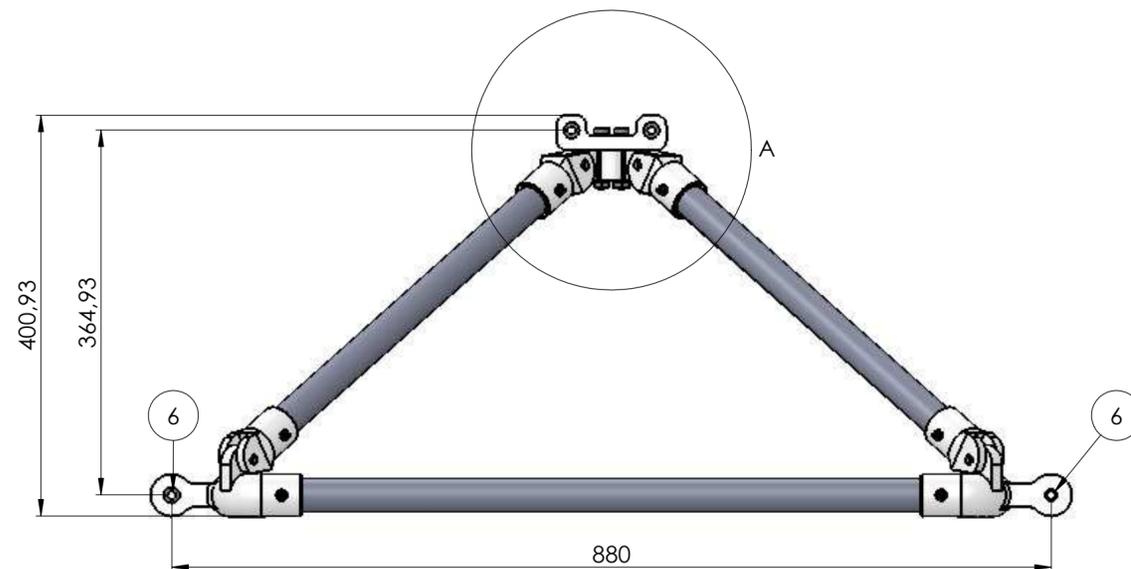
DETALLE B
ESCALA 2 : 5



DETALLE A
ESCALA 2 : 5

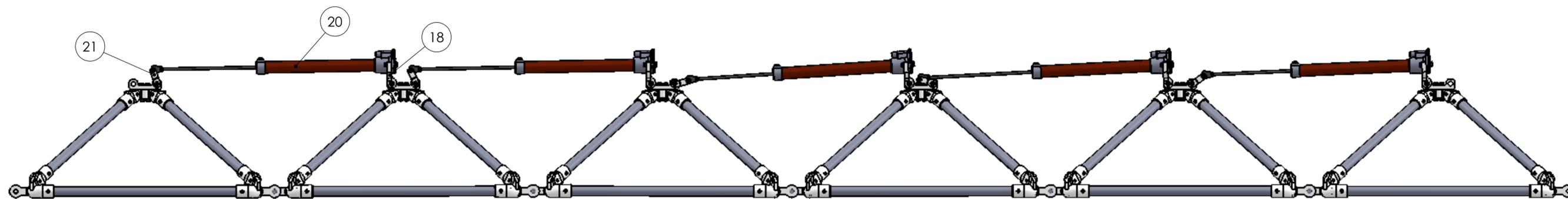


DETALLE C
ESCALA 2 : 5



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	junta triple 1		2
2	perno M4x50		16
3	tuerca M4		16
4	golilla M4		32
5	junta triple 2		2
6	rodamiento de bolas		6
7	tubo3		4
8	tubo 4		4
9	junta triple parte 2		8
10	eje 1		8
11	seguro segers 8mm		16
12	junta cuadruple		1
13	soporte bombin medio		1
14	perno M8x55		2
15	golilla M8		4
16	tuerca M8		2

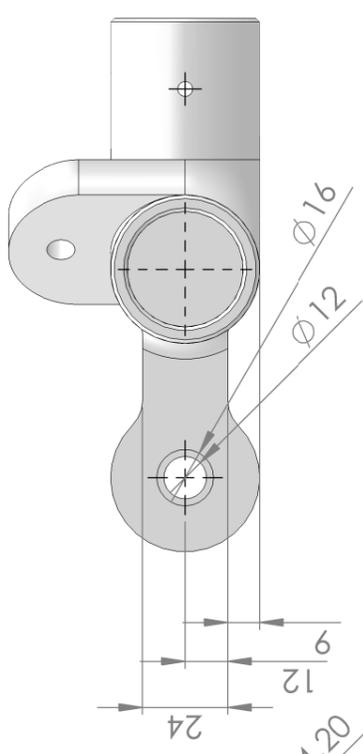
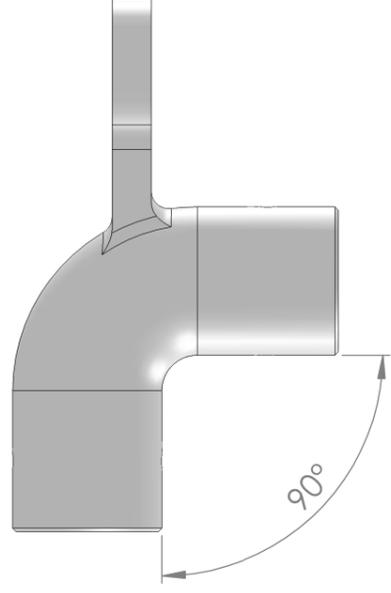
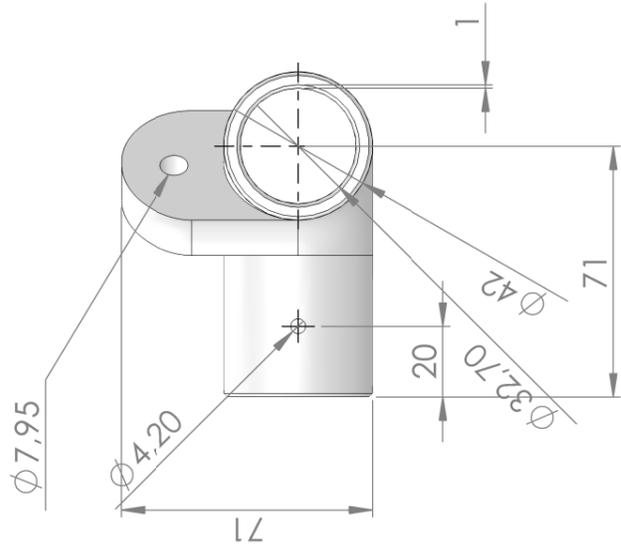
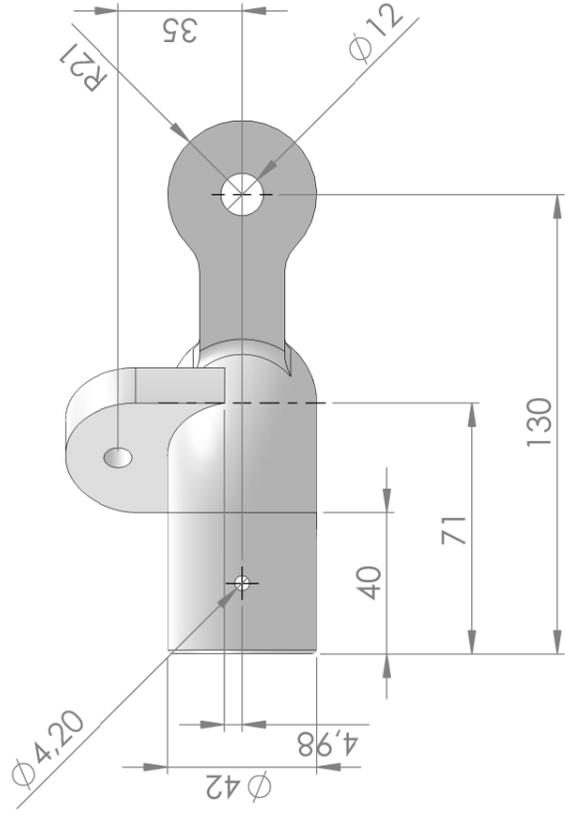
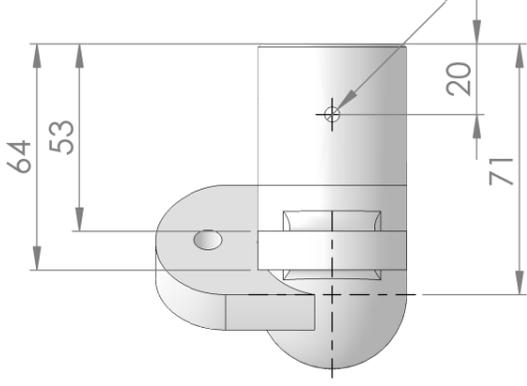
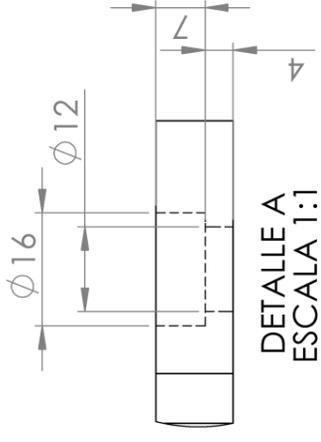
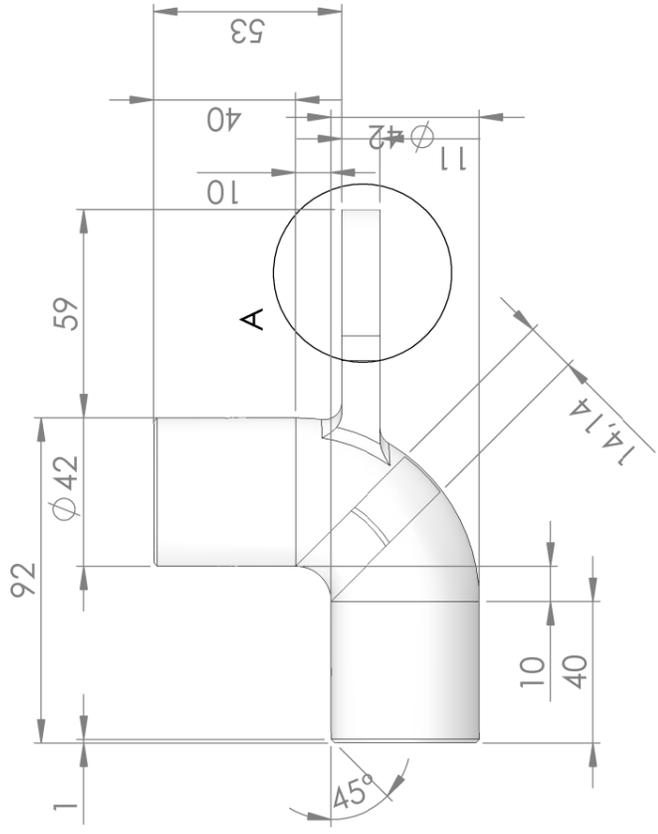
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
DIBUJ:	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
VERIF:	Gustavo Diaz		30/01/2014	Pirámide, componentes	
APROB:				Nº DE DIBUJO	A2
FABR:				0	
CALID:			MATERIAL:		
			PESO: 4 Kg	ESCALA:1:5	HOJA 1 DE 1



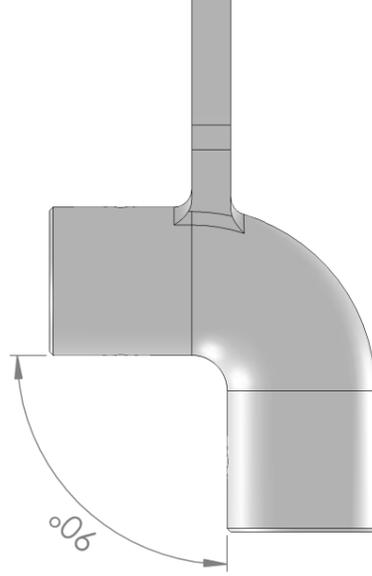
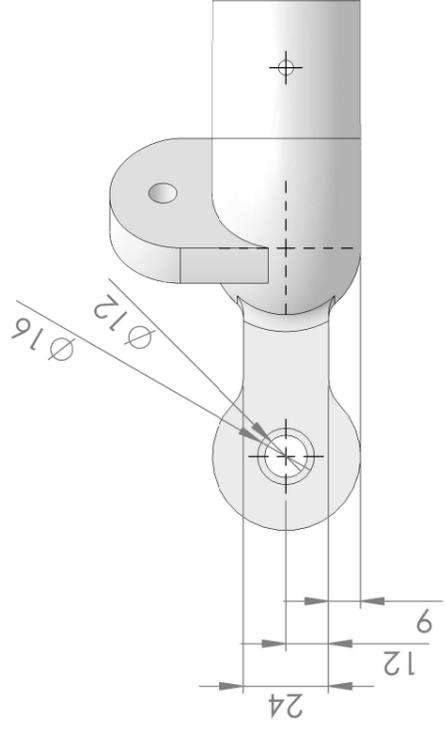
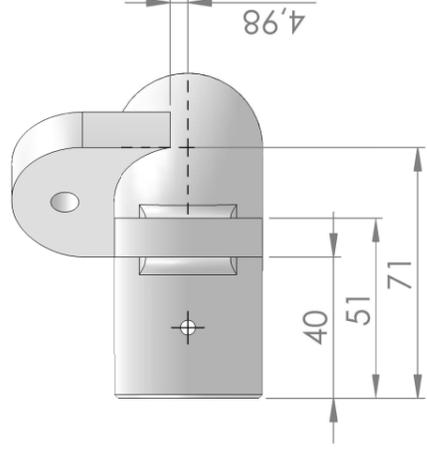
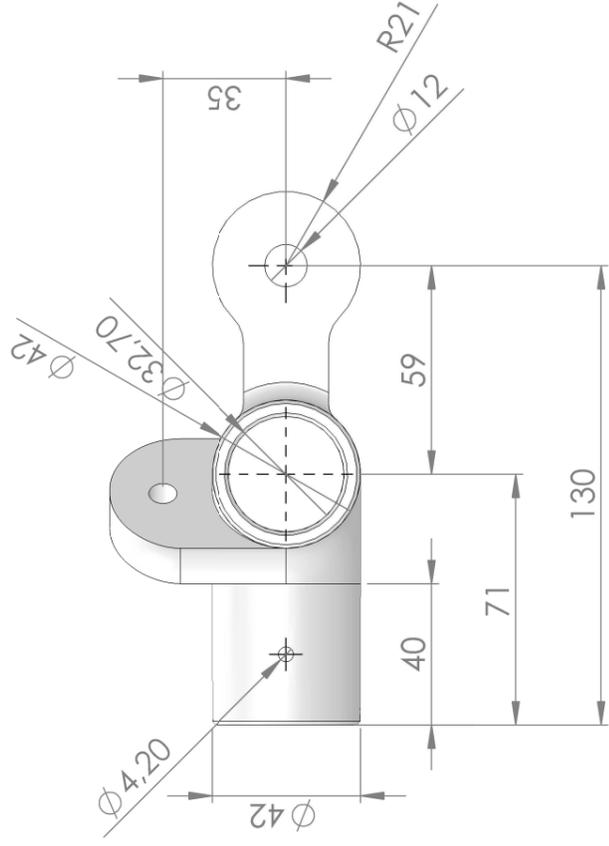
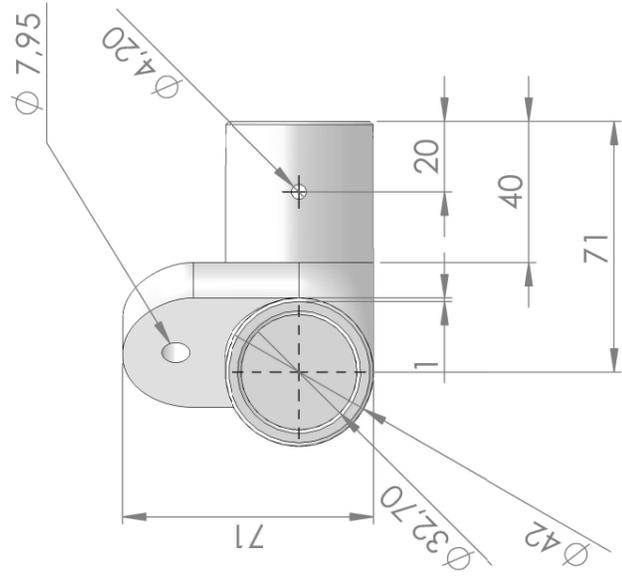
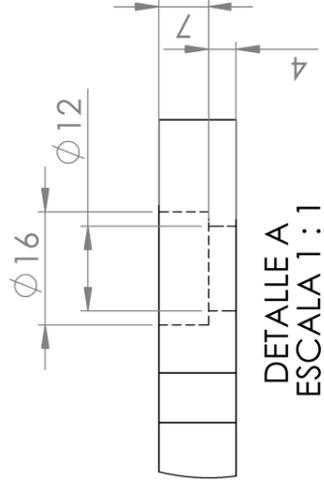
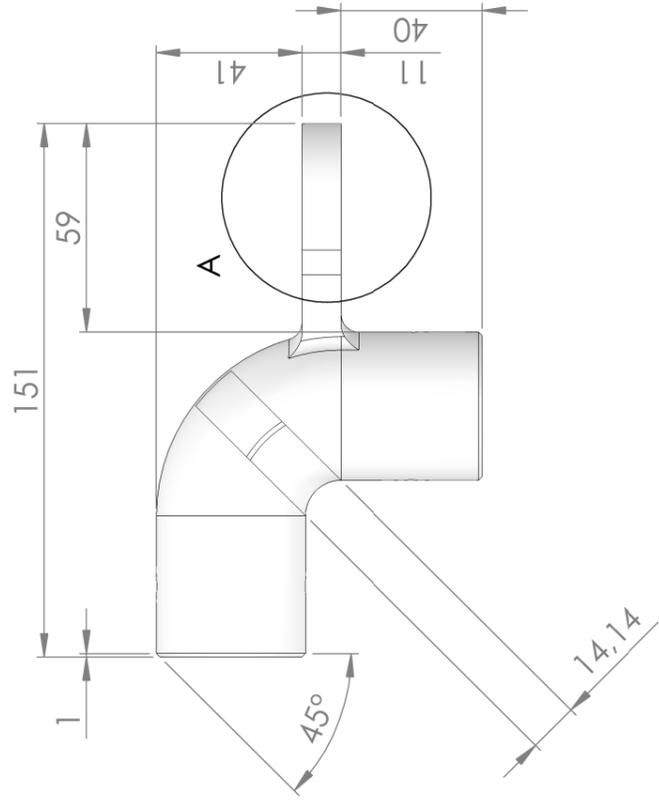
0

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1		junta triple 1	12
2		perno M4x50 parquer inox	96
3		tuerca M4 inox	96
4		golilla plana M4 inox	192
5		junta triple 2	12
6		rodamiento de bolas 16x8x5mm inox	56
7		tubo 3, 32x700 e 1,2mm aluminio	24
8		tubo 4, 32x500 e 1,2mm aluminio	24
9		junta triple parte 2	48
10		eje 1	58
11		seguro seegers 8mm inox	116
12		junta cuádruple	6
13		soporte bombín medio	6
14		perno M8x55 parquer inox	12
15		golilla plana M8 inox	84
16		tuerca M8 con seguro plástico inox	32
17		bombín arriba recortado	5
18		soporte bombín abajo	5
19		perno M8x35 parquer inox	20
20		bombín	5
21		Soporte bombín tenaza	5
22		eje 3, 1/4"x85mm hilo ambos extremos	5
23		tuerca 1/4 con seguro plástico inox	10
24		golilla plana 1/4 inox	10

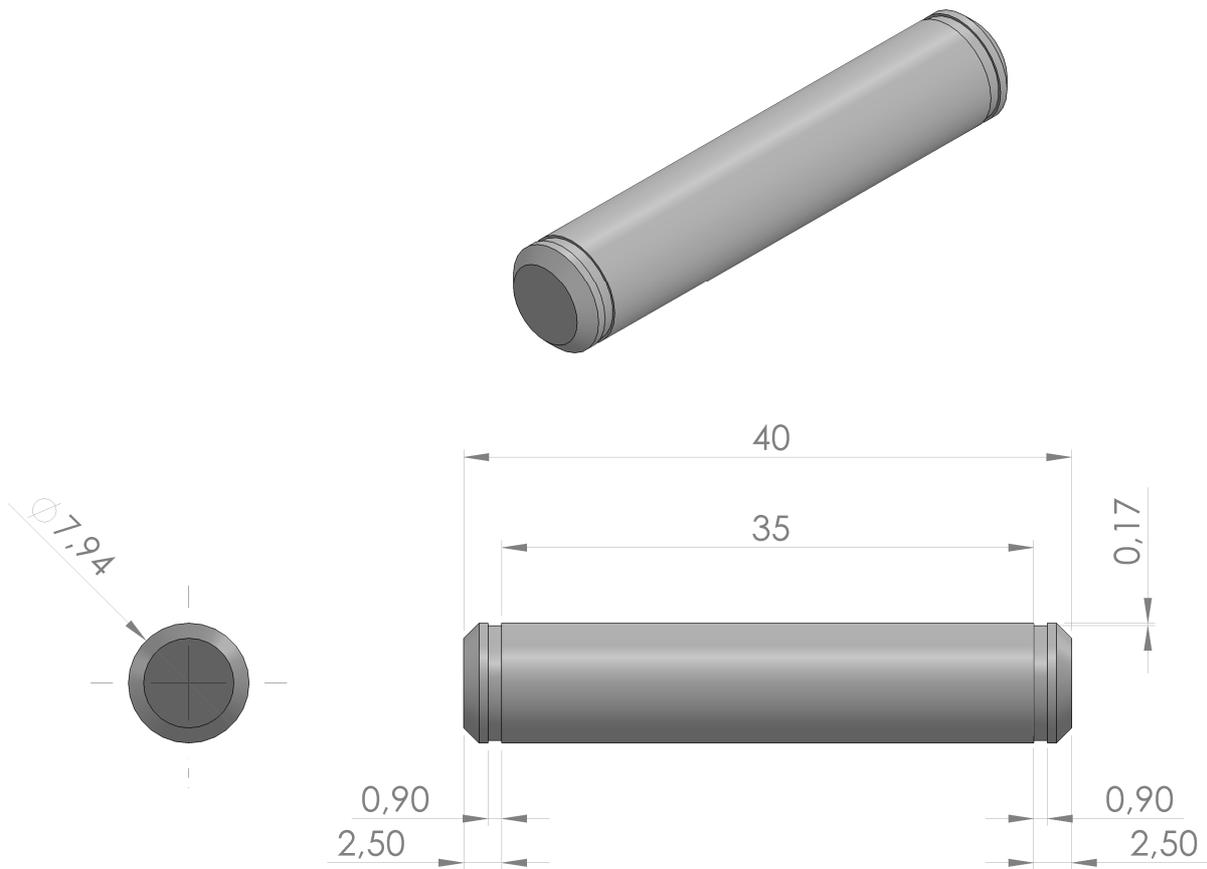
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
VERIF.	Gustavo Diaz		30/01/2014	Sistema undivago completamente ensamblado	
APROB.					
FABR.				Nº DE DIBUJO	A2
CALID.				0	
			MATERIAL:	ESCALA:1:10	HOJA 1 DE 1
			PESO:		



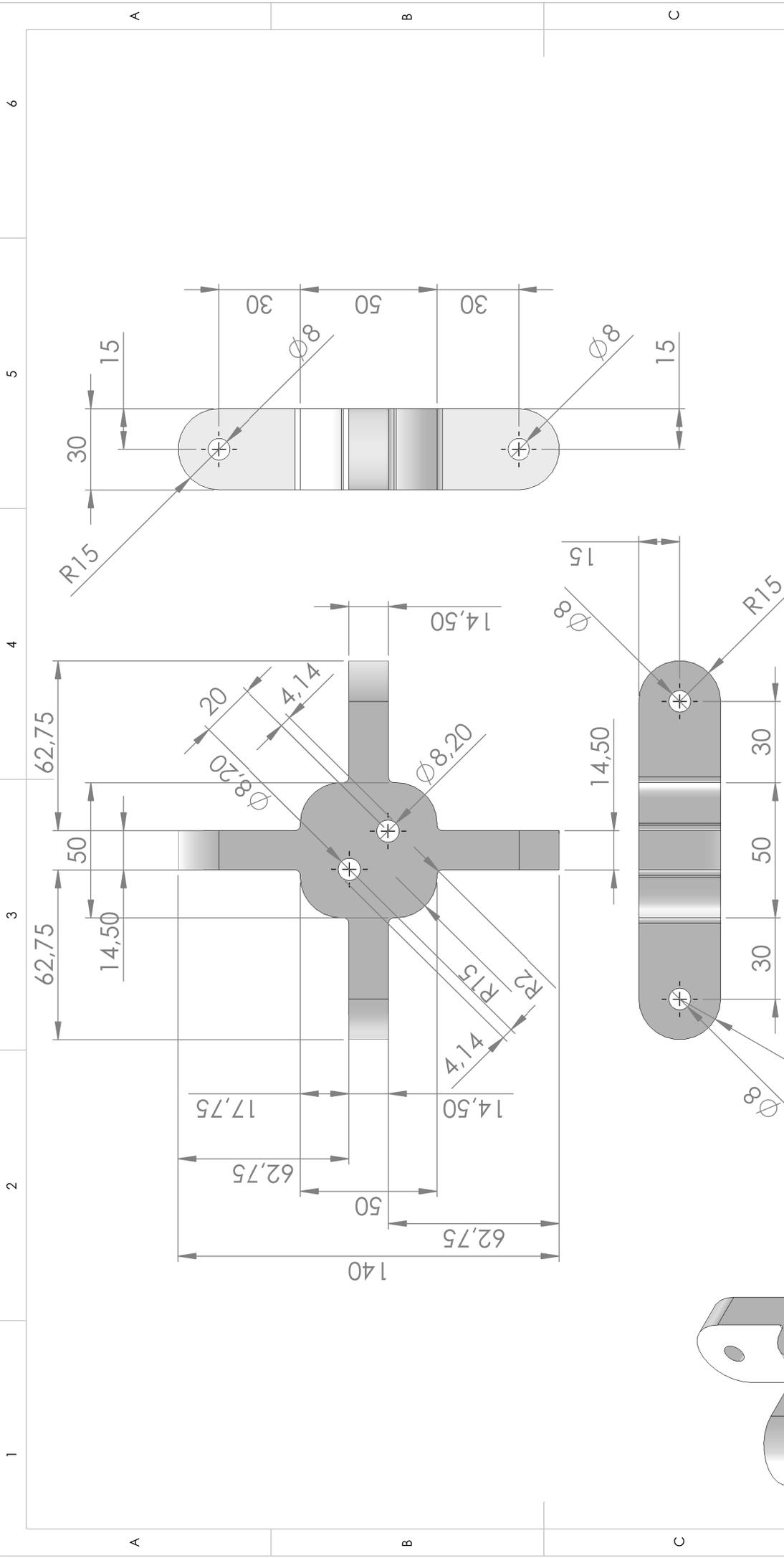
SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:									
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO:					
VERIF.	Gustavo Diaz		30/01/2014	Junta triple 1					
APROB.				N.º DE DIBUJO		1		A3	
FABR.				MATERIAL:					
CAUID.				PESO:					
				ESCALA:1:2		HOJA 1 DE 1			



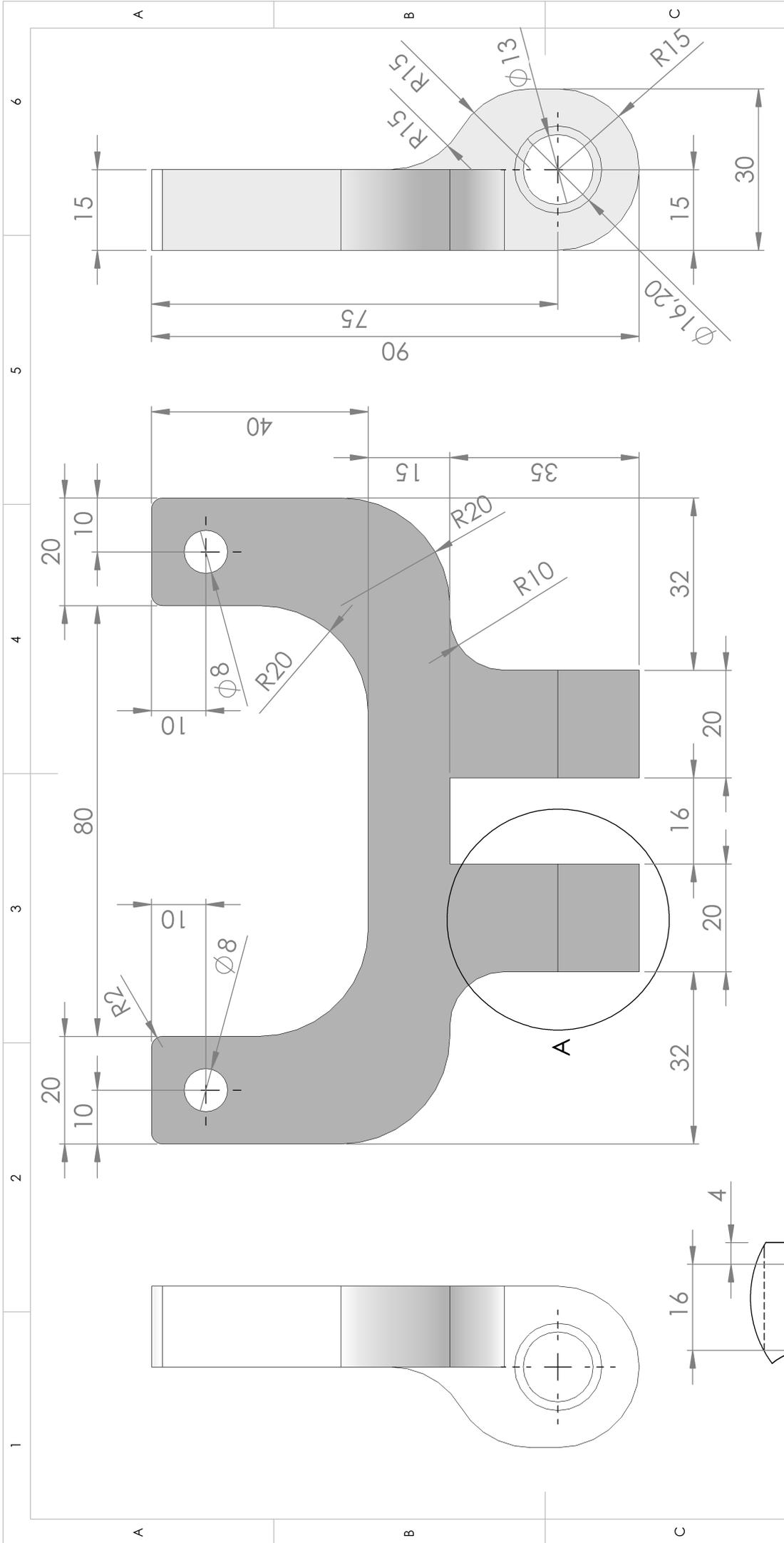
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
ACABADO SUPERFICIAL:		NOMBRE		FECHA		TÍTULO:		Junta triple 2	
TOLERANCIAS:		Gustavo Diaz		30/01/2014		Nº DE DIBUJO		5	
LINEAL:		FIRMA		MATERIAL:		ESCALA:1:2		A3	
ANGULAR:		VERIF.		FABR.		PESO:		HOJA 1 DE 1	
		APROB.		CALID.					



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO: Eje 1				
DIBUJ. Gustavo Díaz		30/01/2014					
VERIF.							
APROB.							
FABR.							
CAUID.			MATERIAL: Acero AISI 316	N.º DE DIBUJO 10	A4		
PESO:			ESCALA:2:1	HOJA 1 DE 1			

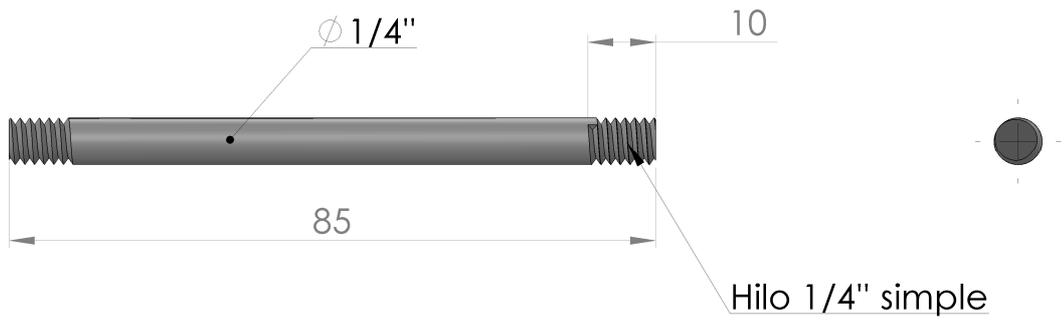
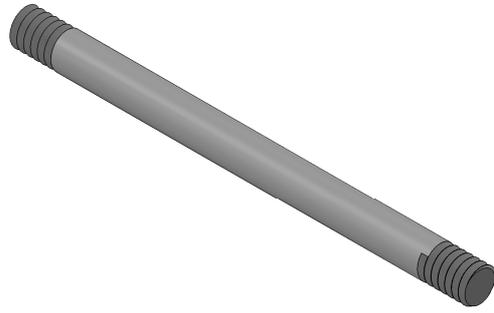


NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS			
ACABADO:		FECHA	
SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		30/01/2014	
ACABADO SUPERFICIAL:		FIRMA	
TOLERANCIAS:		NOMBRE	
LINEAL:		Gustavo Diaz	
ANGULAR:		VERIF.	
		APROB.	
		FABR.	
		CALID.	
		MATERIAL:	
		PESO:	
TÍTULO:			
<h1>Junta cuádruple</h1>			
N.º DE DIBUJO		A4	
ESCALA:1:2		HOJA 1 DE 1	



NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		REVISIÓN	
ACABADO:		TÍTULO:	
SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		Soporte bombín abajo	
ACABADO SUPERFICIAL:		N.º DE DIBUJO	
TOLERANCIAS:		18	
LINEAL:		N.º DE DIBUJO	
ANGULAR:		MATERIAL:	
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA
VERIF.	Gustavo Diaz		30/01/2014
APROB.			
FABR.			
CALID.			
ESCALA: 1:1		PESO:	
HOJA 1 DE 1		A4	

DETALLE A



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
NOMBRE		FIRMA		FECHA		TÍTULO:			
DIBUJ. Gustavo Díaz				30/01/2014		<h1>Eje 3</h1>			
VERIF.									
APROB.									
FABR.									
CAUID.				MATERIAL:		N.º DE DIBUJO		A4	
				Acero AISI 316		22			
				PESO:		ESCALA:1:1		HOJA 1 DE 1	