

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO
ABSORBEDOR PUNTUAL TIPO ON-SHORE PARA ESTUDIO DEL
POTENCIAL ENERGÉTICO UNDIMOTRIZ EN EL
DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA**



**ÁVILA DÍAZ CÉSAR IVÁN.
HERRERA MEDINA MANUEL ALEJANDRO.**

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERIA MECÁNICA
MONTERÍA, CÓRDOBA
2017.**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO
ABSORBEDOR PUNTUAL TIPO ON-SHORE PARA ESTUDIO DEL
POTENCIAL ENERGÉTICO UNDIMOTRIZ EN EL
DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA.**

**ÁVILA DÍAZ CÉSAR IVÁN.
HERRERA MEDINA MANUEL ALEJANDRO.**

**Trabajo de grado presentado, en la modalidad de Trabajo de Investigación y/o
Extensión, como parte de los requisitos para optar al Título de Ingeniero mecánico.**

**Director:
YAHIR ENRIQUE GONZALEZ DORIA M.Sc.**

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERIA MECÁNICA
MONTERÍA, CÓRDOBA
2017.**

La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del proyecto, serán responsabilidad de los autores.

Artículo 61, acuerdo N° 093 del 26 de noviembre de 2002 del consejo superior.

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del director

Dedico este trabajo

A mi esposa Gabriela Arango y a mis hijos Sebastián y Nicolás, por su infinita paciencia hacia mí todos estos años y por permitirme mantenerlos en mi vida. Ustedes son mi razón de ser y el motor que alimenta mi vida.

Manuel Alejandro Herrera Medina

Dedico este trabajo

A las mujeres que más amo, a mi madre Andrea Díaz, a mi hermana Daniela Puello y a mi abuela Carmen Arrieta, quienes siempre depositaron su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento en mi inteligencia y capacidad. Es por ello que soy lo que soy ahora. Las amo con mi vida.

César Iván Ávila Díaz

Agradecimientos especiales:

A Dios por habernos permitido cumplir con éste objetivo.

A todos los docentes del departamento de ingeniería mecánica de la universidad de Córdoba.

A nuestro director Ingeniero Yahir González por haber creído en nosotros y dedicarnos su tiempo durante todo el proyecto.

A la profesora Diana Sofía Herazo Cárdenas quien fue la primera persona que nos escuchó y orientó.

Al Capitán de Puerto de Coveñas José Andrés Díaz Ruiz, por tomarse el tiempo de leer nuestros mensajes y responder amablemente nuestras inquietudes.

Al doctor Andrés Fernando Osorio Arias por sus consejos y sugerencias para el uso del canal de oleaje.

A la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín por permitirnos utilizar el laboratorio de hidráulica y mecánica de fluidos.

Al profesor Francisco Mauricio Toro Botero por habernos recibido y escuchado, además de darnos un espacio para el uso del laboratorio.

A los ingenieros Cesar Augusto Jaramillo, Luis Fernando Ospina Herrera y el estudiante Andrés Esteban Piedrahita Rincón por ayudarnos y orientarnos en nuestra visita a Medellín.

Agradecimientos:

A mis padres por sus consejos, a mis tíos Miguel y Laura por todo el apoyo que me han brindado.

A Gabriela Arango por amarme y aguantarme todo el tiempo.

A mis hijos Sebastián y Nicolás, por tenerme paciencia todos los días de la vida y quererme así como soy.

Manuel Alejandro Herrera Medina

A madre Andrea quien a lo largo de mi vida ha velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento.

A mi hermana Daniela quien con sus bromas y su inocencia siempre me animo en los momentos difíciles

A mi abuela Carmen cuyos sabios consejos aún sigo aplicando.

Finalmente a todas esas personas que creyeron en mí y me dieron su apoyo cuando más lo necesite, Infinitos agradecimientos a todos esos amigos y familiares que siempre estuvieron allí.

César Iván Ávila Díaz

TABLA DE CONTENIDO.

	Pág.
RESUMEN.....	16
ABSTRACT	17
1. REVISIÓN DE LITERATURA.....	21
1.1. Energías contenidas en el mar.....	21
1.2.Energía undimotriz.....	21
1.3.Descripción de las olas.....	23
1.3.1. Teoría lineal de olas.....	23
1.3.2. Olas irregulares.....	25
1.3.3. Energía de las olas.....	25
1.3.3.1.Energía total de una ola.....	25
1.3.3.2.Flujo de energía y potencia de una ola.....	25
1.4.Clasificación de los sistemas de captación.....	26
1.4.1. Clasificación con respecto a la localización.....	26
1.4.2. Clasificación con respecto al principio de captación.....	27
1.4.2.1.Diferencias de presión en un fluido.....	27
1.4.2.2.Cuerpos boyantes activados por las olas.....	29
1.4.2.3.Sistemas de rebosamiento y/o impacto.....	29
1.4.3. Clasificación en cuanto a la modificación que producen en el oleaje incidente.....	31
1.4.3.1.Absorbedores Puntuales.....	31
1.4.3.2.Atenuadores.....	32
1.4.3.3.Terminadores o totalizadores.....	33
1.5.Teoría hidrodinámica.....	34
1.6.Energía undimotriz en el mundo.....	38

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	68
3.1. Diferencial de altura del oleaje en la zona del caribe colombiano.....	68
3.1.1. Búsqueda bibliográfica del Oleaje en la zona del caribe Colombiano.....	68
3.1.2. Sistema de medición de parámetros oceanográficos y de meteorología marina – SMPOMM.....	69
3.1.3. Consulta con personal experto en oceanografía.....	72
3.2. Diseño del dispositivo.....	73
3.2.1. Boya.....	73
3.2.1.1. Geometría y dimensiones de la boya	73
3.2.1.2. Cálculos de la fuerza producida por la boya.....	73
3.2.1.3. Selección de material de la boya.....	74
3.2.2. Cremallera y engranajes del sistema de transmisión de potencia.....	75
3.2.2.1. Selección de material de la cremallera, ejes y engranajes.....	75
3.2.2.2. Dimensionamiento de la cremallera y los engranajes.....	76
3.2.2.2.1. Factor de seguridad Cremallera y engranaje 4: Análisis a flexión.....	78
3.2.2.2.2. Factor de seguridad Cremallera y engranaje 4: análisis a desgaste o picadura.....	80
3.2.2.2.3. Factor de seguridad engranaje 7 y engranaje 8: análisis a flexión.....	83
3.2.2.2.4. Factor de seguridad engranaje 7 y engranaje 8: análisis a desgaste o picadura.....	84
3.2.3. Empalme.....	85
3.2.4. Ejes.....	87
3.2.5. Chumaceras.....	92
3.2.6. Embrague.....	94
3.2.7. Generador.....	95
3.2.8. Validación del dispositivo.....	96
3.2.8.1. Altura real de ola.....	96
3.2.8.2. Comparación de las revoluciones por minuto.....	97

3.2.8.3.Comparación del voltaje y amperaje producido por el dispositivo.....	98
3.3.Comparación del potencial energético undimotriz teórico vs el obtenido a través del dispositivo.....	100
4. CONCLUSIONES.....	104
5. RECOMENDACIONES.....	105
6. BIBLIOGRAFÍA.....	106
ANEXOS	118

LISTADO DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1: Especificaciones de diseño de la chumacera RBR UCP201-8.....	118
ANEXO 2: Grafica de funcionamiento del generador Orientalmotor.com. (2017). DC Input Stepper Motor and Driver Systems - VEXTA & Oriental Motor.....	119
ANEXO 3: Regresión lineal múltiple para encontrar la ecuación de potencia real vs altura y periodo de ola para el dispositivo diseñado.....	119
ANEXO 4: Planos del dispositivo.....	120

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Escenarios elegidos para la toma de datos	65
Tabla 2. Materiales evaluados según las opciones del mercado	75
Tabla 3. Dimensiones de la cremallera y los engranajes.....	76
Tabla 4. Resumen de los datos para la selección de las chumaceras	94
Tabla 5. Comparación de las revoluciones por minuto.....	97
Tabla 6. Voltaje y amperaje promedio en cada escenario.....	99
Tabla 7. Potencia teórica, potencia real y eficiencia del equipo en función de la altura y periodo de la ola.....	101

LISTADO DE GRAFICOS

	Pág.
Grafico 1: Altura real del escenario ocho evaluada con valores arrojados desde dos sensores ubicados en el canal de oleaje.....	96
Grafico 2: Altura real del escenario diez evaluada con valores arrojados desde dos sensores ubicados en el canal de oleaje.....	96
Grafico 3: Voltaje del generador con revoluciones controladas con el torno.....	98
Grafico 4: Intensidad del generador con revoluciones controladas con el torno.....	98

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de la patente de Girard (izda.) y Sistema Bochaux-Praceique (dcha.).....	22
Figura 2: Características de una ola corta.....	24
Figura 3: Clasificación de los dispositivos con respecto a la localización	26
Figura 4: Vista transversal de un dispositivo tipo OWC	28
Figura 5: Representación esquemática del Archimedes Wave Swing.....	28
Figura 6: Representación esquemática de un dispositivo con cuerpo boyante.....	29
Figura 7: Vista de planta del dispositivo Wave Dragon	30
Figura 8: Clasificación de los dispositivos con respecto al principio de captación.....	31
Figura 9: Dispositivo absorbedor puntual Noruego	32
Figura 10: Tres unidades del sistema pelamis (750 kW) en el mar de Portugal.....	33
Figura 11: Clasificación de los dispositivos con respecto a la modificación que producen en el oleaje incidente	34
Figura 12: En la izquierda las curvas de los parámetros ϵ_{33} y μ_{33} los cuales son los coeficientes no dimensionales en modo tirante o heave, de la resistencia a la radiación y la masa agregada para una esfera semi-sumergida de radio r.	37
Figura 13: Coeficiente de la fuerza de excitación en modo tirante o heave	37
Figura 14: Mapa mundial del promedio de energía potencial de las olas marinas expresada en kW/m (por metro de frente de ola).....	38
Figura 15: Nomenclatura de los dientes de engranajes rectos.....	44
Figura 16: Piñón y cremallera con dientes de involuta.....	46
Figura 17: Parámetros del factor de modificación superficial de Marín	51
Figura 18: Estimaciones de primera iteración de los factores de concentración del esfuerzo k_t	51
Figura 19: Sensibilidad a la muesca de materiales sometidos a torsión.	52
Figura 20: Representación general del sistema de transmisión de potencia con sus respectivos componentes.....	56
Figura 21: Nomenclatura de los dientes de engranajes rectos (izq) y cremallera (der).	58
Figura 22: Instalaciones del Laboratorio de Hidráulica y Mecánica de Fluidos de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.....	62
Figura 23: En la izquierda: Instalación de la estructura soporte. En la derecha: Ensamble del sistema mecánico.....	63
Figura 24: En la izquierda: Acople del sistema mecánico con la estructura soporte y con la boya. En la derecha: Conexión del circuito eléctrico y del multímetro	63
Figura 25: Dispositivo completamente ensamblado.....	64
Figura 26: En la izquierda: Cabina de control del canal de oleaje. En la derecha: foto del software que controla el canal de oleaje	66
Figura 27: Coordenadas en las cuales se reconstruyeron las series de Oleaje en el trabajo de Martínez.....	69
Figura 28: Sistema de Medición de Parámetros Oceanográficos y de Meteorología Marina SMPOMM	70
Figura 29: Datos Boya Oleaje Turbo 9 y 17 noviembre de 2015	70

Figura 30: Observaciones Oleaje, Golfo de Urabá, 1 de noviembre de 2015	71
Figura 31: Simulación de la dinámica del convertidor de energía undimotriz a través de la herramienta Simulink de Matlab.....	74
Figura 32: Evolución de la fuerza total en el tiempo para $H = 0.5$ m y $T = 6$ s	74
Figura 33: Esfuerzos de Von Mises y desplazamientos para la boya recubierta en fibra de vidrio con radio 0.6 m considerando que se encuentre parcialmente sumergida	75
Figura 34: Factores de distribución de carga	79
Figura 35: Esfuerzos de Von Mises y desplazamientos para el empalme de fibra de vidrio	86
Figura 36: Diagrama de fuerzas para el eje (5). En la izquierda: plano yz. En la derecha: plano xz.....	87
Figura 37: Curva de vida constante de aluminio -límites de resistencia contra resistencia a la tensión	88
Figura 38: Diagrama de fuerzas para el eje (9). En la izquierda: plano yz. En la derecha: plano xz.....	91
Figura 39: Distribución de los cojinetes en el sistema de transmisión	93
Figura 40: Embrague unidireccional o piñón libre elegido para transformar el movimiento rotativo alternativo a unidireccional y su adaptación al dispositivo.....	95
Figura 41: Generador seleccionado para el proyecto.....	95

RESUMEN

En Colombia las zonas no interconectadas eléctricamente con el sistema nacional representan aproximadamente el 32 % del territorio nacional, allí los habitantes pueden abastecerse de energía eléctrica mediante plantas generadoras, las cuales producen un fuerte impacto en el ambiente y fomentan una barrera significativa para el desarrollo en aquellas comunidades que no poseen los recursos para acceder a ellas.

Una posible solución para esta problemática es el uso de fuentes de energías no convencionales o renovables, dentro de las cuales se encuentra la energía undimotriz, la cual utiliza como fuente las olas que se producen en la superficie del mar. Considerando que Córdoba cuenta con 124 km de costa, el presente trabajo pretende sentar un precedente en la investigación de este recurso en el departamento, generando conocimiento en las energías alternativas obtenidas del mar y continuando con el debate producido acerca de esta energía en Colombia. Lo anterior diseñando y construyendo con base en la teoría hidrodinámica para convertidores de energía undimotriz y normas ingenieriles, un dispositivo absorbedor puntual tipo on-shore capaz de transformar la energía potencial de las olas en electricidad para cuantificarla, validando su funcionamiento en el laboratorio de hidráulica y mecánica de fluidos de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

Se concluyó que la potencia máxima producida por el dispositivo fue de 5.16 W con una altura de 0.3 metros y un periodo de 3.5 segundos, luego con los datos propios del departamento se calculó que teóricamente existen 1058.4 Wm^{-1} de potencial energético undimotriz aprovechables, de los cuales con el dispositivo diseñado en el presente trabajo se podrían obtener cerca de 7.204 W, demostrando que las investigaciones concernientes a la energía undimotriz pueden ofrecer a futuro una posible solución para problemas energéticos en el país. Al finalizar se hacen recomendaciones para futuros dispositivos con base en las observaciones hechas a lo largo del desarrollo del proyecto.

Palabras Clave: Energía Undimotriz, Potencial Energético Córdoba, Energías Renovables.

ABSTRACT

In Colombia not electrically interconnected areas with the national system represent approximately 32 % of the national territory. There the inhabitants can get electricity through generators, which produce a strong impact on the environment and promote a significant barrier to the development in those communities that do not have the resources to access to them.

A possible solution to this problem is the use of non-conventional or renewable energy sources. Within them is wave energy, which uses waves that occur on the surface of the sea as a source. Considering that Córdoba has 124 km of coastline. This work intended to set a precedent in the investigation of this resource in the Department, generating knowledge in alternative energies obtained from the sea and continuing with the debate about this energy in Colombia. The above designing and building based on the hydrodynamic theory for wave energy converters and engineering standards, a point absorber device type on-shore capable of transforming the potential energy of the waves into electricity to quantify it, validating its operation in the laboratory of hydraulics and mechanics of fluids from the National University of Colombia, in Medellín.

It was concluded that the maximum power produced by the device was 5.16 W with a height of 0.3 meters and a period of 3.5 seconds. Then with data specific to the Department it was estimated that theoretically there are 1058.4 Wm^{-1} of potential energy exploitable wave, which with the device designed in this study can be obtained nearly 7.204 W, demonstrating that investigations concerning to wave energy can offer to future a possible solution to energy problems in the country. At the end, recommendations for future devices are made based on the observations made throughout the development of the project.

Key words: Wave Energy, Córdoba Energy Potential, Renewable Energy.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el consumo energético es uno de los principales temas de estudio por parte de la comunidad científica (Torres, et al. 2017), esto, dado los eventuales hallazgos sobre el cambio climático y la influencia del ser humano en ellos, tal como describen Cruz y Martínez (2015). En Colombia la demanda energética para el año 2015 fue de 66174 GWh (XM, 2015), razón por la cual el país ha venido adoptando estrategias en el sector energético tanto a nivel de generación como a nivel de demanda, que intentan mitigar los efectos negativos provocados al medio ambiente (Mejía, 2014), sin dejar de lado el objetivo de brindar electricidad a toda su geografía.

Según lo manifestado por el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas (IPSE), el insumo eléctrico no se ha podido establecer completamente en el país, ya que según el reporte de rendición de cuentas presentado en el año 2015, las zonas no interconectadas eléctricamente con el sistema nacional representaban el 32 % del territorio colombiano (IPSE, 2015, p. 6). En Córdoba la situación no es distinta, ya que aunque para el año 2012 el departamento contaba con más de 342892 usuarios de energía eléctrica (Gobernación de Córdoba, 2015, p. 72), más de 30000 viviendas no poseían el servicio (UPME, 2013, p. 48), ubicándose en el quinto puesto de departamentos con más viviendas sin dicho servicio. Más adelante en el año 2015 se sabe que Córdoba contaba con el 93.1 % de cobertura de energía eléctrica según lo expuesto por Gaviria en su presentación (Gaviria, 2015, p. 88).

En las zonas donde la electricidad es limitada o deficiente, los habitantes pueden abastecerse de energía eléctrica mediante pequeñas plantas generadoras, las cuales generalmente utilizan fuentes fósiles como combustible, el cual produce un fuerte impacto

en el ambiente, tal como lo señala Tortajada, et al (2001) y Meadows (1996); Teniendo en cuenta que los costos de la planta generadora, combustible, transporte y gastos adicionales asociados al funcionamiento de la misma son generalmente altos para comunidades que cuentan con pocos recursos económicos, se hace limitado el acceso al servicio eléctrico en dichos sitios, creando un ciclo negativo que les impide acceder completamente a servicios básicos de educación, salud y conservación de alimentos, este último de gran importancia dadas las altas temperaturas que se presentan en algunas regiones del país como el departamento de Córdoba; además de no contar con iluminación apropiada y constante en las horas nocturnas, lo que hace difícil las actividades cotidianas y fomenta una barrera significativa para el desarrollo (Peon et al., 2004).

Una posible solución para la problemática descrita sobre la producción de electricidad en zonas de difícil acceso, es el uso de fuentes de energías no convencionales o renovables, éstas son aquellas que no se consumen ni agotan en sus procesos de transformación y aprovechamiento de energía útil. En Colombia a partir de la aprobación de la Ley 1715 del 13 de mayo del 2014 referente a la regulación de la integración de las energías renovables en el Sistema Eléctrico Nacional, se puede ver que el rol de estas energías ha ido creciendo poco a poco y que cada día son más importantes para el desarrollo del país. Para el departamento de Córdoba la problemática en torno a la demanda energética no es desconocida y es consciente que las fuentes no convencionales han adquirido una dinámica importante en las zonas no interconectadas, tal es el caso del convenio entre el IPSE y la universidad de Córdoba (Convenio interadministrativo 036, 2013) que se llevó a cabo en el 2013 y que buscaba formular soluciones sostenibles que permitieran llevar este servicio a zonas de los departamentos de Córdoba y Sucre. Teniendo en cuenta que Colombia fue posicionado en el quinto lugar en cuanto a competitividad energética (Castillo et al, 2015, p. 44), además de los múltiples beneficios que aportan las fuentes de energías renovables (Universidad Nacional-Fundación Bariloche, 2010, p. 246), hace que a futuro se proyecte un desarrollo social y económico importante en las zonas donde se pueda implementar tecnologías que aprovechen las fuentes no convencionales, mejorando la calidad de vida de aquellas personas que habitan en dichas zonas.

Dentro de las diferentes fuentes de energía renovable que se encuentran actualmente disponibles para la generación de nuevas tecnologías, se encuentra una que ha sido poco estudiada en el país (Navarro, 2016) y de manera casi nula en el departamento, esta es la energía de los océanos, la cual se divide principalmente en energía mareomotriz y energía undimotriz, la energía undimotriz es aquella que utiliza como fuente las olas que se producen en la superficie del mar, su investigación se encuentra actualmente en un proceso de crecimiento, logrando estar al nivel de otras energías obtenidas del mar en diversos países del continente europeo (Dolgov, 2015, pp. 85 - 86). Considerando que el departamento de Córdoba cuenta con 124 km de costa y que en Colombia los estudios realizados se han fundamentado en mediciones indirectas del oleaje, el diseño de un dispositivo para realizar el estudio del potencial energético undimotriz en la zona del departamento de Córdoba ayudará a generar conocimiento en las energías alternativas obtenidas del mar, además de que puede convertirse en soporte para proyectos futuros y continuar con el debate generado acerca de la energía undimotriz en Colombia.

El presente trabajo tuvo como objetivo principal diseñar y construir un dispositivo absorbedor puntual tipo on-shore para realizar el estudio del potencial energético undimotriz en el departamento de Córdoba, con el fin de conocer la viabilidad de generación eléctrica a partir de ese recurso; los pasos desarrollados para llevar a cabo el proyecto consistieron primero en identificar los valores típicos de altura y periodo de ola en la zona costera del departamento de Córdoba necesarios como parámetros de entrada para el diseño del dispositivo; a continuación se procedió a diseñar el dispositivo con base en normas ingenieriles, validando su funcionamiento en el canal de oleaje del laboratorio de hidráulica y mecánica de fluidos de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín; finalmente se analizaron los datos obtenidos del dispositivo para relacionarlos con las alturas y periodos propios del departamento.

1. REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. Energías contenidas en el mar

Los océanos son masas de agua gigantes en constante movimiento, los cuales acumulan una vasta cantidad de energía que se puede aprovechar de diversas maneras; dentro de los tipos de energías extraíbles de los océanos se pueden mencionar algunas sin mucho desarrollo como las que se basan en el uso del sulfuro de hidrogeno (Norrishy y Rideal, 1923), de biomasa con fuente en el océano por medio de plantaciones de algas (Medina y Novelo, 1995), del gradiente de salinidad o energía osmótica, el cual requiere una fuente de agua dulce cerca de las concentraciones salinas (Reali, 1981), o la extracción de la energía de las corrientes oceánicas como la corriente del golfo de México (Flores, 2014). Sin embargo las tecnologías que presentan más desarrollo en los actuales momentos son las que aprovechan la energía contenida en las mareas (Torres, & Andrade, 2006), el gradiente térmico del océano (Martí, et al 2010) y la que aprovecha las olas que se producen en la superficie del mar, esta última será la que sirva de base al presente trabajo.

1.2. Energía undimotriz

La energía undimotriz, también llamada en ocasiones olamotriz, es un tipo de energía renovable que aprovecha el movimiento superficial de las olas del mar; el oleaje es una de las formas en que se almacena la energía solar a corto plazo, dado que es un derivado del viento; por esta razón es un tipo de energía irregular, sin embargo es más predecible que la energía renovable obtenida del viento (Fernández, 2008, p. 4).

Los primeros testimonios que describen la utilización de energía undimotriz se remontan al siglo XIII en China, donde utilizaban la energía del oleaje para hacer funcionar los

molinos. Cinco siglos después se estudia por primera vez la posibilidad de obtener energía de las olas: la primera patente, perteneciente a unos franceses parisinos de apellido Girard, data de 1799 consistía en una balsa forzada a movimientos verticales, de ascenso y descenso, conectados a algún aparato de la orilla por numerosos alambres y poleas. Dicho mecanismo y su sistema de funcionamiento podría asimilarse a las boyas actuales. Posteriormente, en 1910, aparece la primera generación con éxito de energía eléctrica (1 kW) pertenece a Bochaux-Praceique. Ésta consiste en el diseño de un sistema hidroneumático para dar electricidad a su casa de Rayon (Vidal, 1986, pp 675-676).

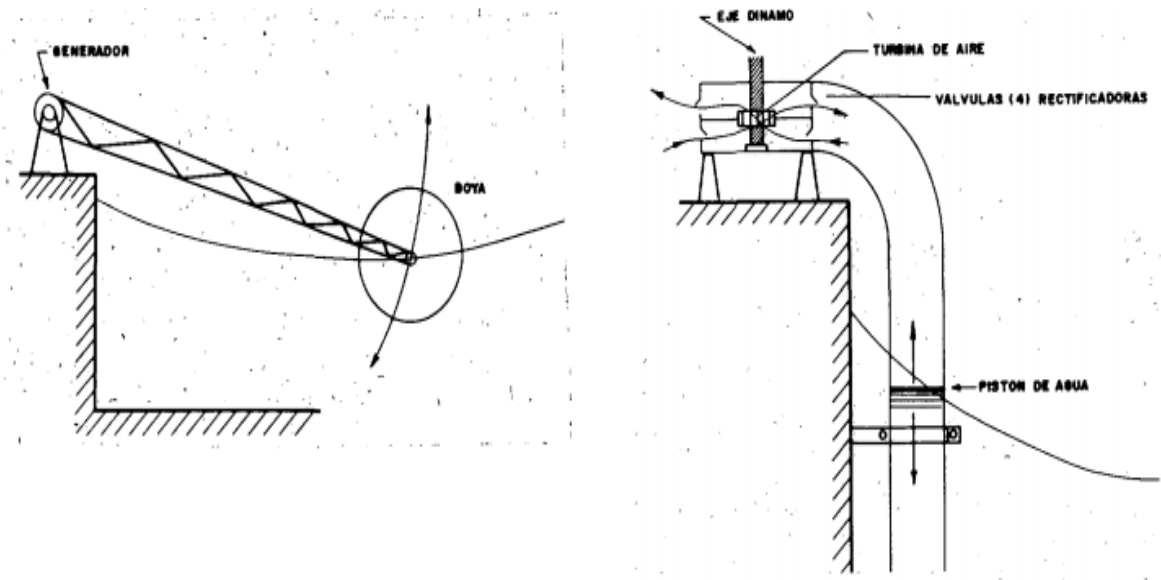


Figura 1: Esquema de la patente de Girard (izda.) y Sistema Bochaux-Praceique (dcha.)
Fuente: Vidal, (1986) pp. 675-676.

Un estudio realizado por Leishman (1978, p. 11) indica que entre 1860 y 1890 las patentes sobre este tema eran de aproximadamente tres por año, alcanzándose seis por año entre 1900 y 1930. Posteriormente, entre 1930 y 1970 ésta tendencia disminuye debido a la utilización masiva del petróleo para la producción de energía. Entre 1856 y 1973 había registradas en el Reino Unido 340 patentes sobre este tema. Según el World Energy Council al año 2008 existían más de 4000 patentes de convertidores de energía undimotriz a eléctrica (World Energy Statistics and Balances. 2008).

1.3. Descripción de las olas

Fernández (2007, p. 71) explica cómo la radiación solar incidente sobre la superficie de la tierra produce calentamientos desiguales, lo que provoca que en la atmosfera aparezcan zonas de alta y baja presión, las diferencias de densidad generan desplazamientos de aire (viento) de distinta intensidad. El rozamiento del aire con la superficie libre del mar genera el oleaje, cuya intensidad depende de la intensidad y duración del viento.

Si se observa el mar en cualquier punto de la costa, se descubrirá que el oleaje consiste en un arreglo de olas de distintos periodos, alturas y direcciones. La teoría lineal de las olas simplifica el comportamiento del oleaje considerando las características de una única ola predominante, mientras que la teoría de olas irregulares analiza un espectro de olas.

1.3.1. Teoría lineal de olas

Las olas cortas son aquellas en las cuales la velocidad de la ola es independiente de la profundidad del mar, pero dependiente de la longitud de onda. Las olas producidas por el viento cumplen con las condiciones para ser descritas como olas cortas (Fernández, 2007. p. 77), por tal razón se describen los siguientes parámetros característicos:

Crestas: zonas de superficie del mar que alcanzan la mayor altura. Definen la amplitud o altura de la ola.

Valles: zonas de superficie del mar que alcanzar la menor altura.

Altura (H): distancia entre un valle y una cresta.

Altura significativa (H_s): altura media del tercio de olas con mayor altura.

Longitud de onda (λ): distancia que separa dos crestas consecutivas. En profundidades indefinidas, la longitud de onda se define como

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (1)$$

Donde:

λ : Longitud de onda en [m]

g : Aceleración de la gravedad [9.81 m/s²]

1.3.2. Olas irregulares

La teoría de olas irregulares considera un espectro de olas con distintos periodos y alturas. Existen varios modelos espectrales que permiten predecir la evolución del oleaje, diferenciando dos tipos principales, aquellos que consideran un espectro escalar y aquellos que consideran un espectro vectorial. Dos ejemplos de los modelos mencionados anteriormente son el espectro pierson-moskowitz y el espectro JONSWAP los cuales son explicados con detalle por Losada, et al, (1977). En el presente trabajo por simplicidad se consideró la teoría de movimiento lineal de olas.

1.3.3. Energía de las olas

En una ola, cada partícula está dotada de energía cinética y energía potencial; en las olas regulares, los valores de longitud de onda y periodo permanecen constantes.

1.3.3.1. Energía total de una ola

La energía de una onda regular es la suma de la energía potencial E_p y la cinética E_c , Fernández (2008, p. 9), Fernández, (2007, p. 79), Correa, (2016, p. 9):

$$\text{Energía total } \left[\frac{KJ}{m^2} \right] = E = E_p + E_c = \frac{\rho g H^2}{8} \quad (7)$$

Donde

ρ = Densidad del agua de mar en $\frac{kg}{m^3}$

H = Altura de la ola

1.3.3.2. Flujo de energía y potencia de una ola

Las ecuaciones que rigen el flujo de energía y la potencia de una ola son descritas en detalle por Fernández, (2007, pp. 79-80), Falnes, (2007, pp. 187-188) y Cabrales, et al, (2013, p. 325):

$$E = \text{flujo de energía} \left[\frac{kW}{m} \right] = \frac{\rho g H^2}{8} C_g = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} \quad (8)$$

$$P = \text{potencia} \left[\frac{kW}{m} \right] \approx 0.96 H^2 T \quad (9)$$

En un mar irregular típico la potencia media total en $[KW m^{-1}]$, está dada por:

$$P_s = 0.49 H_s^2 T \quad (10)$$

1.4. Clasificación de los sistemas de captación

Los sistemas para la captación de energía undimotriz se han clasificado de diversas maneras dependiendo del autor; Rodríguez, et al. (2008) y Minguela, et al. (2008) coincidieron en presentar una clasificación breve y completa de los diversos tipos de sistemas de captación, a continuación se describe lo expuesto en sus trabajos.

1.4.1. Clasificación con respecto a la localización

Según Minguela, et al. (2008, p. 141) este criterio adoptado en el Proyecto Europeo Wavenet clasifica los dispositivos principalmente en función de su distancia a la costa tal y como se puede apreciar en la figura 3; se distinguen tres tipos de dispositivos:

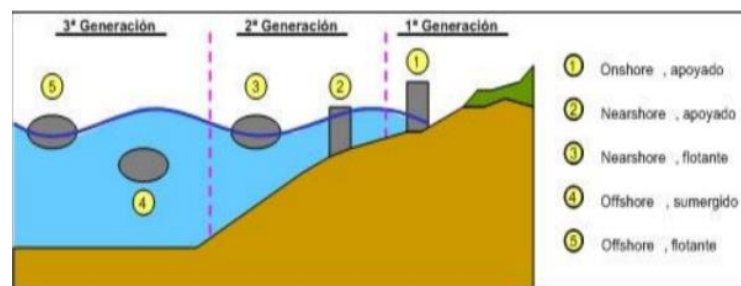


Figura 3: Clasificación de los dispositivos con respecto a la localización.

Fuente: Minguela, et al. (2008) p. 142.

- Los dispositivos de Primera generación (onshore) están ubicados generalmente en estructuras fijas en la costa, diques o acantilados. Las principales ventajas de este tipo de dispositivos son los bajos costos de operación, facilidades a la hora del mantenimiento y un mejor perfil de supervivencia. Sin embargo, debido a la

perdida de potencial energético de las olas al momento de llegar a la costa, se reduce el número de localizaciones potenciales; adicional, el impacto ambiental puede generar inconvenientes al momento de presentar un proyecto con este tipo de dispositivos.

- Los dispositivos de Segunda generación (nearshore) se sitúan en aguas someras, usualmente entre 10 y 40 metros de profundidad (Rodríguez, et al. 2008, p. 6) y distanciados de la costa unos cientos de metros, normalmente descansan sobre el lecho marino gracias al efecto de la gravedad.
- Los dispositivos de tercera generación (offshore) pueden ser flotantes o sumergidos y se encuentran ubicados en aguas entre 50 y 100 metros de profundidad. Esta generación de convertidores son el tipo más prometedor ya que explotan el mayor potencial energético existente en alta mar (Minguela, et al. 2008, p. 142).

1.4.2. Clasificación con respecto al principio de captación

1.4.2.1. Diferencias de presión en un fluido

Rodríguez, et al. (2008. p. 6) indica que son dispositivos que basan su funcionamiento en aprovechar la diferencia de presión creada por el oleaje en un determinado fluido, el cual normalmente es aire; Usualmente son dispositivos tipo nearshore y offshore sumergidos unos pocos metros bajo el agua o apoyados directamente en el fondo del mar, lo que les permite ser menos vulnerables a los cambios bruscos en el clima; sin embargo, al no ser visibles pueden ocasionar inconvenientes o interferencias con la navegación. Dentro de este tipo de captadores se pueden destacar dos clases:

- **Columna de agua oscilante (Oscillating Water Column – OWC)**

Según Iturrioz (2014), estos dispositivos consisten en una cámara semisumergida con una turbina de aire conectada a un generador instalado en la parte superior. La incidencia del

oleaje provoca la oscilación de la superficie libre interna y hace que el aire circule a través de la turbina activando su rotación.

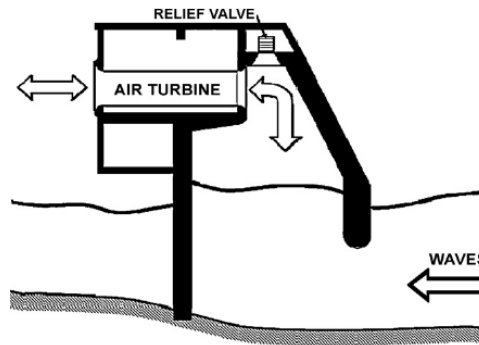


Figura 4: Vista transversal de un dispositivo tipo OWC

Fuente: Falcão A. (2010) p. 905

- **Efecto Arquímedes**

Estos dispositivos basan su funcionamiento en la fluctuación de la presión estática originada por la oscilación del nivel del agua al paso de la ola (Rodríguez, et al. 2008. p. 7). Se trata de una cámara de aire cerrada que varía su volumen en función de la presión a la que es sometida. La parte inferior de la cámara se fija al fondo, mientras que la cubierta puede desplazarse verticalmente. El aire de la cámara se comporta como un muelle cuya rigidez puede modificarse bombeando agua hacia el interior o exterior de la misma.

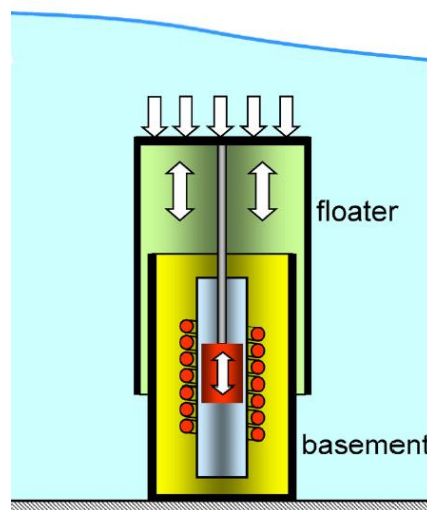


Figura 5: Representación esquemática del Archimedes Wave Swing

Fuente: Falcão A. (2010) p. 908

1.4.2.2. Cuerpos boyantes activados por las olas

Los dispositivos de este tipo se caracterizan por incluir en sus componentes una boya o flotador el cual es movido por las olas; la energía se puede extraer de diversas formas aprovechando el movimiento alternativo del flotador, éste movimiento oscilatorio puede ser horizontal, vertical, en torno a un eje o una combinación de los anteriores (Rodríguez, et al. 2008. p. 7). El movimiento inducido por las olas puede tratarse de un movimiento absoluto entre el cuerpo boyante y una referencia fija externa, o un movimiento relativo entre dos o más cuerpos.

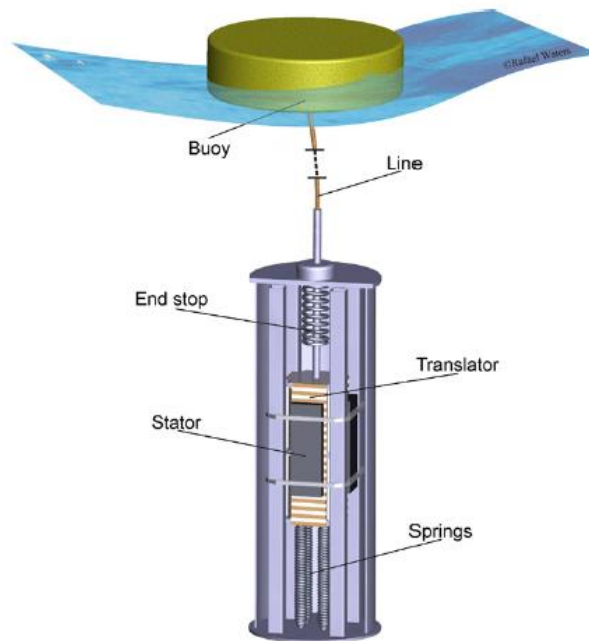


Figura 6: Representación esquemática de un dispositivo con cuerpo boyante

Fuente: Falcão A. (2010) p. 906

1.4.2.3. Sistemas de rebosamiento y/o impacto

Son dispositivos en los cuales las olas inciden en una estructura, lo cual consigue aumentar su energía potencial, cinética o ambas. Existen dos principios diferenciados de este tipo de dispositivos en función del modo en que se aprovecha la energía de ola incidente:

- **Sistemas de rebosamiento**

Los sistemas de rebosamiento fuerzan a que el agua pase por encima de la estructura, pueden incluir un depósito que almacena el agua. Normalmente hacen pasar agua a través de una turbina hidráulica de baja presión para producir energía (Rodríguez, et al. 2008. p. 7).

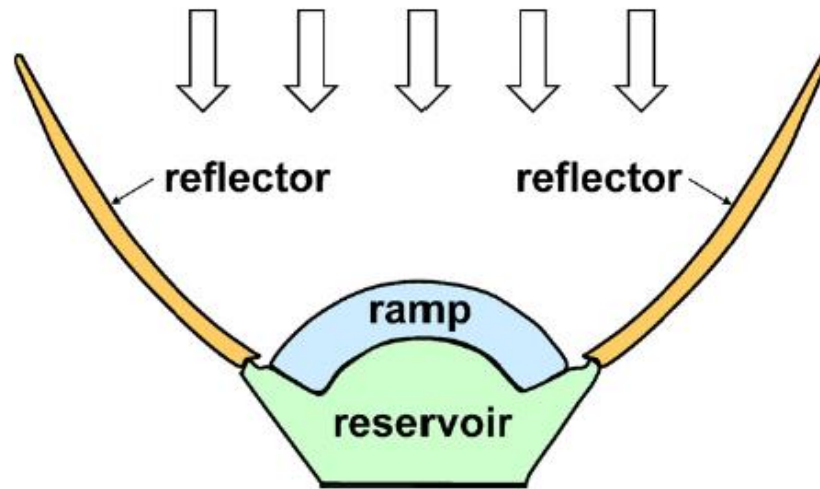


Figura 7: Vista de planta del dispositivo Wave Dragon

Fuente: Falcão A. (2010) p. 911

- **Sistemas de impacto**

Los sistemas de impacto hacen que la ola incida en una estructura articulada o flexible que actúa como medio de transferencia, estos sistemas desaprovechan parte de la energía debido a la irregularidad del empuje horizontal al que se somete el dispositivo (Rodríguez, et al. 2008. p. 7).

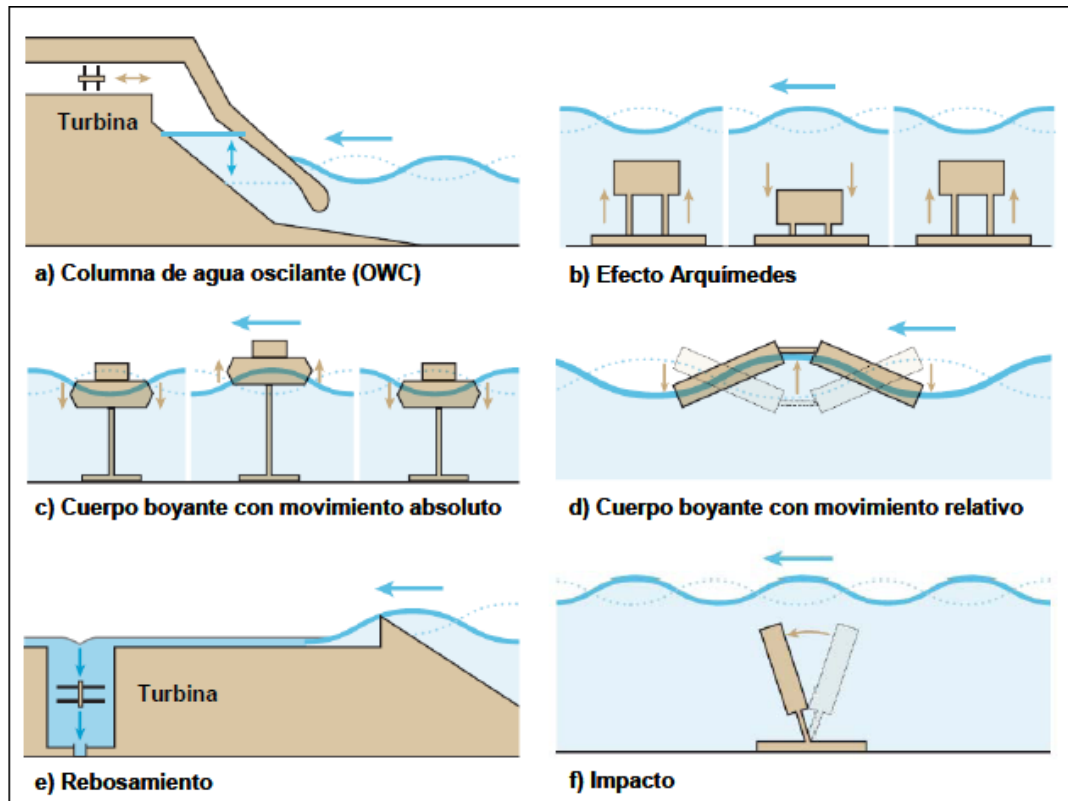


Figura 8: Clasificación de los dispositivos con respecto al principio de captación.
Fuente: Rodríguez, et al (2008) p. 8.

1.4.3. Clasificación en cuanto a la modificación que producen en el oleaje incidente

Los sistemas de captación se pueden clasificar dependiendo de la orientación o modificación que producen en el oleaje como sigue:

1.4.3.1. Absorbedores Puntuales

Se trata de estructuras pequeñas en comparación con la longitud de la ola incidente (Rodríguez et al, 2008. p. 8). Suelen tener una simetría axial y por lo tanto son indiferentes a la dirección de la ola. Un aspecto característico de los Absorbedores puntuales es su capacidad de concentrar la energía sobre sí mismos (efecto antena), lo cual se ve reflejado en una alta relación entre la energía captada con respecto a su volumen estructural. Un dispositivo de este tipo puede captar energía de un frente mayor que el propio frente que

ellos oponen. Según Evans (1976), en condiciones ideales de oleaje regular y funcionamiento resonante, la anchura eficaz de captación puede llegar a $L/2\pi$, donde L es la longitud de onda; sin embargo en la práctica con oleajes irregulares, esto es casi imposible de conseguir, en consecuencia el rendimiento de los absorbedores puntuales se encuentra lejos de éste límite, según Rodríguez, et al (2008, p. 8) un absorbedor puntual oscilando verticalmente puede reflejar menos del 50 % de la energía incidente; más aún, asegura que diversos estudios han demostrado que estos dispositivos en la práctica no son capaces de captar más de un 20 % de la energía incidente.



Figura 9: Dispositivo absorbedor puntual Noruego

Fuente: Falcão A. (2010) p. 906

1.4.3.2. Atenuadores

Son estructuras alargadas que van extrayendo energía de manera progresiva, se ubican de modo paralelo a la dirección de avance de las olas. Esta clase de dispositivos están menos expuestos a daños y requieren menos esfuerzos al momento de anclarse en el lecho marino que los terminadores, pues las fuerzas se compensan a ambos lados de la estructura, siendo

capaces de captar energía por ambos lados de su geometría. Los atenuadores presentan un ancho de banda mayor que los absorbedores puntuales debido a su tamaño en relación con la longitud de ola predominante. Según Evans (1976), la capacidad de absorción de este tipo de dispositivos, puede llegar a ser hasta tres veces mayor que la de los absorbedores puntuales. Esto quiere decir, una mayor capacidad de generación de energía por unidad de peso del convertidor.



Figura 10: Tres unidades del sistema pelamis (750 kW) en el mar de Portugal
Fuente: Falcão A. (2010) p. 909

1.4.3.3. Terminadores o totalizadores

Son dispositivos alargados situados perpendicularmente a la dirección de avance de la ola, es decir, paralelos al frente de onda, que pretenden captar la energía de una sola vez. Un dispositivo ideal de este tipo, no reflejaría ninguna energía, aprovechando el 100 % de la misma. Al tratarse de dispositivos alargados, su anchura eficaz de captación es igual a su longitud. A diferencia de los absorbedores puntuales y los atenuadores, estos dispositivos no dependen de la longitud de onda del oleaje.

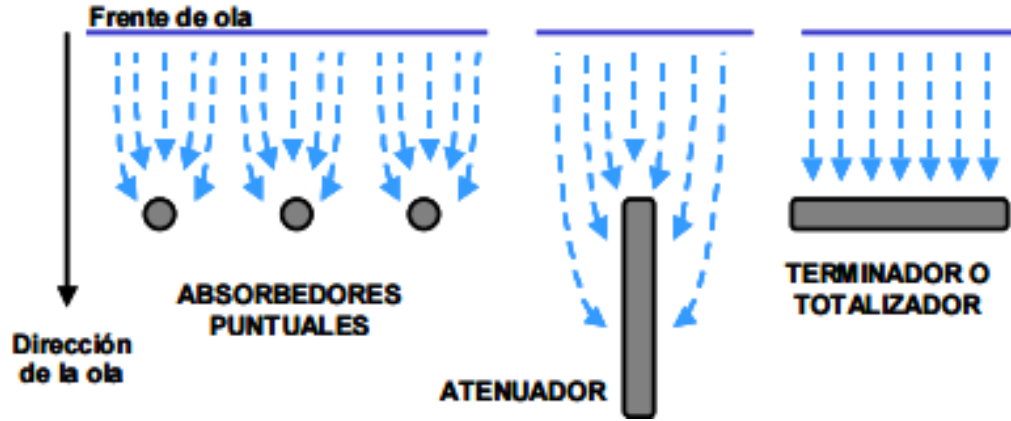


Figura 11: Clasificación de los dispositivos con respecto a la modificación que producen en el oleaje incidente.
Fuente: Rodríguez, et al (2008) p. 9.

1.5. Teoría hidrodinámica

En la literatura científica diversos investigadores han utilizado la teoría hidrodinámica para modelar el comportamiento de los convertidores de energía undimotriz (en inglés Wave Energy Converter: WEC) en el mar, esta teoría descrita por Antonio (2010, p. 901), Beirão y Malça (2014, pp. 3 - 4), Falnes (2002, pp. 118 - 191), Montoya (2010, pp. 31 - 37), Sarlak et al (2010), Velez et al (2014, pp. 4 - 5), evalúa el movimiento de los WECs con base en la segunda ley de Newton; lo anterior asumiendo que las amplitudes y oscilaciones son suficientemente pequeñas comparadas con la longitud de onda. Las componentes verticales de la fuerza total externa f_{ext} actuando sobre la boya resultan de la suma de diversos componentes, los cuales se describirán más adelante, se tiene entonces por la teoría hidrodinámica:

$$\sum f_{ext} = m_b \ddot{z} \quad (11)$$

Donde m_b y \ddot{z} son respectivamente la masa de la boya y su correspondiente aceleración vertical. Para una boya esférica de radio r su masa m_b esta dada por:

$$m_b = \rho_b V_b \Leftrightarrow m_b = \rho_b \frac{4}{3} \pi r^3 \quad (12)$$

Donde ρ_b es la densidad del material de la boya y V_b es el volumen de la boya.

En la ecuación 11 $\sum f_{ext}$ incluye el peso de la cremallera w_{crem} que está encima de la boya, la fuerza de gravedad en función del desplazamiento como la describe Sarlak et al (2010) y la fuerza de las olas f_w , esta última se puede dividir en dos componentes

hidrodinámicos actuando sobre la superficie de la boya: la fuerza de excitación f_{exc} debida a la incidencia de las olas actuando sobre la boya, asumiendo que esta se encuentra estacionaria, que para el presente diseño solamente se considera en modo tirante (en inglés heave) y la fuerza de radiación f_r la cual corresponde a la fuerza experimentada por el cuerpo por su propio movimiento oscilatorio sobre el agua en calma o en ausencia de un campo de ola incidente. Por lo tanto una posible solución para la ecuación 11 es:

$$\sum f_{ext} = m_b \ddot{z}$$

$$(m_b + m_a) \ddot{z} + B \dot{z} + Cz = f_w + w_{crem} + f_{gravedad}$$

$$(m_b + m_a) \ddot{z} + B \dot{z} + Cz = f_{exc} + f_r + w_{crem} + f_{gravedad} \quad (13)$$

Donde \dot{z} y z son respectivamente, la velocidad de la boya y el desplazamiento, m_a es el coeficiente hidrodinámico de la masa agregada, que representa la inercia de un volumen de agua dado que rodea la boya, cuando esta se encuentra oscilando en modo tirante o heave según Falnes (2002), B es el coeficiente de amortiguación de la radiación (en inglés radiation damping coefficient) el cual representa el amortiguamiento de la boya debido a la transferencia de energía de las olas radiadas lejos de la boya, cuando esta se encuentra en modo tirante o heave, C es el coeficiente de restauración o rigidez, el cual representa la posición instantánea de la boya con respecto a la superficie libre sin perturbaciones.

De acuerdo a Biesheuvel et al (1989), para una boya esférica de radio r la masa agregada m_a puede ser hallada a través de la siguiente ecuación

$$m_a = \frac{1}{2} p_w V_b \Leftrightarrow m_a = \frac{1}{2} p_w \frac{4}{3} \pi r^3 \Leftrightarrow m_a = \frac{2}{3} p_w \pi r^3 \quad (14)$$

Donde p_w corresponde a la densidad de agua de mar.

En la ecuación 13 si B es considerado como un coeficiente de amortiguamiento lineal, $B \dot{z}$ corresponde a la fuerza de amortiguación f_d que de acuerdo con Vu et al (2004), resolviendo por la ecuación de Morrison como muestra Demirbilek et al (2002) se puede representar de la siguiente manera:

$$f_d = B \dot{z} \Leftrightarrow f_d = \frac{1}{2} C_d p_w A_{proy} u^2 \quad (15)$$

Donde C_d es el coeficiente de arrastre, A_{proy} es el área proyectada normal de la boya normal al fluido y u es la velocidad del fluido no perturbado con respecto a la boya, la cual está dada según Demirbilek et al (2002) por:

$$u = \frac{\pi H}{T} e^{\left(\frac{2\pi z}{\lambda}\right)} \cos(\omega t) \quad (16)$$

Donde H es la altura de la ola, T es el periodo de la ola, λ la longitud de onda de la ola y ω es la frecuencia angular de la ola.

En la ecuación 13 si C es considerado como un coeficiente lineal de restauración o de rigidez, Cz corresponde a la flotabilidad hidrostática denominada f_b o fuerza boyante, la cual actúa sobre la boya debido a la posición instantánea de esta con respecto a la superficie libre de agua de mar, esta fuerza se puede expresar de la siguiente forma:

$$f_b = Cz \Leftrightarrow f_b = p_w g A z \quad (17)$$

Donde g es la aceleración debida a la gravedad y A es el área de sección transversal de la boya.

En la ecuación 13 la fuerza de radiación f_r puede ser obtenida como se explica en Falnes (2002) y Beirão y Malça (2013, 2014), esto es asumiendo que la boya se comporta como una esfera de radio r semi-sumergida en aguas profundas; de acuerdo a lo anterior la expresión para conocer f_r puede escribirse:

$$f_r = -R\dot{z} \Leftrightarrow f_r = -\left[\omega p_w \frac{2}{3} \pi r^3 (\epsilon_{33} + i\mu_{33})\right] \dot{z} \quad (18)$$

Donde ϵ_{33} y μ_{33} son respectivamente los coeficientes no dimensionales en modo tirante o heave, de la resistencia a la radiación y la masa agregada. Los valores de estos parámetros pueden ser obtenidos de la figura 12, en la cual, a la izquierda se encuentran las curvas de los parámetros ϵ_{33} y μ_{33} para una esfera semi-sumergida de radio r tomada de Havelock (1955) y a la derecha los valores tabulados de la misma grafica organizados por Hulme (1982); la gráfica de la figura 12 enfrenta los coeficientes ϵ_{33} y μ_{33} contra un valor kr donde k corresponde a:

$$k = \frac{\omega^2}{g} \quad (19)$$

Para una esfera semi-sumergida de radio r , en el caso de aguas de profundidad conocida h en metros:

$$\epsilon = \frac{3\pi r}{8h} \quad (20)$$

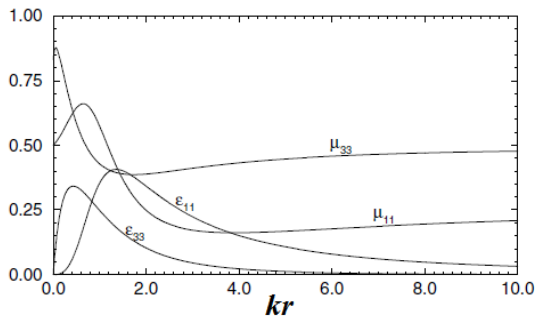
o para aguas de infinita profundidad:

$$\epsilon = 0.75\pi kr \quad (21)$$

Adicionalmente se debe tener en cuenta que para aguas donde $kh \gg 1$, los valores

$$\epsilon_{33} = \epsilon(kr) \quad (22)$$

$$\mu_{33} = \mu(kr) \quad (23)$$



$ka = 0$	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4
$\mu = 0.8310$	0.8764	0.8627	0.7938	0.7157	0.6452
$\epsilon = 0$	0.1036	0.1816	0.2793	0.3254	0.3410
$ka = 0.5$	0.6	0.7	0.8	0.9	1
$\mu = 0.5861$	0.5381	0.4999	0.4698	0.4464	0.4284
$\epsilon = 0.3391$	0.3271	0.3098	0.2899	0.2691	0.2484

Figura 12: En la izquierda las curvas de los parámetros ϵ_{33} y μ_{33} los cuales son los coeficientes no dimensionales en modo tirante o heave, de la resistencia a la radiación y la masa agregada para una esfera semi-sumergida de radio r . En la derecha los valores tabulados de la misma grafica organizados por Hulme.

Fuente: Havelock (1955), Hulme (1982).

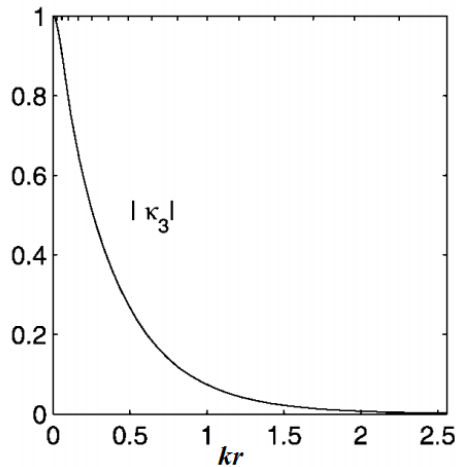


Figura 13: Coeficiente de la fuerza de excitación en modo tirante o heave.

Fuente: Falnes (2002)

En la ecuación 13 la fuerza de excitación f_{exc} cuando es aplicada a un cuerpo rígido que oscila por el oleaje depende de la elevación de la ola incidente. La relación que existe entre la elevación de la ola y la fuerza de excitación es según la teoría hidrodinámica no casual. La

f_{exc} se puede describir a través de la siguiente expresión, la cual se basa en la relación que existe entre los coeficientes de radiación y los coeficientes de excitación, también llamada relación de Haskind según Falnes (2002):

$$f_{exc} = |f_{exc}| \cos(\omega t) \Leftrightarrow f_{exc} = \left[k_3 p_w g \frac{H}{2} \pi r^2 \right] \cos(\omega t) \quad (24)$$

Donde k_3 es el coeficiente de la fuerza de excitación en modo tirante o heave; la ecuación 24 se utiliza para simplificar el modelo, considerando solamente ondas monocromáticas regulares, esto según Beirão y Malça (2013, 2014); en la figura 13 k_3 está en función de la expresión kr mencionada anteriormente.

1.6. Energía undimotriz en el mundo

En el mundo se han realizado diversos estudios sobre la energía undimotriz, en los cuales se ha estimado que el potencial de energía de las olas es aproximadamente de 2 mil a 3 mil millones de kW (Torres, & Andrade, 2006, p. 13), (Cabral, et al, 2013, p. 324), en la figura 14 se observa un mapa mundial del promedio de energía potencial de las olas marinas.

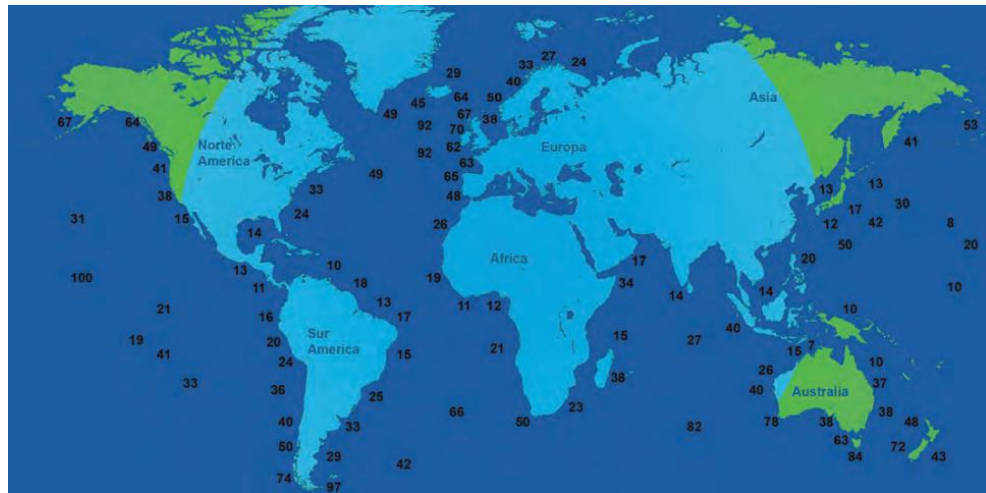


Figura 14: Mapa mundial del promedio de energía potencial de las olas marinas expresada en kW/m (por metro de frente de ola)
Fuente: Wave Energy paper. IMechE, 1991 and European Directory of Renewable. El océano: maravilla terrestre 2013.

Al realizar un breve repaso en la historia se observa que a pesar de que existen patentes de convertidores de energía undimotriz (WEC) desde 1799 (Vidal, 1986, pp 675-676) fue la crisis de petróleo de 1973 lo que impulsó a una mayor investigación en energía de los océanos; tal es el caso del gobierno Británico que en 1975 empezó una importante investigación en el tema y desarrolló un programa en energía de los océanos (Grove-Palmer, 1982); seguido de cerca por el gobierno Noruego. Las primeras conferencias desarrolladas sobre energía de los océanos tuvieron lugar en Inglaterra (Canterbury, 1976, y Heathrow, 1978), más adelante en 1979 se llevaron a cabo dos conferencias internacionales: *Power from Sea Waves* (junio, Edinburgo, Escocia) y *the First Symposium on Wave Energy Utilization* (Octubre – Noviembre, Gothenburg, Suecia).

En Noruega, la actividad siguió con la construcción, en 1985, de dos prototipos costeros de tamaño completo (350 y 500 kW de potencia nominal) cerca de Bergen. En los años siguientes, hasta principios de los noventa, la actividad en Europa se mantuvo principalmente a nivel académico, siendo el logro más visible un pequeño prototipo de costa (75 kW) desplegado en la isla de Islay, Escocia (Whittaker et al, 1993). Aproximadamente al mismo tiempo, se construyeron dos prototipos de convertidores en Asia: uno de 60 kW integrado en un rompeolas en el puerto de Sakata, Japón (Ohneda et al, 1991) y una planta de 125 kW en Trivandrum, India (Ravindran & Koola, 1991).

La situación en Europa se vio dramáticamente modificada por la decisión adoptada en 1991 por la Comisión Europea de incluir la energía de las olas en su programa de I + D sobre energías renovables. Los primeros proyectos comenzaron en 1992. Desde entonces, una treintena de proyectos sobre energía de las olas fueron financiados por la Comisión Europea que involucra a un gran número de equipos activos en Europa.

En 2001, la Agencia Internacional de la Energía creó un Acuerdo de Aplicación de Sistemas de Energía Oceánica (IEA-OES, actualmente con 23 países como partes contratantes) cuya misión es facilitar y coordinar la investigación, el desarrollo y la demostración de energía oceánica a través de la cooperación internacional y el intercambio

de información. El Informe anual del Ocean energy systems (OES, 2015) contiene un estudio de las actividades en curso en la energía de los océanos en todo el mundo.

América del Norte (Estados Unidos y Canadá) también ha desarrollado investigaciones concernientes en el tema undimotriz con la participación de las administraciones nacionales y regionales, instituciones de investigación y empresas, dando lugar a reuniones y conferencias sobre energía oceánica (Bedard et al, 2007), (Previsic et al, 2009).

Actualmente España ofrece tres sitios de prueba para la energía de las olas (OES, 2015): Biscay Marine Energy Platform (bimep), una infraestructura marina para la investigación, demostración y exploración de sistemas de captación de energía de las olas en mar abierto promovida por el Ente Vasco de la Energía (EVE) y el Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía (IDAE) que se inauguró oficialmente en julio de 2015. Luego de la puesta en marcha de bimep, EVE está dando a la planta de energía de las olas de Mutriku un nuevo uso como sitio de prueba, el uso es compatible con la actividad principal de la planta que es generar electricidad a partir de las olas. Esta instalación ha logrado una producción acumulada de más de 1 GWh después de cuatro años de funcionamiento continuo. La tercera, PLOCAN en las islas Canarias incluye un área marítima de 23 000 m² desde la costa hasta 600 m de profundidad. La infraestructura eléctrica submarina aún está en etapa de diseño y se espera que esté lista para el 2017. Durante el 2015 se instalaron y ensayaron dos aparatos de energía undimotriz en PLOCAN: el prototipo W1 desarrollado por la compañía española Wedge Global y el PENGUIN II prototipo desarrollado por la empresa WELLO instalado en septiembre de 2015. Otro ejemplo es en China el instituto de conversión de energía de Guangzhou (GIEC) de la academia China de ciencias (CAS) el cual probó en el 2014 el convertidor de energía undimotriz Sharp Eagle I (10 kW) el cual había estado funcionando cerca de Wanshan Island durante casi 6000 horas, con una eficiencia total de conversión de 16.76 %. Basados en Sharp Eagle I, China Shipping Industry Co y GIEC desarrollaron conjuntamente el convertidor Wanshan Sharp Eagle I de 100 kW, el nuevo convertidor fue desplegado para pruebas desde noviembre de 2015.

Se debe tener en cuenta que las tecnologías emergentes en materia de captación y aprovechamiento de energía undimotriz son desarrolladas en su mayoría en Europa y en diversos sitios del mundo, donde se conoce el recurso es mayor, como por ejemplo Australia y España (Mendoza et al, 2015), Escocia, Portugal, Inglaterra, Irlanda, China, Japón, Canadá y Estados Unidos (Cabrales et al, 2013); sin embargo esto no ha sido un impedimento para que los países de América del Sur donde el recurso en algunos casos es menos visible, se empeñen en conocer su potencial energético undimotriz y busquen alternativas eficaces para el aprovechamiento de dicho potencial, tal es el caso de Chile (Cáceres, 2015), Ecuador (Mendoza et al, 2015) y Uruguay (Alonso, 2012).

1.6.1. Estudios energía del mar y undimotriz en Colombia

En Colombia en el año 2006 (Torres & Andrade) evaluaron los sitios en la geografía colombiana que debido a sus condiciones oceanográficas, cuentan con mayor potencial para la generación eficiente y económicamente competitiva de electricidad a partir de la energía contenida en los océanos, encontrando que en Bahía Málaga en el océano Pacífico sería necesario realizar unas modificaciones a los canales de acceso para explotar este tipo de energía; además encontraron en el Caribe por métodos indirectos que la península de la Guajira posee un flujo de energía promedio anual de 11.67 kWm^{-1} ; para finalizar en Bocas de Ceniza Barranquilla, al analizar una serie de tiempo de 28 días colectada con una boya direccional, encontraron un flujo promedio de energía de 16.11 kWm^{-1} .

En el año 2008 (Polo, Rodríguez y Sarmiento) analizaron el potencial de generación a lo largo de la costa colombiana mediante el uso de corrientes inducidas por mareas, utilizando imágenes landsat y sistemas de información geográfica para digitalizar la línea de la costa, las imágenes fueron correlacionadas con la topografía y barimetría obtenidas de entes gubernamentales, la corriente inducida por marea y los niveles dentro y fuera de la bahía se obtuvieron a partir del modelo de Keulegan; el estudio encontró 45 posibles bahías del litoral pacífico cuyo potencial energético calculado fue de 120 MW, en las cuales cabe destacar Bahía Málaga, la ensenada de Tribugá, Punta Catripe, Bocana Bazán

y Boca Naya; para la costa atlántica el modelo que utilizaron no mostro velocidades apropiadas para ningún sitio, excepto de la ciénaga grande de Santa Marta, debido a su gran tamaño; sin embargo no es utilizable en el corto plazo debido a que su salida al mar se encuentra bloqueada.

En el año 2009 (Tovar & Yamá) analizaron la prefactibilidad para la generación de energía eléctrica mediante energía undimotriz en Tumaco, Nariño; encontrando con base en datos obtenidos en tiempo real del instituto de Hidrología, Meteorología y estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) un potencial aproximado de 15 kWm^{-1} , adicional concluyeron que la tecnología Pelamis es la más adecuada para la generación teniendo en cuenta experiencias internacionales; para finalizar dedujeron que la Bahía de Tumaco es una excelente locación para la implementación de un parque de olas dado: el estado hidrometeorológico de la zona, la salida de aguas residuales al mar que disminuyen el costo de la transmisión por cable y el monitoreo y control del comportamiento ambiental por parte del Centro Control Contaminación del Pacifico (CCCP).

En el año de 2010 Ortega presenta su tesis para obtener el título de magister en Ingeniería de recursos Hidráulicos (Ortega, 2010), la cual posteriormente en el 2013 publica en un artículo (Ortega, Osorio, & Agudelo, 2013); en estos dos trabajos se estudia el aprovechamiento del recurso de energía de las olas en el mar caribe, específicamente en la Isla Fuerte. Teniendo en cuenta que la zona del mar caribe no cuenta con la cantidad necesaria de instrumentos de medición y que esto dificulta evaluar adecuadamente un recurso, Ortega presenta una nueva metodología para estimar el potencial de energía de las olas en lugares en los cuales no se encuentre la documentación o los instrumentos necesarios para medir los parámetros de evaluación; la metodología se basa en construir una serie de oleaje confiable en cercanías de la Isla, esta serie se obtiene usando datos de viento en el Caribe provenientes de modelos de reanálisis, que se usan como insumos para un modelo de generación de oleaje de tercera generación. Las series son calibradas usando instrumentación existente en sitios del litoral Caribe Colombiano. Una vez se cuenta con estas series, se hace una caracterización del clima marítimo de la zona, y se cuantifica la energía presente en el oleaje para distintas escalas temporales. Ortega explica al final de

su trabajo de tesis cuáles podrían ser las mejoras para dicha metodología, tales como el uso de un software diferente al SWAN, la toma de datos in situ para optimizar el sitio de ubicación del dispositivo generador de electricidad, el aporte de personal experto en temas mecánicos y eléctricos para un análisis más exhaustivo de la tecnología escogida por Ortega y finalmente el impacto ambiental que puede generar un proyecto de tal índole.

En el año 2014 (Appendini, et al) publican un artículo donde evalúan el potencial de energía de las olas en el mar Caribe, analizando información retrospectiva de 30 años y validándola con datos de boyas Colombianas y a través de tecnología satelital; enfocándose en el golfo de México y algunos lugares del mar caribe que se encuentran en Colombia, al finalizar el artículo mencionan que el lugar con mayor potencial encontrado a través de esta metodología está ubicado en 11.86°N , 75.66°W .

En el año 2014 (Jaramillo & Garcés) publicaron un artículo que habla acerca de la generación undimotriz y la integración con la red, teniendo en cuenta el análisis de resonancia subsíncrona; el generador undimotriz elegido por Jaramillo y Garcés es tipo Archimedes Wave Swing, el aporte significativo que brindan los autores es el análisis del impacto producido por el dispositivo sobre las oscilaciones de frecuencia. Este último trabajo muestra que el esfuerzo de las personas interesadas en el tema de la generación undimotriz está llegando cada vez más lejos y que los estudios continúan para volver realidad el uso de la energía de las olas en el sistema eléctrico de Colombia.

1.7 Componentes mecánicos del dispositivo

En la construcción del dispositivo que se utilizó como absorbedor puntual para realizar el presente estudio se aplicaron diferentes teorías de diseño mecánico acordes a los requerimientos de componentes que necesitaba el dispositivo, estas se enumeran a continuación:

1.7.1 Engranajes rectos

Los engranes rectos tienen dientes paralelos al eje de rotación y se emplean para transmitir movimiento de un eje a otro eje paralelo. La terminología de los dientes de engranes rectos se indica en la figura 15. El círculo de paso es un círculo teórico en el que por lo general se basan todos los cálculos; su diámetro es el diámetro de paso. Los círculos de paso de un par de engranes acoplados son tangentes entre sí.

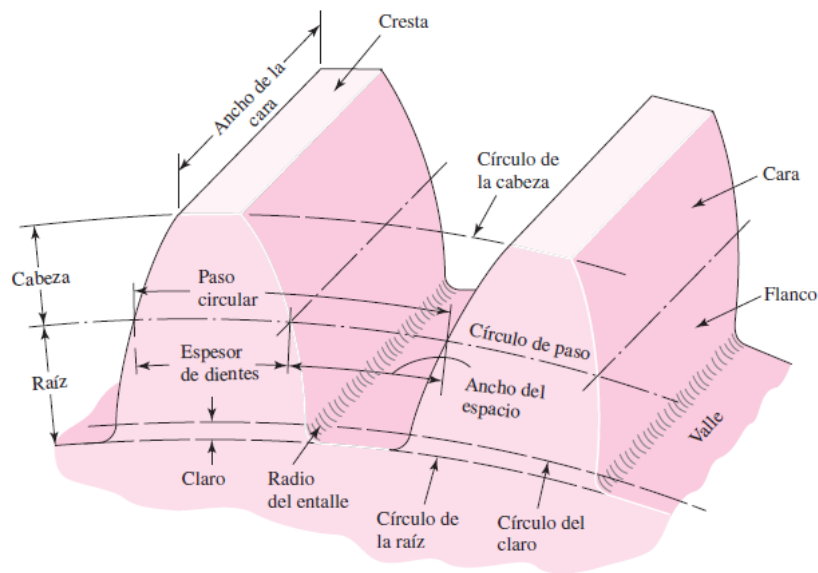


Figura 15: Nomenclatura de los dientes de engranes recto.

Fuente: Budynas & Nisbett (2008), p. 656.

El paso circular p_c es la distancia, medida sobre el círculo de paso, desde un punto en un diente a un punto correspondiente en un diente adyacente. De esta manera, el paso circular es igual a la suma del espesor del diente y del ancho del espacio.

El módulo m representa la relación del diámetro de paso con el número de dientes. La unidad de longitud que suele emplearse es el milímetro. El módulo señala el índice del tamaño de los dientes en unidades SI. El paso diametral P_d está dado por la relación del número de dientes en el engrane respecto del diámetro de paso. Por lo tanto, es el recíproco del módulo. Debido a que el paso diametral se utiliza sólo con unidades del sistema inglés, se expresa en dientes por pulgada.

La cabeza a se determina por la distancia radial entre la cresta y el círculo de paso. La raíz b equivale a la distancia radial desde el fondo hasta el círculo de paso. La altura, o profundidad total h , es la suma de la cabeza y la raíz. El círculo del claro es un círculo tangente al círculo de la raíz del engrane acoplado. El claro c está dado por la cantidad por la que la raíz en un engrane dado excede la cabeza de su engrane acoplado. El huelgo se determina mediante la cantidad por la cual el ancho del espacio de un diente excede el grosor o espesor del diente de acoplamiento medido en los círculos de paso. El número de dientes que posee un engranaje se denomina N .

Ecuaciones para los engranajes

Las ecuaciones utilizadas para dimensionar los engranajes se encuentran descritas en Budynas & Nisbett (2008). pp. 656 – 661.

$$\mathbf{d} = N * m \quad \text{Diámetro de paso del piñón} \quad (25)$$

$$\mathbf{p}_c = \pi \frac{d}{N} = \pi m \quad \text{Paso circular} \quad (26)$$

$$\mathbf{P}_d = \frac{\pi}{p} \quad \text{Paso diametral} \quad (27)$$

$$\mathbf{a} = 1 * m \quad \text{Addendum o cabeza del diente} \quad (28)$$

$$\mathbf{b} = 1.25 * m \quad \text{Deddendum o raíz del diente} \quad (29)$$

$$\mathbf{t} = \frac{p_c}{2} \quad \text{Espesor del diente} \quad (30)$$

$$\mathbf{r}_b = \frac{d}{2} \cos \phi \quad \text{Radio del círculo base} \quad (31)$$

$$\mathbf{c} = b - a \quad \text{Claro} \quad (32)$$

$$\mathbf{F} = \text{Ancho de la cara del piñón (Budynas & Nisbett, 2012, p. 711)}$$

$$\mathbf{F} = 3p_c < F < 5p_c \quad (33)$$

Se puede considerar a una cremallera como un engrane recto con un diámetro de paso infinitamente grande. Por consiguiente, la cremallera tiene un número infinito de dientes y un círculo base que se localiza a una distancia infinita desde el punto de paso. Los lados de los dientes de involutas de una cremallera son líneas rectas que forman un ángulo respecto de la línea entre centros igual al ángulo de presión. En la figura 16 se presenta una cremallera involuta acoplada a un piñón. Los lados correspondientes de dientes

involuta son curvas paralelas; el paso base representa la distancia constante y fundamental que hay entre ellos a lo largo de una normal común.

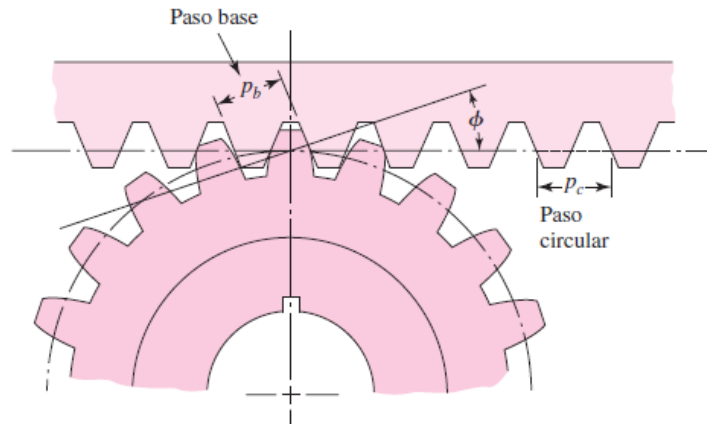


Figura 16: Piñón y cremallera con dientes de involuta.
Fuente: Budynas & Nisbett (2008), p. 662.

Ecuaciones para la cremallera

Las ecuaciones utilizadas para dimensionar la cremallera se encuentran descritas en Casillas (1977) p. 199 y Budynas & Nisbett (2008) p. 662.

$$N_c = \frac{L_c}{P_c} \quad \text{Número de dientes de la cremallera} \quad (34)$$

$$P_b = P_c \cos \phi \quad \text{Paso base} \quad (35)$$

$$h = m * 2.167 \quad \text{Altura total del diente} \quad (36)$$

$$e_d = 0.5 * p_c \quad \text{Espesor del diente} \quad (37)$$

$$e_{ed} = 0.5 * p_c \quad \text{Espacio entre dientes} \quad (38)$$

$$r_t = \frac{N_c}{N} \quad \text{Relación de transmisión} \quad (39)$$

Análisis de engranajes método AGMA

En los engranajes la parte más propensa a fallar son los dientes, los cuales deben soportar la carga que se transmite y el impacto con el diente conjugado, estos factores pueden generar dos tipos de falla: el primero por flexión en el diente, el segundo por desgaste o picadura superficial del diente (Benítez, 2011).

Ecuaciones para calcular el esfuerzo a flexión en la raíz del diente σ_t

El esfuerzo a flexión se calcula a través de la siguiente expresión (Budynas & Nisbett, 2012, p. 717)

$$\sigma_t = \frac{W_t K_o K_v K_s K_H K_B}{F m J} \quad (40)$$

Donde:

W_t : Carga tangencial transmitida, en [N]

K_o : Factor de sobrecarga

K_v : Factor dinámico

K_s : Factor de tamaño

K_H : Factor de distribución de carga

K_B : Factor del espesor del aro

F : Ancho de la cara del elemento más angosto, en [mm]

m : Módulo métrico, en [mm]

J : Factor geométrico de resistencia a la flexión

Factor dinámico, se calcula mediante las siguientes formulas (Budynas & Nisbett, 2012, p.p. 727-728):

$$B = 0.25(12 - Q_v)^{2/3} \quad (41)$$

$$A = 50 + 56(1 - B) \quad (42)$$

$$K_v = \left(\frac{A + \sqrt{200v}}{A} \right) \quad (43)$$

$$v = \frac{\pi * d * w}{60000} \quad (44)$$

Donde v es la velocidad en la línea de paso y Q_v es el número de control de calidad, que definen las tolerancias para engranes, los números de calidad del 3 a 7 incluyen la mayoría de los engranes comerciales, y de 8 a 12 engranes de alta precisión.

Ecuación para calcular el esfuerzo a flexión permisible σ_{perm}

La norma AGMA indica que el esfuerzo permisible σ_{perm} , se calcula mediante la siguiente ecuación (Budynas & Nisbett, 2012, p. 737):

$$\sigma_{perm} = \frac{S_t Y_N}{K_T K_R} \quad (45)$$

Donde:

S_t : Esfuerzo de flexión permisible [N/m^2]

Y_N : Factor de ciclos del esfuerzo de flexión

K_T : Factor de temperatura

K_R : Factor de confiabilidad

Ecuación para calcular el esfuerzo de picadura σ_C

La expresión que determina el valor de σ_C es (Budynas & Nisbett, 2012, p. 718):

$$\sigma_C = C_p \sqrt{\frac{W_t K_0 K_v K_s K_H C_f}{d_p F I}} \quad (46)$$

Donde:

C_p : Coeficiente elástico, en [$\sqrt{N/mm^2}$]

C_f : Factor de condición superficial

d_p : Diámetro de paso del piñón, en [mm]

I : Factor geométrico de resistencia a la picadura

Factor métrico I para engranajes externos, se calcula mediante las siguientes expresiones (Budynas & Nisbett, 2012, p. 726):

$$m_G = \frac{N_G}{N_P} \quad (47)$$

$$I = \frac{\cos \phi \sin \phi}{2m_N} * \frac{m_G}{m_G + 1} \quad (48)$$

Donde:

m_G : Relación de velocidades

m_N : Relación de repartición de carga

En el caso de engranajes rectos $m_N = 1$

Ecuación para calcular el esfuerzo permisible por contacto σ_{Cperm}

La norma AGMA indica que el esfuerzo permisible por contacto σ_{Cperm} , se determina mediante la siguiente ecuación (Budynas & Nisbett, 2012, p. 747):

$$\sigma_{Cperm} = \frac{S_C Z_N}{K_T K_R} \quad (49)$$

Donde:

S_C : Resistencia de contacto permisible, $[N/mm^2]$

Z_N : Factor de ciclo de vida de esfuerzo

K_T : Factor de temperatura

K_R : Factor de confiabilidad

1.7.2 Ejes

Una flecha es un elemento rotatorio, por lo general de sección transversal circular, que se emplea para transmitir potencia o movimiento. Ella constituye el eje de rotación u oscilación de elementos como engranes, poleas, volantes de inercia, manivelas, catarinas y miembros similares y, además, controla la geometría de su movimiento (Budynas & Nisbett, 2012, p. 348).

Los momentos flexionantes sobre un eje pueden determinarse mediante diagramas de cortante y momento flexionante. Como la mayoría de los problemas de ejes incorporan engranes o poleas que introducen fuerzas en dos planos, por lo general los diagramas de momento cortante y flexionante deberán ser en dos planos

Los esfuerzos de flexión, torsión o axiales pueden estar presentes tanto en componentes medios como en alternantes. Para el análisis, es suficientemente simple combinar los diferentes tipos de esfuerzos en esfuerzos de von Mises alternantes y medios.

Se pueden obtener expresiones similares para cualquiera de los criterios de falla comunes mediante la sustitución de los esfuerzos de von Mises de las ecuaciones en cualquiera de los criterios de falla; En este caso se concentrara en el criterio de sodeberg debido a las múltiples ventajas que presenta

$$d = \left(\frac{16n}{\pi} \left\{ \left[\frac{1}{S_e} \left[4(K_f M_a) \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} + \left[\frac{1}{S_y} \left[3(K_{fs} T_m) \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right) \frac{1}{3} \quad (50)$$

Siempre es necesario considerar la posibilidad de falla estática en el primer ciclo de falla. El criterio de Soderberg evita de manera inherente la fluencia, como puede observarse en su curva de falla que se mantiene conservadoramente dentro de la línea de fluencia (Langer) (Budynas & Nisbett, 2008. p. 353)

Para una verificación adicional contra la fluencia se calcula el esfuerzo máximo de von mises y se compara con la resistencia a la fluencia (Budynas & Nisbett, 2012, p. 358)

$$\dot{\sigma}_{max} = [(\sigma_m + \sigma_a)^2 + 3(\tau_m + \tau_a)^2]^{\frac{1}{2}} = \left[\left(\frac{32K_f(M_m + M_a)}{\pi d^3} \right)^2 + 3 \left(\frac{16K_{fs}(T_m + T_a)}{\pi d^3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (51)$$

$$n_y = \frac{S_y}{\dot{\sigma}_{max}} \quad (52)$$

Se puede observar que uno de los parámetros requeridos para el cálculo de resistencia de ejes es el límite de resistencia a la fatiga, para el cual existen grandes cantidades de datos en la literatura técnica sobre los resultados de ensayos con viga rotativa y de ensayos a la tensión simple de muestras tomadas de la misma barra.

Para el trabajo con aluminios se recomienda trabajar con un límite de resistencia a la fatiga de

$$S'_e = 0.4S_{ut} S_{ut} < 330 MPa \quad (53)$$

Escacena, J. (2006). Vanegas, L. (2011). Grover, H. (1951).

Adicionalmente se consideran los factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga, tal como se muestra en las siguientes ecuaciones (Budynas & Nisbett (2008), p. 273-282)

$$S_e = K_a K_b K_c K_d K_f S'_e \quad (54)$$

Dado que

$$K_a = a S_{ut}^b \quad (55)$$

Los valores de a y b se encuentran en la figura 17

Acabado superficial	Factor a		Exponente b
	S_{ut} kpsi	S_{ut} MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o estirado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

Figura 17: Parámetros del factor de modificación superficial de Marín.

Fuente: Budynas & Nisbett (2012), p. 337

$$K_b = \left(\frac{d}{7.62}\right)^{-0.107} \quad (56)$$

Para $2.79 < d < 51$ mm

$$k_f = 1 + q(k_t - 1) \quad (57)$$

Los valores de k_t y q se encuentran en las figuras 18 y 19

	Flexión	Torsión	Axial
Filete de hombro: agudo ($r/d = 0.02$)	2.7	2.2	3.0
Filete de hombro: bien redondeado ($r/d = 0.1$)	1.7	1.5	1.9
Cuñero fresado ($r/d = 0.02$)	2.2	3.0	—
Cuñero de patín o trapezoidal	1.7	—	—
Ranura para anillo de retención	5.0	3.0	5.0

Figura 18: Estimaciones de primera iteración de los factores de concentración del esfuerzo k_t .

Fuente: Budynas & Nisbett (2012), p. 361

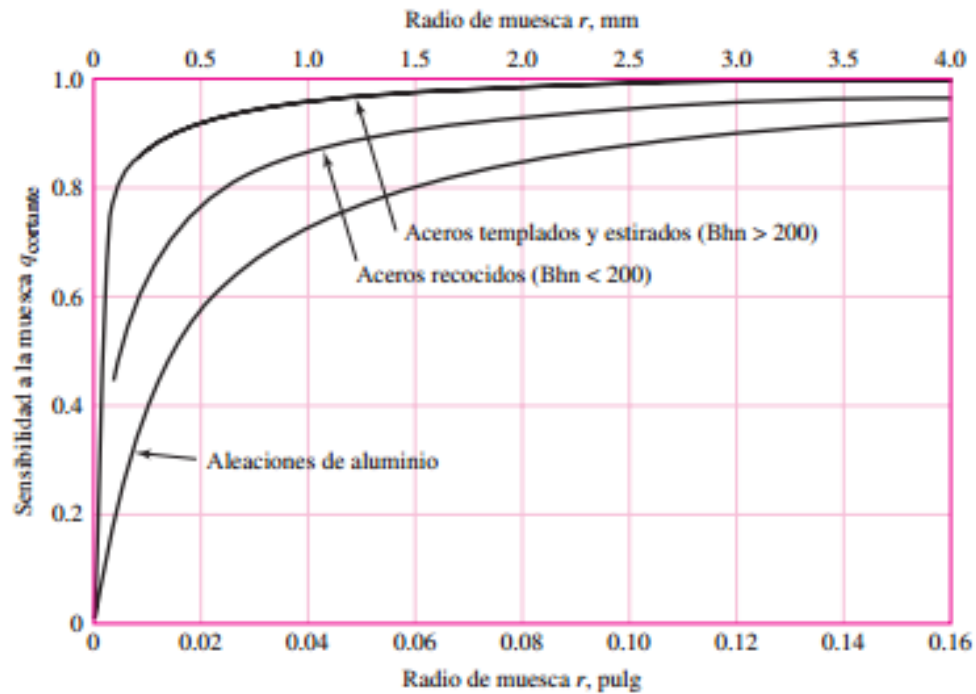


Figura 19: Sensibilidad a la muesca de materiales sometidos a torsión.
Fuente: Budynas & Nisbett (2012), p. 318

1.7.3 Cojinetes

Un cojinete en ingeniería es la pieza o conjunto de ellas sobre las que se soporta y gira el árbol transmisor de momento giratorio de una máquina; los términos cojinete de contacto rodante, cojinete antifricción y cojinete de rodamiento se emplean para describir la clase de cojinete en la cual se transfiere la carga principal mediante elementos que experimentan contacto rodante. En un cojinete de rodamiento, la fricción inicial aproximadamente duplica la fricción de operación, pero aún es despreciable en comparación con la fricción inicial de un cojinete de manguito. La carga, la velocidad y la viscosidad de operación del lubricante afectan las características de fricción de un cojinete de rodamiento.

La relación carga-vida-confiabilidad es uno de los principales problemas del diseñador debido a que la carga deseada no es la carga de ensayo o la carga del catálogo del fabricante. La velocidad deseada es diferente a la velocidad de ensayo del proveedor y la

expectativa de confiabilidad es mucho mayor que 0.90, que acompaña la anotación del catálogo.

Por lo tanto para el cálculo de cojinetes de bolas se utiliza una aproximación de la carga por catálogo arrojada por el fabricante analizando la velocidad nominal y la vida nominal en función de la velocidad deseada y la vida deseada (Budynas & Nisbett, 2012, p. 551,554).

$$X_D = \frac{L_D}{L_R} = \frac{60L_D n_D}{L_{10}} \quad (58)$$

Donde:

L_D : vida deseada

N_D : vida deseada

L_R : valores nominales

$$C_{10} = a_f F_D = \left[\frac{X_D}{X_0 + (\theta - X_0)(1 - R_D)^{1/b}} \right]^{1/a} \quad (59)$$

Donde:

a_f : Factor de aplicación

F_D : Carga de diseño

X_0 : Valor garantizado o mínimo de la variante

θ : Parámetro característico que corresponde al valor del percentil de las variables

R_D : Confiabilidad

b : Parámetro de la forma que controla el sesgo

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Los pasos desarrollados para llevar a cabo el presente proyecto consistieron: primero en investigar cual es el diferencial de altura del oleaje en la zona del caribe Colombiano, enfocándose en la zona del departamento de Córdoba; luego aplicando conceptos y normas ingenieriles se diseñó un dispositivo capaz de transformar el movimiento oscilatorio de las olas en revoluciones y a su vez en electricidad; a continuación se validó el dispositivo en el laboratorio de hidráulica y mecánica de fluidos de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Finalmente se evaluó el potencial teórico y se comparó con el obtenido a través del dispositivo, para luego determinar con los datos de altura y periodo de ola característicos, el potencial energético undimotriz del departamento de Córdoba; todo esto se describe con más detalle a continuación.

2.1. Diferencial de altura del oleaje en la zona del caribe colombiano

2.1.1. Búsqueda bibliográfica

La primera consulta se realizó a nivel de artículos científicos, buscando información general del oleaje en el Caribe Colombiano, eligiendo un documento que presentara información concreta del oleaje en el departamento de Córdoba o lo más cerca posible.

2.1.2. Investigación de parámetros oceanográficos en sitio web

Se utilizó el sistema de medición de parámetros oceanográficos y de meteorología marina (SMPOMM) del sitio web de la Dirección General Marítima del estado Colombiano (DIMAR) para conocer en tiempo real la altura de las olas y periodos característicos de la zona costera cercana al departamento de Córdoba.

2.1.3. Búsqueda de información con expertos en temas oceanográficos

Se consultó con diversos expertos en temas marítimos y oceanográficos para corroborar los datos obtenidos con respecto al oleaje, posibles sugerencias para el proyecto y posibles sitios para el aprovechamiento de la energía Undimotriz.

2.2. Diseño del dispositivo

El diseño del dispositivo se dividió en los siguientes componentes: diseño de la boya, cálculo de la fuerza máxima que entrega la boya, dimensiones de la cremallera y del sistema de transmisión de potencia, cálculo de los ejes, selección de las chumaceras, elección del embrague para la conversión del movimiento rotatorio alternativo en rotatorio unidireccional y elección del generador eléctrico.

2.2.1. Boya

2.2.1.1. Geometría y dimensiones de la boya:

Para seleccionar la geometría de la boya se revisaron artículos científicos que evaluaran diferentes geometrías, eligiendo según los artículos, la geometría que produce menores esfuerzos en los componentes del dispositivo y por lo tanto manifiesta un mejor comportamiento estructural. Para la dimensión de la boya se tuvo como referencia el ancho del canal de oleaje.

2.2.1.2. Cálculos de la fuerza producida por la boya

Para calcular la máxima fuerza producida por la boya se basó en la teoría hidrodinámica para implementar una simulación en la herramienta Simulink del software Matlab & Simulink Student Suite, con las fuerzas que influyen sobre la boya; luego se visualizó una de las gráficas que arroja la simulación para elegir el valor máximo de fuerza que se utilizó como dato de entrada para los cálculos de la cremallera.

2.2.1.3. Selección del material para la boya

Para la selección del material de la boya primero se identificaron diferentes materiales existentes que pudieran adaptarse a la geometría de la boya, luego se revisó cuáles de esos materiales se encontraban disponibles en la ciudad de Montería, finalmente el material que cumpliera con estos requisitos y fuera el menos costoso se validó a través del software Solidworks 2015 para comprobar que resistiera la carga a la cual estaría sometido.

2.2.2. Cremallera y engranajes del sistema de transmisión de potencia.

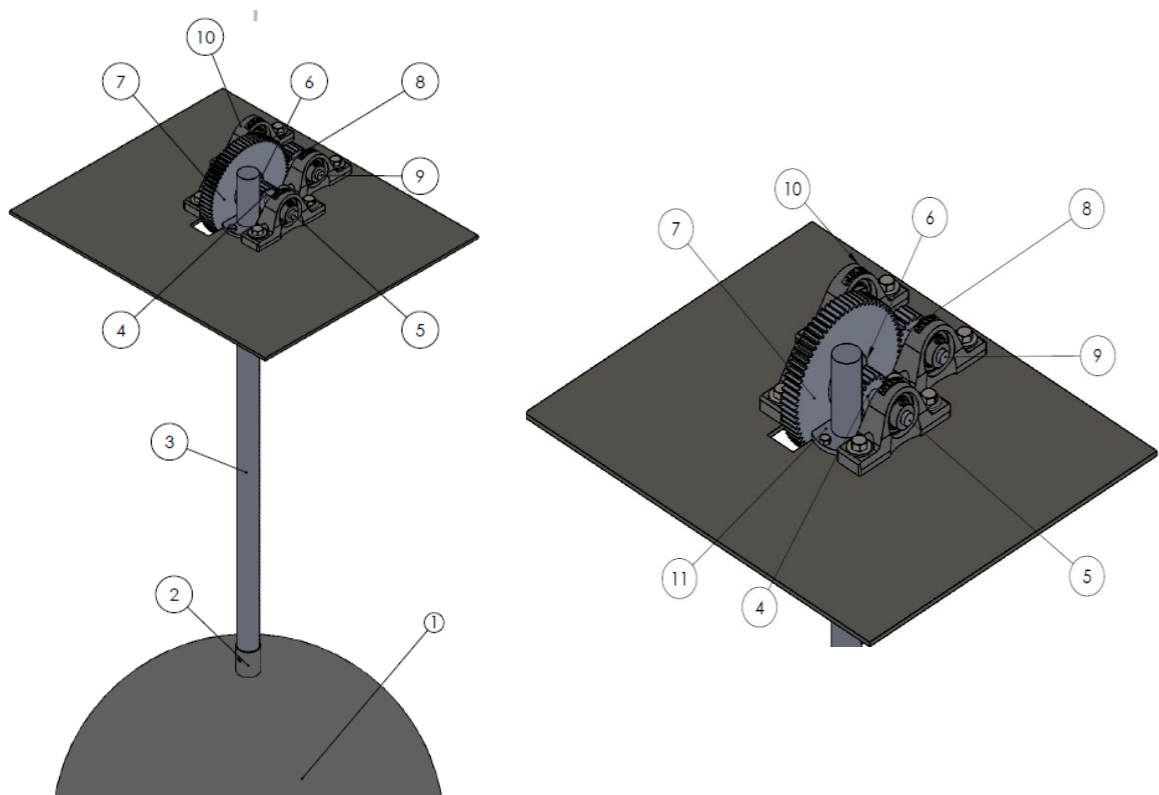


Figura 20: Representación general del sistema de transmisión de potencia con sus respectivos componentes.

Fuente: Autores.

La boya (1) está ensamblada por medio del empalme (2) a la cremallera (3), esta sirve para transportar la energía potencial de las olas y transmitirla al sistema a través del engranaje (4) el cual está incorporado al eje monolítico (5), este a su vez transmite el movimiento al engranaje (7), con la salvedad de que se transforma el movimiento rotatorio alternativo a rotatorio unidireccional empleando el embrague (6); finalmente el engranaje

(7) transmite el movimiento al engranaje (8) el cual está unido al eje (9) que sirve de entrada al generador; los dos ejes se encuentran sostenidos en chumaceras (10) y la cremallera se mantiene en su posición utilizando el buje (11).

2.2.2.1. Selección del material de la cremallera, ejes y los engranajes.

Para la determinación del material con el cual se construyó el sistema de transmisión de potencia refiriéndose específicamente a la cremallera, los ejes y los engranajes, se procedió a comparar al aluminio 6261 con el acero 1045 para conocer cuál de los dos materiales posee mejores cualidades para la construcción de los componentes, para tal fin se consideraron características tales como densidad, resistencia a la corrosión, maquinabilidad, costos y obtención en el mercado, los cuales representan beneficios en el funcionamiento del dispositivo y facilidad en la ejecución del proyecto. Al finalizar se evaluó que el material elegido resistiera los esfuerzos producidos en los componentes.

2.2.2.2. Dimensionamiento de los engranajes y la cremallera

Engranaje 4

Para elegir el modulo del engranaje 4 se tuvo en cuenta que debe aprovechar la carrera de la cremallera cuanto más sea posible y que la manufactura no debe ser complicada para no encarecer el proceso, por tal razón se eligió el módulo número 2; para elegir el número de dientes se tuvo en cuenta que el menor número de dientes que debe tener un piñón para que no exista interferencia con una cremallera es 18 según (Budynas & Nisbett., 2012, p. 660) y (Mott., 2006, p. 320).

Cremallera

Al momento de definir las dimensiones de la cremallera se revisó el resultado de la sección 2.1: *Diferencial de altura del oleaje en la zona del caribe colombiano*, agregando un

factor de seguridad para la longitud de la cremallera; el modulo, ángulo de presión y paso circular de la cremallera deben ser iguales al del engranaje 4.

Engranaje 7 y Engranaje 8

Para estos dos engranajes se utilizó el mismo modulo que en el engranaje 4 con el fin de no aumentar los costos de la manufactura, en consecuencia el paso diametral y el ángulo de presión también son los mismos; la relación de transmisión utilizada entre ellos fue de 4:1.

Teniendo en cuenta los aspectos mencionados anteriormente se procedió a dimensionar la cremallera y los engranajes con base en la nomenclatura de la figura 21 y las ecuaciones presentadas en los libros de diseño de: Mott (2006), Budynas, R., & Nisbett, J. K. (2008, 2012) y Benítez (2011) las cuales se muestran en la sección 1.7.1. *Engranajes rectos*; al finalizar el dimensionamiento de los componentes se organizaron los resultados en una tabla y se verificaron las dimensiones a través del método AGMA, las ecuaciones para el análisis AGMA se encuentran también en la sección 1.7.1.

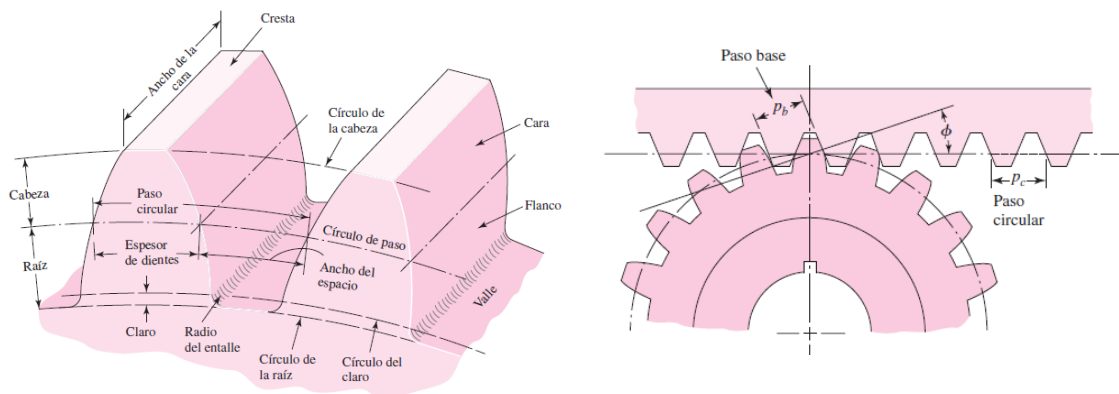


Figura 21: Nomenclatura de los dientes de engranajes rectos (izq) y cremallera (der)
Fuente: Budynas & Nisbett (2008), Pp. 656 y 662

2.2.3. Empalme

Como se indicó anteriormente la cremallera (3) se encuentra unida a la boya (1) a través del empalme (2), este además de unir los componentes debe soportar los esfuerzos que se producen allí; para el diseño de este componente se decidió aprovechar la manufactura de la boya, comprobando a través de SolidWorks 2015 que el material elegido para la fabricación de la boya soportara los esfuerzos producidos en la unión.

2.2.4. Ejes

El diseño de los ejes se realizó con base a las teorías de falla por fatiga y fluencia descritas en el libro de Budynas & Nisbett (2012), se desarrolló desde los requerimientos de carga que debía soportar el dispositivo dadas las condiciones presentes en la zona costera del departamento de Córdoba.

El procedimiento para la selección de los ejes es el que se describe a continuación:

En primer lugar se realizó un estudio de cargas en las cuales se analizó la fuerza a la que estarán sometidos los ejes, considerando que el parámetro de entrada es la carga que arroja la boya y la cremallera, la cual es calculada con anterioridad, y de esta manera realizar los diagrama de momentos a través del software MDSolid 4.1 versión libre y conocer las condiciones que soportarán los ejes. Una vez se obtuvo las cargas de trabajo se procedió a calcular el diámetro mínimo efectivo que resistiría las condiciones, para esto primero se utilizó el criterio de falla por fatiga para obtener un diámetro aproximado en el cual posteriormente se aplicaron factores de corrección como son los factores de Marín y de esta manera emplear un criterio de selección de diámetro, considerando razones conservativas se seleccionó el criterio de falla de Sodeberg para obtener el diámetro efectivo, dado que este protege contra la fatiga y la fluencia (Budynas & Nisbett, 2012, p. 369). Por consiguiente una vez se determinó el primer diámetro se procedió a iterar hasta que el valor convergiera en un punto realizando el mismo procedimiento aplicando los factores de corrección; Incluyendo además un factor de seguridad de 1.5 inicialmente,

porque para propósitos comparativos se utilizó el criterio de falla por fluencia para conocer un valor aproximado para este factor dado las condiciones de trabajo.

2.2.5. Chumaceras

Una vez seleccionado el diámetro de los ejes, se procedió a escoger las chumaceras adecuadas para las condiciones de trabajo, dada cierta facilidad de ensamblaje se prescindió de los rodamientos y se optaron por chumaceras puesto que cumplen la misma función facilitando la instalación, de esta manera para la selección de las chumaceras adecuadas primero se analizó las cargas con que trabajara el sistema y por lo tanto se obtuvo la carga directa que soportaran cada uno de las chumaceras, simultáneamente se determinó las rpm máximas en las que funcionara el dispositivo las cuales dependen de las condiciones de evaluación acordes a las presentes en el departamento de Córdoba, finalmente al tener las condiciones de trabajo de las chumaceras se procedió a calcular la carga por catálogo basándose en las teorías del libro de Budynas & Nisbett (2012) y teniendo en cuenta consideraciones de diseño entregadas por los fabricantes tales como son la vida útil, el factor de seguridad y la confiabilidad; En consecuencia para la selección de las chumaceras se consultó en el mercado las posibles opciones que cumplan con la carga por catálogo y el diámetro requerido para la labor, los cuales se calcularon con anterioridad.

2.2.6. Elección del embrague

Como se mencionó anteriormente, las revoluciones entregadas por el eje (5) al engranaje (7) deben transformarse de rotativas alternativas a unidireccionales, esto porque la mayoría de los generadores comerciales funcionan con revoluciones en un solo sentido; para tal fin considerando las revoluciones que gira el eje (5), el entorno comercial de la

ciudad de Montería y el costo del componente, se eligió un embrague y se adaptó al engranaje (7).

2.2.7. Generador

Teniendo en cuenta que ya se calculó todo el sistema de transmisión, se procedió a seleccionar un generador que funcione con los parámetros finales arrojados por el dispositivo como son el torque y las revoluciones, estos son determinables puesto que depende de las condiciones a las que estará expuesto el sistema; las condiciones máximas a las que estará sometido el generador serán: 332 revoluciones por minuto entregadas por el eje (9) del sistema de transmisión y un torque de 10 Nm, sin embargo dada la naturaleza del dispositivo y el ambiente de trabajo no es posible obtener revoluciones ni torques constantes con los cuales se pudiera seleccionar un generador convencional, por tal razón se buscó en el mercado un generador que funcione a revoluciones por minuto aproximadas entre 94 y 332 y a torque variable.

2.2.8. Validación del dispositivo

El dispositivo se puso en marcha en el canal de oleaje del laboratorio de hidráulica y mecánica de fluidos de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín; el canal cuenta con una longitud de 25 metros, 1 metro de ancho y 1 metro de profundidad, puede generar olas de hasta 30 centímetros con una profundidad de agua de 60 centímetros. Está apoyado por un sistema de corrientes que puede trabajar contra la ola o a favor de ella, para caudales máximos de hasta 90 litros por segundo (Agencia de Noticias UN, 2014).

El ingeniero Cesar Augusto Jaramillo quien hace parte del Grupo de Oceanografía e Ingeniería Costera – OCEANICOS de la Universidad Nacional de Colombia y trabaja en el laboratorio indicó “que el canal de oleaje podía producir olas de diferentes alturas desde 0.07 m hasta 0.3 m con periodos que van desde 0.5 s hasta 3.5 s; también indicó que el

sistema de empuje puede reproducir oleaje monocromático con teoría del oleaje Stokes y oleaje espectral para los espectros teóricos Jonswap y Pierson-Moskowitz. Finalmente comentó que el canal cuenta con un sistema de disipación pasivo que absorbe ~70 % de la energía” (C. Jaramillo, comunicación a través de e-mail, 29 de noviembre de 2016).

Antes de realizar la validación del dispositivo se concertó una visita para el día martes 6 de diciembre de 2016 para conocer el canal de oleaje y planear la instalación del dispositivo, en la figura 22 se observa la infraestructura del laboratorio. En la reunión se dialogó con personal adscrito al laboratorio como los ingenieros Francisco Mauricio Toro Botero, Luis Fernando Ospina Herrera y Cesar Augusto Jaramillo, se mostraron los planos del dispositivo y se conversó sobre los alcances y objetivos del proyecto, adicionalmente se tomaron las medidas necesarias para la correcta instalación del equipo en el canal; al final de la visita se acordó que las pruebas del dispositivo se llevarían a cabo el 7 de diciembre de 2016.



Figura 22: Instalaciones del Laboratorio de Hidráulica y Mecánica de Fluidos de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

Fuente: Autores.

Para la instalación del dispositivo el día 7 de diciembre de 2016 primero se procedió a instalar la estructura soporte, luego se armó la parte mecánica del dispositivo, a continuación se acopló el sistema mecánico a la estructura soporte, posteriormente se puso la boya en el agua y se empalmó con el sistema mecánico, finalmente se conectó el circuito eléctrico con su respectivo multímetro para la medición, en las figuras 23 y 24 se observan algunos de los pasos antes descritos.



Figura 23: En la izquierda: Instalación de la estructura soporte. En la derecha: Ensamble del sistema mecánico.

Fuente: Autores.



Figura 24: En la izquierda: Acople del sistema mecánico con la estructura soporte y con la boya. En la derecha: Conexión del circuito eléctrico y del multímetro.

Fuente: Autores.

Con el dispositivo completamente montado, como se aprecia en la figura 25 se eligieron tres parámetros representativos para evaluar el funcionamiento del equipo, estos son: las revoluciones, el voltaje y el amperaje.



Figura 25: Dispositivo completamente ensamblado.
Fuente: Autores.

Para comparar los tres parámetros mencionados anteriormente se decidió utilizar un número representativo de 12 escenarios, dado que el agua en el canal se demora aproximadamente cinco minutos en llegar a la calma luego de cualquier ejecución, los escenarios descritos en la tabla 1 fueron los elegidos para la toma de datos, cada uno de ellos se ejecutó por un periodo de 60 segundos.

Tabla 1: Escenarios elegidos para la toma de datos

Escenario	Altura (m)	periodo (s)
1	0.3	3.5
2	0.3	2.5
3	0.3	2
4	0.25	3.5
5	0.25	2.5
6	0.25	2
7	0.2	3.5
8	0.2	2.5
9	0.2	2
10	0.15	3.5
11	0.15	2.5
12	0.15	2

Fuente: Autores

2.2.8.1. Altura real de ola

El canal de oleaje es operado con un software desde una cabina, este tiene adaptados sensores eléctricos que se utilizan para conocer la altura real de las olas; los datos de voltaje entregados por el personal del laboratorio se transforman en alturas con ecuaciones proporcionadas por el programa. La figura 26 muestra una foto de la cabina y un pantallazo del software. En este punto se tomaron dos escenarios al azar de la tabla 1 y se graficaron para verificar los datos de altura real de ola.



Figura 26: En la izquierda: Cabina de control del canal de oleaje. En la derecha: foto del software que controla el canal de oleaje.

Fuente: Autores.

2.2.8.2. Comparación de las revoluciones por minuto

Se calculó teóricamente el número de giros que debía realizar el eje de salida en un minuto con base en el desplazamiento de la cremallera, para los escenarios descritos en la tabla 1; luego en el laboratorio se midió con un tacómetro las revoluciones por minuto desarrolladas por el equipo en los mismos escenarios y se compararon los valores.

2.2.8.3. Comparación del voltaje y amperaje producido por el dispositivo

Utilizando el torno del laboratorio de Materiales y Procesos de la Universidad de Córdoba se midió el voltaje y amperaje producidos por el generador a 45, 70, 90, 108, 140, 165, 215, 255 y 330 revoluciones por minuto, para elaborar las gráficas características.

Luego se midieron los mismos parámetros con el dispositivo en funcionamiento utilizando un multímetro en los escenarios descritos en la tabla 1 y se promedió para cada escenario, para las mediciones del amperaje se utilizó una resistencia de 1 omh; finalmente se compararon los valores producidos por el dispositivo en marcha con los de las gráficas características elaboradas anteriormente.

2.3. Comparación del potencial energético undimotriz teórico vs el obtenido a través del dispositivo

Primero se calculó el potencial energético undimotriz teórico a través de la ecuación 10 con la altura de ola y periodo de los escenarios de la tabla 1; a continuación, se calculó el potencial producido por el dispositivo multiplicando el voltaje por el amperaje ocurridos en los mismos escenarios, los cuales se encuentran en la tabla 6, teniendo en cuenta que las mediciones llevadas a cabo en el inciso **2.2.8.3: Comparación del voltaje y amperaje producido por el dispositivo**, se hicieron utilizando solo una bobina de las dos que posee el generador, esto quiere decir que los valores medidos en el inciso 2.2.8.3 se duplicaron para hacer el análisis de potencia; luego se calculó la eficiencia que tiene el dispositivo en los mismos escenarios; en seguida se organizaron los datos en una tabla en función de la altura y periodo para analizarlos. Para finalizar se calculó la ecuación de regresión lineal múltiple a través del software estadístico R versión libre 3.4, para conocer el potencial real energético undimotriz obtenido a través del dispositivo utilizando los valores de altura y periodo de ola característicos del departamento de Córdoba encontrados en la sección **3.1: Diferencial de altura del oleaje en la zona del caribe colombiano**.

3 RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. Diferencial de altura del oleaje en la zona del caribe colombiano

3.1.1. Búsqueda bibliográfica del Oleaje en la zona del caribe Colombiano

En el año 2010 Martínez presentó un trabajo en el cual propone una metodología para estimar la cota de inundación en la zona costera del Caribe colombiano, el trabajo tiene un inciso en el cual para calcular el run up (cota que alcanza el oleaje al incidir sobre una estructura respecto el nivel del mar en reposo) se debe calcular el oleaje significativo, las series de oleaje utilizadas por Martínez fueron proporcionadas por una componente del proyecto de (Ortega, 2010) y la metodología para su cálculo fue desarrollada utilizando los datos de oleaje generado por medio de un re-análisis de esta variable a partir de un modelo de tercera generación llamado SWAN desarrollado en Delft University of Technology en Holanda (Booij et al., 1996). Las coordenadas en las cuales se reconstruyeron las series de oleaje para el trabajo de Martínez fueron: Riohacha, Santa Marta, Barranquilla, Cartagena, Golfo Morrosquillo y Golfo de Uraba, como se puede apreciar en la figura 27. Para la región del Golfo de Uraba, la cual es la más cercana al departamento de Córdoba, se presentan según (Martínez, 2010, p 119) valores del altura de ola que van desde la calma hasta valores máximos que alcanzan los 2 m, con una media de 0.5 m, y periodos que van desde 2 s hasta 29 s, con una media de 6.7 s. Para la región del golfo de Morrosquillo se presentan valores máximos que alcanzan los 2.1 m, con una media de 0.6 m, y periodos con una media de 6 s.

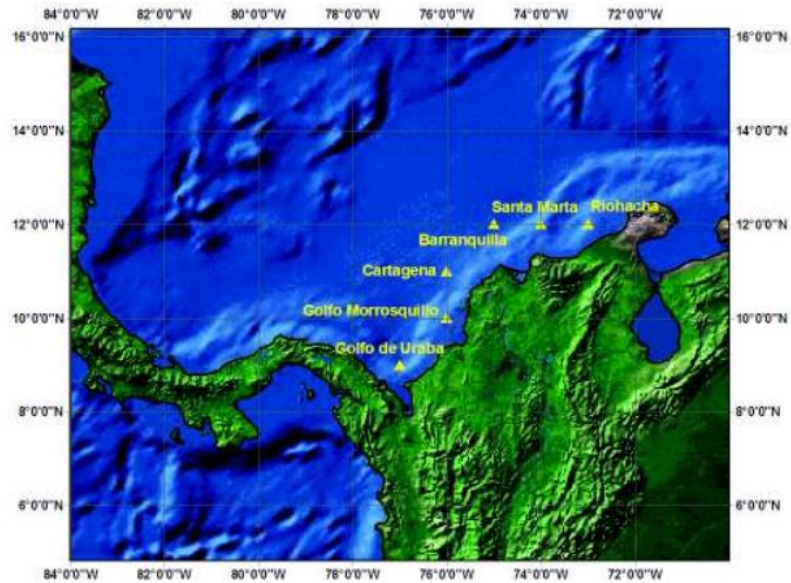


Figura 27: Coordenadas en las cuales se reconstruyeron las series de Oleaje en el trabajo de Martínez.
 Fuente: Martínez (2010) p. 63.

3.1.2. SISTEMA DE MEDICIÓN DE PARÁMETROS OCEANOGRÁFICOS Y DE METEOROLOGÍA MARINA – SMPOMM

La Dirección General Marítima DIMAR cuenta con un sistema de Medición de Parámetros Oceanográficos y de Meteorología Marina – SMPOMM. Este Sistema de medición permite obtener en tiempo real datos relacionados con las condiciones oceánicas y atmosféricas del territorio marítimo colombiano, con el fin de ofrecer información necesaria para garantizar y salvaguardar la vida humana en las distintas actividades marítimas y costeras que se realizan en el país. Está interconectado con estaciones meteorológicas, boyas de oleaje direccional, boyas metocean y boya Tsunami, ubicadas en diferentes puntos marítimos nacionales cercanas a los Puertos y principales ciudades del litoral, que registran datos como: dirección y velocidad del viento, temperatura ambiente, humedad relativa, presión atmosférica, radiación solar y sobre el estado del mar: dirección y velocidad de corrientes hasta 50 mts de profundidad; periodo, altura y dirección de la ola, temperatura superficial del mar, salinidad superficial (Sitio web DIMAR, 2015). En la figura 28 se muestra un pantallazo de la aplicación.

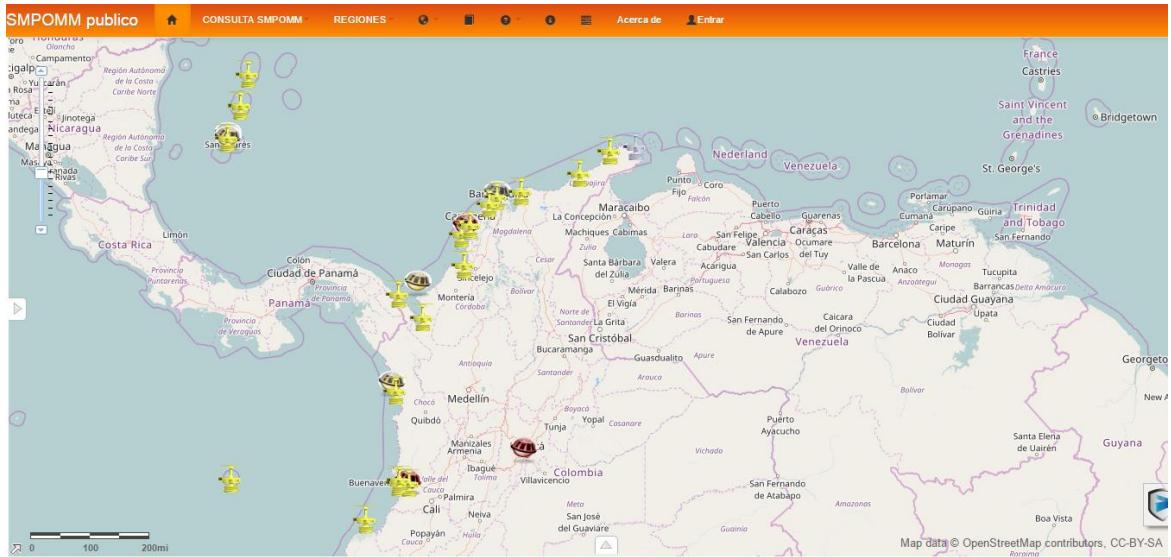


Figura 28: Sistema de Medición de Parámetros Oceanográficos y de Meteorología Marina SMPOMM.
Fuente: SMPOMM (2017).

La boya oceanográfica del SMPOMM que se encuentra más cerca al departamento de Córdoba es la Boya de Oleaje Turbo, la cual se encuentra aproximadamente a 50 000 m de la zona costera del departamento; esta boya arroja datos de altura de ola máxima, media y baja, además de los periodos pico y medio. En la figura 29 se observa información del día 9 y 17 de noviembre de 2015, la cual ha sido descargada desde la aplicación, cabe resaltar que dichos datos pueden ser consultados por cualquier persona, a cualquier hora del día.

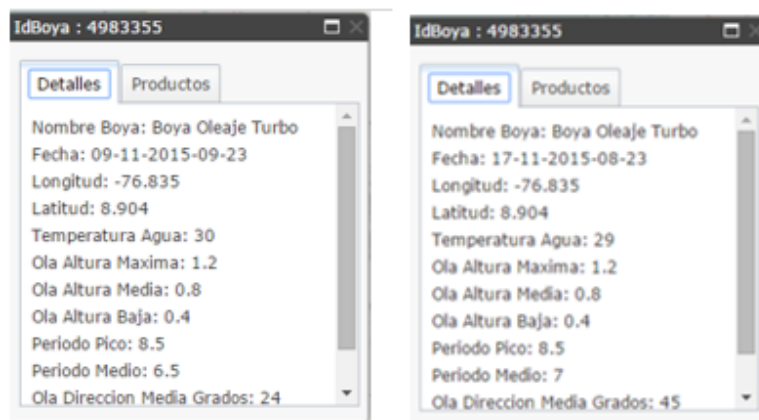


Figura 29: Datos Boya Oleaje Turbo 9 y 17 noviembre de 2015.
Fuente: SMPOMM (2015).

Con la información obtenida por los elementos del Sistema SMPOMM, los Centros de Investigaciones CIOH del Caribe y Pacífico colombiano elaboran pronósticos del estado del tiempo y del mar y alertas tempranas por ocurrencia de eventos extremos de origen marino para la toma de decisiones por parte de las autoridades competentes, además presentan graficas que permiten visualizar de manera fácil las mediciones diarias que realizan las boyas, en la figura 30 se observan los parámetros de altura máxima, altura significativa, altura promedio y dirección y periodo del oleaje del día 1 de noviembre del 2015 en la boya de oleaje Turbo, la cual se encuentra ubicada en el golfo de Urabá.

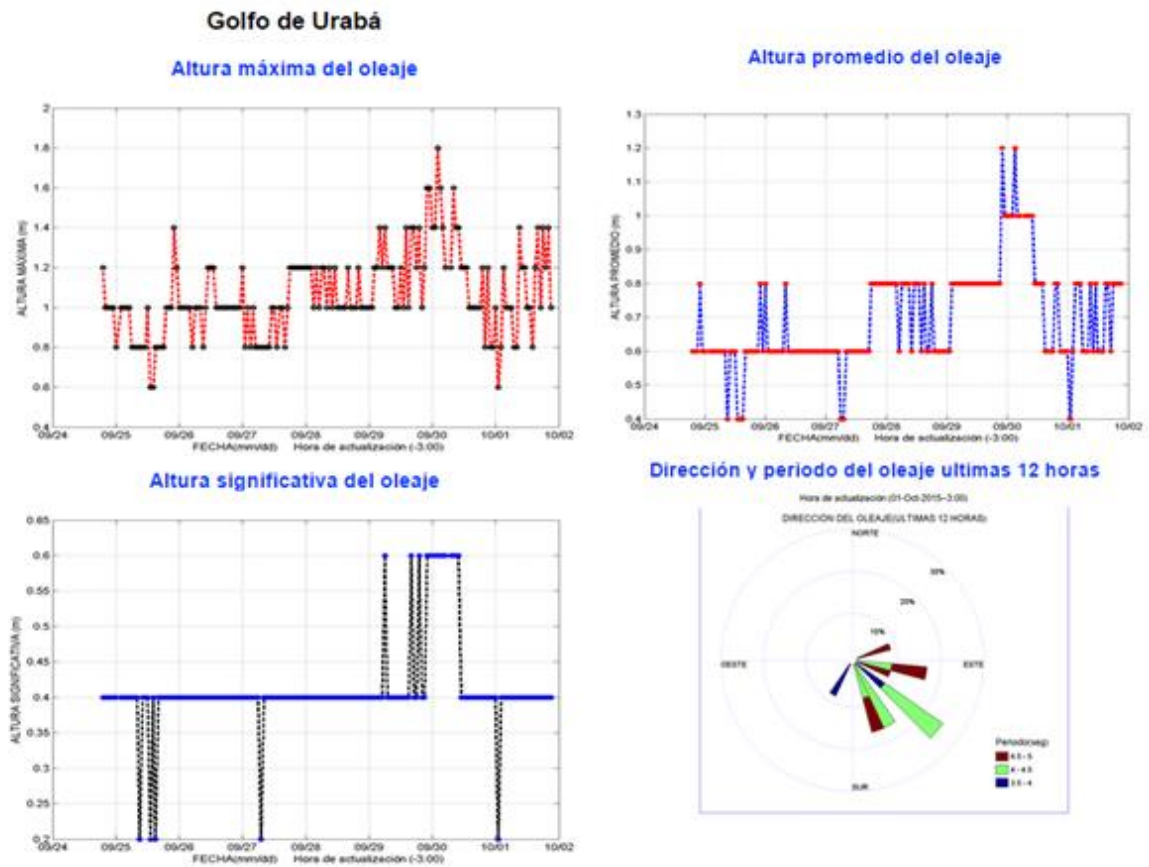


Figura 30: Observaciones Oleaje, Golfo de Urabá, 1 de noviembre de 2015.
Fuente: Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (2015).

3.1.3. Consulta con personal experto en oceanografía

La primera consulta con personal especializado en el tema se hizo con Diana Sofía Herazo Cárdenas, M. Sc. en gestión sostenible de sistemas marinos, profesora de planta de la universidad de Córdoba, en ésta consulta “la profesora Diana indicó que el oleaje del caribe Colombiano era uniforme, que no variaba mucho de un lugar a otro y que la altura no superaba los sesenta centímetros” (D. Herazo, comunicación personal, 11 de agosto de 2015), temas que se corroboraron con los datos obtenidos en el inciso 3.1.1 y 3.1.2 del presente trabajo, adicionalmente la profesora Diana sugirió que un posible sitio para la implementación de un sistema de generación undimotriz era Puerto Rey, dado que en su experiencia personal era el sitio con mayor oleaje en el departamento de Córdoba.

La segunda consulta se hizo con José Andrés Díaz Ruiz, M. Sc. en Oceanografía y Capitán de puerto de Coveñas, en esta consulta “el Capitán Díaz sugirió el uso de un análisis espectral del oleaje” (J. Díaz, comunicación a través de e-mail, 29 de septiembre de 2015), tal como el realizado por Martínez en la sección 3.1.1 del presente trabajo, también recomendó revisar y tener en cuenta las boyas oceanográficas que midan parámetros océano-atmosféricos tales como las usadas por el Sistema de Medición de Parámetros Oceanográficos y de Meteorología Marina.

La tercera consulta se hizo al área de Servicio y Participación Ciudadana ASEPEC del ministerio de defensa y la Dirección General Marítima, en esta consulta “el ASEPEC indicó que estudios de oleaje específicos en Córdoba no se tienen, más si para el Caribe y se puede encontrar varios artículos científicos que describen el comportamiento del oleaje y nivel del mar de forma en general” (ASEPEC, comunicación a través de e-mail, 6 de octubre de 2015), tales como el consultado en el inciso 3.1.1.

Con base en los incisos descritos anteriormente, se puede decir que la altura promedio de ola en la zona del departamento de Córdoba es de 0.6 m y el periodo promedio de ola es de 6 s.

3.2. Diseño del dispositivo

3.2.1. Boya

3.2.1.1. Geometría y dimensiones de la boya

Según las conclusiones descritas por Beirão y Malça (2013, p. 76; 2014, p. 9) los resultados de los análisis de elementos finitos para la carga, el dimensionamiento de los componentes y materiales elegidos por ellos, demostraron que la geometría de la boya esférica presenta los valores más bajos para las concentraciones de esfuerzos e induce los desplazamientos más bajos, dando lugar al mejor comportamiento estructural, con base en esto se eligió la geometría esférica para el presente trabajo; en el caso de la dimensión de la boya se consideró que el ancho del canal de oleaje es 1 m, sin embargo por precaución al momento de ejecutar la validación se decidió elegir un diámetro de 0.6 m.

3.2.1.2. Cálculos de la fuerza producida por la boya

Se implementó la simulación del convertidor de energía undimotriz WEC siguiendo a Sá da Costa (2005) y Beirão y Malça (2013, 2014). La simulación con dominio en el tiempo se ha desarrollado utilizando la herramienta Simulink del software Matlab & Simulink Student Suite, el objetivo del programa es simular el comportamiento dinámico de los WEC debido a la acción de las olas del mar. Todas las fuerzas descritas en la sección 1.5 se agruparon en subsistemas individuales, tal como se puede apreciar en la figura 31.

Luego de desarrollar los bloques y sus respectivas conexiones se simuló el comportamiento del convertidor WEC por un periodo de 500 s, la figura 32 muestra la gráfica arrojada por el software, en la cual se aprecia que la máxima fuerza ocurrida en la boya es de aproximadamente 500 N, por tal razón ese será el valor tomado como parámetro de entrada al sistema de transmisión de potencia.

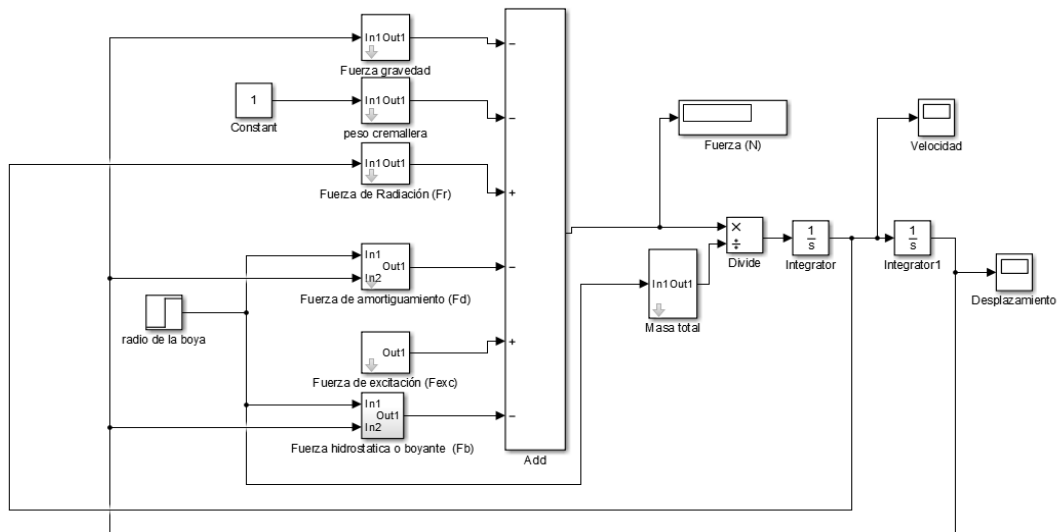


Figura 31: Simulación de la dinámica del convertidor de energía undimotriz a través de la herramienta Simulink de Matlab
Fuente: autores, Matlab & Simulink Student Suite.

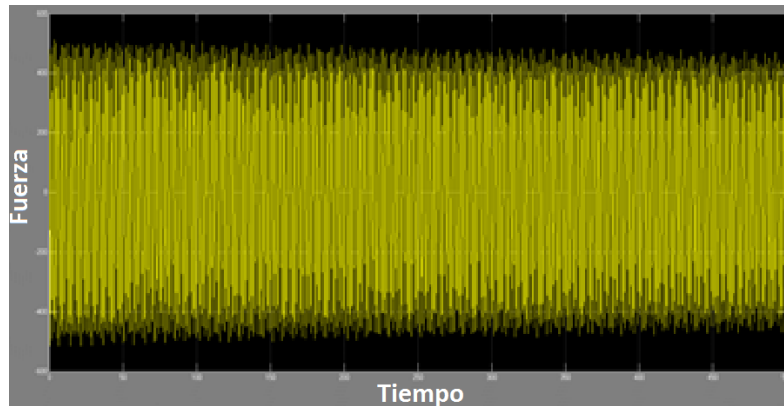


Figura 32: Evolución de la fuerza total en el tiempo para $H = 0.6$ m y $T = 6$ s.
Fuente: autores, Matlab & Simulink Student Suite.

3.2.1.3. Selección de material de la boya

Los materiales que pueden ser empleados en la fabricación de la boya comercialmente son: poliuretano y fibra de vidrio, ambos ofrecen una baja densidad con respecto al agua lo que repercute en una alta flotabilidad; sin embargo en la ciudad de Montería existen pocos sitios que trabajen con poliuretano, encareciendo el costo de la construcción de la boya con ese material, por tal razón se eligió la fibra de vidrio como recubrimiento de una bola de goma.

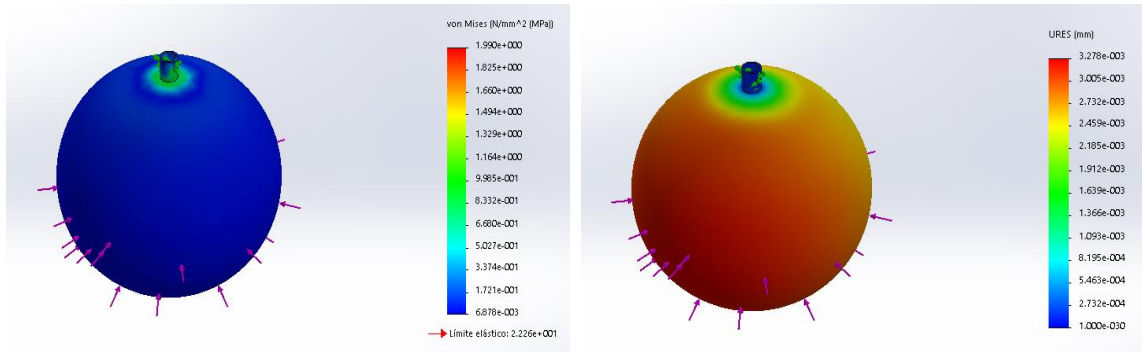


Figura 33: Esfuerzos de Von Mises y desplazamientos para la boya recubierta en fibra de vidrio con radio 0.3 m considerando que se encuentre parcialmente sumergida
Fuente: autores, SolidWorks 2015.

Como se puede apreciar en la figura 33, en la boya no se generan esfuerzos que superen el esfuerzo que resiste el material; de igual manera se observa que los desplazamientos no superan los 0.003278 mm lo cual nos indica que la deformación de la boya es casi nula.

3.2.2. Cremallera y engranajes del sistema de transmisión de potencia.

3.2.2.1. Selección del material de la cremallera, ejes y los engranajes.

A continuación se muestra la tabla 2, que se usó para comparar los posibles materiales para fabricar la cremallera, ejes y engranajes.

Tabla 2: Materiales evaluados según las opciones del mercado

Material	Densidad Kg/m ³	Resistencia a la corrosión.	Índice de Maquinabilidad.	Costos por kg (COP).
Acero 1045	7850	Baja	Medio	3041,51
Aluminio 6261	2700	Alta	Superior	4651,89
Referencias	Askeland, D. (1998)	Correa, et al. (2008). Jiménez Morales (2004).	Amorrortu, J. (2006). Díaz, & Kraemer. (2005).	Indexmundi. (2016)

Fuente: Autores

Al observar la tabla 2 se puede deducir que de las opciones estudiadas la más adecuada es el aluminio, dado que posee una baja densidad lo que genera un bajo momento de inercia facilitando la transmisión de potencia en el dispositivo; otra ventaja es que tiene una buena resistencia a la corrosión lo cual beneficia en el proceso de validación, debido a que el

equipo estuvo expuesto a agua; sin embargo como lo muestra la tabla 2, este material es más costoso que el acero, pero ya que presenta un buen índice de maquinabilidad el proceso de manufactura se facilita, disminuyendo costos en la producción de las piezas. Por lo tanto se escogió aluminio 6261 el cual posee una resistencia a la tracción de $26 \frac{kg}{mm^2}$, dureza 95 HB (Amu & Franco, 2009).

3.2.2.2. Dimensionamiento de la cremallera y los engranajes

A continuación se muestra la tabla 3, en la cual se organizan los datos de dimensionamiento de la cremallera y los engranajes.

Tabla 3: Dimensiones de la cremallera y los engranajes

	Engranaje 4	Cremallera	Engranaje 7	Engranaje 8
m [mm]	2	2	2	2
N	18	114	72	18
ϕ [°]	20	20	20	20
d [mm]	36	-	144	36
p_c [mm]	6.2832	6.2832	6.2832	6.2832
P_d	12.7	-	12.7	12.7
a [mm]	2	-	2	2
b [mm]	2.5	-	2.5	2.5
t [mm]	3.1416	-	3.1416	3.1416
r_b [mm]	16.92	-	67.66	16.92
c [mm]	0.5	-	0.5	0.5
F [mm]	20	-	20	20
P_b [mm]	-	5.904	-	-
h [mm]	-	4.334	-	-
e_d [mm]	-	3.1416	-	-
e_{ed} [mm]	-	3.1416	-	-
r_t	-	6.3	-	-

Fuente: Autores

Donde r_t es la relación de transmisión entre la cremallera y el engranaje 4, esta se da considerando que si la cremallera alcanza su máximo desplazamiento el engranaje 4 habrá dado 6.3 vueltas; si se tiene en cuenta un periodo de ola de 6 segundos, se puede decir que la cremallera habrá alcanzado su máximo recorrido subiendo y bajando 20 veces, es decir 10 veces subiendo y 10 veces bajando, en consecuencia el piñón terminará girando 128 revoluciones por minuto, 64 revoluciones en un sentido y 64 en el sentido contrario, este análisis es válido para diferentes periodos de olas y diferentes alturas de olas en las cuales la cremallera no alcance el máximo desplazamiento.

Análisis método AGMA

Análisis de fuerzas en el diente de la cremallera

El análisis realizado en la sección 3.2.1.2 para conocer la fuerza que se producía en la boya, consideraba la cremallera y la gravedad dentro de los parámetros analizados, esto quiere decir que la fuerza transmitida por la boya es la misma que transmite la cremallera al piñón, con la consideración de que a la salida de la cremallera, la fuerza se ve influenciada por el ángulo de presión en los dientes; teniendo en cuenta esto se determina la fuerza máxima que se produce en el elemento.

$w_{t,max}$ = Fuerza máxima transmitida de la cremallera al piñón (Budynas & Nisbett, 2012, p. 686).

$$w_{t,max} = w_{t,crem} \cos \phi \quad (60)$$

$$w_{t,max} = (500 \text{ N}) * (\cos 20)$$

$$w_{t,max} = 469.85 \text{ N}$$

Análisis de fuerzas en el engranaje 7

La fuerza en el engranaje multiplicador se calcula a través de la sumatoria de torques, como resultado se obtiene:

w_{t2} = Fuerza transmitida en engranaje 7

$$w_{t2} = 117.5 \text{ N}$$

3.2.2.2.1. Factor de seguridad Cremallera y engranaje 4: Análisis a flexión

Para garantizar que el engranaje 4 y la cremallera no fallen a flexión se debe cumplir la siguiente relación:

$$\sigma_t \leq \sigma_{perm} \quad (61)$$

Donde:

σ_t : Esfuerzo de flexión en la raíz del diente, en *MPa*

σ_{perm} : Esfuerzo de flexión permisible, en *MPa*

El esfuerzo a flexión en la raíz del diente σ_t se calcula a través de la ecuación 40 teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

Factor de sobrecarga, $K_o = 1.25$ (Budynas & Nisbett, 2012, p. 737).

$Q_v = 5$, para repercutir lo menos posible en los costos.

Reemplazando en las (Ec. 41), (Ec. 42), (Ec. 43) y (Ec. 44) se tiene:

$$v = 0.12 \frac{m}{s}$$

$$B = 0.915$$

$$A = 54.77$$

$$K_v = 1.09$$

Factor de tamaño, $K_s = 1$ recomendación de la AGMA (Budynas & Nisbett, 2012, p. 730)

Factor de distribución de carga $K_H = 1.6$ considerando un ancho de cara de 20 mm y un montaje poco preciso, de la figura 34 se elige este valor.

Factor de espesor del aro, $K_B = 1$ suponiendo que el espesor es constante.

Factor geométrico de resistencia a la flexión, J (Budynas & Nisbett, 2012, p. 724)

$$J_{p_engranaje\ 4} = 0.33$$

$$J_{G_cremallera} = 0.43$$

El esfuerzo de flexión en la raíz del diente para el engranaje 4 se calcula de acuerdo con la (Ec. 40)

$$\sigma_{t_engranaje\ 4} = 78 \text{ MPa}$$

CONDICIÓN DE SOPORTE	ANCHO DE CARA in (mm)			
	≤ 2 (50)	6 (150)	9 (225)	≥ 16 (400)
Montaje exacto, bajas holguras de cojinetes, deflexiones mínimas, engranes de precisión	1.30	1.40	1.50	1.80
Montajes menos rígidos, engranes menos precisos, contacto a todo lo ancho de cara	1.60	1.70	1.80	2.0
Exactitud y montaje de modo que exista contacto incompleto con la cara			>2.0	

Figura 34: Factores de distribución de carga.
Fuente: Abad, 2010, p. 63.

Para calcular el esfuerzo de flexión en la raíz del diente de la cremallera se utiliza la siguiente relación

$$\sigma_{t_cremallera} = \sigma_{t_engranaje} 4(J_p/J_G) \quad (62)$$

$$\sigma_{t_cremallera} = 60 \text{ MPa}$$

El esfuerzo a flexión permisible σ_{perm} , se calcula a través de la ecuación 45 teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

Factor de temperatura, $K_T = 1$ para temperaturas de operación menores a 120 °C.

Factor de ciclos de esfuerzos, $Y_N = 1.5$ para 10^5 ciclos de carga.

Factor de confiabilidad, $K_R = 0.85$ suponiendo una confiabilidad del 90 %.

Para calcular el esfuerzo a flexión permisible se debe conocer la resistencia a la flexión permisible S_t , el cual es un valor dependiente del tipo de material y de su dureza. Las ecuaciones 63 y 64 (Abad, 2010, p. 65) determinan los valores máximos y mínimos para S_t en función de la dureza del material.

$$S_{t\text{mín}} = (-274 + 167H_B - 0.152H_B^2) * 0.00689 \text{ MPa} \quad (63)$$

$$S_{t\text{máx}} = (6235 + 174H_B - 0.126H_B^2) * 0.00689 \text{ MPa} \quad (64)$$

Reemplazando los valores se tiene:

$$S_{t\min} = 98 \text{ MPa}$$

$$S_{t\max} = 149 \text{ MPa}$$

Reemplazando en la ecuación 45 y utilizando el $S_{t\min}$ se tiene:

$$\sigma_{perm} = 173 \text{ MPa}$$

Para calcular el factor de seguridad a flexión se agrega la constante S_F a la ecuación 61, quedando de la siguiente manera

$$S_F \sigma_t \leq \sigma_{perm}$$

$$S_F \leq \frac{\sigma_{perm}}{\sigma_t}$$

Reemplazando los valores correspondientes se tiene S_F para el engranaje 4:

$$S_{F_{engranaje\ 4}} = 2.2$$

Reemplazando los valores correspondientes se tiene S_F para la cremallera:

$$S_{F_{cremallera}} = 2.9$$

3.2.2.2.2. Factor de seguridad Cremallera y engranaje 4: análisis a desgaste o picadura

Para garantizar que el engranaje 4 y la cremallera no fallen bajo las cargas de contacto que proporciona el uno sobre el otro. Debe cumplirse lo siguiente:

$$\sigma_C \leq \sigma_{Cperm} \quad (65)$$

Donde:

σ_C : Esfuerzo de picadura, en [MPa]

σ_{perm} : Esfuerzo de contacto permisible, en [MPa]

En este análisis es suficiente realizar la evaluación de desgaste o picadura únicamente al engranaje, ya que este elemento tiene un mayor número de ciclos que la cremallera. El valor de σ_c se determina a partir de la ecuación 46

Varios de los factores de la ecuación 46 son los mismos que los del análisis a flexión, a continuación se determinan los coeficientes faltantes:

Se seleccionó aluminio como material para los dos elementos conjugados, por lo tanto se obtiene un coeficiente $C_p = 112 \text{ MPa}$ (Budynas & Nisbett, 2012, p. 716).

Factor de condición superficial, $C_f = 1$ suponiendo que tiene un acabado superficial que no genere un efecto perjudicial a la picadura.

Factor métrico I se calcula mediante las ecuaciones 47 y 48.

$$I = 0.138$$

Diámetro del engranaje 1, $d_p = 36 \text{ mm}$

Se calcula el esfuerzo de picadura para el piñón de acuerdo a la ecuación 46

$$\sigma_c = 360 \text{ MPa}$$

El esfuerzo de contacto permisible σ_{cperm} , se calcula a través de la ecuación 49 teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

Factor de ciclos de vida, para 10^5 ciclos de carga, se obtiene reemplazando en

$$Z_N = 2.466N^{-0.056}$$

$$Z_N = 1.29$$

Factor $K_T = 1$, para temperaturas de operación menores a $120 \text{ }^\circ\text{C}$.

Factor $K_R = 0.85$, suponiendo una confiabilidad del 90 %.

Para calcular el esfuerzo de contacto permisible se debe conocer la resistencia de contacto permisible S_c , el cual es un valor dependiente del tipo de material y de su dureza. Las ecuaciones 66 y 67 (Abad, 2010, p. 70) determinan los valores máximos y mínimos para S_c en función de la dureza del material.

$$S_{cmin} = (26000 + 327H_B) * 0.00689 \text{ MPa} \quad (66)$$

$$S_{cmáx} = (27000 + 364H_B) * 0.00689 \text{ MPa} \quad (67)$$

Reemplazando los valores se tiene:

$$S_{cmín} = 393 \text{ MPa}$$

$$S_{cmáx} = 424 \text{ MPa}$$

Reemplazando en la ecuación 49

$$\sigma_{Cperm} = 596 \text{ MPa}$$

Para calcular el factor de seguridad a flexión se agrega la constante S_H a la ecuación 65, quedando de la siguiente manera

$$S_H \sigma_C \leq \sigma_{Cperm}$$

Despejando S_H se tiene:

$$S_{H_engranaje\ 4} = \frac{\sigma_{Cperm}}{\sigma_C} \quad (68)$$

$$S_{H_engranaje\ 4} = \frac{596}{360}$$

$$S_{H_engranaje\ 4} = \mathbf{1.65}$$

Comparación de los factores de seguridad: Cremallera vs Engranaje 4

La norma AGMA indica que al comparar los factores de seguridad a flexión y de picadura, se puede determinar el tipo de falla más probable de los engranajes. La comparación se realiza analizando S_f con $(S_H)^2$

Para los valores obtenidos anteriormente se tiene:

$$2.2 < 2.72$$

La relación anterior indica que la mayor amenaza para el engranaje 4 es por picadura. Conociendo que la cremallera es del mismo material que el engranaje 4 y teniendo en cuenta que tiene un factor de seguridad a la flexión de 2.9 se puede concluir que la amenaza para la cremallera es por flexión.

3.2.2.2.3. Factor de seguridad engranaje 7 y engranaje 8: análisis a flexión

En este inciso se evalúa el análisis a flexión, para garantizar que el engranaje 7 y el engranaje 8 no fallen a la misma se debe cumplir la siguiente relación:

$$\sigma_t \leq \sigma_{perm} \quad (69)$$

Donde:

σ_t : Esfuerzo de flexión en la raíz del diente, en [MPa]

σ_{perm} : Esfuerzo de flexión permisible, en [MPa]

El esfuerzo a flexión en la raíz del diente σ_t se calcula a través de la ecuación 40 teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

Factor de sobrecarga, $K_o = 1.25$ (Budynas & Nisbett, 2012, p. 737).

Factor dinámico con $Q_v = 5$

$$v = 0.48 \frac{m}{s}$$

$$B = 0.915$$

$$A = 54.77$$

$$K_v = 1.18$$

Factor de tamaño, $K_s = 1$ recomendación de la AGMA (Budynas & Nisbett, 2012, p. 730):

Factor de distribución de carga $K_H = 1.6$ considerando un ancho de cara de 20 mm y un montaje poco preciso, de la figura 34 se elige este valor.

Factor de espesor del aro, $K_B = 1$ suponiendo que el espesor es constante.

Factor geométrico de resistencia a la flexión, J (Budynas & Nisbett, 2012, p. 724)

$$J_{p_engranaje\ 7} = 0.32$$

$$J_{G_engranaje\ 8} = 0.41$$

El esfuerzo de flexión para el engranaje 7 se calcula de acuerdo con la ecuación 40

$$\sigma_{t_engranaje\ 7} = 22\ MPa$$

Para calcular el esfuerzo en el engranaje 8 se utiliza la siguiente relación

$$\sigma_{t_engranaje\ 8} = \sigma_{t_engranaje\ 7} (J_p/J_G) \quad (70)$$

$$\sigma_{t_engranaje\ 8} = 17\ MPa$$

Para calcular el esfuerzo a flexión permisible se utilizan las siguientes consideraciones

Factor de temperatura, $K_T = 1$ para temperaturas de operación menores a 120 °C.

Factor de ciclos de esfuerzos, $Y_N = 1.5$ para 10^5 ciclos de carga.

Factor de confiabilidad, $K_R = 0.85$ suponiendo una confiabilidad del 90 %.

Reemplazando en la ecuación 45 y utilizando el S_{tmin} del aluminio se tiene:

$$\sigma_{perm} = 173\ MPa$$

Se realiza el análisis de falla mediante la ecuación 61 añadiéndole la constante S_F , y se calcula el factor de seguridad.

Reemplazando los valores correspondientes se tiene S_F para el engranaje 7:

$$S_{F_engranaje\ 7} = 7.9$$

Reemplazando los valores correspondientes se tiene S_F para el engranaje 8:

$$S_{F_engranaje\ 8} = 10$$

3.2.2.2.4. Factor de seguridad engranaje 7 y engranaje 8: análisis a desgaste o picadura

Para garantizar que el engranaje 7 y el engranaje 8 no fallen bajo las cargas de contacto que proporciona el uno sobre el otro. Debe cumplirse lo siguiente:

$$\sigma_C \leq \sigma_{Cperm} \quad (71)$$

Donde:

σ_C : Esfuerzo de picadura, en [MPa]

σ_{perm} : Esfuerzo de contacto permisible, en [MPa]

En este análisis es suficiente realizar la evaluación de desgaste o picadura únicamente al engranaje 8, ya que este elemento tiene un mayor número de ciclos que el engranaje 7. El valor de σ_C se determina a partir de la ecuación 46

Varios de los factores de la ecuación 46 son los mismos que los del análisis a flexión, a continuación se determinan los coeficientes faltantes:

Factor métrico I para engranajes externos, se calcula mediante las ecuaciones 47 y 48 las cuales se muestran a continuación (Budynas & Nisbett, 2012, p. 726):

$$m_G = \frac{N_G}{N_P} \quad (47)$$

$$I = \frac{\cos \phi \sin \phi}{2m_N} * \frac{m_G}{m_G+1} \quad (48)$$

Donde:

m_G : Relación de velocidades

m_N : Relación de repartición de carga

En el caso de engranajes rectos $m_N = 1$

$$m_G = 4$$

$$I = 0.128$$

Diámetro del engranaje 8, $d_p = 36 \text{ mm}$

Se calcula el esfuerzo de picadura para el engranaje 8 de acuerdo a la ecuación 46

$$\sigma_C = 194 \text{ MPa}$$

El esfuerzo de contacto permisible σ_{Cperm} , se calcula a través de la ecuación 49, teniendo en cuenta que el engranaje 8 es del mismo material y está actuando bajo las mismas condiciones que el engranaje 4, se tiene:

$$\sigma_{Cperm} = 596$$

Para calcular el factor de seguridad a flexión del engranaje 8 se hace el mismo análisis que en la sección 3.2.2.2.3 obteniendo:

$$S_H = \frac{596}{194}$$

$$S_H = 3.07$$

La norma AGMA indica que al comparar los factores de seguridad a flexión y de picadura, se puede determinar el tipo de falla más probable de los engranajes. La comparación se realiza analizando S_f con $(S_H)^2$

Para los valores obtenidos anteriormente se tiene:

$$7.9 < 9.4$$

La relación anterior indica que la mayor amenaza para el engranaje 8 es por picadura. Conociendo que el engranaje 7 es del mismo material y teniendo en cuenta que tiene un factor de seguridad a la flexión de 10 se puede concluir que la amenaza para él es por flexión.

3.2.3. Empalme

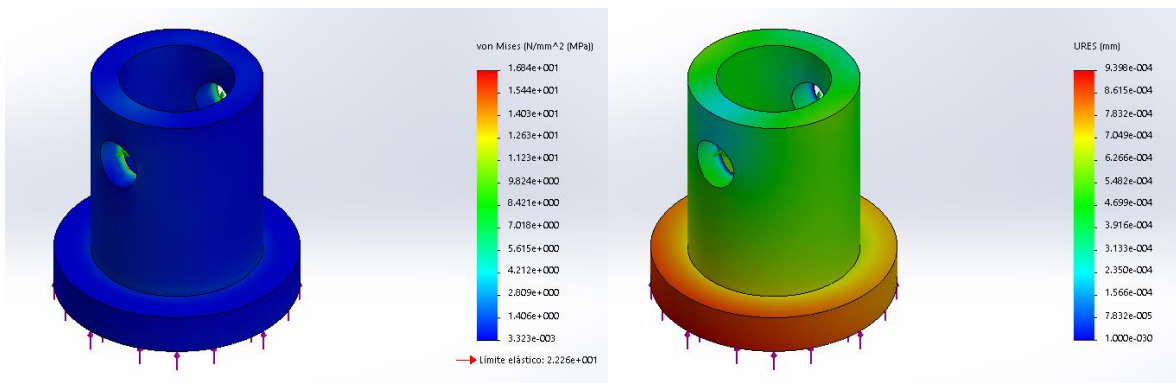


Figura 35: Esfuerzos de Von Mises y desplazamientos para el empalme de fibra de vidrio

Fuente: autores, SolidWorks 2015.

Como se puede apreciar en la figura 35 los esfuerzos producidos en el empalme no superan los esfuerzos que resiste la fibra de vidrio, además se observa que el mayor desplazamiento fue 0.009398 mm el cual es un valor pequeño e indica que la deformación es casi nula.

3.2.4. Ejes

Eje (5)

El eje (5) es el eje que estará en contacto directo con la cremallera este girara más lentamente pero recibirá una mayor carga de trabajo, para el diseño se calculó el diámetro mínimo que se puede utilizar con las cargas descritas.

Conociendo que el material de trabajo es aluminio, con las siguientes propiedades

$$S_{ut} = 251 \text{ Mpa y } S_y = 98 \text{ Mpa}$$

La distribución de las cargas a lo largo del eje está en la figura 36 en el plano

$$F_{1x} = 469.85 \text{ N} \quad F_{1y} = 171.01 \text{ N} \quad F_{2x} = -117.5 \text{ N} \quad F_{2y} = -42.77 \text{ N}$$

Evaluando las reacciones en cada plano, nos queda entonces lo diagramas de fuerzas de la siguiente manera:

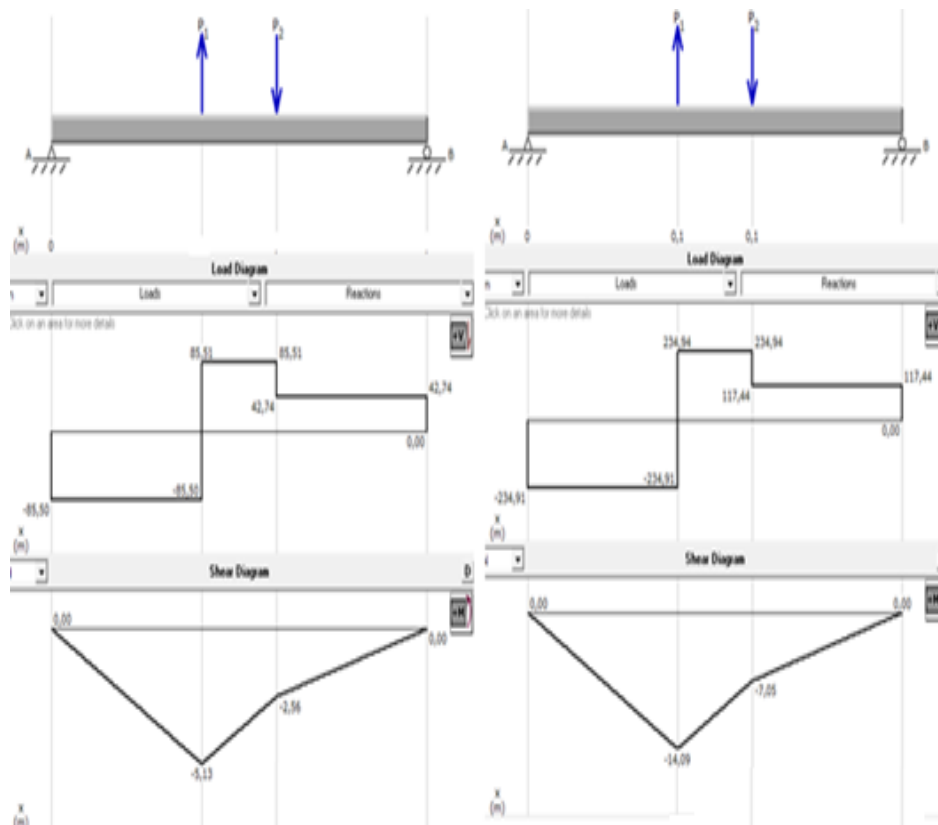


Figura 36: Diagrama de fuerzas para el eje (5)
En la izquierda: plano yz. En la derecha: plano xz.
Fuente: autores, MDSolids 4.1 versión libre.

Por lo tanto de las figuras se puede obtener que

$$M_{max} = \sqrt{5.13^2 + 14.09^2} = 14.99 \approx 15 \text{ Nm}$$

El torque máximo será producido por el engrane 7, dado que este posee una mayor área, por lo tanto:

$$T_{max} = w_{ec} * r_{ec} = (469.85) \left(\frac{0.036}{2} \right) = 8.46 \text{ Nm}$$

Se tomó que el eje de trabajo es un eje giratorio con flexión y torsión constantes, por lo tanto el esfuerzo flexionante es completamente reversible y la torsión es constante, lo que dejó en síntesis con $M_a=15 \text{ Nm}$ $T_m=8.46 \text{ Nm}$ y $M_m=0$ $T_a=0$

Tomando un hombro de filete redondeado en la figura 18 y 19, utilizando la ecuación 57 se determino los factores que modifican la carga

$$k_f = 1.57$$

$$k_{fs} = 1.43$$

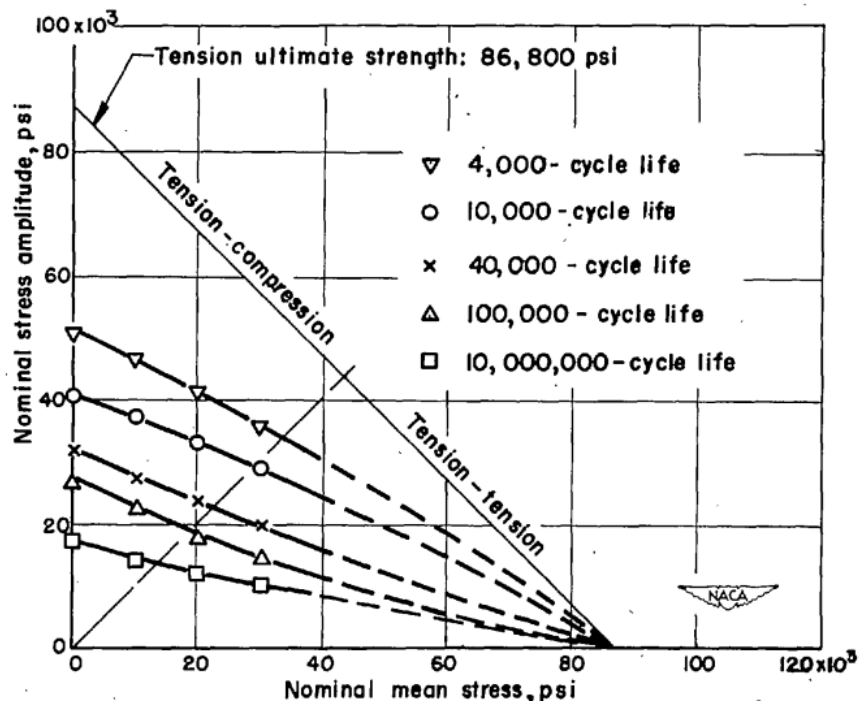


Figura 37: Curva de vida constante de aluminio -límites de resistencia contra resistencia a la tensión.

Fuente: Grover, H. J., Bishop, S., & Jackson, L. R. (1951).

Ahora dado que se está trabajando con aluminio, observando la figura 37 y tomando la consideración de la ecuación 53 se pudo obtener una aproximación de

$$S_e = 0.4S_{ut} = 0.4(254) = 101.6 \text{ MPa}$$

Se incluyó el factor de concentración de esfuerzos para el análisis de fatiga en el eje (5), para obtener una aproximación del diámetro que protege contra la fatiga se utilizaron las ecuaciones 51 y 52, en las cuales se resolvió para d y se reemplazaron los valores anteriormente mencionados

$$d = 0.01489 \text{ m}$$

Ahora teniendo un valor aproximado del diámetro que protege contra la fluencia, se calcula el diámetro efectivo contra la fatiga y la fluencia, por lo tanto se calcularan los factores de Marín que modifican el límite de resistencia a la fatiga, para así obtener un valor más cercano a la realidad en las condiciones de trabajo, teniendo en cuenta las ecuaciones 54, 55, 56 se tuvo que

$$K_a = 1.04$$

$$K_b = 0.92$$

El nuevo límite de resistencia a la fatiga con los factores de Marín resulta

$$S_e = (101.6)(1.04)(0.92) = 91.21 \text{ N}$$

Aplicando el criterio de sodeberg (Ec. 50) se pudo obtener un diámetro efectivo que ofrezca protección contra la fluencia de esta manera reemplazando los valores anteriormente mencionados y resolviendo para d resulta

$$d = 0.0134 \text{ m}$$

Teniendo este diámetro se volvió a iterar, para así obtener certeza que el diámetro mínimo protege contra la fluencia y la fatiga, reemplazando en la ecuación 50 dio como resultado

$$d = 0.0127 \text{ m}$$

De manera comparativa se utilizaron las ecuaciones 51 y 52 para obtener un valor del factor de seguridad aproximado y confirmar que el valor anteriormente tomado sea correspondiente a las condiciones de trabajo.

$$n_y = 1.25$$

Eje (9)

El eje (9) es aquel que está en contacto directo con el generador, este gira más rápidamente por la relación de engranajes, lo cual es el efecto que se busca con el sistema de transmisión y así poder aprovechar al máximo el movimiento de subida y bajada de la boya y la cremallera.

La distribución de cargas se puede observar en la figura 38, en la cual la única carga que actúa es la reacción interna de los engranes

$$F_x = 117.5 \text{ N} \quad F_y = 42.77 \text{ N}$$

De esa manera al evaluar las reacciones en los planos XZ y YZ se podrá observar los siguientes diagramas de momentos.

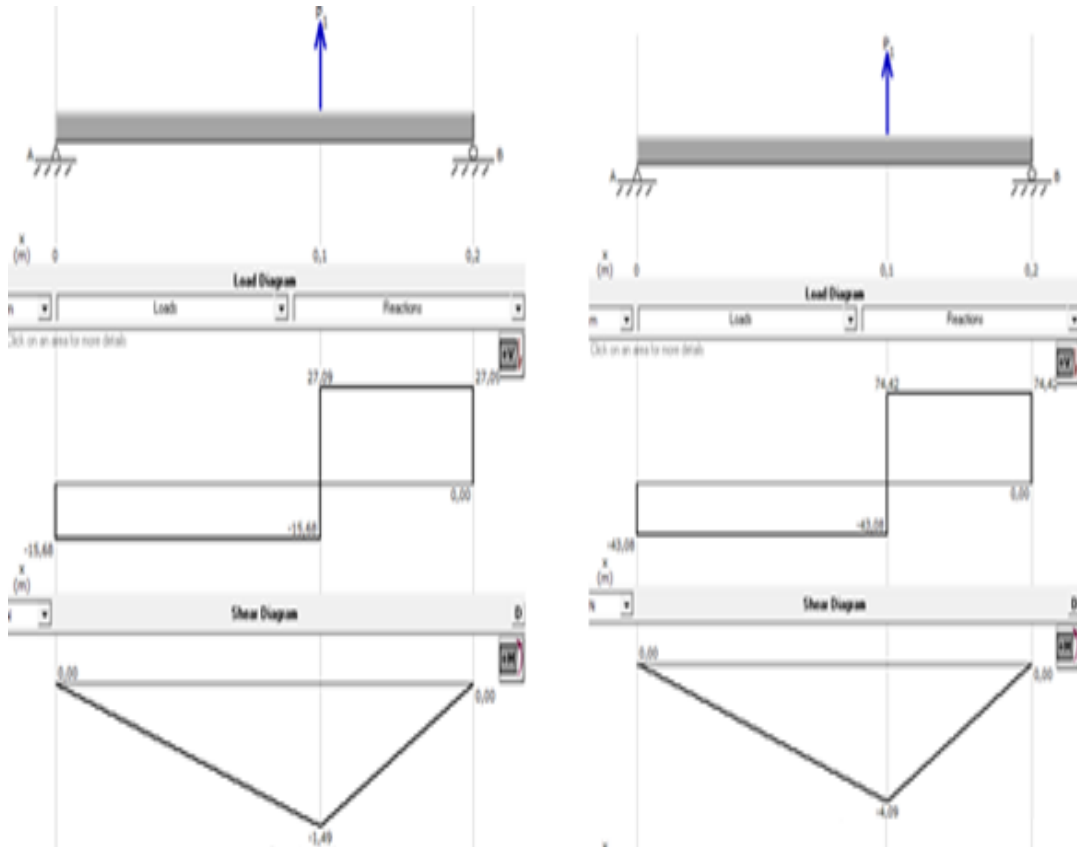


Figura 38: Diagrama de fuerzas para el eje (9)
 En la izquierda: plano yz. En la derecha: plano xz.
 Fuente: autores, MDSolids 4.1 versión libre.

De los diagramas se pudo obtener que el momento máximo es

$$M_{max} = \sqrt{(-4.09)^2 + (-1.49)^2} = 4.35 \text{ Nm}$$

Por lo tanto el toque máximo estuvo dado por

$$T_{max} = w_{ec} * r_{ec} = (117.5) \left(\frac{0.036}{2} \right) = 2.12 \text{ Nm}$$

Tomando nuevamente la ecuación 51 y 52 para obtener una aproximación del diámetro, dada las condiciones de trabajo resulto

$$d = 0.01145 \text{ m}$$

Teniendo este valor del diámetro aproximado, se procedió a calcular los factores de Marin de las ecuación 54, 55 y 56 se tiene que

$$K_a = 1.04$$

$$K_b = 0.97$$

$$S_e = (101.6)(1.04)(0.97) = 102.49 N$$

Teniendo estos valores se procedió a reemplazar en las ecuaciones de Sodeberg para obtener el diámetro que proteja contra la fluencia y la fatiga, para ellos se utilizó nuevamente la ecuación 50 quedando como resultado un diámetro de 0.01029 m, De igual manera como se hizo anteriormente se tomó este valor y se reemplazo nuevamente en los factores de Marín Ec. 54, 55, 56 y en la Ec. 50, para así volver a iterar y observar que convergió a un valor, el cual fue 0.0102 m.

Observando los resultados de los cálculos de cada uno de los ejes y dada las condiciones de trabajo controlado a las que está expuesto en el laboratorio, se procedió a tomar en fabricación un solo eje de 0.0125 m, también teniendo en cuenta que el proceso de manufactura es más económico y rápido si se escoge un solo eje de aluminio, que después se divide en dos monolíticos de acuerdo a las especificaciones del proyecto.

3.2.5. Chumaceras

Los cojinetes son elementos mecánicos que soportan árboles y ejes permitiendo que giren libremente, en este caso se utilizaron para soportar los dos ejes que se utilizaron para sostener y transmitir el movimiento de la boya al generador, realizando un análisis de carga se puede observar que los ejes soportaran solo carga radial, dado que la carga tangencial en la cual trabajaran es despreciable, por lo tanto ya es de saber que se utilizaran rodamientos de bolas, además de que resultan más económicos (Astbearings, 2016).

Se seleccionaron 4 cojinetes, los cuales se distribuyeron como muestra la figura 39.

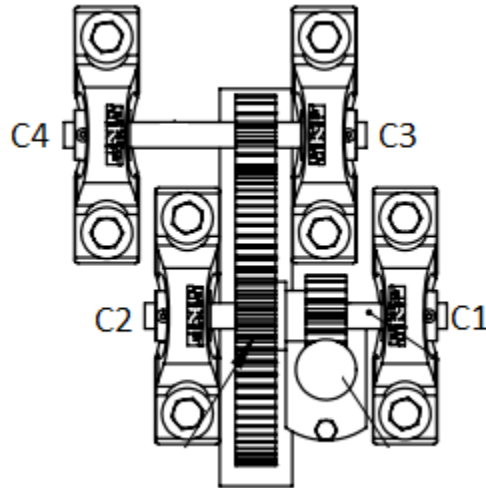


Figura 39: Distribución de los cojinetes en el sistema de transmisión.

Fuente: Autores

De los anteriores cálculos de ejes y sus reacciones se tiene respectivamente que las variaciones de fuerzas radiales aplicadas en los cojinetes son:

$$C_1 = 234.91 \text{ N}$$

$$C_2 = 117.44 \text{ N}$$

$$C_3 = 43.08 \text{ N}$$

$$C_4 = 74.42 \text{ N}$$

Las condiciones de trabajo a las que estará expuesto el dispositivo se pueden analizar y calcular dada la información obtenida de las diferentes fuentes como son Dimar y las boyas oceánicas, igualmente se puede concluir que los cojinetes C1 y C2 pertenecen al mismo eje y girarán a 64 Rpm, y los cojinetes C3 y C4 dado que estarán después del sistema de multiplicación girarán a 332 Rpm.

Para efectos de diseño se trabajó con una vida de 30 Kh, con un factor de aplicación de 1.4 y confiabilidad de 0.9 (Mounted Bearing Units – General Information and Load Calculations; Astbearings, 2016)

Se procedió a calcular la clasificación de carga por catálogo para cada uno de los cojinetes con base en las ecuaciones 58 y 59

El resumen de los cálculos para los cojinetes se puede observar en la siguiente tabla

Tabla 4: Resumen de los datos para la selección de las chumaceras

Cojinete	Carga (N)	Rpm	Vida (Kh)	Confiabilidad	C ₁₀ (N)
C1	234.91	64	30	0.9	1603.79
C2	117.44	64	30	0.9	801.79
C3	43.08	256	30	0.9	466.88
C4	74.42	256	30	0.9	806.53

Fuente: Autores

Teniendo en cuenta las cargas por catálogo arrojadas para las condiciones mostradas, se procedió a examinar en el mercado del que se dispone aquella chumacera que más se acerque a las necesidades requeridas, para facilidad y economía se seleccionaran todas las chumaceras de un mismo diámetro el cual corresponde a 0.0125 m y por lo tanto se tuvo en cuenta la mayor carga para la selección que sería de 1603.79 N. De esta manera con las condiciones de trabajo y mercado actual se seleccionaron 4 chumacera RBR pillow blocks UCP201-8, de la cual se muestran sus características en el anexo 1.

3.2.6. Embrague

La validación del dispositivo presentó que las condiciones máximas a las que estará sometido el generador serán: 332 rpm entregadas por el eje (9) del sistema de transmisión, por lo que el embrague unidireccional comercial más conveniente por lo económico y fácil de comprar es la catarina de la bicicleta, también llamado piñón libre; considerando que una bicicleta estándar gira a más de 300 rpm se eligió tal componente para el proyecto, adaptándolo como se muestra en la figura 40.



Figura 40: Embrague unidireccional o piñón libre elegido para transformar el movimiento rotativo alternativo a unidireccional y su adaptación al dispositivo
Fuente: autores

3.2.7. Generador

Se selecciono un motor paso a paso como alternativa de generación puesto que este presentaba la ventaja de trabajar a revoluciones bajas y medianas desde 25 a 360 rpm (Carletti, E. 2007). El modelo utilizado en este proyecto fue el PK244-02A-C46 de la marca VEXTA, como se aprecia en la figura 41, el cual corresponde a un motor unipolar de voltaje nominal de 12 V y una corriente de 0.8 A. (Oriental motor Co, Ltd. 2007). En el anexo 2 se encuentra la gráfica característica del generador.



Figura 41: Generador seleccionado para el proyecto
Fuente: Oriental motor Co

En el anexo 4 se muestran los planos del dispositivo, con sus respectivas dimensiones y especificaciones.

3.2.8. Validación del dispositivo

3.2.8.1. Altura real de ola

Los escenarios elegidos al azar para la comprobación de la altura real de ola, fueron el escenario 8 y el escenario 10, en las gráficas 1 y 2 se puede apreciar la altura real de ola en función del tiempo gracias a datos suministrados por el software que controla el canal de oleaje.

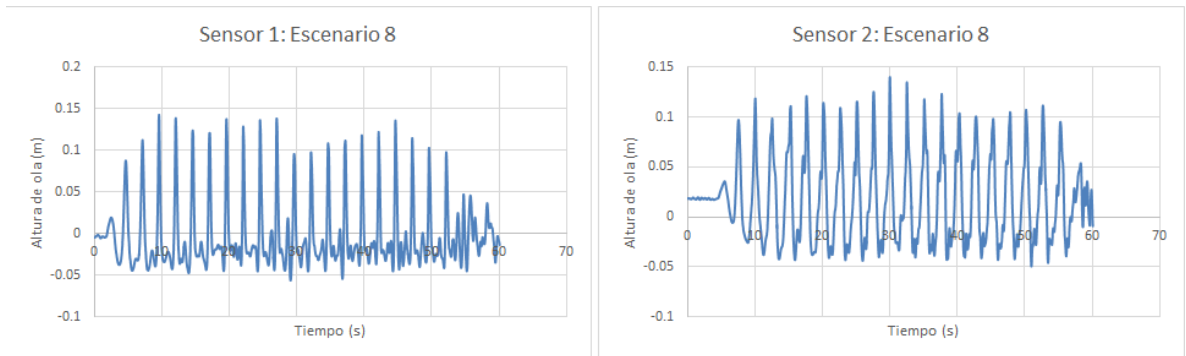


Grafico 1: Altura real del escenario ocho evaluada con valores arrojados desde dos sensores ubicados en el canal de oleaje.

Fuente: Autores, 2017

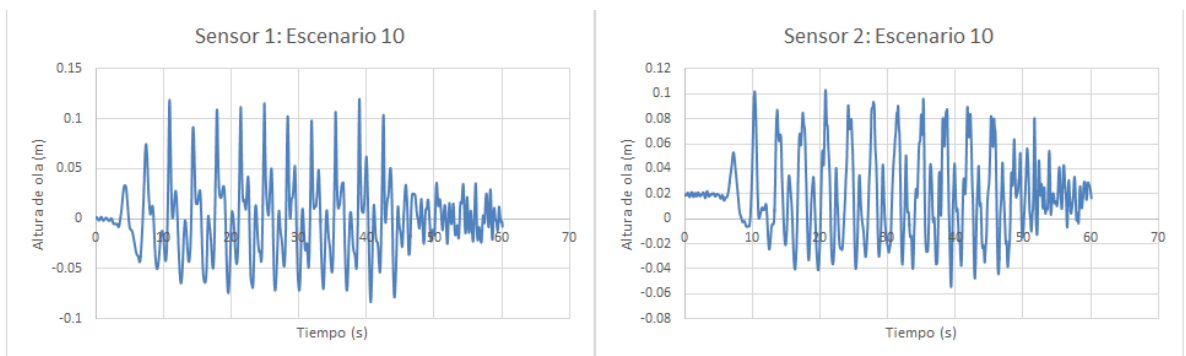


Grafico 2: Altura real del escenario diez evaluada con valores arrojados desde dos sensores ubicados en el canal de oleaje.

Fuente: Autores, 2017

3.2.8.2. Comparación de las revoluciones por minuto

Para calcular las revoluciones teóricas del dispositivo se realizó el mismo análisis que en la sección 3.2.2.2 pero añadiéndole el efecto del sistema multiplicador a las revoluciones finales. En la tabla 5 se muestran los resultados obtenidos teórica y experimentalmente.

Tabla 5: Comparación de las revoluciones por minuto

Escenario	Revoluciones por minuto teóricas	Revoluciones por minuto del dispositivo
1	189	196
2	265	156
3	332	106
4	158	169
5	222	98
6	277	67
7	126	141
8	177	130
9	222	103
10	94	75
11	132	86
12	165	80

Fuente: Autores

Al analizar los datos obtenidos se puede observar que los escenarios 1, 4, 7 y 10 son los que más se aproximan, esto puede ser debido a que los cuatro tuvieron en común el periodo de ola de 3,5 segundos y en ese tiempo la boya alcanzaba a realizar un recorrido completo de subida y bajada, además se observa que las revoluciones están por encima del valor teórico, esto puede ser debido a que como se aprecia en las gráficas 1 y 2 las olas producidas por el canal en algunas oportunidades son más grandes, lo cual explicaría ese ligero aumento; en contraparte se observa que los escenarios 3, 6, 9 y 12 fueron los que

menos se aproximaron, esto puede ser debido a que estos tuvieron en común el periodo de ola de 2 segundos, tiempo en el cual la boya no alcanzaba a terminar de bajar cuando se encontraba con la ola siguiente o en ocasiones la ola impactaba de manera directa a la boya sin causar el efecto de subida y bajada deseado.

3.2.8.3. Comparación del voltaje y amperaje producido por el dispositivo

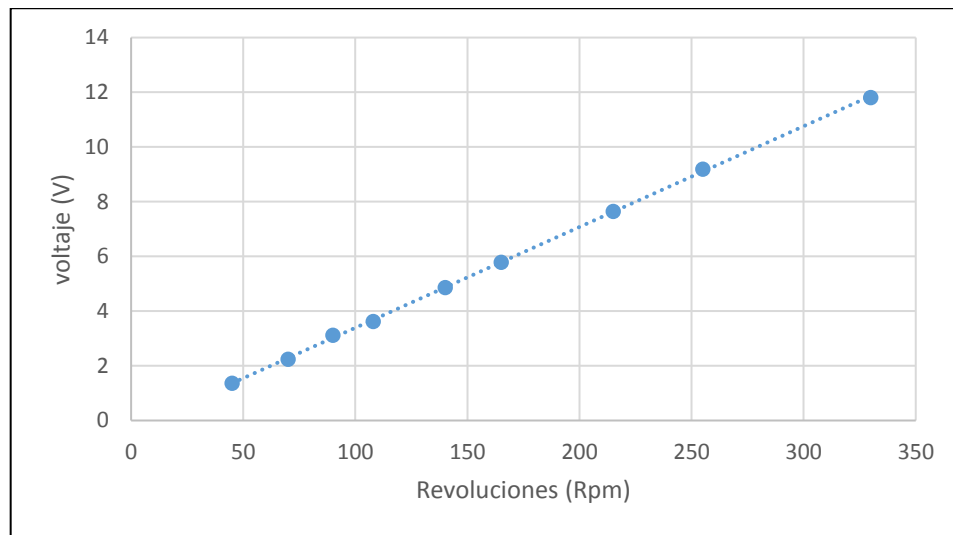


Gráfico 3: Voltaje del generador con revoluciones controladas con el torno.
Fuente: Autores, 2016

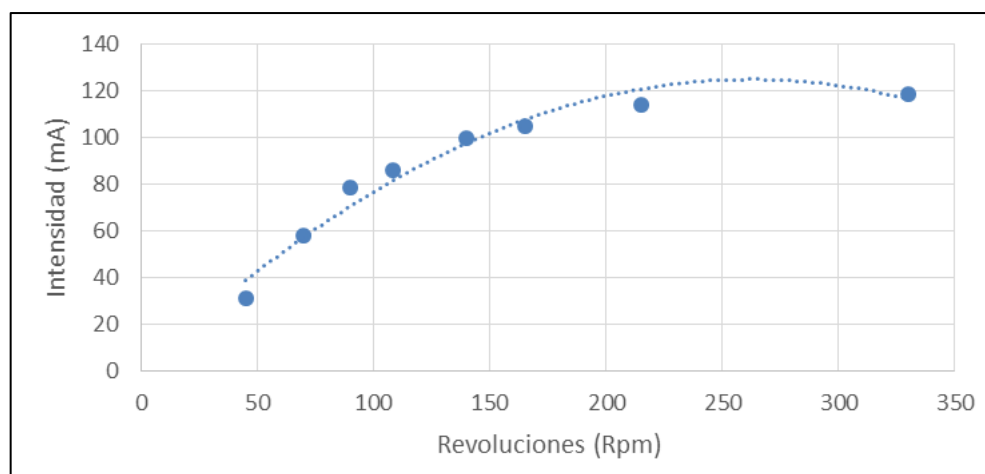


Gráfico 4: Intensidad del generador con revoluciones controladas con el torno.
Fuente: Autores, 2016

Tabla 6: Voltaje y amperaje promedio en cada escenario

Escenario	Voltaje máximo promedio en cada escenario (V)	Amperaje máximo promedio en cada escenario (mA)
1	10.32	125
2	9.47	121.2
3	8.5	114
4	8.45	123.8
5	9.3	117.2
6	7.4	103.5
7	10.7	120
8	9.1	116.4
9	9.7	115.9
10	8.7	98
11	9.3	104.6
12	9.1	100.9

Fuente: Autores

Al analizar la tabla 6 se observa que la mayor medición de voltaje y amperaje se dio en el escenario 1 dado que fue este el que presentó las mayores revoluciones, tal como se puede apreciar en la tabla 5; también se observa que el escenario 6 fue el que mostró el menor valor de voltaje debido a que tuvo la menor cantidad de revoluciones y que el escenario 10 fue el que exhibió la menor medición de amperaje; el rango de valores de voltajes experimentales estuvo entre 7.4 V y 10.32 V. El rango de valores de amperaje experimentales estuvo entre 98 mA y 125 mA. Una observación importante se hace al comparar las gráficas 3 y 4 con los valores de la tabla 6, dado que los resultados obtenidos experimentalmente fueron más altos que los esperados teóricamente, esto se puede deber

a que el dispositivo genera un torque más alto al que necesita el generador para producir el voltaje y amperaje como se muestra en el anexo 2, por tal razón se necesitan menos revoluciones para producir la misma cantidad.

3.3. Comparación del potencial energético undimotriz teórico vs el obtenido a través del dispositivo

Para realizar la comparación se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$P_s = 0.49H_s^2T \quad (10)$$

$$P_r = VI \quad (72)$$

$$e = \frac{P_r}{P_s} * 100 \quad (73)$$

Donde

e = Eficiencia del dispositivo

P_r = Potencia real

P_s = Potencia teórica

En la tabla 7 se organizan los datos obtenidos de eficiencia, potencia real y potencia teórica, en función de la altura y periodo de ola.

Tabla 7: Potencia teórica, potencia real y eficiencia del equipo en función de la altura y periodo de la ola

Escenario	Altura [m]	Periodo [s]	Potencia teórica [W]	Potencia real [W]	Eficiencia [%]
1	0.3	3.5	154.35	5.16	3.34
2	0.3	2.5	110.25	4.59	4.17
3	0.3	2	88.20	3.87	4.40
4	0.25	3.5	107.18	4.18	3.90
5	0.25	2.5	76.56	4.35	5.69
6	0.25	2	61.25	3.06	5.00
7	0.2	3.5	68.60	5.13	7.49
8	0.2	2.5	49.00	4.23	8.65
9	0.2	2	39.20	4.49	11.47
10	0.15	3.5	38.58	3.41	8.85
11	0.15	2.5	27.56	3.89	14.15
12	0.15	2	22.05	3.67	16.70

Fuente: Autores

Al comparar los resultados de potencia teórica y real se observa que existe una gran diferencia, esto se puede deber a varios factores, entre ellos se mencionan los siguientes:

La ecuación 10 de potencial energético undimotriz teórico tiene unidades de $[KW m^{-1}]$ esto quiere decir la cantidad de kiloWats presentes en un metro de frente de ola, como se observó en la sección 3.2.1.1: *Geometría y dimensiones de la boya*, el diámetro de boya elegido para el presente trabajo es de 0.6 metros, así mismo en el momento de la validación del dispositivo en el laboratorio de hidráulica y mecánica de fluidos de la Universidad Nacional de Colombia se observó que la superficie de la boya en contacto con el agua era mucho más pequeña, al realizar los cálculos de flotabilidad con fluidos hidrodinámicos se encontró que la superficie real de la boya en contacto con el agua es aproximadamente de

0.164 m; esto es un factor importante, dado que solo se está absorbiendo el 16.4% del frente de ola.

Otro aspecto importante es la afirmación hecha por Rodríguez, et al (2008, p. 8) según la cual un absorbedor puntual oscilando verticalmente puede reflejar menos del 50 % de la energía incidente; más aún, asegura que diversos estudios han demostrado que estos dispositivos en la práctica no son capaces de captar más de un 20 % de la energía incidente, disminuyendo considerablemente la cantidad de energía que se puede absorber, esto último se confirma con la información descrita en el informe anual del Ocean Energy Systems (OES, 2015): acerca del convertidor de energía undimotriz Sharp Eagle I (10 kW) el cual había estado funcionando cerca de Wanshan Island durante casi 6000 horas, con una eficiencia total de conversión de 16.76 %. En la tabla 7 se observa que en todos los escenarios evaluados la eficiencia del equipo no supero el 16.70 %, todo esto refleja la problemática descrita por (Drew, et al. 2009, p. 895) acerca de la baja eficiencia de los dispositivos convertidores de energía undimotriz.

Otro elemento importante en el análisis comparativo de potencia teórica vs real es el generador, dado que como se observa en el anexo 2, el generador trabaja con un torque de entre 0.3 y 0.4 Nm para producir voltaje; como el dispositivo produce en teoría un torque de 10 Nm se puede inferir que el generador no aprovecha la totalidad de energía entregada por las olas, sin embargo, esto era algo esperado de antemano ya que al momento de elegir el generador para el dispositivo se dialogó con expertos en electrónica, los cuales recomendaron que para estas situaciones en las cuales la entrada no se puede controlar, lo mejor sería diseñar un generador acorde a las necesidades, pero esto se salía de los objetivos del presente proyecto. Otra observación importante es como la eficiencia disminuye al aumentar la altura y periodo, esto se puede deber a que en los escenarios con bajas revoluciones presenta una baja altura y por lo tanto un torque pequeño, de esta manera el generador puede trabajar en condiciones cercanas a las establecidas en sus valores nominales, en consecuencia al aumentar la altura y periodo se empieza a desperdiciar torque. No obstante se observa que a medida que aumentan la altura y periodo de ola, la potencia obtenida aumenta.

Para finalizar un último aspecto importante por mencionar es que la medición del voltaje y amperaje se hizo de manera visual en un multímetro, ya que esa fue la manera elegida por los autores para realizar las mediciones, esto pudo generar errores debido a la incertidumbre en el tiempo de toma de medidas; sin embargo al momento de realizar las pruebas se evidenció que una forma más adecuada para medir dichos parámetros sería anexando un osciloscopio a la salida del generador, para poder definir de una manera más sencilla los picos de las mediciones, así como el tiempo que toma en estabilizarse el sistema.

Ahora teniendo en cuenta que en la sección 3.1: *Diferencial de altura del oleaje en la zona del caribe colombiano* se obtuvo como resultado que la altura promedio y el periodo promedio de ola para la zona costera del departamento de Córdoba es de 0.6 metros y 6 segundos respectivamente, se puede calcular el potencial energético undimotriz teórico a través de la ecuación 10 como sigue:

$$P_s = 0.49(0.6)^2(6)$$

$$P_s = 1.0584 \left[\frac{KW}{m} \right] = 1058.4 \left[\frac{W}{m} \right]$$

Se utilizó la ecuación 74 del modelo ajustado del anexo 3, realizada con el modelo de regresión lineal múltiple para obtener una aproximación de la potencia del dispositivo con los valores de altura y periodo propios del departamento

$$y = 1.8244 + 0.8151T + 0.8150H \quad (74)$$

Se puede decir entonces que el posible potencial energético undimotriz obtenido a través del equipo diseñado en el presente trabajo es de $7.204 [Wm^{-1}]$, el cual muestra que existe un potencial cuantificable que demuestra que es posible aprovechar la energía acumulada en el océano.

4. CONCLUSIONES

Se demostró que existe un potencial undimotriz aprovechable en la zona costera del departamento de Córdoba y se calculó que es teóricamente de $1058.4 [Wm^{-1}]$.

Se diseñó un dispositivo absorbedor puntual tipo on-shore capaz de transformar la energía potencial de las olas en electricidad, encontrando que la máxima potencia producida fue de 5.16 W con una altura de 0.3 m y 3.5 segundos. Esto podría mejorar con la implementación de un generador diseñado específicamente para las condiciones de evaluación.

La geometría esférica elegida para la boya del presente trabajo, los periodos iguales o superiores a tres segundos presentaban un mejor aprovechamiento de la energía potencial de las olas, debido a que la boya alcanzaba a subir y bajar completamente con el pasar de las olas.

La geometría de la boya aun cuando se eligió por ser la que demostró un mejor comportamiento estructural, no es la apropiada para el dispositivo, debido a que su superficie no aprovecha completamente el frente de ola.

El potencial que produciría el dispositivo en la zona costera del departamento de Córdoba es de $7.204 [Wm^{-1}]$ teniendo en cuenta una altura de 0.6 metros y un periodo de 6 segundos, los cuales sería suficiente para la carga de pequeños dispositivos electrónicos tales como Celulares, Tablets, gps, lectores electrónicos, etc.

5. RECOMENDACIONES

Al momento de utilizar dispositivos tipo absorbedor puntual como eje de captación de energía, hacer un análisis comparativo respecto a que geometría diferente a la esférica se comporta mejor estructuralmente y es superior para el aprovechamiento del frente de ola.

Para futuros proyectos utilizar un generador que sea diseñado acorde a los requerimientos de funcionamiento que arroje el sistema de transmisión.

A fin de evitar errores en la medición es aconsejable implementar un método para la medición del voltaje y amperaje que incluya un osciloscopio para la toma de datos.

Considerar la implementación de un volante de inercia para mejorar la transmisión de potencia, almacenando energía cinética y manteniendo el giro del eje.

Realizar un rediseño del dispositivo para que sea posible aprovechar la carrera de subida y de bajada en la cremallera, y de esta manera conseguir una completa absorción de la energía en la oscilación de la ola.

6. BIBLIOGRAFÍA.

Abad Moralejo, D. (2010). Diseño de una rueda motriz con motor integrado en el eje para uso en motocicletas eléctricas.

Agencia de Noticias UN (2014). U.N. pone a funcionar canal de oleaje único en Latinoamérica. Sitio web de la Agencia de Noticias de la Universidad Nacional de Colombia. Disponible desde: <<http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/un-pone-a-funcionar-canal-de-oleaje-unico-en-latinoamerica.html>> [Acceso 5 de febrero de 2017].

Alonso, R. (2012). Evaluación del potencial undimotriz de Uruguay. Montevideo: Universidad de la República, Master's thesis.

Amorrortu, J. E. (1967). Las aleaciones de aluminio de alta maquinabilidad. *dyna*, 42(8), 481-493.

Amu B, M., & Franco A, F. (2009). Microestructura y propiedades mecánicas en la zona afectada por el calor de la unión soldada de la aleación 6261-T5. Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales. S, 1, 767-772.

Antonio, F. D. O. (2010). Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 14, no 3, p 899-918.

Appendini, C. M., Urbano-Latorre, C. P., Figueroa, B., Dagua-Paz, C. J., Torres-Freyermuth, A., & Salles, P. (2015). Wave energy potential assessment in the Caribbean Low Level Jet using wave hindcast information. *Applied Energy*, 137, 375-384.

Askeland, D. R., & Phulé, P. P. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (Vol. 3). International Thomson Editores.

Astbearings.com. (2016). UCP 201-8 Inch Series | AST Bearings. [Internet] Disponible desde: <<http://www.astbearings.com/catalog.html?page=product&id=UCP201-8>> [Acceso 6 Noviembre 2016].

Bedard, R., Previsic, M., Hagerman, G., Polagye, B., Musial, W., Klure, J. & Hopper, C. (2007, September). North American ocean energy status—March 2007. In 7th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC), Porto, Portugal, September (pp. 11-13).

Beirão, P., & Malça, C. (2013). Hydraulic Power Take-off and Buoy Geometries Characterisation for a Wave Energy Converter. *Energy and Power Engineering*, 5(04), 72.

Beirão, P., & Malça, C. (2014). Design and analysis of buoy geometries for a wave energy converter. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 5, no 2-3, p 1-11.

Benítez, Luis. (2011). Engranajes: diseño, lubricación, análisis de fallas y mantenimiento. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Biesheuvel, A., & Spoelstra, S. (1989). The added mass coefficient of a dispersion of spherical gas bubbles in liquid. *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 15, no 6, p. 911-924.

Booij et al. (1996). SWAN User Manual - A third-generation wave model for coastal regions - Model description and validation. Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology, Delft, Netherlands. pp. 1-15.

Budynas, R., & Nisbett, J. K. (2008). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. 8va edición. México DF: McGraw-Hill.

Budynas, R., & Nisbett, J. K. (2012). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. 9na edición. México DF: McGraw-Hill.

Cabrales V, Eusebio; Cantera K, Jaime; Cárdenas, Efraín; Devis M, Andrea; Lozano I, José; Montealegre B, José; Ramírez del Castillo, Amparo; Reyna M, Julián, (2013), El océano: maravilla terrestre, Bogotá, Colombia: Editorial Comisión Colombiana del Océano.

Cáceres Sáez, R. (2015). Energías renovables no convencionales: factibilidad de la energía oceánica en Chile.

Carletti, E. J. (2007). Motores paso a paso: Características Básicas. *Robots Argentina, 2012*.

Casillas, A. L. (1977). Máquinas: cálculos de taller.

Castillo, Y., Gutiérrez, M. C., Vanegas-Chamorro, M., Valencia, G., & Villicaña, E. (2015). Rol de las Fuentes No Convencionales de Energía en el sector eléctrico colombiano. *Prospectiva*, 13(1), 39-51

Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas – CIOH: Observaciones Oleaje Golfo de Urabá. Disponible desde: <<http://www.cioh.org.co/meteorologia/ObMaritimas.php?obm=gdu>> [Acceso 1 de noviembre de 2015].

Convenio interadministrativo 036 Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas en Zonas no Interconectadas IPSE – Universidad de Córdoba. Informe final Rendición de cuentas. Montería, Colombia. 500 (2014)

Correa, F., Caicedo, J. C., Aperador, W., Rincón, C. A., & Bejarano, G. (2008). Mejoramiento de la resistencia a la corrosión del acero AISI 4140 utilizando multicapas de titanio/nitruro de titanio. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (46), 7-14.

Correa Hernández, D. P. (2016). Estudio del comportamiento de un mecanismo de boyas para obtener energía undimotriz.

Cruz, P., & Martínez, C. (2015). Cambio climático: Bases científicas y escepticismo. *CULCyT*, (46).

Demirbilek, Z., & Vincent, C. (2002). *Water Wave Mechanics Coastal Engineering Manual (EM 1110-2-1100)*. US Army Corps of Engineers, USA.

Díaz, R. C., & Krahmer, d. m. (2005) evaluación de maquinabilidad por torneado de un acero SAE 1020 fabricado en Colombia.

Dolgov, V. (2015). Estudio de la energía del mar y posibles aplicaciones en las costas Españolas.

Drew, B., Plummer, A. R., & Sahinkaya, M. N. (2009). A review of wave energy converter technology.

Escacena, J. (2006). Caracterización de las Propiedades Mecánicas del Aluminio 7075-T651.

Evans, D. V. (1976). A theory for wave-power absorption by oscillating bodies. *J. Fluid Mech*, 77(1), 1-25.

Falcão A. (2010). Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(3), 899-918.

Falnes, J. (2002). Ocean waves and oscillating systems: linear interactions including wave-energy extraction. Cambridge university press.

Falnes, J. (2007). A review of wave-energy extraction. Marine Structures, 20(4), 185-201.

Fernández Chozas, J. (2008). Una aproximación al aprovechamiento de la energía de las olas para la generación de electricidad. Proyecto Fin de Carrera. UPM.

Fernández, D. P. (2007). La energía del mar. Edición Electrónica, Universidad de Cantabria.

Flores Nava, J. A. (2014). Tecnologías desarrolladas para el aprovechamiento de las corrientes marinas. [Internet], México, Repositorio Institucional de la Universidad Veracruzana. Disponible desde: < <http://cdigital.uv.mx/handle/123456789/36019>> [Acceso 22 de mayo de 2016].

Gaviria, Simón. (2015). Diálogos regionales para la planeación de un nuevo país: Córdoba. Disponible desde: < <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Presentaciones/2016-02-08%20Presentacio%CC%81n%20Co%CC%81rdoba.pdf>> [Acceso 17 de noviembre de 2015].

Gobernación de Córdoba. PLAN DE DESARROLLO DEPARTAMENTAL Gestión y Buen Gobierno para la Prosperidad de Córdoba 2012-2015. Disponible desde: <<http://www.cordoba.gov.co/pdd/plan-de-desarrollo-2012-2015.pdf>> [Acceso 7 de noviembre de 2015].

Grove-Palmer, C. O. J. (1982, June). Wave energy in the United Kingdom: a review of the programme June 1975 to March 1982. In Proceedings of the 2nd International Symposium on Wave Energy Utilization (pp. 22-24).

Grover, H. J., Bishop, S., & Jackson, L. R. (1951). Fatigue strengths of aircraft materials. NACA TN, 2324.)

Havelock, T. (1955, July). Waves due to a floating sphere making periodic heaving oscillations. In Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences (Vol. 231, No. 1184, pp. 1-7). The Royal Society.

Hulme, A. (1982). Wave forces acting on a floating hemisphere undergoing forced periodic oscillations. Journal of Fluid Mechanics, vol. 121, no 1, p. 443.

Indexmundi.com. (2016). Aluminio - Precio Mensual (Peso colombiano por Tonelada) - Precios de Materias Primas. [Internet] Disponible desde: <<http://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=aluminio&meses=12&moneda=cop>> [Acceso 23 Octubre 2016].

IPSE. (2015) Rendición de cuentas [Internet], Bogotá D.C, Ministerio de Minas y Energía. Disponible desde: <<http://www.ipse.gov.co/atencion-ciudadano/seguimiento-spqr/rendicion-de-cuentas>> [Acceso 23 de noviembre de 2015]

Iturrioz, A (2014). Modelado numérico de sistemas de extracción de energía del oleaje basados en la tecnología de columna de agua oscilante (Doctoral dissertation, Universidad de Cantabria).

Jaramillo Osorio, R. D. & Garcés Ruiz, A. (2014). Generación Undimotriz: Integración con la red y análisis de resonancia subsíncrona.

Jiménez-Morales, A., Ruiz-Navas, E. M., Fogagnolo, J. B., & Torralba, J. M. (2004). Influencia de la composición y las condiciones de procesado en la resistencia a la

corrosión de materiales compuestos base aluminio. Boletín-Sociedad española de cerámica y vidrio, 43(2), 196-199.

Leishman, J. M., & Scobie, G. (1978). The Development of Wave Power: A Techno-economic Study. Economic Assessment Unit, National Engineering Laboratory, Department of Industry.

Losada, M. A., Tejedor, L., Corniero, M. A., & Tejeira, J. L. (1977). Métodos espectrales de previsión de oleaje. Estudio comparativo. Revista de obras públicas, 399-422.

Martí, José A., Laboy A.J Manuel., & Ruiz, Orlando E. (Noviembre de 2010). Viabilidad de la conversión de energía océano termal (otec) para la producción de energía renovable y agua potable en países en desarrollo. Bávaro-Punta Cana, República Dominicana. Asociación interamericana de ingeniería sanitaria y ambiental – AIDIS XXXII congreso interamericano de ingeniería sanitaria y ambiental.

Martínez Gallo, J. C. (2010). Propuesta metodológica para la estimación de la cota de inundación en la zona costera del Caribe colombiano (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia; Sede Medellín).

Meadows, D. H. (1996). Más allá de los límites. Ecología y Desarrollo. Madrid: UCM, 57-72.

Medina, E., Lugo, A. E., & Novelo, A. (1995). Contenido mineral del tejido foliar de especies de manglar de la laguna de Sontecomapan (Veracruz, México) y su relación con la salinidad. Biotropica, p. 317-323.

Mejía, G. (2014). Estudio comparativo entre la legislación de eficiencia energética de Colombia y España. Revista EAN, (77), 122-134.

Mendoza, R. C., & Rivera, D. V. (2015). Energía Undimotriz, alternativa para la producción de Energía Eléctrica en la Provincia de Santa Elena. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 1(2), 1-12.

Minguela, P. R., Martínez, J. L. V., & Fernandez, F. S. (2008). Energía del oleaje: estado actual y perspectivas futuras. *DYNA-Ingeniería e Industria*, 83(3).

Montoya, D. (2010) Modelado y control de centrales undimotrices. Aplicación a sistemas oscilantes y osciladores de columna de agua. Dirigido por Antonio De la Villa Jaen. Proyecto Fin de Máster defendido en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla. Disponible desde: <<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70175/>> [Consulta: 15 de abril de 2016]

Mott, R. L. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*. Pearson Educación.

Navarro, M. Hernández, J. Benedetti, E. & González, Á. (2016) Aprovechamiento de energía offshore: Avances y perspectivas. *Revista ESAICA*, Vol.2 n°1, pp. 3-6.

Norrish, R. G. W., & Rideal, E. K. (1923). The conditions of reaction of hydrogen with sulphur. Part I. Direct union. *Journal of the Chemical Society, Transactions*, vol. 123, p. 696-705.

Ocean energy systems (OES), reporte anual 2015. Disponible desde: <<https://www.ocean-energy-systems.org/library/annual-reports/document/oes-annual-report-2015/>> [Consulta: 8 de marzo de 2017]

Ohneda, H., Igarashi, S., Shinbo, O., Sekihara, S., Suzuki, K., Kubota, H. & Morita, H. (1991). Construction procedure of a wave power extracting caisson breakwater. In *Proceedings of the 3rd Symposium on Ocean Energy Utilization*, Tokyo (pp. 171-179).

Orientalmotor.com. (2016). DC Input Stepper Motor and Driver Systems - VEXTA & Oriental Motor. [Internet] Disponible desde: <<http://www.orientalmotor.com/products/stepper-motors/dc-input-stepper-motor-driver-systems.html>> [Acceso 12 Noviembre 2016].

Ortega, S. (2010). Estudio de aprovechamiento de la energía del oleaje en Isla Fuerte (Caribe colombiano) (Doctoral dissertation, Master's thesis, School of Geosciences and Environment, National University of Colombia, Medellin, Colombia).

Ortega, S., Osorio, A. F., & Agudelo, P. (2013). Estimation of the wave power resource in the Caribbean Sea in areas with scarce instrumentation. Case study: Isla Fuerte, Colombia. *Renewable Energy*, 57, 240-248.

Peon, R., Leon, S. & Irvine-Haliday, D., 2004. Solid State Lighting for Developing Countries. A cost effective solution, facilitator of gender equity and encourager of peace. In *Proceedings of World Renewable Energy Congress VIII.*, 2004.

Polo, J. M., Rodríguez, J., & Sarmiento, A. (2008). Potencial de generación de energía a lo largo de la costa colombiana mediante el uso de corrientes inducidas por mareas. *Revista de Ingeniería*, (28), 99-105.

Previsic, M., Moreno, A., Bedard, R., Polagye, B., Collar, C., Lockard, D. & Rocheleau, R. (2009, September). Hydrokinetic energy in the United States—resources, challenges and opportunities. In *Proceedings of 8th European Wave Tidal Energy Conference* (pp. 76-84).

Ravindran, M., & Koola, P. M. (1991). Energy from sea waves—the Indian wave energy programme. *Current science*, 60(12), 676-680.

Reali, M. (1981). Submarine hydro-electro-osmotic power plants for an efficient exploitation of salinity gradients. *Energy*, 6(3), 227-231.

Rodríguez, R., Ricci, P., Marón, A., Prieto, M. E., Fernández, D., & Taboada, M. (2008). Diseño y ensayos del sistema de fondeo de un convertidor de energía de las olas. *Canal de experiencias hidrodinámicas*, 209, 1-31.

Sá da Costa, J., Sarmiento, A., Gardner, F., Beirão, P., & Brito-Melo, A. (2005). Time domain model of the Archimedes Wave Swing wave energy converter. In *Proceedings of the Sixth European Wave and Tidal Energy Conference* (pp. 91-97).

Sarlak, H., Seif, M. S., & Abbaspour, M. (2010). Experimental investigation of offshore wave buoy performance, vol. 6, no 11, p. 0-0.

Sitio web DIMAR, (2015). Sistema de Medición de Parámetros Oceanográficos y de Meteorología Marina – SMPOMM. Disponible desde <<https://www.dimar.mil.co/content/sistema-de-medicion-de-parametros-oceanograficos-y-de-meteorologia-marina-smpomm>> [Acceso 17 de noviembre de 2015].

SMPOMM (2015, 2017) Aplicación. Disponible desde: <<http://sig.dimar.mil.co/smpommWeb/index#consultaBoyasPublic>> [Acceso 7 y 19 de noviembre de 2015]. [Acceso 20 de enero de 2017].

Torres, A. P. G., Montaña, J. E. C., & Salamanca, P. R. (2017). La necesidad de una educación energética desde las ciencias de la sostenibilidad. *TED: Tecné, Episteme y Didaxis*.

Torres, R., & Andrade, C. (2006). Potencial en Colombia para el aprovechamiento de la energía no convencional de los océanos. *Boletín Científico CIOH*, 24, 11-25.

Tortajada, J. F., i Castell, J. G., Andreu, J. L., i Domínguez, F. G., García, J. O., Tornero, O. B., & Conesa, A. C. (2001). Enfermedades asociadas a la polución atmosférica por combustibles fósiles. Aspectos pediátricos. *Rev Esp Pediatr*, 57(3), 213-225.

Tovar, M. & Yamá, L. (2009). Análisis de prefactibilidad para la generación de energía eléctrica mediante energía Undimotriz en Tumaco (Nariño).

Unidad de planeación minero energética, UPME (2013). Primer seminario internacional de energización con fuentes alternativas. Planeamiento energético y energías alternativas en Colombia. Disponible desde: <http://www.upme.gov.co/presentaciones/2013/upme_pers-n_planeamientoenergetico-energiasalternativas_vf.pdf> [Acceso 17 de mayo de 2016].

Universidad Nacional-Fundación Bariloche Política Energética. (2010) Plan Energético Nacional 2010-2030 Informe Final [Internet], Bogotá D.C., UPME. Disponible desde:<<http://www.upme.gov.co/Docs/PEN/PEN%202010%20VERSION%20FINAL.pdf>> [Acceso 20 de mayo de 2016].

Vanegas Useche, L. (2011). Diseño de Elementos de Máquinas. Capítulo 5. [Internet] Disponible desde: <<http://blog.utp.edu.co/lvanegas/dis1/>> [Acceso 13 Octubre. 2016].

Velez, C., Qu, Z., Lin, K. C., & Jin, S. (2014). Design, Modeling and Optimization of an Ocean Wave Power Generation Buoy. Marine Technology Society Journal, vol. 48, no 4, p. 51-60.

Vidal Pascual, C. (1986). Historia, clasificación y selección de los generadores de energía del oleaje.

Vu, K. H., Chenu, B., & Thiagarajan, K. P. (2004, August). Hydrodynamic damping due to porous plates. In Proceedings of the WSEAS International Conference on Fluid Mechanics, Corfu (pp. 17-19).

Whittaker, T. J. T., McIwaine, S. J., & Raghunathan, S. (1993). A review of the Islay shoreline wave power station. In Proceedings of First European Wave Energy Symposium (pp. 283-6).

World Energy Statistics and Balances. 2008. National Renewable Energy Laboratories. US. -2011-

XM. (2015). Informe de operación del SIN y administración del mercado 2015 [Internet], Medellín, XM. Disponible desde: <<http://informesanuales.xm.com.co/2015/SitePages/operacion/3-1-Demanda-de-energia-nacional.aspx#>> [Acceso 18 de mayo de 2016].

ANEXOS

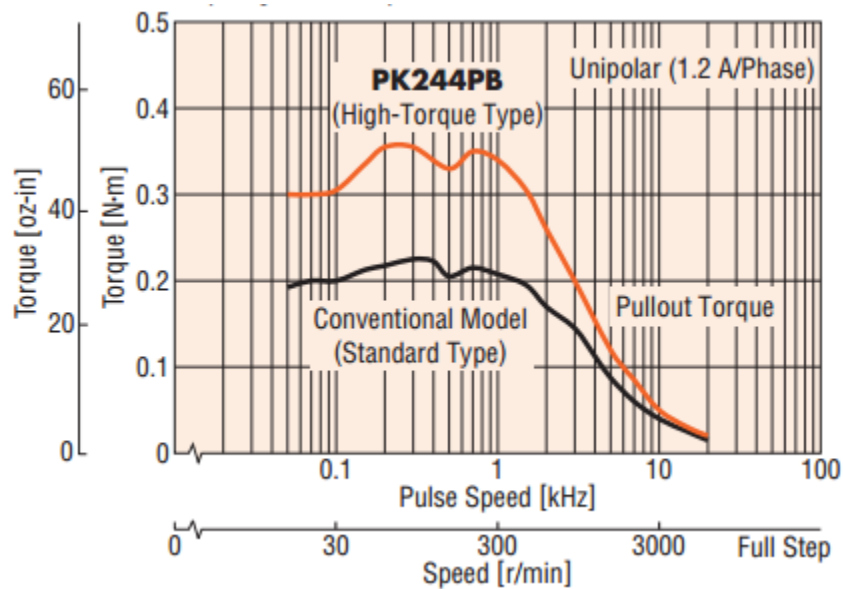
ANEXO 1 - Especificaciones de diseño de la chumacera RBR UCP201-8

(Astbearings, 2016)

Specifications		
Bearing Type	Extended inner race with set screws	
Dynamic Load Rating (Cr)	2,887	lbs
Static Load Rating (Cor)	1,499	lbs
Shaft Height (h)	1.1890	in
Housing Width (b)	1.4960	in
Mounting Hole Center-to-Center (e)	3.7400	in
Housing Length (a)	5.0000	in
Mounting Slot Length (S2)	0.7480	in
Mounting Slot Width (S1)	0.5120	in
Housing Base Thickness (g)	0.4720	in
Housing Height (w)	2.3620	in
Bearing Inner Race Width (Bi)	1.2200	in
Bearing Inner Race Width - Short Side (n)	0.5000	in
Bearing Inner Race Width - Extended Side (m)	0.7200	in
Mounting Bolt Size	0.3750	in
Bearing Number	UCP 201-8	
Housing Number	P 203	
Shaft Dia., Nominal (d)	0.5000	in
Shaft Size (ds)	1/2	in
Weight (g)	635.03	grams
Material	Cast iron housing, chrome steel bearing	

ANEXO 2 – Grafica de funcionamiento del generador Orientalmotor.com. (2017).

DC Input Stepper Motor and Driver Systems - VEXTA & Oriental Motor.



ANEXO 3 – Regresión lineal múltiple para encontrar la ecuación de potencia real vs altura y periodo de ola para el dispositivo diseñado

Para poder determinar cómo se comportaría el dispositivo en condiciones reales del departamento, se realizó una regresión lineal múltiple con los datos de altura, periodo y potencia entregadas por el dispositivo en las condiciones del laboratorio; para ello se utilizó el software estadístico R en el cual primero se encontró el modelo de regresión de primer orden para los valores dados y luego se comprobó que esta ecuación tenga los ajustes necesario para que los valores de predicción fueran fiables esto se hizo por medio de test de validación de supuestos como son los de homogeneidad de varianza, independencia y normalidad.

ANEXO 4 – Planos