eman ta zabal zazu

Universidad del País Vasco

Euskal Herriko Unibertsitatea

NUEVO SISTEMA DE PROPULSIÓN NAVAL

TESIS DOCTORAL

Ignacio de la Llana Martínez

2011

© Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco
Euskal Herriko Unibertsitateko Argitalpen Zerbitzua
ISBN: 978-84-694-5977-5

A mis alumnos

Universidad del País Vasco
Euskal Herriko Univertsitatea

Departamento de Ciencias y Técnicas de la Navegación, Máquinas y Construcciones Navales

NUEVO SISTEMA DE PROPULSIÓN NAVAL

Memoria presentada por **Ignacio de la Llana Martínez** para optar al grado de
DOCTOR EN MÁQUINAS NAVALES

Directores

Dr. D. Jesús Ángel Vila Muñoz

Profesor Titular de Universidad. Departamento de Física Aplicada I
Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Univertsitatea

Dr. D. Carlos Ángel Pérez Labajos

Profesor Titular de Universidad. Departamento de Ciencias y Técnicas de la Navegación y de la Construcción Naval
Universidad de Cantabria

Portugalete 2011

Agradecimientos

Mucha gente me ha apoyado durante estos años, soy plenamente consciente. Aunque no soy partidario de utilizar estos escritos, convencido de su frágil utilidad, nunca he tenido razones para ello.

Ahora, siento la necesidad de recordar someramente a todos los que han contribuido en la consecución del hecho que hoy nos ocupa.

Mi añorada Rosario, mi chaval Adrián, mi amada familia, mis estimados colegas, mis apreciados compañeros de la Escuela, mis queridos alumnos, mis incansables amigos ... me han cuidado generosamente en situaciones complejas tanto personales como profesionales.

Agradezco a mis amigos Pedro Pérez Elguezabal, maestro ebanista, y Enrique Arri Lemoniz, experto informático, su desinteresada contribución en repetidas ocasiones durante esta dilatada experiencia.

Considero un honor estar en mi querida Escuela de Náutica de Bilbao y, honestamente, quiero agradecer la positiva disposición observada desde el Departamento de Ciencias y Técnicas de la Navegación, Máquinas y Construcciones Navales, del que formo parte desde su fundación. Ha sido inestimable la cercana actuación del Dr. Alfonso Davalillo Aurrecoechea; tanto como decisiva la del Dr. Carlos Ángel Pérez Labajos, director de mi proyecto de Tesis Doctoral.

Lo escrito hasta ahora adolecería de contenido sin destacar la aportación esencial de Alfred *Bruno* Kolb, mi amigo y maestro. ¡Cuántas horas de trabajo sin mirar el reloj! … con la importancia que otorgas al uso y disfrute de tu tiempo físico. Sin el extenso conocimiento que posees y tu exquisita habilidad técnica nunca lo hubiera logrado. ¡Bedankt Gebieter Kolb!

Como Doctorando es un verdadero placer referirme a mi mentor, el Dr. Jesús Ángel Vila Muñoz, verdadero alma mater del trabajo realizado. El rigor científico que preside su labor diaria sólo es superado por una tenacidad investigadora innata, me refiero a un intelectual libre que disfruta inventando. Cariñosamente, a fuer de emular un discurso panegírico, quiero agradecerte la envidiable honestidad que has regalado desde que nos vimos (*de gratis*, como dicen *allá*) por primera vez, en nuestra Escuela, hasta ayer, en tu acogedor hogar. Hay buena gente a la que no vamos a disfrutar en nuestra ruta terrenal, esporádicamente sucede lo contrario y, en ese preciso momento, las dificultades tornan a logros. Eres un hombre templado, *querido Vila*. ¡Ezkerrik asko laguntxo!

Nunca te olvido Aitatxu.

ÍNDICE

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN 1
1.1. *Evolución histórica de la propulsión naval* 2
1.1.1. Los orígenes 2
1.1.2. La conquista del Mediterráneo 4
1.1.3. De la conquista al comercio 6
1.1.4. El descubrimiento del nuevo mundo 9
1.1.5. La máquina alternativa de vapor y las hélices 10
1.1.6. La turbina de vapor 23
1.1.7. El motor alternativo de combustión interna 26
1.1.8. La turbina de gas 29
1.1.9. La propulsión eléctrica 30
1.1.10. Los buques atómicos 32
1.1.11. Buques por encima del mar 34
1.1.12. El propulsor magnetohidráulico 36
1.1.13. Vehículo subacuático autónomo (AUV) 42
1.2. *Antecedentes* 45
1.3. *Objetivos y organización de este trabajo* 48

Capítulo 2. INTRODUCCIÓN TEÓRICA 50
2.1. *Fuerza tangencial y fuerza centrípeta* 51
2.2. *Fuerza centrífuga* 55
2.3. *Vector unidireccional rotatorio* 57

Capítulo 3. MATERIAL Y MÉTODOS 60
3.1. *Modelo de laboratorio* 61
3.2. *Estudio energético* 67
3.3. *Estudio dinámico* 71
3.4. *Estudio de los choques* 74

3.5. *Ecuaciones diferenciales correspondientes a el modelo de laboratorio* 79
3.6. *Método y programa utilizado para la resolución de las ecuaciones diferenciales que aparecen en el desarrollo de la teoría del modelo de laboratorio* 81

Capítulo 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES 85
4.1. *Resultados experimentales correspondientes al modelo de laboratorio para realizar movimiento por planos horizontal e inclinado* 86
4.2. *Resultados experimentales correspondientes a los modelos de laboratorio para impulsar un barco* 88
4.2.1. Modelo de laboratorio para impulsar un barco I 88
4.2.2. Modelo de laboratorio para impulsar un barco II 96

Capítulo 5. MODELO A CONSTRUIR Y SUS APLICACIONES 109
5.1. *Base de introducción* 110
5.2. *Modelo compuesto por una serie de tubos girando* 113
5.3. *Aplicaciones de este modelo* 120
5.4. *Vehículos terrestre* 122
5.5. *Vehículos para medios acuáticos* 124
5.6. *Vehículos aéreos y espaciales* 126

Capítulo 6. CONCLUSIONES 128

BIBLIOGRAFÍA 131

TRABAJOS DERIVADOS TESIS 141

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Evolución histórica de la propulsión naval

1.1.1. Los orígenes

Es un misterio cómo y cuándo fue botada la primera embarcación, ni si lo fue desde la orilla de un río, un lago o una playa marina. Muchos estudiosos creen que embarcaciones de tipos diferentes aparecieron en todas las partes del mundo, sin relación entre sí, pero en forma más o menos simultánea. Pudiendo abarcar, el concepto de *simultaneidad*, lapsos de varios siglos. En el Pacífico sur, en las costas de los países nórdicos, en el Mediterráneo y en las playas africanas; en todos los parajes donde el hombre ha vivido junto a aguas navegables, ha intentado siempre construir barcos.

Las cañas y los juncos han sido durante varios milenios los principales materiales utilizados para construir embarcaciones, desde las egipcias del Nilo hasta cierto tipo de botes utilizados actualmente en los mares costeros del Perú y en el lago Titicaca.

Se puede discutir si el primer del barco fue una piragua excavada en un tronco como el de la figura 1.1., o un bote constituido por una armazón recubierta de cortezas de árbol o de pieles de animales. Es posible pensar que ambas formas de embarcaciones se desarrollaron al mismo tiempo, y que prevaleció una u otra según el material disponible [55].

Las primeras construcciones flotantes con que los hombres se lanzaron al mar eran impulsadas y movidas con los sistemas más sencillos: manos y pies, tablas planas (precursoras de los futuros remos y paletas) e incluso largas pértigas con las cuales se tomaba impulso apoyándolas sobre el

fondo de las aguas tranquilas. En cuanto a los tipos de embarcaciones de una sola pieza, en otras partes del mundo se recurrió a construirlas cada vez con mayor calado, de modo que una parte considerable del buque se hallara bajo el agua, y su centro de gravedad descendiera hasta el máximo posible. Cuando se comprobó que la fuerza del viento no sólo no era peligrosa, sino que incluso podía ser aprovechada, surgieron las primeras velas: probablemente hojas de palmera o simples esteras.



Figura 1.1. Piragua en la costa occidental de África

Un antiguo documento de la historia de la navegación muestra el extraordinario grado de desarrollo alcanzado por la técnica de la construcción naval en la cuenca del Mediterráneo mil quinientos años antes de nuestra era. A la vez, da cuenta de un asombroso y dilatado viaje de exploración: se trata de un relieve en piedra existente en el templo de Karnak, y que se remonta a la reina egipcia Hatshepsut (1511-1492 a.C.). El viaje, se realizó desde el extremo norte del mar Rojo hasta

la actual Etiopía o, posiblemente más lejos aún, hasta la *Tierra de Punt* (la actual Somalia) [20].

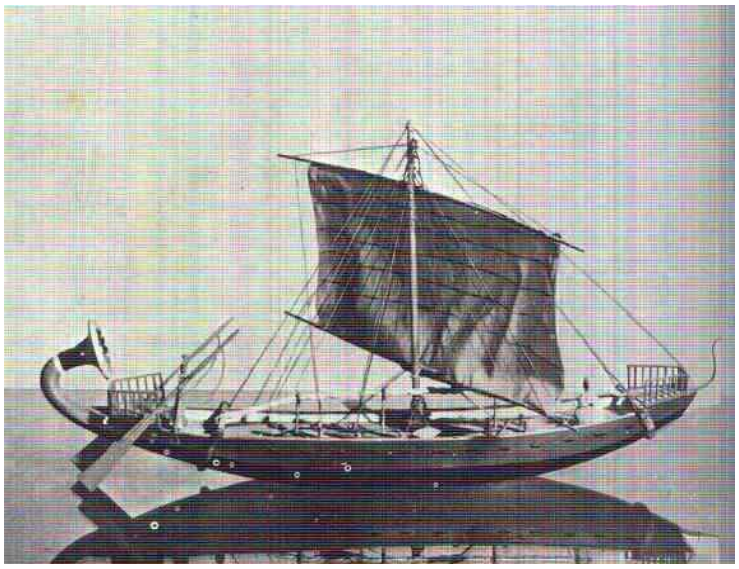


Figura 1.2. Modelo de navío egipcio del año 1800 a.C.

Cuando se observan detenidamente los barcos de vela y remo, tan acertadamente representados en los bajorrelieves egipcios, se llega al convencimiento de que su evolución debió ser fruto de muchos años. La construcción de esos navíos de hasta 30 metros de eslora, con mástiles, vergas, velas, bancos de remeros, gruesos cabos trenzados, plataforma y barandilla en la proa y dos timones a ambos lados del cuerpo de popa, era poco menos que perfecta, figura 1.2.

1.1.2. La conquista del Mediterráneo

La supremacía en mar abierto estaba reservada a los fenicios, pueblo originariamente asentado en Siria, que durante los siglos XV a VIII a.C. llegó a ser la única potencia marítima del Mediterráneo.

Es probable que la técnica de construcción de barcos capaces de navegar por el mar la aprendieran de los egipcios, o de sus discípulos los cretenses; pero pronto superaron a sus maestros. Los navíos fenicios, construidos con madera de cedro del Líbano, poseían elevadas paredes laterales y una firme cubierta que protegía del viento y del temporal.

Según Walter Zeeden, experto alemán en ingeniería naval, junto a los panzudos barcos mercantes y de carga, que eran los más numerosos (pero que, incluso con viento favorable, apenas alcanzaban una velocidad superior a siete nudos), se hallaban los largos y esbeltos barcos de guerra. Aunque dotados también de mástil y de una gran vela cuadra, se impulsaban casi siempre con los remos, ya que no querían estar a merced del capricho de los vientos, para poder maniobrar rápidamente, atacar al enemigo o esquivar un abordaje. Para facilitar la manipulación de los remos tenían muy poca obra muerta, es decir, un puntal muy corto. Con el tiempo se añadió a la primera fila de remeros una segunda, y luego otra más. Así, de las *galeras* con una sola fila de remos se pasó a las birremes de la figura 1.3., con dos, y finalmente a las trirremes, con tres filas, una encima de otra.

Las hileras de remeros no sólo siguieron siendo el principal sistema de propulsión en la antigüedad, sino que además se fueron incrementando progresivamente. El *Alexandria*, barco de Siracusa que navegó hacia el año 200 a.C., debió llevar hasta 4.000 remeros a bordo [20].

Los romanos se interesaron en la navegación por dos razones fundamentales: tenían que defender las provincias conquistadas de los ataque por mar y, además, alimentar la metrópoli con grandes importaciones de cereales.



Figura 1.3. Birreme de guerra romano reproducido en relieve

Los grandes barcos de guerra romanos eran multirremos, construidos según modelos ya acreditados. Unos decenios a.C., desarrollaron un nuevo tipo de barco de guerra, que se acreditó en las batallas navales más importantes de la antigüedad. Era la *liburna*, pequeño navío de alta borda, impulsado únicamente por una o dos filas de remeros en cada banda y provisto de un espolón que se colocaba indistintamente a proa o a popa. Las liburnas poseían un mástil con una vela cuadra, que llevaba una cofa, y eran más fáciles de manejar que las embarcaciones de muchos remos.

1.1.3. De la conquista al comercio

En Europa los verdaderos navegantes de los primeros años de la era cristiana fueron los vikingos, que en sus costas y fiordos construyeron los barcos con que surcaron el Atlántico.

Estos navegantes del norte de Europa no dejaron pruebas irrefutables de su vocación marinera hasta los primeros siglos de nuestra era; pero las pinturas rupestres de la Edad de Bronce inducen a pensar que hacia el año 1000 a.C. se hallaba difundida en las costas de la península escandinava una técnica muy avanzada de arquitectura naval. Los navíos vikingos de los años 200 a 300 d.C., figura 1.4., como el descubierto en el Nydamer Mooren, cerca de Schleswig, tenían sólo unos 25 metros de eslora y tres de manga. Pero si se comparan con los que navegaban por el Nilo o el Mediterráneo, se advierten en ellos dos notables progresos. Por una parte, el sistema de aparejo holandés, consistente en que los tablones montaban unos sobre otros y se mantenían sujetos entre sí (lo que proporcionaba a los barcos una estabilidad asombrosa). Por otra, las rodas de proa y de popa eran extraordinariamente cortantes y estaban arqueadas con una increíble audacia, lo cual aumentaba considerablemente la eficacia del impulso de las velas y de los remos y, sobre todo, permitía al barco saltar fácilmente sobre las olas más altas.

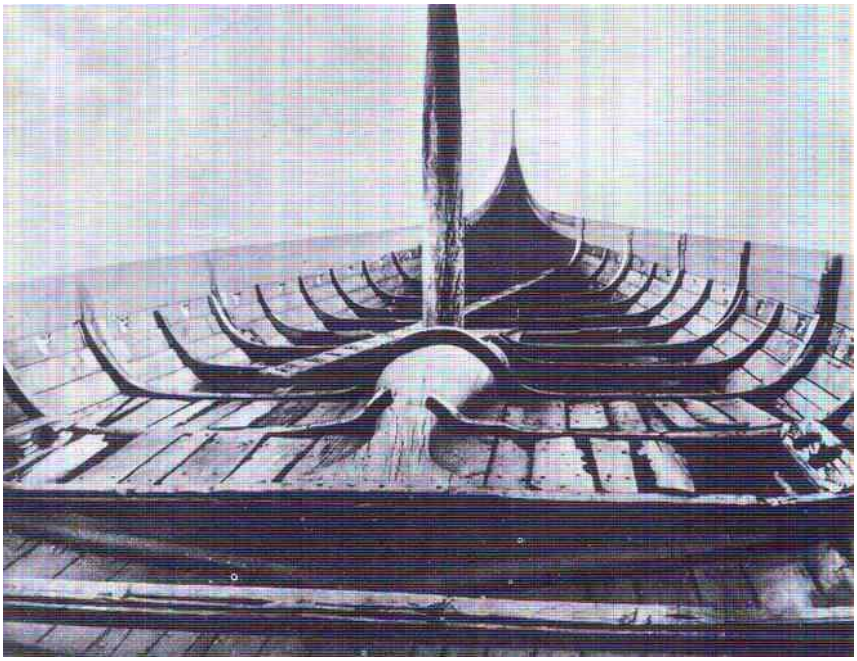


Figura 1.4. Navío vikingo desenterrado en Oseberg (Noruega)

Se trataba de buques abiertos, altos de proa y de popa y con un extraordinario abultamiento para que el casco tuviese la estabilidad necesaria para soportar el enorme peso de la única vela. El casco, sin ser voluminoso, ofrecía mucho espacio para carga, y garantizaba una gran estabilidad; la enorme vela podía imprimir fácilmente al navío un velocidad de nueve a diez nudos, sin que el agua saltase por encima de la borda.

Después de un largo periodo de intranquilidad, la integración de los normandos en las tierras conquistadas dio paso en el norte de Europa a una época de relativa calma política. La experiencia náutica y técnica acumulada por los normandos en sus campañas de conquista se aplicó a un fin pacífico: el comercio marítimo.

En el año 1241 Hamburgo, Bremen y Lübeck crearon una unión mercantil, a la que en pocos años se adhirieron más de 70 ciudades. Desde mediados del siglo XIV esta unión se denominó *Liga Hanseática*.

Esta insólita colaboración pacífica a través de fronteras políticas, idiomáticas y monetarias, que tras la desaparición de la Liga no volvería a conocerse hasta pasados varios siglos, se debió sobre todo al barco y, concretamente, a un determinado tipo de barco: el *velero hanseático*. Estos veleros no llevaban remos; un sólido mástil en el centro sostenía la única y ancha vela cuadra, y en el castillo de popa había un cabrestante de madera para el servicio de los cabos del velamen. Debajo, en una sólida cubierta principal, se encontraba el molinete, dispositivo con el que se podía mover el timón de codaste [20]. Este timón, revolucionaria novedad en la arquitectura naval, iba unido a la popa con bisagras; sustituyó al timón en forma de remo, sólidamente fijo a un lado del castillo de popa, característico de los buques normandos.

De la cooperación técnica entre los astilleros del norte y del sur surgió a principios del siglo XV un barco que llegó a ser el prototipo de todos los grandes veleros posteriores: la *carabela*, que abrió un nuevo capítulo en la historia de la navegación; con ella fue posible superar por primera vez las viejas fronteras, y surcar los grandes océanos.

1.1.4. El descubrimiento del nuevo mundo

La corona española proporcionó al almirante Cristóbal Colón una pequeña flota de tres carabelas, con las que se hizo a la mar desde el puerto de Palos. Colón navegó resueltamente y el 12 de octubre de 1492 avistó la isla de Guanahani, en el Caribe, a la que llamó San Salvador. Sin sospecharlo, había descubierto el Nuevo Mundo: América. El objeto de éste y de los siguientes viajes fue primordialmente encontrar en aquellas tierras yacimientos de oro y plata.



Figura 1.5. Reproducción de la carabela Santa María

Los barcos de Colón, que seguramente fueron considerados modernos en su época, nos dan una idea de lo lentamente que progresaba la técnica naval. Eran las mismas carabelas, figura 1.5., que los portugueses habían utilizado para sus descubrimientos.

A finales del siglo XV se construyeron grandes cantidades de carabelas. En los años posteriores a Colón los conquistadores aventureros, y buscadores de fortuna, se sintieron atraídos cada vez en mayor número por los viajes ultramarinos. Todos ellos hubieron de ser transportados por naves igualmente pequeñas, de las que dependía todo el intercambio de mercancías entre la metrópoli y las nuevas colonias.

1.1.5. La máquina alternativa de vapor y las hélices

La era de los grandes descubrimientos llegó a su fin antes de que los barcos de vela perdieran su primacía. Pero hacía ya tiempo que se habían realizado descubrimientos e invenciones en otros campos distintos al de la geografía, que habían de tener para la navegación mucha mayor trascendencia de lo que nadie pudo al principio sospechar. Se descubrieron fenómenos tan importantes como la fuerza expansiva del vapor y la acción recíproca de la corriente eléctrica y del magnetismo. El hombre reconoció las posibilidades latentes en estas fuerzas y, con ayuda de su intelecto, ahora rigurosamente lógico y sistemático, erigió en menos de ciento cincuenta años un colosal imperio tecnológico.

El origen de la navegación a vapor ha sido objeto de valoraciones muy dispares que hacen muy confusa y farragosa esta importante parte de la historia marítima. Blasco de Garay, Denis Papin y Jonathan Hulls, son los tres personajes para los que se ha reclamado la primacía en la invención del barco de vapor [16].

El primero que aplicó el vapor a la navegación fue el francés Claude François Jouffroy d'Abans (1751-1832). En 1776 construyó un barco provisto de una máquina de simple efecto, que accionaba una serie de remos con aletas móviles que imitaban el movimiento de las palmípedas. En 1780 sustituyó los remos por ruedas de álabes y utilizó un barco de mayores dimensiones (46 m. de eslora), construido en Lyon y al que llamó *piróscafo*. Con él remontó el curso del Sena en presencia de los miembros de la academia de Lyon [40].

Hacia 1770 el ingeniero escocés James Watt había construido la primera máquina de vapor utilizable. Desde entonces otras mentes ingeniosas, entre ellas la del estadounidense Robert Foulton, se propusieron aplicar este mecanismo en los barcos, de manera que el movimiento giratorio, generado de un modo tan revolucionario, pudiera emplearse como fuerza de propulsión en el agua. Inmediatamente se cayó en la cuenta de que bastaba con invertir el principio de las ruedas de paletas existentes en los molinos de agua: un cigüeñal accionado por vapor haría girar dos ruedas de paletas adosadas a ambos costados del barco, con lo que éste resultaría poderosamente impulsado hacia delante [33].

La máquina de vapor también estuvo llamada a sustituir a la vela en los buques. Aún así la navegación a vela, dominada por la técnica americana, experimentó su apogeo a mediados del siglo XIX. Fue la época de los *clippers*.

En 1802, Symington probó el primer barco de ruedas, con casco de madera rentable. Se trató del buque *Charlote-Dundas* que se probó en el canal escocés de Forth-Clyde. La máquina iba situada en el centro y accionaba las ruedas de paletas posicionadas a babor y estribor.

En 1806 Robert Foulton marchó a América y con ayuda de Livingstone construyó el *Clermont*, que en 1807 enlazó New York con Albany, navegando por el río Hudson a la velocidad de 5 millas por hora. Iba dotado de una máquina de vapor de Boulton y Watt de 20 CV.

En 1817 el *Caledonia* equipado con dos máquinas de 32 CV, construidas por Watt, atravesó el mar del Norte y remontó el Rhin.

Las primeras pruebas con barcos de esta clase se realizaron, naturalmente, en ríos tranquilos. En 1818 se instaló en la fragata estadounidense *Savannah*, figura 1.6., de 30 metros de eslora, una máquina auxiliar de vapor de 90 caballos de fuerza que debía complementar el velamen. Se agregaron cabinas para 32 pasajeros y, tras largas pruebas, se emprendió la travesía del océano hasta Liverpool [28].

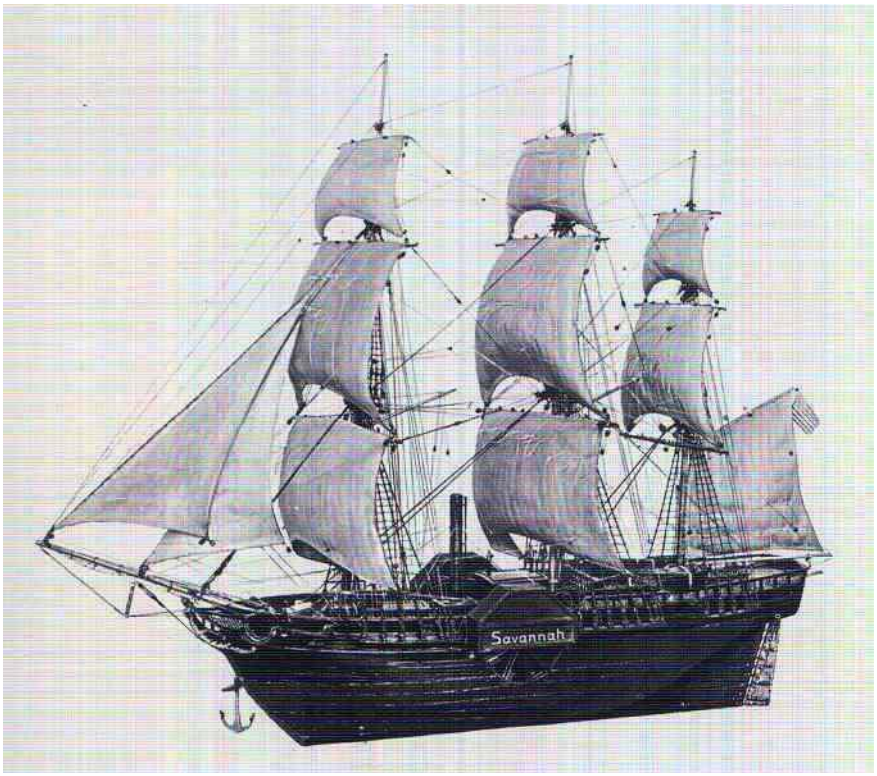


Figura 1.6. Modelo a escala del buque Savannah

La tracción mediante la rueda de paletas en el océano planteó inmediatamente dos problemas casi insolubles. Cuando había mar gruesa las ruedas no se podían utilizar y tenían que ser recogidas e izadas a cubierta (operación que en el *Savannah* se podía realizar en veinte minutos). Precisamente por esta razón se mantuvo el aparejo complementario. Por otra parte, cuando el barco viajaba vacío o incluso a media carga, el casco se elevaba tanto sobre el agua que las paletas apenas si la rozaban.

En 1834, el ingeniero inglés Hall patentó un condensador de superficie, que permitió al vapor expulsado por la máquina licuarse, lo que solucionó el problema correspondiente a la capacidad de almacenamiento de los depósitos. Esto propició que se estableciesen líneas regulares transatlánticas [66].

Subsistía la duda sobre el sistema de propulsión mejor y más seguro. Fue el ingeniero I.K. Brunel, quien llevó a la práctica sus teorías al construir el *Great Western* en 1837, y el *Great Britain* en 1843. Al *Great Britain* quiso dotarlo primeramente con ruedas de paletas; sin embargo, se convenció luego de las ventajas de la propulsión por hélice. Tras el éxito obtenido con estos dos barcos, Brunel colaboró con John Russel, ingeniero, catedrático y director de un astillero, en la construcción del *Great Eastern*, uno de los gigantes de su tiempo. A pesar de su elevado coste fueron instalados los tres sistemas a la vez: las ruedas de paletas en los costados, una máquina con hélice detrás y, además, un aparejo completo de velas en seis gigantescos mástiles [56].

Hubo de transcurrir todavía mucho tiempo hasta que la nueva técnica de construcción naval consiguiera disipar los recelos de pasajeros y armadores. Casi durante un siglo, vapores y veleros surcaron juntos los mares y atracaron juntos en los puertos.

El acero se fue haciendo presente en los buques y de esta manera en 1862 el vapor *Banshere* es la primera embarcación de acero que surca el Atlántico.

Desde 1870 hasta finales del siglo XIX, tanto la máquina de vapor de triple o cuádruple expansión como la caldera de tubos de humo y la sólida hélice de bronce, se utilizaban sin ningún inconveniente en toda clase de barcos, desde barcazas y lanchas hasta el vapor de lujo.

La hélice es un dispositivo formado por un conjunto de elementos denominados palas o álabes, montados de forma concéntrica alrededor de un eje, girando alrededor de éste en un mismo plano. Su función es transmitir a través de las palas su propia energía cinética (que adquiere al girar) a un fluido, creando una fuerza de tracción; o viceversa, *tomar* la energía cinética de un fluido para transmitirla mediante su eje de giro a otro dispositivo. Este instrumento de propulsión o tracción está generalmente acoplado a algún tipo de motor que empuja lo que está alrededor (generalmente aire o el agua) convirtiendo energía rotacional en traslación y desplazando el objeto a que se encuentra acoplado. Las palas de hélice actúan como alas y producen fuerza obedeciendo al principio de Bernoulli y a la 3ª ley de Newton, creando una diferencia de presiones entre ambas superficies de las palas.

La primeras aplicaciones de las hélices, hace miles de años, fueron los molinos de viento y agua. Hoy en día, también bajo los nombres de *rotor*, *turbina* y *ventilador*, las hélices y los dispositivos derivados de ellas se emplean para multitud de propósitos: refrigeración, compresión de fluidos, generación de electricidad, propulsión de vehículos e incluso para la generación de efectos visuales (estroboscopio).

El inventor de la hélice para barcos fue el checo Josef Ressel, quien solicitó la patente austriaca el 28 de noviembre de 1826.

Como evidencia la variedad de denominaciones y campos de aplicación, existe una gran variedad de hélices, variedad que se manifiesta sobre todo en las palas cuya forma varía según su propósito.

Se estima que el origen de la hélice remonta a los tiempos del Antiguo Egipto pero se sabe que en la Antigua China las hélices ya eran usadas para propulsar embarcaciones. En el siglo III a.C. el filósofo griego Arquímedes desarrolló la hélice de tornillo con el objetivo de transportar agua hasta la superficie y, alrededor de 1090, Cruzados Europeos encontraron molinos de viento en el medio oriente. Leonardo da Vinci diseñó planes para un helicóptero primitivo que hacía uso de una hélice sólida, sin palas.

La primera hélice montada en un motor, fue instalada por el ingeniero escocés James Watt en Birmingham, que la usó en su motor a vapor. La primera hélice movida por un motor de combustión interna, fue instalada en un pequeño barco por Frederick William Lancaster también en Birmingham y fue probada en Oxford. Sin embargo la hélice sólo se hizo popular cuando Isambard Kingdom Brunel decidió aplicarla en vez de una rueda de paletas para mover el navío *SS Great Britain*.

La propulsión mecánica de navíos comenzó con la máquina a vapor. Las ruedas de paletas eran el mecanismo propulsor más popular en estos primeros navíos. Las hélices de tornillo fueron introducidas en la segunda mitad del siglo XVIII. La invención de Bushnell en 1775 usaba hélices de tornillo movidas a mano para obtener propulsión vertical y horizontal. Francis Pettit Smith probó una semejante en 1836. En 1839, John Ericsson instaló una hélice de tornillo en un navío que más tarde navegó a

través del Atlántico en 40 días. Una mezcla de hélices de tornillo y ruedas de paletas aún era usada en esa época (SS *Great Eastern*).



Figura 1.7. Hélice con sentido de giro a la derecha en un navío moderno.

En el principio del siglo XX los navíos movidos por ruedas de paletas estaban completamente desfasados. La hélice sustituyó a la rueda debido a su gran eficiencia, reducido tamaño, reducida complejidad en el sistema de transmisión y el hecho de ser menos susceptible a dañarse, especialmente se usaba en barcos de guerra. Los proyectos iniciales se basaban en el diseño del tornillo común, de ahí su nombre. Más tarde las hélices consistían en dos palas que de perfil tenían el tamaño equivalente al de una rotación de un tornillo correspondiente en diámetro (de ahí la designación de paso de hélice) [10]. Este diseño era el más común, pero

los inventores experimentaron diferentes tamaños de perfil y varias palas. El diseño de la hélice se estabilizó alrededor de 1880.

El desarrollo de la marina mercante, y junto a ella la de guerra, también ha sido espectacular en el siglo XX. El casco de acero permitirá hacer barcos cada vez más grandes, y el desarrollo del motor de combustión y la hélice permite el transporte de grandes cantidades de producto a largas distancias. La marina mercante se desarrolla enormemente, hasta los grandes superpetroleros.

Los grandes barcos aparecieron tras la utilización del motor de combustión Diesel, ya que liberó a los buques de una parte muy importante de la carga que era ocupada por el carbón. Los barcos de pasajeros actuales, y los mercantes, son capaces de atravesar el Atlántico en pocos días. En recorridos cortos se utilizan los hovercrafts, más rápidos pero de menor autonomía. Pero donde más importancia tiene la marina es en el transporte de grandes volúmenes y pesos de mercancías.

Actualmente las hélices son movidas por motores de combustión o turbinas. El acoplamiento de la hélice al motor puede ser directo o bien mediante mecanismos reductores.

Las hélices se clasifican básicamente en *hélices de paso fijo* y *hélices de paso variable*.

Como su propio nombre indica, una hélice de paso fijo es aquella cuyo paso es único y no es modificable por mecanismo alguno. Este tipo de hélice compensa su falta de eficacia con una gran sencillez de funcionamiento, figura 1.7. Las hélices con paso variable y reversible son hélices de tornillo en que las aspas se han montado separadamente en el cubo, cada una sobre un eje, y en las cuales el paso puede cambiarse y

aún invertir, mientras la hélice está girando. El paso se cambia por medio de un mecanismo interno, que consiste esencialmente en unos actuadores hidráulicos, situados en el cubo de la hélice y que actúan sobre unas crucetas. Son mejores para los vehículos que operan en condiciones variables, como remolcadores, barcos pesqueros, transbordadores, buscaminas y lanchas de desembarco. El empleo de las hélices de paso variable elimina los mecanismos de reversa de los motores de movimiento alterno y de las turbinas de marcha atrás en los vehículos que tienen este sistema de propulsión, y son muy importantes en las instalaciones de turbinas de gas.

El requisito básico de operación para los sistemas principales de propulsión, es impulsar el vehículo con la velocidad constante necesaria, durante y a la distancia que se requiere, y tener la capacidad de maniobra adecuada. Para ello, se integra el generador de potencia, el sistema de transmisión, el propulsor y otros sistemas a bordo, con el casco del barco. La figura 1.8., muestra varias alternativas de sistemas de propulsión con hélices de paso fijo y de paso variable [7]

En los barcos modernos sólo los motores Diesel de baja velocidad y gran diámetro de los pistones se conectan directamente con la flecha de la hélice. Para convertir las rpm relativamente altas de un motor económico compacto a las rpm relativamente bajas necesarias en la hélice para un alto rendimiento de la propulsión, se necesitan sistemas de transmisión mecánicos, como trenes de engranajes de reducción o eléctricos, como las transmisiones generador-motor. En los casos de turbinas de vapor, motores Diesel de media o alta velocidad, y turbinas de gas, se emplean transmisiones con reducciones de engranajes. Las relaciones de engranaje varían de valores relativamente bajos para los motores Diesel de velocidad media, hasta aproximadamente 50:1 para turbinas compactas.

Cuando el motor es unidireccional, el mecanismo de transmisión debe incluir también un mecanismo de reversa.

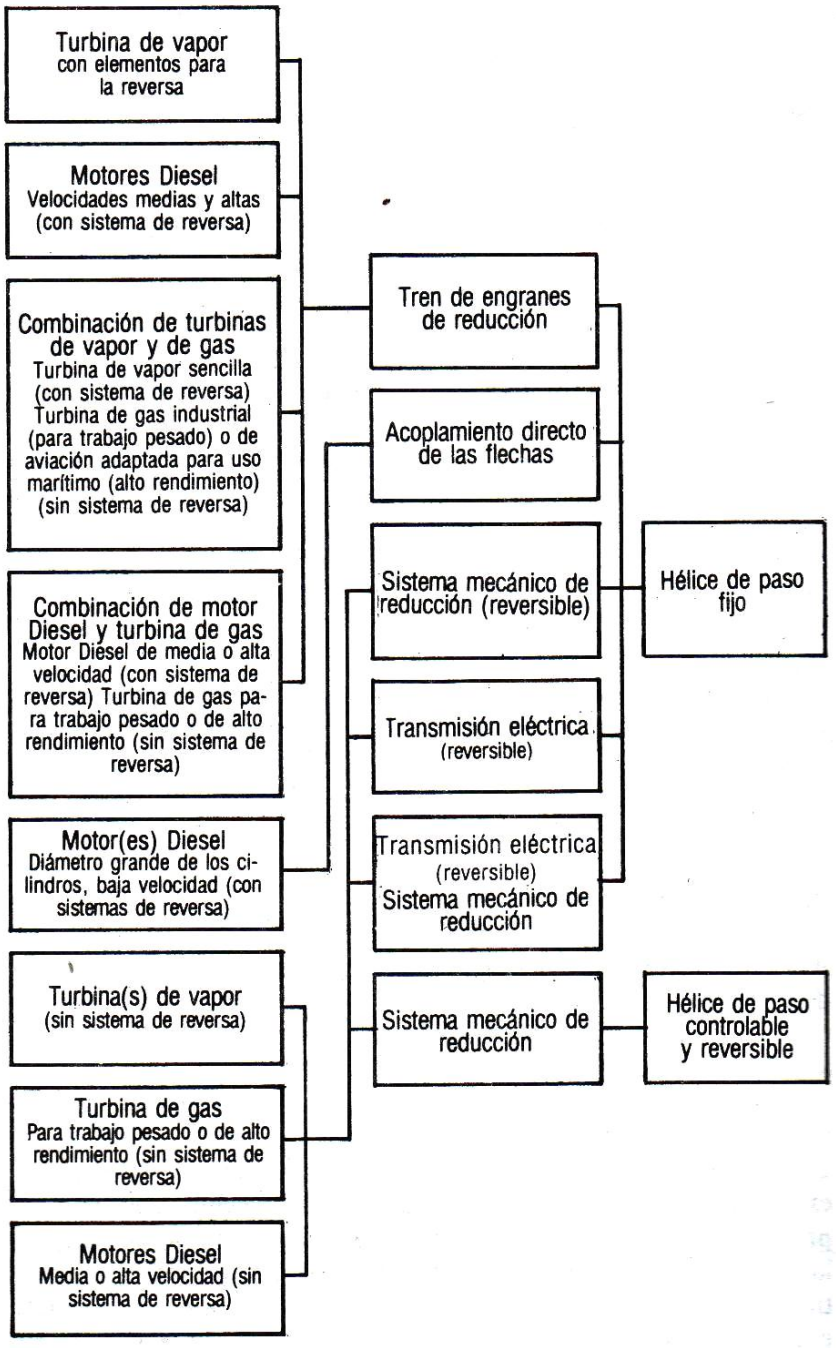


Figura 1.8. Sistemas de propulsión con hélices de paso fijo y de paso variable

La mayoría de las hélices tienen su eje de rotación paralelo a la dirección del movimiento, también ha habido tentativas de propulsar vehículos usando los mismos principios de las turbinas de viento de eje vertical [49], donde el eje de rotación es perpendicular. Hay dos tipos de sistemas de propulsión con eje vertical, localizados bajo el agua en la popa. Los discos del rotor se colocan siguiendo el flujo de la corriente del casco y tienen de 5 a 8 palas alargadas currentilíneas cerca de la periferia. Las palas se perfilan durante la rotación del disco, para producir un empuje máximo en cualquier dirección que se desee. En el sistema *Kirsten-Boeing*, las palas están interconectadas por engranajes de tal forma, que cada una realiza media revolución alrededor de su eje por cada revolución del disco. En el sistema *Voith-Schneider*, figura 1.9., las palas realizan una revolución completa alrededor de su propio eje por cada revolución del disco. Para transmitir la potencia desde la flecha horizontal al disco se emplea un engranaje cónico. Esto impone limitaciones a la potencia máxima que puede transmitirse; pero, aunque el propulsor es 30 o 40% menos eficiente que las hélices de tornillo, tiene ventajas de maniobrabilidad. Los propulsores de este tipo también se han usado en la proa, para ayudar en las maniobras.



Figura 1.9. Una hélice Voith-Schneider.

Existen, además, otros sistemas de empuje entre los que destacan los siguientes:

Chorros de agua. Este método consiste en un impulsor o bomba colocado dentro del casco, que toma agua del exterior, la acelera y la descarga con alta velocidad por la popa. Es un mecanismo de reacción semejante a la hélice; sin embargo, las partes móviles se encuentran dentro del casco, lo cual es deseable para la operación en aguas de poco calado. El rendimiento total es menor que con las hélices de un diámetro igual que el del orificio del chorro, debido principalmente a las pérdidas en los tubos de entrada. Otra desventaja es la pérdida de volumen en los ductos y el impulsor, y el peligro de atascamiento con basura en el impulsor. Los chorros de agua se emplean en general en hidroplanos y vehículos de superficie.

Sistemas de bomba y chorro [30]. En este sistema el impulsor rotativo está fuera del casco y tiene guías fijas adelante o atrás, y la unidad completa se encuentra dentro de un ducto o una cubierta alargada en forma de anillo. El diámetro del ducto aumenta desde la entrada hasta el impulsor, de tal forma que la velocidad disminuye y la presión aumenta. Por lo tanto el diámetro del impulsor es mayor, la carga es menor y el rendimiento es mayor. La incidencia de cavitación y ruido se retrasa. Sin embargo, las resistencias en el ducto representan una pérdida.

Toberas Kort. En este sistema la hélice de tornillo opera dentro de una tobera o anillo unido al fondo del casco. Las secciones longitudinales tienen forma aerodinámica y la longitud de la tobera es, en general, la mitad de su diámetro. A diferencia de la cubierta anular del sistema de bomba y chorro, la entrada de la tobera Kort es mucho mayor que la sección de la hélice, con lo cual el gasto de agua es mucho mayor que en hélices abiertas, y se logra mayor empuje. Debido a la aceleración del agua en el interior la tobera, la presión interna es menor y, por tanto, se

presenta un empuje hacia adelante en la tobera y en el casco. La mayor ventaja se obtiene con remolcadores que comienzan a moverse desde una posición de reposo. La velocidad de giro libre es en general, menor con la tobera que sin ella. En algunos remolcadores y barcos de río, la tobera completa se encuentra pivoteada y se emplea con un mecanismo de dirección muy eficiente.

Hélices de tándem y contrarrotativas [14].Pueden montarse dos o más hélices en una misma flecha, con lo cual se divide el factor de carga aumentada cuando el diámetro de una hélice está restringido. Las hélices que giran en la misma dirección se llaman hélices de tándem, y las que giran en direcciones opuestas, contrarrotativas. La energía de rotación de las hélices en tándem aumenta de una hélice a la siguiente. Las hélices contrarrotativas, están montadas en flechas coaxiales, que giran en sentidos contrarios, de tal forma que la hélice posterior recupera la energía de rotación de la que está adelante. La hélice posterior es de diámetro menor para ajustarse a las líneas de corriente y tiene un paso adecuado para lograr la absorción de potencia. Estas hélices se han utilizado durante años en torpedos, para evitar la rotación del cuerpo de los mismos. Hidrodinámicamente, las ventajas de las hélices contrarrotativas son un rendimiento propulsivo mayor, mejores características de vibración y una frecuencia mayor de las aspas. Las desventajas, son, principalmente, el sistema complicado de engranajes, las flechas coaxiales y los problemas de sellado.

Hélices con hipercavitación. Cuando la parte posterior de una hélice presenta cavitación en toda su área, al aumentar las rpm no se reduce la presión en la parte posterior, pero la de la cara continúa aumentando y hace que el empuje total crezca con una relación menor que antes que empezara la cavitación. La ventaja de las hélices con cavitación total es la ausencia de erosión en la parte posterior y una vibración menor. Aunque

las características de tales hélices se han determinado por medio de pruebas y tanteos, se han utilizado bastante en lanchas motoras de carreras. El diseño de la sección de la pala debe asegurar una separación limpia del flujo en los bordes de entrada y salida, y proporcionar relaciones de empuje-resistencia de alta eficiencia. Introduciendo aire en la parte posterior de las aspas, *hélices ventiladas*, se logra la cavitación completa con velocidades menores.

Hélices parcialmente sumergidas. La resistencia presentada por las hélices de vehículos de alta velocida, como lanchas planeadoras, hidroplanos y naves de efecto superficie, condujo al desarrollo de las hélices parcialmente sumergidas. Aunque todavía faltan por resolver muchos problemas de vibración y resistencia, debido a las cargas cíclicas sobre las aspas al entrar y salir del agua, se ha demostrado que los rendimientos, cuando la hélice está parcialmente sumergida, son semejantes a los de la operación con la hélice totalmente sumergida y sin cavitación. Los rendimientos de estas hélices pueden considerarse dentro de un amplio rango de posibilidades.

Motores de gasolina fuera de borda. Los motores fuera de borda de 1 a $100\ bHP$ combinan la dirección y la propulsión y son muy populares por su uso en lanchas pequeñas de recreo. Las unidades de alta potencia llegan a $40\ o\ 400\ bHP$ para motores Diesel de uso comercial.

1.1.6. La turbina de vapor

Cabe preguntarse por las causas que contribuyeron a que la máquina de vapor de cilindro triunfase en principio sobre la turbina, a pesar de ser ésta históricamente anterior. La explicación se encuentra en las condiciones técnicas de construcción. Una turbina de vapor exige ajustar sus diversos órganos a la décima del milímetro mientras que Watt

estimaba que podría considerarse satisfecho si el ajuste entre el cilindro y el émbolo, de su máquina de vapor, llegaba a tener un juego no superior a un milímetro [38].

El ingeniero sueco Gustaf de Laval (1845-1913) creó como subproducto de su desnatador centrífugo, por la necesidad de encontrar un accionamiento de gran velocidad para el mismo, la turbina de vapor de acción, de un solo escalonamiento, llamada turbina de Laval. Esta turbina estuvo constituida por un disco único, cuyo diámetro fue de $15\,cm$ y que giraba a la fantástica velocidad de $26.000\,rpm$. El vapor proyectado sobre sus álabes por una serie de toberas fijas, alrededor de la rueda, llegaba completamente expansionado. Dada la velocidad de la turbina, su eje vibraba y fue preciso construirlo flexible, para permitir que llegase sin rotura a su velocidad crítica.

En 1884, el ingeniero inglés Charles Parsons (1854-1931) quien buscaba un motor marino apropiado, desarrolló una turbina de vapor de reacción de varios escalonamientos. La primera turbina de reacción que giraba a razón de $18.000\,rpm$ y desarrollaba una potencia superior a $5\,CV$, dividía la expansión del vapor en varias fases, obteniendo mayor eficacia que la máquina de vapor. En lo esencial la turbina constaba de un rotor, compuesto de una serie de discos sobre un eje común, los cuales disponían de paletas que alternaban en toda su superficie. A través de éstas escapaba el vapor a la vez que movía el disco. El vapor empujaba el disco siguiente, como resultado de su impacto sobre las paletas de un anillo que se ajustaba al disco. De esta forma los rotores se movían alternativamente por acción y reacción. El éxito de la combinación de los dos principios se evidenció en 1891, cuando Parsons construyó una turbina de accionamiento de un generador eléctrico.

Con ocasión de la revista naval británica realizada en Spithead en 1897, un barco de $30\,m$ de eslora cruzó entre los buques de guerra y sus asombradas tripulaciones, levantando tanta espuma y a una velocidad tan increíble ($35\,nudos$) que los entendidos comprendieron inmediatamente la trascendencia del acontecimiento. Era el *Turbinia* de la figura 1.10., barco experimental impulsado, con su nombre revela, por una turbina de vapor [15].

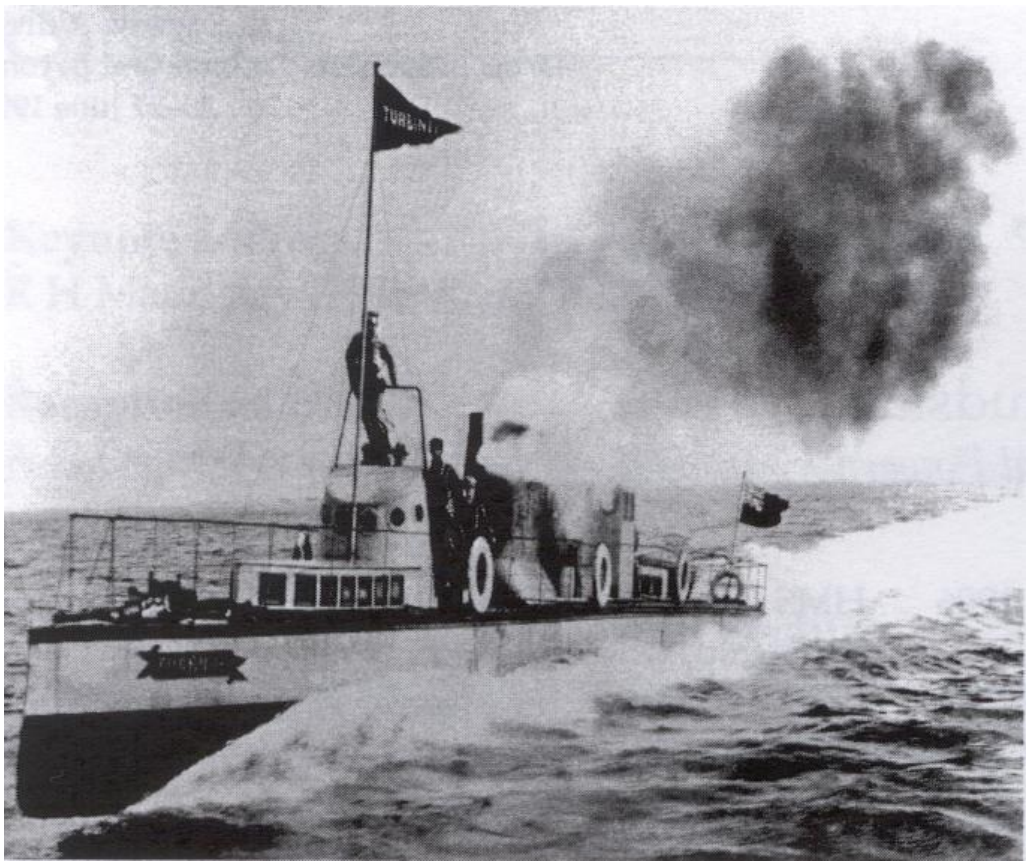


Figura 1.10. Buque "Turbinia". Febrero a mayo de 1897

El ingeniero de minas francés Râteau (1863-1930), centró sus estudios en los fluidos, considerando a estos como fuerzas motrices, y sobre las máquinas en las que actúan, a las que denominó turbomáquinas.

En la exposición universal de 1900 en París, presentó una turbina de vapor de varias etapas, permitiendo, de esta manera, una disminución de la velocidad de la turbina sin pérdida de potencia.

También por entonces el estadounidense Curtis, que en 1895 obtuvo una patente de una turbina que combinaba ruedas de álabes fijos y móviles, proyectó construir una turbina de $5000\,kW$. En la turbina de Curtis, el vapor, una vez accionados los álabes móviles, fluía sobre unas paletas fijas llamadas directrices en las que modificaba su dirección antes de incidir sobre la siguiente corona de álabes móviles [52].

Entre 1903 y 1905 el transbordador *Queen* y los buques *Victorian*, *Virginian* y *Cameria*, fueron equipados con turbinas de vapor de $7.500, 12.000\ y\ 21.000\,CV$, que abrieron la generación de los buques impulsados por turbinas.

1.1.7. El motor alternativo de combustión interna

En los motores de pistón de vacío la carrera motriz del émbolo se debía a la disminución de la presión de la carga por debajo de la presión atmosférica como consecuencia de su enfriamiento.

En 1854, los italianos E. Bassanti y C.F. Matteucci, solicitaron patente en Inglaterra sobre el método de *Obtención de potencia motriz mediante explosión de gases*. Se basaron en un pistón de vacío y cremallera que engranaba en el descenso. El motor estaba compuesto de dos pistones y dos cilindros en paralelo en tiempos opuestos. Se alimentaba de hidrógeno produciéndose el encendido por chispa, que daba lugar a la proyección del pistón hacia arriba. La gravedad y la depresión causada por la expansión provocaban el descenso del pistón.

La muerte de Bassanti interrumpió el proyecto de fabricación. Su idea consiguieron explotarla Nickolaus A. Otto y E. Langen, quienes introdujeron un volante de inercia, para ejecutar la carrera ascendente e introducir una nueva carga. Este motor proporcionaba $1/2\ CV\ a\ 80\ rpm$; se llegaron a fabricar unos 5000 y dominó el mercado hasta la aparición del motor Otto de cuatro tiempos [15].

El 16 de enero de 1862, Alphonse Beau de Rochas (1815-1893), ingeniero francés, registró una patente sobre el ciclo que regulaba las condiciones de la transformación en energía mecánica de la energía térmica, obtenida de la inflamación de una mezcla aire-gas en cámara cerrada.

En 1876, Nickolaus Otto (1832-1891) construyó el primer motor de gran velocidad de régimen que funcionó según el ciclo de Rochas. El llamado *Silent Otto* se construyó en la Gasmotorenfabrik Deutz AG de Köln, e iba provisto de un regulador centrífugo para limitar la velocidad máxima y una distribución por válvulas laterales. Constaba de un solo cilindro montado horizontalmente con un diámetro de $161\ mm$ y una carrera de $300\ mm$. La presión al fin de la compresión era de $2{,}36\ atm$, la potencia efectiva de $3\ CV$, el régimen de velocidad $185\ rpm$ y consumía gas ($0'95\ m3\ N/CV\ h$) [61].

En la memoria *Teoría y construcción de un motor térmico racional, destinado a sustituir a la máquina de vapor y a los demás motores conocidos actualmente* (1893), Diesel concentró en noventa y seis páginas sus estudios y trabajos. Patentó su primer motor en 1892, pero cuando trató de echarlo a andar, explotó.

En 1897, fabricó un motor práctico de un cilindro capaz de desarrollar $25\,CV$. En este motor, el combustible experimentaba un autoencendido, prescindiendo de instalación eléctrica y no necesitando carburador.

Era un motor de cuatro tiempos. En el primer tiempo, de desplazamiento descendente del émbolo, sólo absorbía aire fresco. En el segundo, ascendente del émbolo, comprimía dicho aire hasta temperaturas comprendidas entre $700\,y\,900\,℃$. Se inyectaba entonces el combustible altamente inflamable que se encendía inmediatamente, empujando el émbolo hacia abajo, en su tercer tiempo, y realizándose un trabajo motriz. En el cuarto tiempo, el émbolo ascendía expulsando los gases [28].

El primer motor comercial Diesel entró en servicio un año después en San Luis (Missouri). Se trató de un motor de dos cilindros y $60\,CV$.

La idea de realizar el proceso de Beau de Rochas en dos tiempos permite aumentar la potencia por cilindrada; en la consecución de dicho objetivo cabe citar los trabajos de Robson, Clerk, Benz y Day.

El monje escocés Robert Stirling (1790-1878), construyó en 1816, un motor de aire caliente con ignición externa, que funcionó muy bien. Su diseño sirvió a diversos constructores de motores a partir de 1818 [33].

El funcionamiento del motor diesel era tan perfecto que, pasados unos cuantos años, pudo experimentarse también en barcos. En 1910 se instaló en el buque cisterna *Vulkanus,* que medía $60\,m$ de eslora, un motor diesel con seis cilindros que desarrollaba $50\,HP$. Se trataba de la primera prueba de un motor de este tipo aplicado a la navegación; no obstante cuando el barco fue desguazado en 1931, después de veinte años de servicio en los

trópicos, el motor estaba indudablemente viejo, pero funcionaba sin dificultad.

1.1.8. La turbina de gas

La turbina de gas con respecto a los motores de combustión interna ha sido lo que las turbinas de vapor con respecto a las máquinas alternativas de vapor.

Ya Leonardo da Vinci realizó diseños con este motor para diversas aplicaciones y, en 1791, el inglés John Barber ideó una turbina para ser accionada por los productos de la combustión, que no llegaría a realizar, aunque sí a patentar.

Fue el constructor británico Whitte, el que en 1928 patenta y en 1937 prueba el primer turborreactor de aviación, que fue impulsado por reacción. Estaba formado por compresor, cámara de combustión en la que quemaba keroseno, turbina de accionamiento del compresor y tobera de salida de los gases.

Una turbina de gas más evolucionada, desarrollada inicialmente por Rolls Royce para aviones comerciales, fue adaptada al principio de los años setenta del siglo pasado para la marina de guerra británica. En ella, el compresor está dividido en dos partes. La de BP, a la izquierda, con nueve etapas, está movida por la rueda de MP de la turbina. Y la de AP, de seis etapas, lo está por la rueda de AP de la turbina. La turbina o rueda de BP, separada de las otras, mueve la hélice [18].

Una turbina de General Electric, de $27.200\,CV$, fue ensayada a partir de 1967 en uno de los ejes del transporte estadounidense *Adm. Wm W Callaghan*, que fue, probablemente, el primer barco mercante construido

para ser propulsado por esta clase de máquina. Tiene ésta dos ejes, con un compresor de 16 etapas con paletas fijas orientables y una presión de descarga de $17\,bar$. Como la temperatura máxima es de $1.180\,℃$, las paletas de la turbina de AP están refrigeradas. Su consumo es de $175\,g/CV/h$. Pero lo interesante en el presente contexto es que, habiendo tenido resultados muy satisfactorios, fue escogida, ya en 1977, por la marina norteamericana para más de 150 barcos de guerra [73].

La primera turbina de gas fue instalada en un barco que llevaba motores. Era un barco pequeño. En los grandes, que estaban propulsados por vapor, se añadió a esa planta la turbina de gas para navegar a mayor velocidad. Para lo que es particularmente apropiada, por ponerse muy rápidamente en servicio $(90\,s$, desde la máquina parada y fría hasta estar a plena potencia, en la LM 2500) y ser fácilmente manejable a distancia.

Una turbina de vapor, que en un momento dado puede reforzarse con una de gas, es una instalación COSAG; y si hay un motor Diesel para marcha de crucero, pero sólo la turbina de gas está funcionando a *Toda Fuerza*, se trata de una CODOG [18].

A pesar de que en relativamente poco tiempo su consumo específico había disminuido a poco más de un tercio del que tenían las primeras turbinas, seguían quemando más combustible que los motores Diesel.

1.1.9. La propulsión eléctrica

La propulsión eléctrica es un área emergente a la que concurren diferentes áreas de conocimiento. Las soluciones más satisfactorias para buques propulsados eléctricamente se hallarán en escenarios en los que la arquitectura naval, la ingeniería hidrodinámica y de propulsión y, por

último, la ingeniería eléctrica, cooperen bajo consideraciones constructivas, operacionales y económicas. El diseño y compromisos optimizados habrán de ser alcanzados con un lenguaje conceptual común y con un entendimiento mutuo de las distintas materias.

El concepto de propulsión eléctrica no es nuevo, ya que la idea se originó hace más de 100 años. Sin embargo, con la posibilidad de controlar los motores eléctricos con velocidad variable dentro de un amplio rango de potencias, todo ello con compacidad, fiabilidad y costo competitivo, el uso de la propulsión eléctrica se extendió a nuevas áreas de aplicación durante los años 80 y 90 del siglo XX.

Actualmente, la propulsión eléctrica es aplicada, principalmente, en los siguientes tipos de buque: cruceros, ferrys, cableros, instaladores de tubos submarinos, buques perforadores con DP, buques de asistencia de instalaciones de producción flotantes amarradas, petroleros lanzadera, rompehielos, buques de suministro y buques de guerra.

Posteriormente a las aplicaciones experimentales de la propulsión eléctrica alimentada por batería a finales del siglo IXX que tuvieron lugar en Rusia y Alemania, la primera generación de propulsión eléctrica fue puesta en uso en 1920, como resultado de la competencia existente al objeto de reducir el tiempo requerido por los buques de pasajeros para cruzar el Atlántico. El S/S *Normandie* era uno de los más renombrados. Los turbogeneradores de vapor proporcionaban la energía eléctrica necesaria para alimentar los motores eléctricos síncronos de $29\,MW$ en cada uno de los cuatro ejes de hélice [73].

Con la introducción de motores diesel más eficientes y favorables económicamente a mediados del siglo XX, la tecnología de las turbinas de

vapor y la propulsión eléctrica desaparecieron en gran medida de los buques de la marina mercante hasta 1980.

El desarrollo de los variadores eléctricos de velocidad, inicialmente con el rectificador AC/DC (usando tiristores o *Silicon Controlled Rectifier*-SCR) en 1970 y los convertidores AC/AC a inicios de 1980, posibilitó el desarrollo de la planta eléctrica basada en el sistema de propulsión eléctrica, el cual es típico para la propulsión eléctrica de segunda generación.

La propulsión POD fue introducida a principios de los 90 el siglo pasado, cuando el motor eléctrico es instalado directamente en el eje de una hélice de paso fijo, en un POD sumergido y con giro azimutal. Mientras que este concepto fue originalmente desarrollado para realzar el funcionamiento de los rompehielos, rápidamente se demostró que proporcionaba beneficios en la maniobrabilidad y en la eficiencia hidrodinámica. Después de la primera aplicación en un buque crucero, el M/S *Elation*, las ventajas fueron tan convincentes que la propulsión POD casi se convirtió en un elemento estándar en los nuevos buques cruceros.

1.1.10. Los buques atómicos

En 1938 el alemán Otto Hahn logró por vez primera, mediante un bombardeo de neutrones, escindir el núcleo del átomo de uranio y liberar la energía atómica. Se abría así una nueva etapa que terminaría revolucionando, por tercera vez (la turbina vapor y el motor de combustión interna son las otras dos) en menos de medio siglo, el sistema de propulsión de los barcos. Desde entonces continúa en aumento el número de reactores en los que se obtiene, para ser utilizada con fines pacíficos, la misma energía que desarrolla la bomba atómica [57].

Pero el futuro continúa siendo una incógnita, especialmente porque la propulsión atómica sólo es rentable en barcos de grandes dimensiones, que todavía no necesita la marina mercante. Incluso los mayores superpetroleros hasta ahora construidos, con más de $500.000\,Ton$ de capacidad de carga, necesitan menos de $50.000\,HP$. Precisamente a partir de este *límite de eficiencia* el reactor comienza a desarrollar todas sus posibilidades [36].



Figura 1.11. N/S Otto Hahn

Los primeros y más satisfactorios de los esfuerzos para desarrollar la potencia nuclear en la propulsión de barcos fueron realizados por la AEC y por la armada de Estados Unidos. La armada de Estados Unidos botó el USN *Nautilus* en el año 1954, seguido por alrededor de otros cien submarinos de operación nuclear y por cuatro barcos de operación de

superficie. También Inglaterra, Rusia y Francia, han puesto en operación submarinos nucleares [38].

En los barcos comerciales, las ventajas de la potencia nuclear están relacionadas con las altas velocidades de operación sobre rutas muy largas. La experiencia indica que un incremento en velocidad, por lo general, se traduce en un incremento sustancial en la carga, con lo que se obtiene un incremento en el factor carga del barco. En los barcos convencionales, la potencia requerida para lograr las altas velocidades es incrementada por la tercera potencia de la relación de velocidades. Esto significa el empleo de grandes motores y una mayor capacidad de almacenaje para combustible. Por otro lado, un barco nuclear puede operar en forma continua a la capacidad máxima de su casco sin sacrificar la carga. Esta ventaja es deseable, en especial para los rompehielos, los barcos de gran capacidad de carga y los de servicio de pasajeros que cubren grandes distancias. En 1962, los primeros esfuerzos de Estados Unidos en este sentido dieron por resultado el N. S*. Savannah* ($20000\ HP\ y\ 21\ nudos$) y el esfuerzo desarrollado por la República Federal Alemana dio por resultado el N. S*. Otto Hahn* ($10000\ HP$), realizando maniobras en la figura 1.11. Posterior a éstos ya no se han producido bases aceptables para mayores entregas de barcos de propulsión nuclear del tipo comercial. En Rusia el rompehielos *Lenin* ($44000\ HP$) fue el último en dejar el servicio [33].

1.1.11. Buques por encima del mar

Muy poco después de haberse experimentado con los primeros buques atómicos comenzaron a perfeccionarse los hidroplanos. Estas embarcaciones están provistas en su caso de aletas inclinadas que al marchar, por efecto de la reacción que el agua ejerce contra ellas, sostienen gran parte del peso del aparato. De este modo el buque se

eleva literalmente sobre la superficie, en la que sólo apoya las aletas, y alcanza una velocidad muy superior a la de los otros barcos.

En 1918 se estableció un record mundial de velocidad en el agua con un hidroplano al que se había adosado un motor de aviación. Sus constructores fueron el doctor Alexander Graham Bell, estadounidense, y el inventor canadiense Casey Baldwin [73].

Aunque se han construido hidroplanos que desplazan varios cientos de toneladas, hay aún mucho desacuerdo entre los ingenieros navales sobre cuál es el límite práctico de tamaño para estas embarcaciones. Se cree que el peso ideal máximo está entre 500 y 1.500 toneladas, por lo que resulta evidente que los hidroplanos no desplazarán los portaaviones ni los grandes transatlánticos. Se los usa con gran eficacia como transbordadores, buques de patrulla, lanchas de ataque y de defensa contra los submarinos, y para otras misiones en las que se requieren alta velocidad y tamaño moderado.

Otro tipo de embarcaciones, que realmente no surcan el agua sino que andan sobre ella, es el hovercraft, de origen británico y perfeccionado a mediados de los años sesenta. El hovercraft, que flota sobre una corriente regular de aire, se emplea en el transporte de pasajeros y ha sido adaptado para servir como transbordador de trenes y automóviles [73].

En la dilatada historia de la navegación se han registrado extraordinarios perfeccionamientos y transformaciones, como supone progresar desde la canoa excavada de un tronco hasta el buque atómico. Durante este tiempo el mundo ha ido creciendo y ensanchándose.

Claro que también los barcos se elevan en el aire por encima de las aguas. Los acuaplanos y las embarcaciones que se deslizan sobre un colchón de

aire transportan hombres y mercancías en menor tiempo del que se requería antes. Pero para las mercancías que han de transportarse en grandes cantidades y volúmenes sigue en vigor la ley natural según la cual cada tonelada de peso que se quiera transportar sobre las agitadas aguas habrá de serlo surcando éstas. Cada tonelada de carga desplazará constantemente hacia delante y hacia los lados una tonelada de agua. O, mejor dicho, bastante más de una tonelada, ya que habrá que añadir, proporcionalmente el peso del barco.

1.1.12. El propulsor magnetohidrodinámico

La fuerza que actúa sobre una partícula en movimiento, moviéndose con velocidad $\vec{v}$, debida a la acción de campos eléctricos y magnéticos combinados, se obtiene fácilmente por superposición.

$$\vec{F} = Q\left(\vec{E} + \vec{v}x\vec{B}\right)$$

Esta ecuación se conoce como la ecuación de la fuerza de Lorentz [41], y su empleo se requiere para la determinación de las órbitas del electrón en el magnetrón, las trayectorias del protón en el ciclotrón, de las características del fluido en el generador magnetohidrodinámico (MHD), ó, en general, en el movimiento de partículas cargadas en campos eléctricos y magnéticos combinados, figura 1.12.

La propulsión MHD está basada en la interacción entre el campo magnético producido por lo inductores alimentados en corriente continua y el campo eléctrico generado por una diferencia de potencial (tensión eléctrica o sea un voltaje) entre dos electrodos dentro del agua de mar.

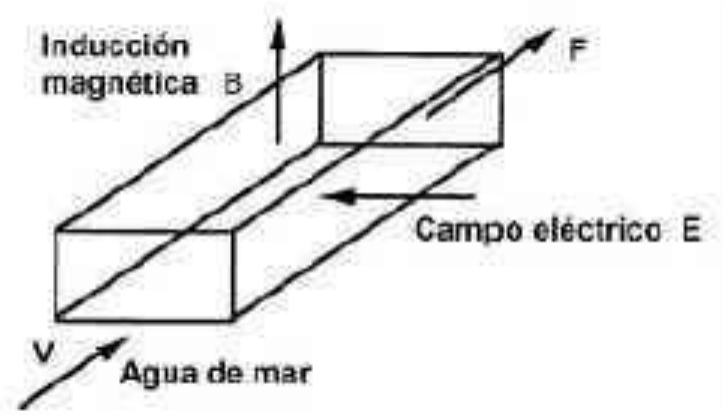
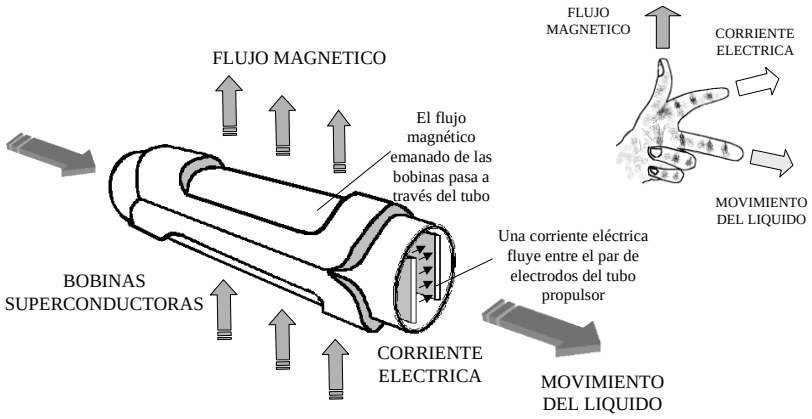


Figura 1.12. Esquema de los campos eléctrico y magnético actuando sobre el agua de mar

En lugar de una hélice ó paletas propulsoras, se usa un chorro de agua producido por un sistema de propulsión magnetohidrodinámico (MHD) [13]. La tecnología MHD está basada en la ley fundamental del electromagnetismo que nos dice que cuando un campo magnético y una corriente eléctrica se actúan sobre un fluido, la interacción repulsiva entre ambos, empuja al fluido en dirección perpendicular a ambos, al campo magnético y a la corriente eléctrica, figura 1.13. (Regla de la mano izquierda). Si construimos un dispositivo en el cual el conductor por el que circula la corriente es un fluido, por ejemplo, el agua de mar (*hidro*), se produce el movimiento (*dinámico*) del agua de mar, debido a la interacción del campo magnético (*magneto*) y a la corriente que circula por el agua. A este dispositivo le llamamos motor magnetohidrodinámico [43]. Los motores magnetohidrodinámicos clásicos trabajan con campos eléctricos y magnéticos constantes con el tiempo (corriente continua).



La propulsión magnetohidrodinamica y la" regla de la mano izquierda"

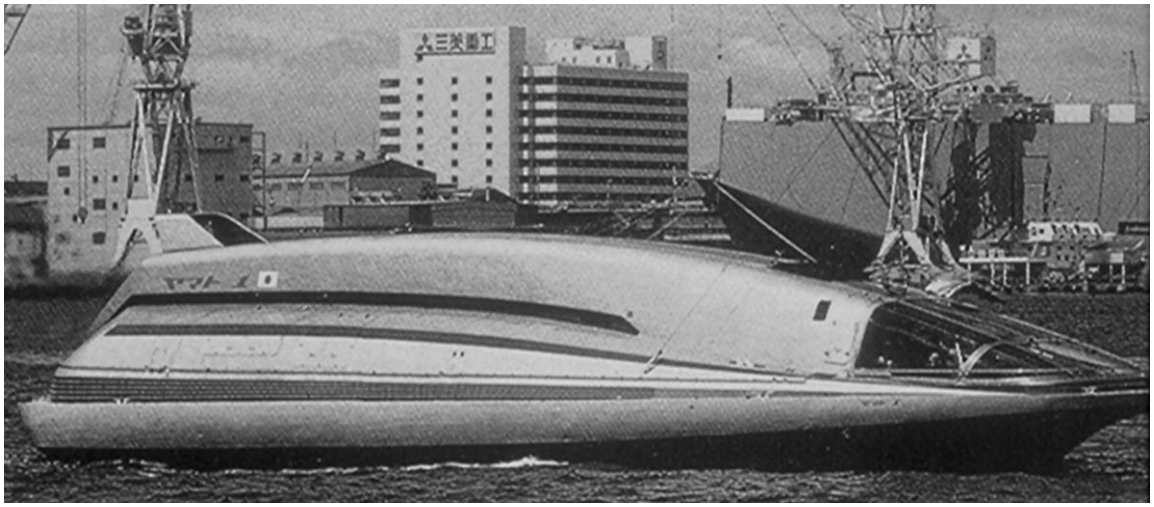
Figura 1.13. La propulsión magnetohidrodinámica y la regla de la mano izquierda"

El líquido es el agua de mar, quien conduce la electricidad debido a la sal que contiene poseyendo una conductividad eléctrica del orden de $0.22\ ohm \cdot m$. Dentro de cada propulsor el agua fluye por tubos, arreglados de tal forma como si fueran las toberas de un cohete. Los tubos se encuentran envueltos en su contorno por bobinas superconductoras hechas de una aleación especial (niobio y titanio) sobre un núcleo de cobre. Helio líquido puede ser usado como refrigerante para las bobinas a una temperatura de $-452.13\ °F$, solo unos pocos grados sobre el cero absoluto, manteniéndolas en un estado de superconductividad donde no casi no existe resistencia al flujo de la electricidad.

Los primeros estudios datan de los años 60 y tratan de la propulsión de los buques de superficie o de los submarinos. El desarrollo de la propulsión MHD se vio frenada por la necesidad de tener inducciones magnéticas importantes ($5\,Teslas$) dentro de grandes volúmenes ($centenares\,de\,m3$) para obtener un rendimiento interesante. El magnetismo de la tierra tiene influencia en el propulsor MHD, por lo que se requiere de un gran flujo magnético generado a fin de contrarrestar el mismo. Otra limitación es que la tecnología MHD para los buques no puede operar en áreas de grandes cantidades de agua dulce, puesto que no conduce tan bien la electricidad como el agua salada. Además el agua salada tiene un alto nivel de corrosión en los electrodos.

Entre las ventajas de estos propulsores podemos indicar las siguientes: capacitarán a los buques y submarinos a viajar a altas velocidades ya que no se tiene el problema de la cavitación. La segunda ventaja de la propulsión MHD es el silencio; y la tercera es que requieren un bajo nivel de mantenimiento comparado con los sistemas de propulsión convencionales. Además, no se necesita de un enlace entre la unidad propulsora y la hélice (eje). De esta manera se pueden experimentar con nuevos diseños de buques, entre ellos submarinos de carga con formas de avión comercial ó trasatlánticos con la forma de un catamarán.

El Y*amato* I, figura 1.14., es el primer barco propulsado por magnetohidrodinámica, a través de superconductores eléctricos. Actualmente hay varios estudios en marcha debido al progreso de la superconductividad en el mundo.



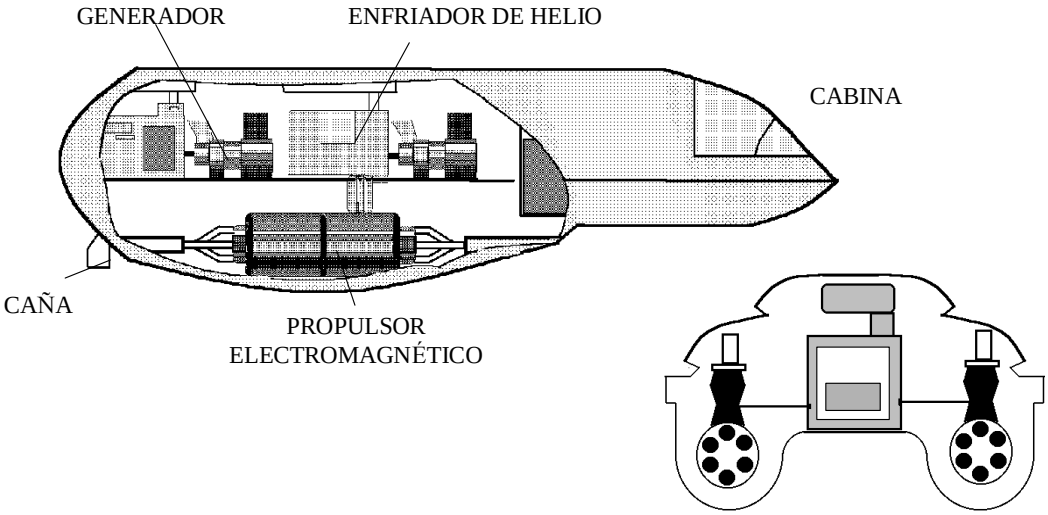


Figura 1.14. Fotografía y esquema de la embarcación "Yamato I"

También se está trabajando en la actualidad en los motores de inducción magnetohidrodinámicos IMHD. El principio de funcionamiento de los IMHD se basa en la corriente alterna inducida en el secundario o rotor al igual que en las jaulas de ardilla. Así se evita el contacto eléctrico físico del rotor con su fuente de energía. Según la ley de Lenz, la dirección de las corrientes de Foucault (corrientes del secundario) se tiene que oponer al cambio que las produce. Por esta razón, las corrientes de Foucault tienen que producir polos magnéticos efectivos en el secundario, que son atraídos por los polos creados por el inductor del motor lineal, lo que ocasiona una fuerza de arrastre sobre el fluido. En la propulsión por inducción (IMHD), los devanados inductores alimentados por las corrientes de alterna polifásicas generan una inducción magnética senoidal deslizante. El inducido puede ser al agua de mar, por donde las corrientes se cierran e interaccionan con el campo inductor y desarrollan una fuerza que "bombea" el agua hacia atrás. El motor lineal de inducción que impulsa el fluido (IMHD) es complicado ya que la velocidad no es constante, y hay pérdidas adicionales debidas a la viscosidad del fluido u otros factores todavía desconocidos. A pesar de las dificultades tecnológicas de implementación, las ventajas de aplicación justifican los esfuerzos realizados para desarrollar esta tecnología. La ventaja principal del sistema IMHD es que no necesita electrodos como el MHD, y este hecho evita problemas de corrosión y de electrólisis que afectan a los MHD. También es de esperar una caída de tensión menor al no existir potenciales de electrodo y ánodo y cátodo.

La IMHD tiene en su contra las dificultades de la realización de cables superconductores para el transporte de corrientes alternas superiores al kA y el elevado valor de las inductancias de los inductores, lo que comporta serios inconvenientes para la fuente de alimentación, lo que al ser este imán superconductor altamente inductivo, hace que a frecuencias

elevadas sea necesario tomar mucha corriente, pero que ésta no es utilizada en su totalidad, no logrando entonces que el circuito pueda utilizar a pleno esa corriente para generar el intenso campo magnético necesario y así sacar provecho del sistema IMHD. Para colmo la corriente necesaria en la vena líquida, aconseja trabajar con frecuencias elevadas.

1.1.13. Vehículo subacuático autónomo (AUV)

Estos vehículos, a veces llamados Unmanned Underwater, son dispositivos accionados por baterías (ión del litio, polímero del litio, hidruro del metal del níquel etc.) o células de combustible y pueden funcionar en aguas de profundidad hasta 6000 metros. Los avances en tecnología de los sistemas de la propulsión y de la fuente de energía dan éstos robóticos submarinos resistencia extendida en tiempo y distancia. Los AUVs pueden navegar dentro de una red de faros acústicos; esto se conoce como línea baja larga (LBL) navegación. Cuando está funcionando totalmente autónomo, el AUV emergerá y tomará su propio arreglo del GPS.

El primer AUVs fue desarrollado en el Instituto de Tecnología de Massachusetts en los años 70. Uno de éstos está en la exhibición en la galería náutica MIT. Al mismo tiempo, AUVs también fue desarrollado en Unión Soviética. En usos militares, los AUVs también se conocen como vehículos submarinos sin tripulación (UUVs).

El *planeador subacuático* es un tipo de vehículo subacuático autónomo (AUV) que utiliza cambios pequeños en su flotabilidad conjuntamente con las aletas, para convertir el movimiento vertical en horizontal y así poder propulsarse hacia adelante con el consumo de muy baja potencia [5].

El *Scarlet Knight*, figura 1.15., también conocido por Wilmer Ruperti [75] como RU27 es un pequeño robot de $59\,kg$ de peso y de $2{,}4\,m$ de largo

capaz de avanzar en el mar sin motor ni hélice propulsora, con la única energía de sus baterías. Para conseguirlo cambia su flotabilidad inundando una pequeña cámara, no más grande que un pequeño vaso de agua, lo cual hace que se hunda. Pero no se hunde a plomo ya que gracias a sus dos pequeñas aletas, mientras se hunde va avanzando hasta alcanzar unos $200\,m$ de profundidad. Explica Wilmer Ruperti que un pequeño pistón recupera el volumen de la cámara inundada lo cual produce una flotabilidad positiva que hace que el submarino emerja a la superficie mientras continúa avanzando igual que lo hizo al hundirse. En la cola un pequeño timón de dirección ayuda a mantener el rumbo deseado para avanzar en la dirección correcta. Ha sido capaz de surcar los más de $7.400\,km$ del océano Atlántico que separan Nueva Jersey (EE UU) y Baiona (Pontevedra) sin ningún tipo de motor, sólo con la energía de sus baterías de litio y la fuerza de las corrientes marinas. Tras un periplo de algo menos de ocho meses en las aguas del Atlántico, se ha convertido en el primer ingenio no tripulado que logra completar un viaje transoceánico.



Figura 1.15. Scarlet Knight; el submarino sin motor

Otra de las grandes ventajas que posee, derivada de su modo de propulsión, es que no genera ningún tipo de contaminación, lo que podría servir para desarrollar un nuevo sistema de transporte marítimo más respetuoso con el medio ambiente.

Este proyecto fue impulsado por los profesores Scout Glem, Oscar Schofield, Josh Kohut y los estudiantes de la Universidad de Rutgers (Nueva Jersey) [74]; de ahí viene la denominación de Scarlet Knight, el nombre de la mascota de este centro docente.

1.2. Antecedentes

Uno de los primeros intentos de lograr convertir un movimiento de rotación en movimiento lineal, es decir movimiento circular convertido en empuje, podemos encontrarlo en los trabajos realizados por Laszlo (1971) [50]. Su dispositivo estaba compuesto por varias masas rotando sobre un eje común, y un sistema que intentaba variar el radio de giro de ellas al pasar por un determinado sector; de esta manera se podría conseguir una fuerza centrífuga desbalanceada que propulsa en una dirección. Se encontró con el problema de no poder conseguir variar adecuadamente el radio de giro en un ángulo adecuado y esto le llevó a no conseguir un efecto realmente apreciable. Sin embargo, desde el punto de vista teórico proporcionó un camino interesante a seguir.

Otro sistema parecido fue presentado por Gaberson (1973) [34]. Consistía en un aparato con varias correderas que descansan sobre una base, y una masa vibratoria unida a cada corredera. La masa, operada por un motor que crea una oscilación sinusoidal, contrae e impulsa a la corredera en un ángulo determinado respecto a la base. Lo que consiguió con este dispositivo es una vibración que podía moverse algo en una dirección.

También se intentó bajar los pesos de la periferia a través de una guía, Estrade (1973) [31], pero ni lograba un ángulo óptimo para conseguir el empuje, y además se necesitaba una energía tan grande que el rendimiento resultaba bajísimo.

Posteriormente, Rupp (1980) [62], diseñó un dispositivo para la conversión del par en un momento de cizallamiento libre que resultaba tangencial al área sobre la que actuaba.

En general se puede decir que se ha intentado retraer o recoger las masas de la periferia hacia al centro por diferentes métodos, como por ejemplo, Schmitt (1986) [63], que utiliza un brazo hidráulico; Zachystal (1989) [72] o McMahon (1991) [58] que utilizan un segundo motor para realizar esta función. En todos los casos la energía que se necesita para conseguirlo es enorme y tampoco se pudiera conseguir un impulso observable.

El aparato que presenta Bronislavovich (1994) [9], funciona con varios pesos situados en un cono con unas masas más alejadas del centro y otras más cercanas, trabajando por diferencias de diámetros.

Otra investigación interesante la llevó a cabo Kruk (1994) [48], el cual recoge los pesos desde la periferia hasta el centro con un solenoide, pero se sabe que de momento no hay solenoide que pueda realizar bien el proceso.

Todos estos sistemas utilizan mecanismos mecánicos para producir el impulso. Existen también algunos dispositivos que utilizan líquidos en lugar de masas mecánicas, como por ejemplo Le Mauff (1972) [53] y Colignon (1994) [19], pero que tienen el problema de no poder disipar la energía enorme que posee el líquido cuando está rotando a altas revoluciones.

Una mejor disipación de la energía la consigue Arntz (1982) [4], pero sobretodo Kolb y Vila (1999) [45] que introducen tanto mecanismos mecánicos como sistemas trabajando con líquidos que logran mejores rendimientos e impulsos observables.

Posteriormente se han realizado trabajos intentando mejorar estos sistemas anteriores, pero sin demasiado éxito. Un primer trabajo

presentado por Bird (2000) [8] intenta conseguir una propulsión centrífuga inercial a través de un sistema de masas en rotación pero con difícil control. En algunos casos, como por ejemplo Fiala (2009) [32], se trata de un peso que gira y se encuentra con dos anillos, uno de los cuales sirve para producir el impulso, pero el ángulo de actuación es demasiado grande con la consiguiente pérdida de eficiencia. En otro caso, Baskis y Mullinix (2001) [6], se transforma el movimiento circular en lineal utilizando una rotación demasiado lenta, lo que produce un impulso demasiado pequeño; y en otro, Gutsche (2008) [39], se tiene un disco montado concéntricamente con un eje central, pero que gira de forma que recibe de manera alternativa energía cinética rotacional, consiguiendo impulsos entre los que transcurre demasiado tiempo. Un primer intento de utilización de este concepto para la propulsión marina se realiza en el trabajo presentado por Cariou (2004) [12], el cual presenta un desarrollo teórico que pudiera funcionar pero que en la práctica no ha dado buenos resultados.

1.3. Objetivos y organización de este trabajo

El objetivo fundamental de este trabajo se centra en el diseño y construcción de un nuevo sistema de propulsión naval, basado en la conversión de un movimiento de rotación en un movimiento lineal.

En esta Tesis Doctoral se realiza el estudio y se construye un prototipo para el movimiento por tierra, y un prototipo naval, basados en la patente de Alfred Kolb y Jesús Vila. *Vorrichtung und verfahrem zum erseugen einer gerichteten kraft au seiner drehbewegung*. Germany patent number DE 19712542 A1, PCT/EP98/01755, WO 98/42982, 1999

Se realizan los diseños de ambos prototipos y se fabrican todas las piezas necesarias para su construcción, incluyendo las fuentes de alimentación eléctrica necesarias para mover los motores eléctricos que se utilizan. No se pretende comparar con los sistemas de propulsión existentes, sino que se presenta el desarrollo teórico de un sistema de propulsión diferente a los que hay en la actualidad, con los planos y la construcción, así como la comprobación experimental de su funcionamiento y sus bondades.

Después de una introducción teórica, desarrollada en el segundo capítulo, donde se exponen todas las magnitudes y conceptos que desde el punto de vista de la Física se necesitan para el desarrollo de este estudio, se introduce el concepto del impulso que se puede generar a través de un movimiento circular.

En el tercer capítulo, material y métodos, se puede observar un modelo de laboratorio, diseñado y construido, para comprobar el movimiento de una caja totalmente cerrada por planos horizontal e inclinado. Se presentan los planos de construcción, así como el estudio energético y dinámico que se necesita para entender su funcionamiento. Por último se expone el

método seguido para la resolución de las ecuaciones diferenciales que resultan. Este sistema servirá de base para el diseño y construcción de los modelos para propulsar un barco. Se incluyen los dos modelos de laboratorio, de diseño y construcción propia, con los que se consigue la propulsión de un barco. Se muestran los planos y fotografías de los mismos.

A continuación, cuarto capítulo, se presentan los resultados experimentales. Primero se muestran los correspondientes al modelo de laboratorio para moverse por planos horizontal e inclinado, comparando dichos resultados con los obtenidos de la resolución teórica. Terminando con los resultados correspondientes a los modelos de laboratorio para impulsar un barco.

En el capítulo quinto se discute un posible modelo a construir en el futuro, realizando el estudio teórico que soporta dicha posible construcción. También se presentan las posibles aplicaciones prácticas para la propulsión de vehículos de tierra, agua y aire.

La exposición de las conclusiones más importantes se detalla en el capítulo sexto de este trabajo.

Para concluir, se da un listado de la bibliografía citada en el texto y, finalmente, los trabajos derivados de esta Tesis Doctoral.

Capítulo 2. INTRODUCCIÓN TEÓRICA

2.1. Fuerza tangencial y fuerza centrípeta

En el movimiento curvilíneo, en general, la velocidad varía en módulo y en dirección. Por tanto, la aceleración $\vec{a}$ tiene dos componentes: la aceleración tangencial y la aceleración centrípeta o normal [2], [67], [11]. La aceleración tangencial está asociada con el cambio en el módulo de la velocidad, mientras que la aceleración centrípeta se debe al cambio en la dirección de la velocidad.

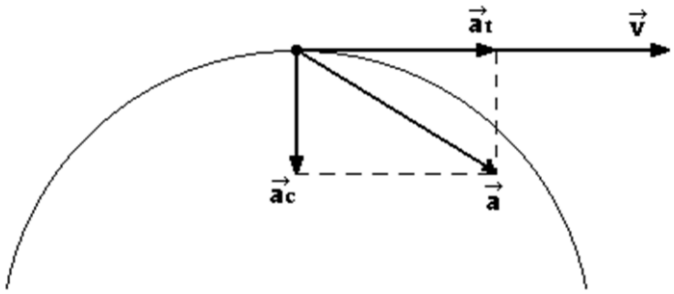


Figura 2.1. Vectores velocidad y aceleración

$$\vec{a} = \vec{a}_1 + \vec{a}_2$$

donde:

$$a_t = |\vec{a}_t| = \frac{d|\vec{v}|}{dt}$$

$$a_c = \frac{v^2}{\rho}$$

ρ: radio de curvatura

Para modificar la velocidad de un móvil se requiere la acción de una fuerza. Si se quiere modificar tanto el módulo como la dirección de la velocidad, es necesario aplicar una fuerza oblicua a la velocidad. La componente de la fuerza paralela a la velocidad se llama fuerza tangencial, por ser tangente a la trayectoria, y la componente perpendicular a la velocidad se llama fuerza centrípeta [42]. La fuerza tangencial modifica el módulo de la velocidad y la fuerza centrípeta modifica la dirección de la velocidad [51].

La fuerza aplicada debe tener la misma dirección que la aceleración $\vec{a}$ para que se cumpla la relación $\vec{F} = m\vec{a}$.

$$\vec{F} = m\vec{a} = m\vec{a}_t + m\vec{a}_c = \vec{F}_t + \vec{F}_c$$

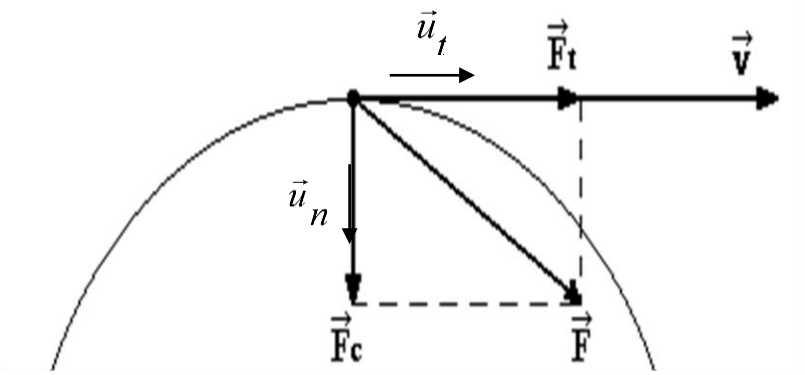


Figura 2.2. Vector fuerza y sus componentes

Por tanto, en un movimiento curvilíneo la fuerza aplicada es oblicua a la velocidad y tiene una componente tangencial y una centrípeta [3], [54], dadas por las expresiones:

$$\vec{F}_c = m\vec{a}_c \qquad \text{y} \qquad \vec{F}_t = m\vec{a}_t$$

donde:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{a}_t = \dfrac{d_v}{d_t}\ \vec{u}_t \\ \\ \vec{a}_c = \dfrac{v^2}{\rho}\ \vec{u}_n \end{array} \right\}$$

En el movimiento circular:

$$a_c = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R$$

donde R es el radio (distancia hasta el eje de giro) y ω la velocidad angular.

Por consiguiente, para producir un movimiento circular uniforme se requiere la aplicación de una fuerza perpendicular a la dirección de la velocidad y dirigida hacia el centro de la circunferencia descrita, es decir, la fuerza centrípeta [60].

La fuerza centrípeta no es una fuerza de género especial. Como cualquier otra fuerza, la fuerza centrípeta caracteriza la acción de un cuerpo dado sobre otros cuerpos [1]. Fuerza centrípeta puede ser cualquier fuerza que mantenga a un cuerpo en una trayectoria circular, por ejemplo la fuerza de fricción, la fuerza de elasticidad, la fuerza de atracción universal, etc.

La fuerza centrípeta puede producirse de diferentes maneras, según el caso considerado [54]. Veamos un ejemplo:

Suponiendo una piedra amarrada al extremo de un hilo elástico, manteniendo sujeto el otro extremo [37]. Si se le imprime un movimiento

de rotación, el hilo se estira hasta que su fuerza elástica es exactamente igual a la fuerza centrípeta requerida para producir el movimiento circular [59].

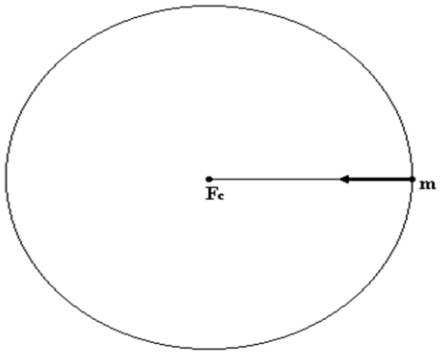


Figura 2.3. Piedra sujeta a un hilo realizando un movimiento circular

En algunos casos, la fuerza centrípeta es la equivalente de dos fuerzas que actúan sobre un cuerpo que se mueve en una circunferencia.

2.3. Fuerza centrífuga

Algunas veces, al explicar el movimiento circular, se utiliza el término fuerza centrífuga. Este término se deriva de dos palabras latinas, cuyo significado es *alejarse del centro*, lo que implica la existencia de una fuerza que tiende a alejar el cuerpo del centro del círculo. Nosotros estudiaremos la fuerza centrífuga como la fuerza de reacción de la fuerza centrípeta, y no tendremos en cuenta el concepto de fuerza de inercia como fuerza de inercia o ficticia, sólo consideraremos el concepto de fuerza centrífuga como fuerza real.

Al examinar el movimiento circular de los cuerpos, se presta atención solamente a la fuerza que actúa sobre un cuerpo en movimiento. Así, la fuerza de un muelle estirado (deformado) o bien un hilo, actúa sobre una bolita en movimiento circular.

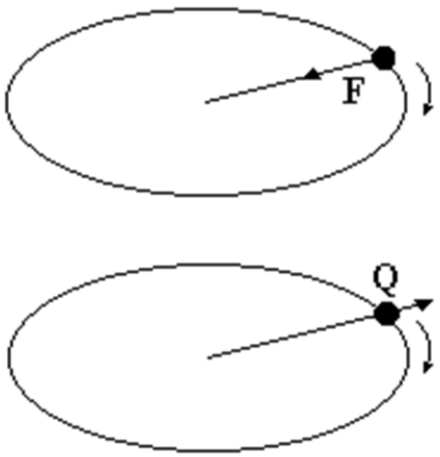


Figura 2.4. Fuerzas centrípeta y centrífuga

Pero según la tercera Ley de Newton, la acción del muelle (hilo) sobre la esfera producirá una reacción igual y opuesta a esta, la que es precisamente la acción de la esfera sobre el muelle [21], [65].

Así pues, durante el movimiento circular de la esfera, actúa sobre ella una fuerza: la fuerza centrípeta. Sobre el muelle (hilo) actúa otra fuerza igual pero de sentido opuesto a la primera, que es la llamada fuerza centrífuga [35], [64]. Sucede que las fuerzas centrífuga y centrípeta actúan sobre cuerpos diferentes y, por tanto, no pueden equilibrarse mutuamente. En la figura 2.4. se aclara esto: (F) es la fuerza centrípeta aplicada a la esfera; (Q) es la fuerza centrífuga aplicada al cordel y a través de éste sobre el centro de rotación de la bolita, por ejemplo en la mano.

Si un cuerpo ejerce una fuerza sobre otro, ambos le deformarán. Por consiguiente, en el caso del movimiento circular de la bolita, le deformará no solo el muelle (o el hilo), sino también la propia bolita [17].

Esto se refiere a todos los casos del movimiento circular de los cuerpos. Así, por ejemplo, al moverse un tranvía en una curva le deforman los rieles y estos presionan sobre la rueda. Estas, a su vez, le deforman y presionan sobre los rieles.

2.4. Vector unidireccional rotatorio

Al vector representativo del impulso que recibe un cuerpo, cuando una masa m realiza un movimiento de rotación, se le ha denominado *Vector Unidireccional Rotatorio* [44]. A este vector se le representa por $\vec{F}_d$ y será igual a:

$$\vec{F}_d = m\omega^2\vec{\rho}$$

donde m es la masa que está girando, ω la velocidad angular de rotación y $\vec{\rho}$ el vector que va desde el eje de giro hasta el punto donde está situada la masa m.

Se ha cambiado la nomenclatura para no utilizar el de la fuerza centrífuga que siempre da lugar a controversias sobre si es o no es una fuerza ficticia. El vector unidireccional rotatorio no es ficticio y es independiente del sistema de referencia utilizado.

Se ha observado que cuando existe una masa desbalanceada girando alrededor de un eje, se produce una vibración [47], [29]. La explicación es que debido al γ_d se produce un vector unidireccional rotatorio que va girando solidariamente con la masa y, por tanto, va actuando sobre el eje en todas las direcciones pero no a la vez. Para que se produzca el vector unidireccional rotatorio en una sola dirección y sentido, se deberá lograr que la masa descompensada solamente actúe en un recorrido pequeño de toda la circunferencia de rotación y desaparezca en otro no muy lejano, en un ángulo ideal de $12°$.

Un ejemplo ilustrativo de esta observación es el del *balde de agua* [24], [69]. Si a un balde (cubo) vacío y atado con un tubo largo se le hace girar

en un plano paralelo al suelo con una velocidad angular de rotación constante, tal y como se indica en la figura 2.5.

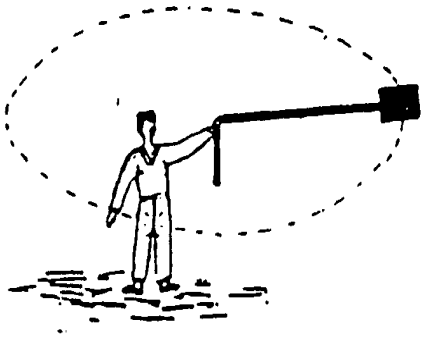
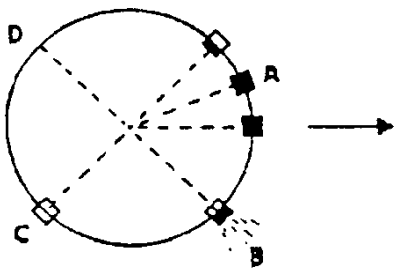


Figura 2.5. Cubo de agua junto con un tubo girando

Al llenar el balde de agua, se introduce un desbalance que se transmite al eje produciendo una vibración circular.



$$F_d = m\gamma_d = m\omega^2 R$$

Figura 2.6. Fuerza generada por la masa desbalanceada girando

Si con algún sistema (bomba conectada a través del tubo al balde) se introduce agua en una posición tal que en la posición A está lleno y, en la

posición B el fondo se abre, saliendo el agua. ¿Cuál es el efecto sobre la persona que hace girar el balde? El efecto es un impulso que lleva a la persona hacia adelante. La explicación hay que buscarla en la presencia $\vec{\gamma}_d$ durante el trayecto en que el balde está lleno.

En la posición A y durante el trayecto en el que el balde está lleno, se crea una fuerza $\vec{F}_d = m\,\vec{\gamma}_d$ que impulsa a todo el sistema. En B la masa de agua sale debido a $\vec{F}_d$ pero ya no actúa sobre todo el sistema. En el resto de las posiciones (C, D, etc.) no hay agua y no se produce impulso.

Capítulo 3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. Modelo de laboratorio

En nuestro trabajo nos basaremos en un modelo de laboratorio que viene representado en la figura 3.1., dentro de él hay una masa m situada casi en la periferia de un disco de radio R, el cual gira con una velocidad angular de rotación ω. Este disco está acoplado a un sistema pendular y éste, está situado dentro de una caja de aluminio de masa total igual a M. Mediante dicho sistema se consigue, por una parte, que la masa m actué sobre todo el sistema solo en un ángulo; y por otra, acumula energía sobre un péndulo que luego ayudará también en el impulso conseguido [70].

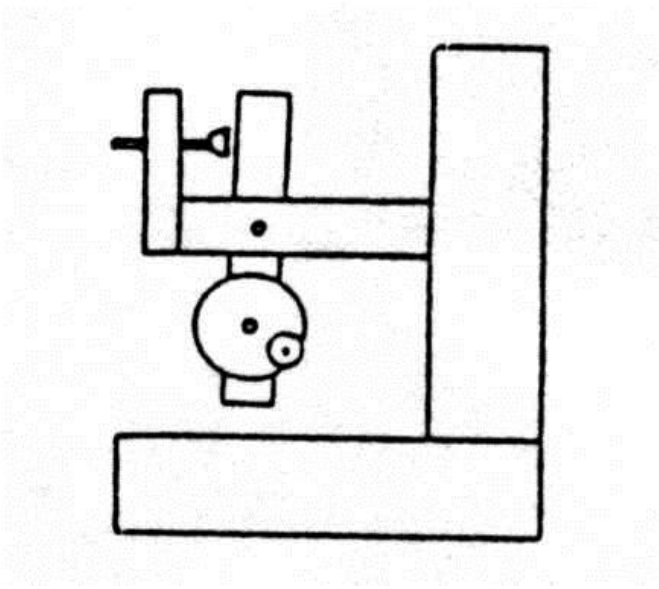
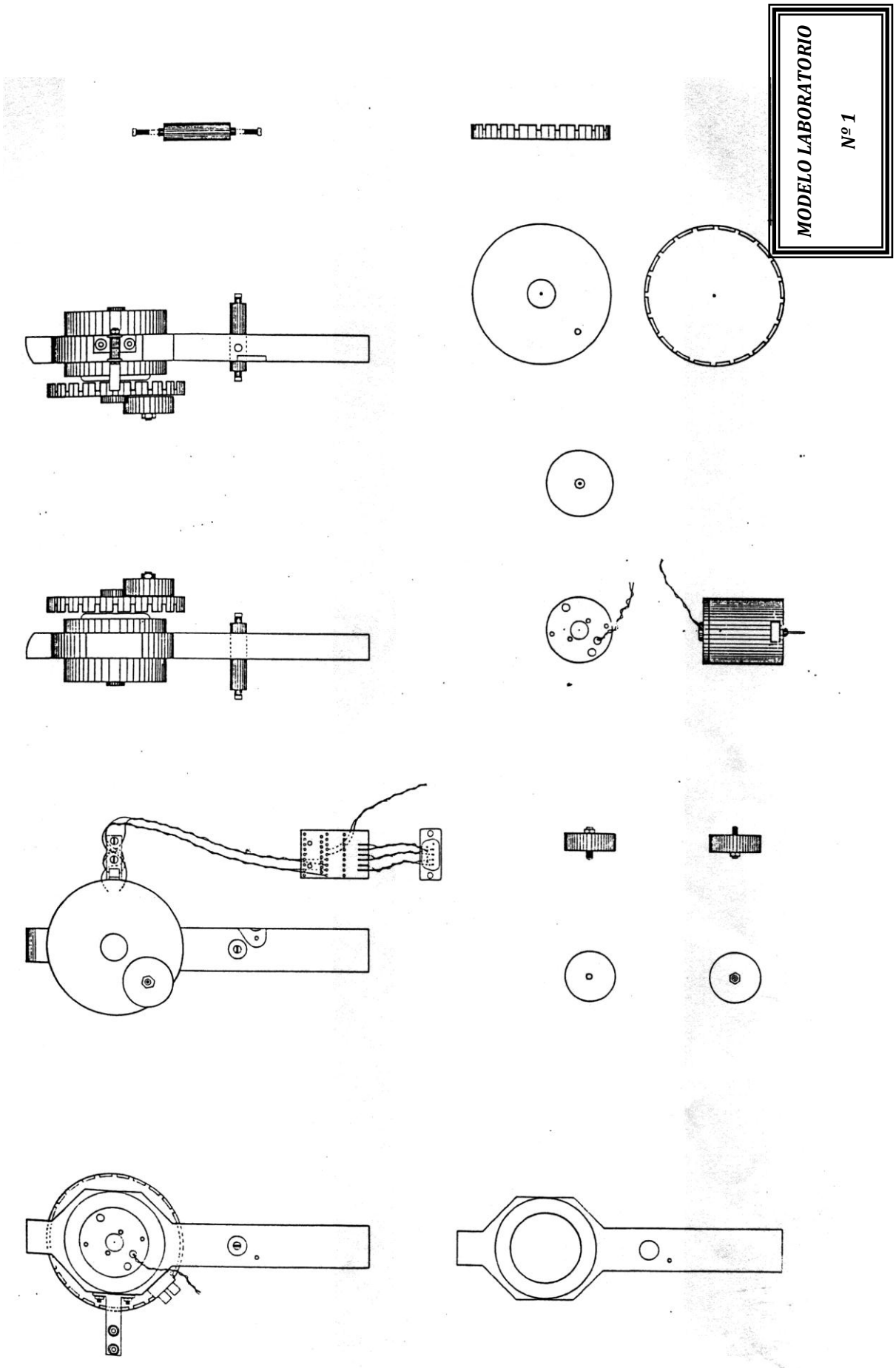


Figura 3.1. Esquema de modelo de laboratorio

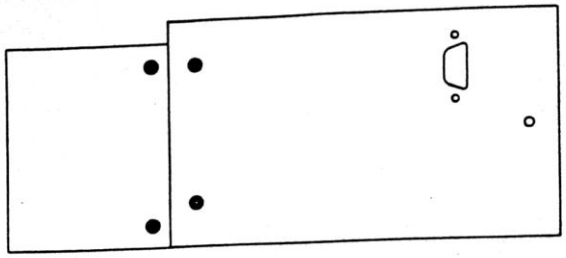
La caja está totalmente cerrada y no posee ni ruedas ni tubos de escape.

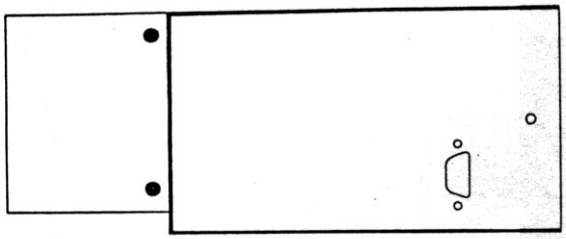
Se diseña y construye un modelo de laboratorio. Los planos correspondientes a la construcción del modelo son los siguientes:

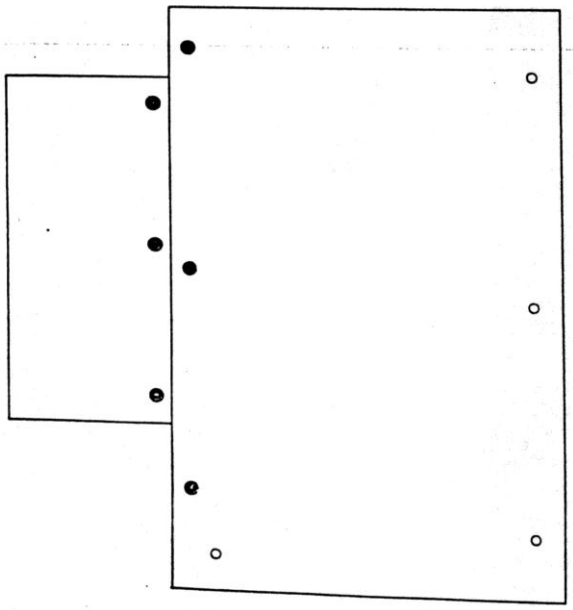

MODELO LABORATORIO
Nº 1

MODELO LABORATORIO

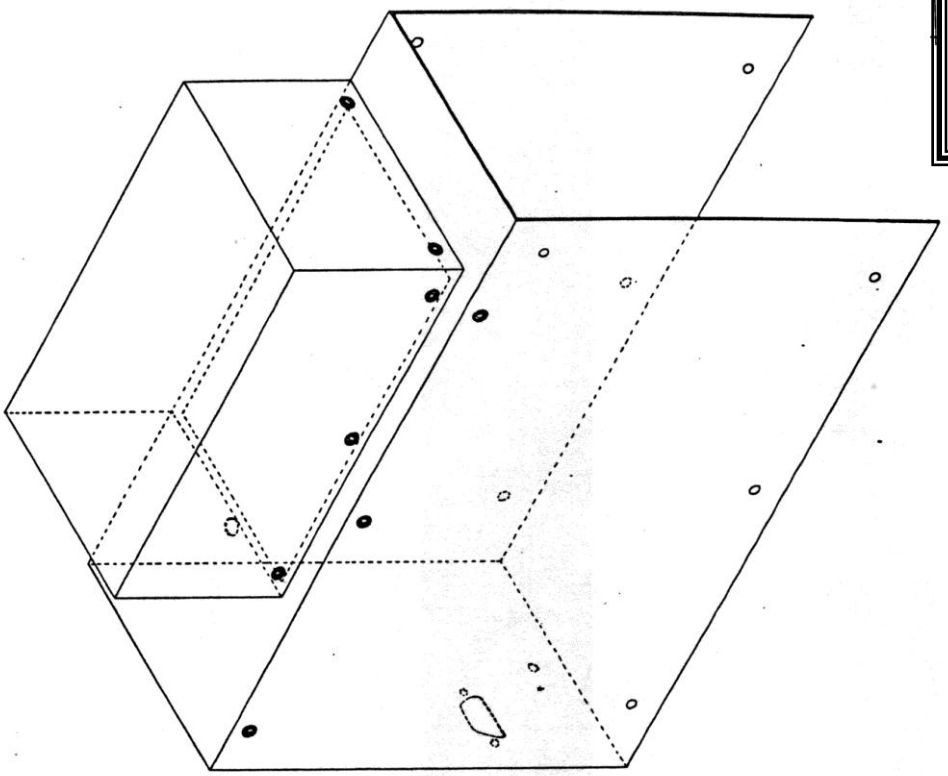
Nº 2

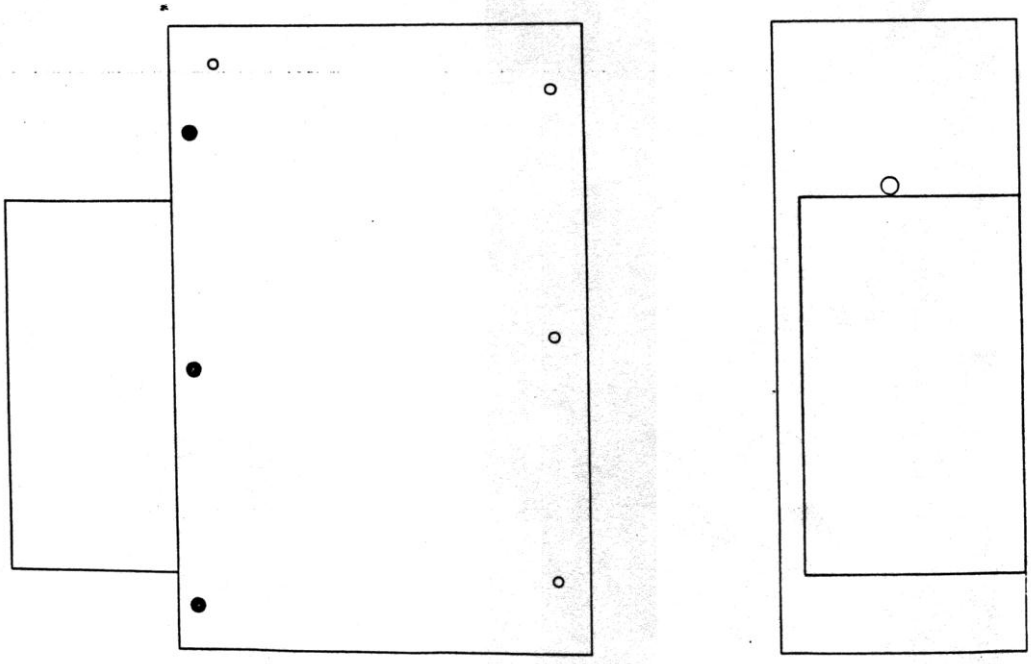




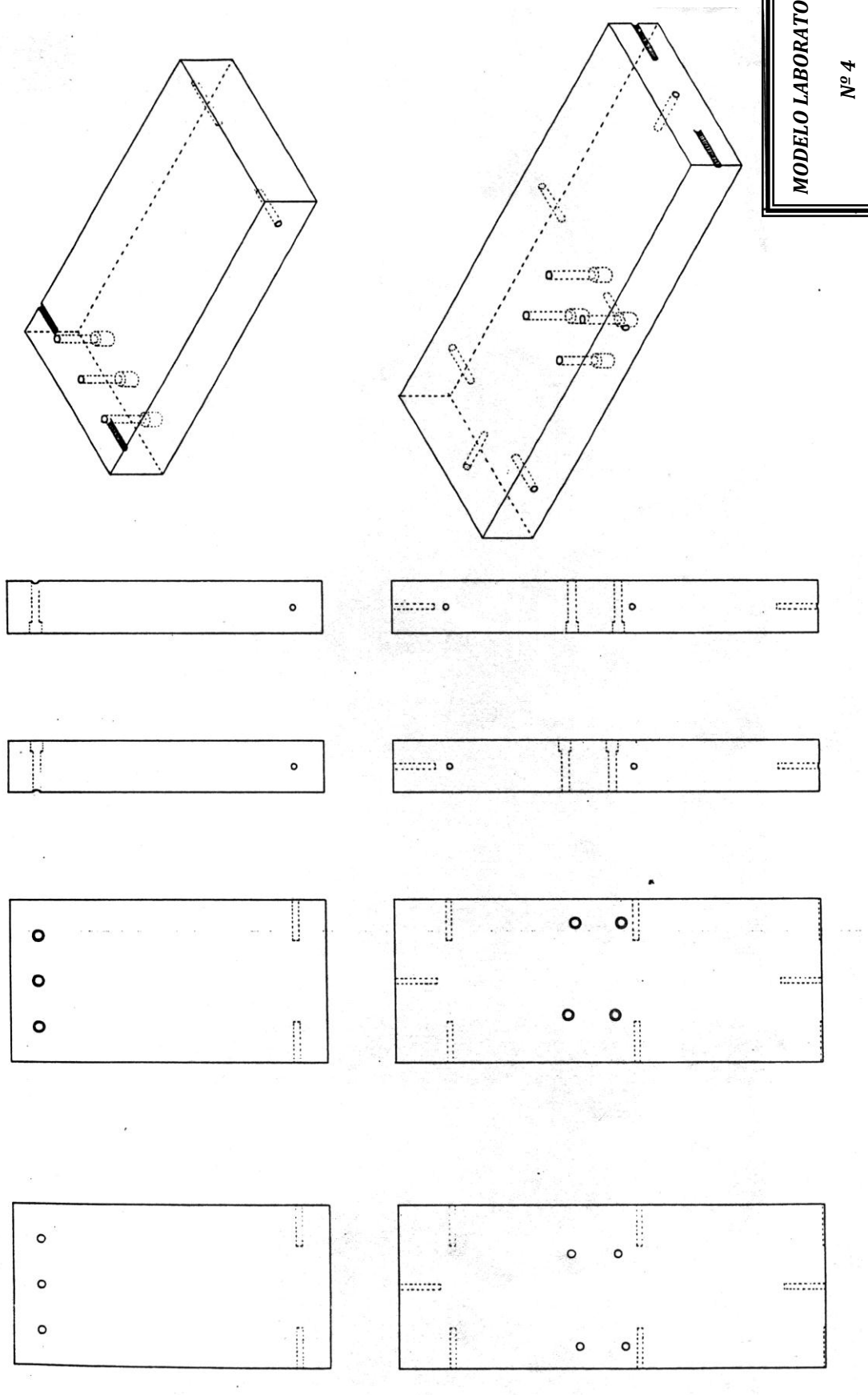


MODELO LABORATORIO Nº 3



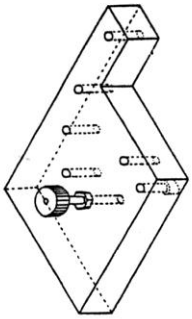


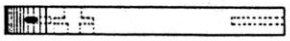
MODELO LABORATORIO Nº 4

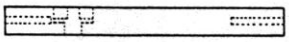


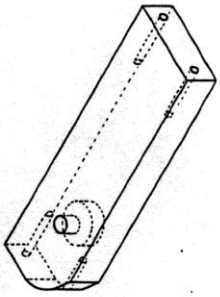
MODELO LABORATORIO

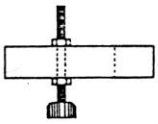
Nº 5

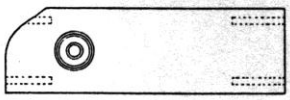


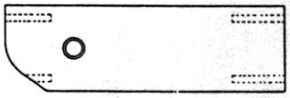




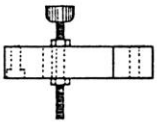


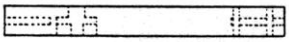


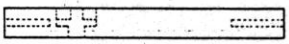


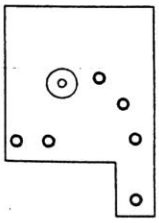


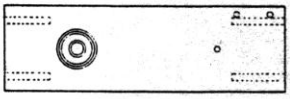


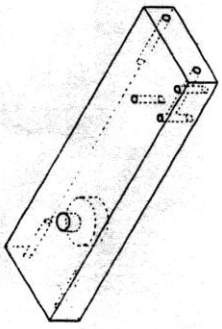


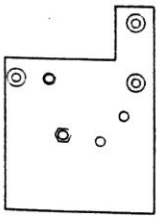


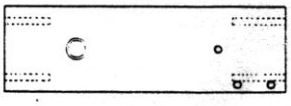














3.2. Estudio energético

El sistema pendular pasa por las posiciones indicadas hasta lograr el arranque [71]. En el arranque pasa por las posiciones $1, 2\, y\, 3$ de la figura 3.2., a partir de esta posición el péndulo se despega del freno cinético y alcanzando en la posición 5 el máximo desplazamiento angular. Después va pasando por otras posiciones hasta llegar a la $7\, y\, 8$, posiciones entre las que se produce el choque de la barra con el freno cinético dando lugar al avance; después se pasa a la 9, figura 3.3., y se vuelve a la posición 4 comenzando un nuevo ciclo, y así sucesivamente.

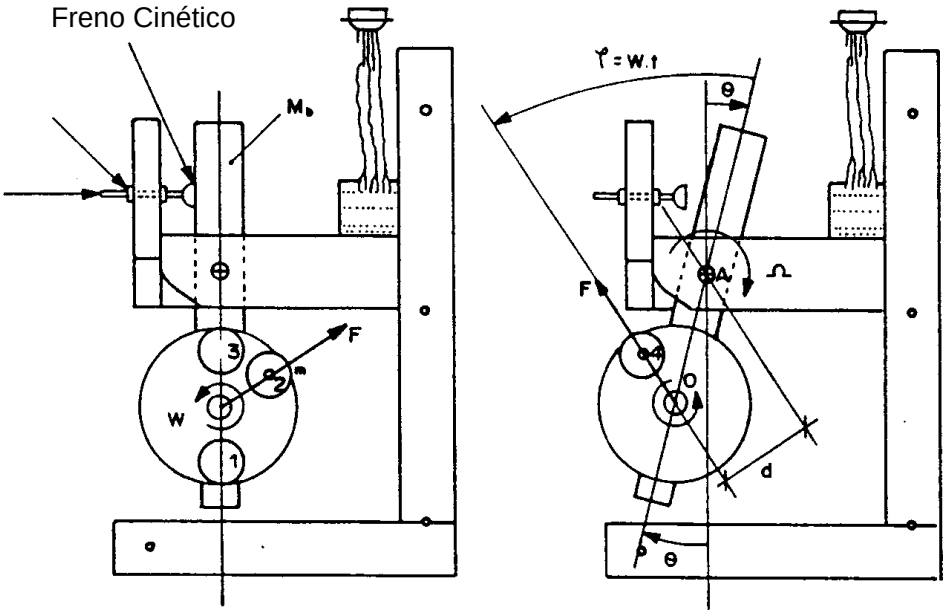


Figura 3.2. Algunas posiciones por las que va pasando el sistema pendular

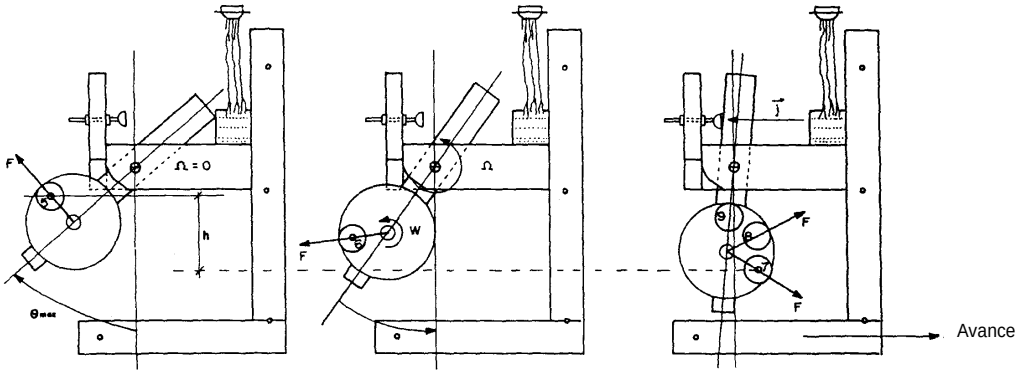


Figura 3.3. Otras posiciones hasta completar una vuelta completa

Se toma una posición cualquiera, por ejemplo la 4, y se examina qué es lo que ocurre.

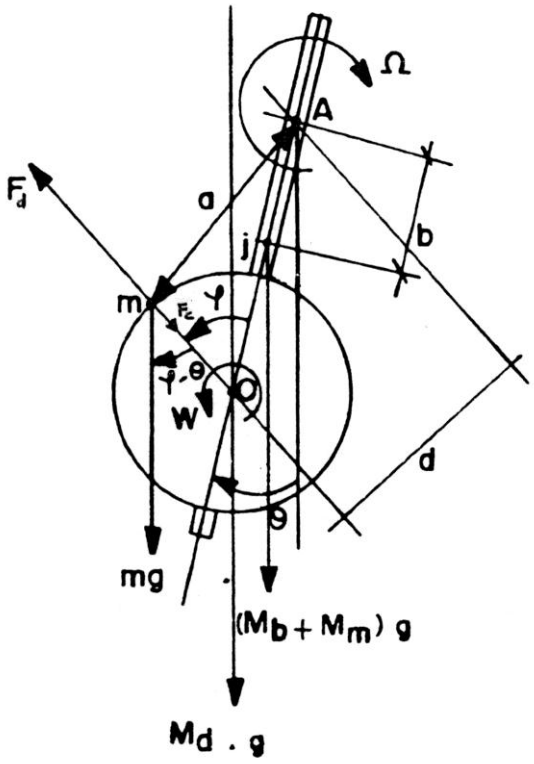


Figura 3.4. Fuerzas aplicadas sobre el sistema pendular en la posición 4

Al pasar de la posición 3 a la 4 se ha realizado un trabajo, que será igual a la variación de energía cinética debida a la rotación del sistema, ω *a* la velocidad angular de rotación del disco, Ω a la velocidad angular de rotación del péndulo, I_A al momento de inercia del sistema pendular respecto al punto A, M_d a la masa del disco, M_m a la masa del motor, M_b a la masa de la barra y m a la masa que gira en el disco. Se denomina J a la posición del centro de gravedad del sistema formado por la barra y el motor.

Teniendo que:

$$W = \Delta E_c$$

Siendo:

$$W = E_{pi} - E_{pf} \qquad \text{y} \qquad \Delta E_c = \frac{1}{2}\, I_A \Omega^2$$

Como:

$$m \ll M_b + M_m + M_d \;\rightarrow\; X_{CG}\ del\ total \cong X_{CG}\ de\ (M_b + M_m + M_d)$$

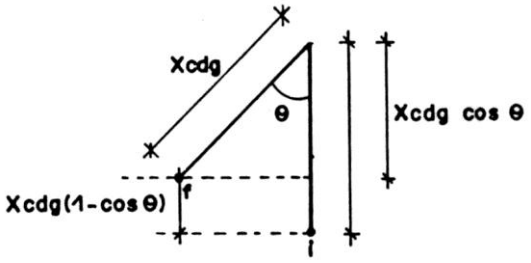


Figura 3.5. Alturas para el cálculo de la energía potencial

$$W = E_{pi} - E_{pf} = -(M_m + M_b + M_d)\ g\ X_{CG}\ (1 - \cos\theta)$$

Luego

$$-(M_m + M_b + M_d)\, g\, X_{CG}\, (1 - \cos\theta) = \frac{1}{2}\, I_A \Omega^2$$

La parte derecha de la igualdad siempre es positiva; la parte izquierda vemos que es negativa, luego esto sería imposible a no ser que haya otra fuerza que realice trabajo. Para poder levantar el conjunto disco-motor-barra, tiene que haber algo que genere un par de elevación, esa fuerza será la fuerza F representada en la figura, la cual es el vector unidireccional rotatorio F_d.

3.3. Estudio dinámico

Al realizar un estudio dinámico, se tiene:

$$\sum \tau_A = I_A\,\alpha = I_A\,\frac{d^2\theta}{dt^2}$$

Siendo $\sum \tau_A$ el sumatorio de momentos respecto a A, θ el ángulo que se desplaza el péndulo y α la aceleración angular del péndulo.

$$F_d\,d - M_d\,g\,\overline{OA} - (M_b + M_m)\,g\,b\sin\theta - m\,g(r\,\sin(\varphi-\theta) + \overline{OA}\,\sin\theta) -$$

$$-F_{Coriolis}\,d = \left(\frac{1}{2}M_d\,r^2 + M_d\,\overline{OA}^2 + M_m\,\overline{OA}^2 + I^A_{barra} + m\,a^2\right)\frac{d^2\theta}{dt^2}$$

siendo

$$b = \overline{AJ}$$

$$\varphi = \omega t$$

$$F_d = m\omega^2 r$$

$$d = \overline{OA}\,\sin\varphi$$

$$a = (\overline{OA}^2 + r^2 - 2\,\overline{OA}\,r\cos\varphi)^{\frac{1}{2}}$$

$$F_{Coriolis} = 2\,mv\,\frac{d\theta}{dt} = 2\,m\omega r\,\frac{d\theta}{dt}$$

Como condiciones iniciales se puede establecer que para $t = 0$, comenzando a medir el ángulo, con lo que se tiene $\theta = 0$; $\left\{\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt} = 0, \ddot{\theta} = \frac{d^2\theta}{dt^2} = 0\right\}$ y que se repite periódicamente la posición angular cada periodo $T = \frac{2\pi}{\omega}$.

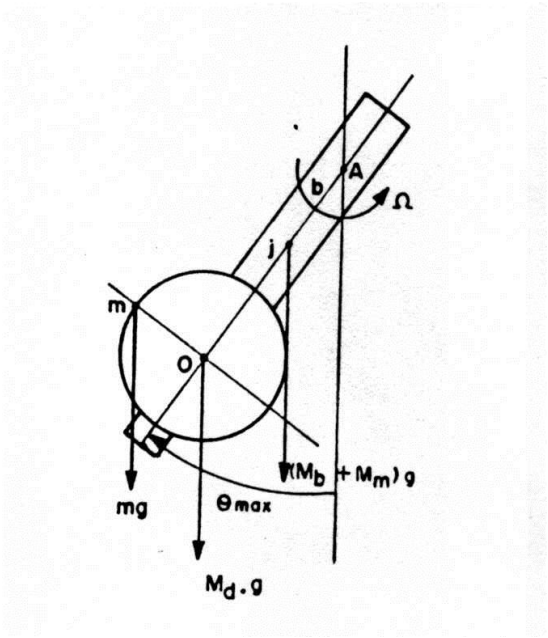


Figura 3.6. Fuerzas durante la caída del sistema pendular

Al resolver esta ecuación diferencial se puede calcular $\theta = \theta(t)$, deduciendo el valor máximo de θ ($\theta_{máx}$) que forma la barra y el ángulo φ con el que se sabe la posición de la masa m cuando se produce el choque de la barra con el freno cinético. Una vez llegado al $\theta_{máx}$ de elevación, la energía transmitida al freno cinético es debida a la caída del conjunto.
La energía que da al freno cinético será:

$$E = \frac{1}{2} I_A \Omega^2 = (M_b + M_m) g b (1 - \cos\theta_{máx}) + M_d g \, \overline{OA} (1 - \cos\theta_{máx}) + mgh$$

donde h es la altura que desciende la masa m desde la posición en la que se alcanza el $\theta_{máx}$ hasta la posición en el momento de la percusión.

En la percusión con el freno cinético tendremos que el impulso que se transmitirá a la caja es:

$$I = [2\ (M_m + M_d + M_b + m)\ E]^{\frac{1}{2}} = M_{caja} v_{caja}$$

La energía cinética que ha adquirido, se invierte en vencer el rozamiento durante su movimiento en el plano horizontal; o en vencer el rozamiento y adquirir una cierta energía potencial si asciende por el plano inclinado.

3.4. Estudio de los choques

Se realiza ahora un estudio más detallado de lo que sucede en el primer choque y en otros posteriores [68].

Denotando:

$\frac{d\theta}{dt} = \dot{\theta} = velocidad\ angular$; $\frac{d^2\theta}{dt^2} = \ddot{\theta} = aceleracón\ angular$. También se indicará con el subíndice 0 antes del choque y con el subíndice 1 después del choque.

Se produce un choque inelástico de coeficiente e (relación entre las velocidades angulares) al llegar $\dot{\theta}_0$ ( ) y al rebotar $\dot{\theta}_1$ ( ).

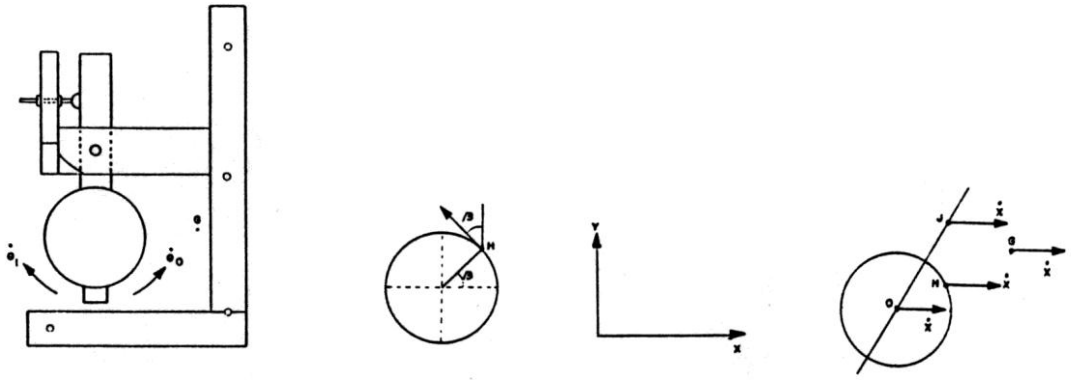


Figura 3.7. Velocidades lineales y angulares antes y después del choque

Considerando que se conserva en el choque la cantidad de movimiento horizontal. Para ello primero se calcula cuál es la cantidad de movimiento un instante antes del choque.

Sean:

G: c.d.g. del bloque base

J: c.d.g. de la barra + motor

O: c.d.g. del disco

M: masa puntual

$$m_H = m;\ m_O = M_d;\ m_J = M_b + M_m;\ m_G = masa\ del\ bloque\ base$$

Las velocidades según el eje x justo antes del choque serán:

$$Barra:\ v_J = \overline{AJ}\ \dot{\theta}_0$$

$$Disco:\ v_O = \overline{AO}\ \dot{\theta}_0$$

$$Masa\ H:\ v_H = \left[(\overline{AO} - r\sin\beta)\ \dot{\theta}_0 - \omega r\sin\beta\right]$$

$$Bloque\ base:\ v_G = 0$$

La cantidad de movimiento según el eje horizontal (x) antes del choque será:

$$P_x = m_J v_J + m_O v_O + m_G v_G + m_H v_H =$$

$$= \left[m_J\ \overline{AJ} + m_O\,\overline{AO} + m_H\,(\overline{AO} - r\ \sin\ \beta)\right]\dot{\theta}_0 - m_H\,\omega\,r\ \sin\beta$$

Tras el choque, la barra se mueve con velocidad angular $\dot{\theta}_1$. Además hay que considerar que tras el choque todo el sistema estará decelerado debido al rozamiento, con aceleración $a = x = \mu g$ (siendo μ el coeficiente de rozamiento). Las velocidades justo después del choque según el eje x serán:

Barra: $v'_J = \dot{x} - \overline{AJ}\,\dot{\theta}_1$

Disco: $v'_O = \dot{x} - \overline{AO}\,\dot{\theta}_1$

Masa H: $v'_H = \dot{x} - (\overline{AO} - r\sin\beta)\,\dot{\theta}_1 - \omega r \sin\beta$

Bloque base: $v'_G = \dot{x}$

La cantidad de movimiento según el eje horizontal (x) después del choque será:

$$P'_x = \left(m_J + m_O + m_H + m_G\right)\dot{x} - m_H\,\omega\,r\,\sin\beta -$$

$$-\left[m_J\,\overline{AJ} + m_O\,\overline{AO} + m_H\,(\overline{AO} - r\,\sin\beta)\right]\dot{\theta}_1$$

Imponiendo la condición $P_x = P'_x$ y despejando:

$$\dot{x} = \frac{\left(\dot{\theta}_o + \dot{\theta}_1\right)\left(m_J\,\overline{AJ} + m_O\,\overline{AO} + m_H\,\overline{AO} - m_H\,r\,\sin\beta\right)}{m_J + m_O + m_H + m_G}$$

Esta será la velocidad con la que se moverá todo el sistema después del choque. Con esta velocidad $\dot{x} = v_0$ tras el choque y con una fuerza de rozamiento $F_r = \mu M_{total} g$, se producirá una deceleración $a = \mu g$ y un avance por choque de:

$$\left\{\begin{array}{c} \Delta x = v_0\,\Delta t - \frac{1}{2}a\,\Delta t^2 \\ \\ 0 = v_0 - a\,\Delta t \end{array}\right\} \rightarrow \left\{\begin{array}{c} \Delta t = \frac{v_0}{a} = \frac{v_0}{\mu g} \\ \\ \Delta x = \frac{v_0}{2\,a} = \frac{v_0^2}{2\,\mu g} \end{array}\right\}$$

Durante el intervalo $\Delta t = \frac{v_0}{\mu g}$ se considera que va a existir deceleración de la base (μg). Durante ese intervalo habrá que considerar la ecuación diferencial que resolvimos anteriormente pero con unos cambios. Mientras haya esta deceleración a, hay que considerar las *fuerzas*, para el giro relativo, siguientes:

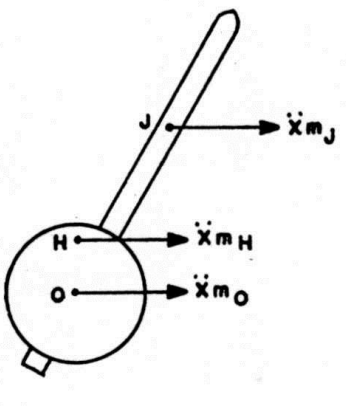


Figura 3.8. Fuerzas para el giro relativo

Para los momentos de las fuerzas, hay que introducir los términos siguientes:

1. $-m_J \overline{AJ} \cos\theta \ddot{x}$

2. $-m_O \overline{AO} \cos\theta \ddot{x}$

3. $-m_H [\overline{AO} \cos\theta - r \cos(\omega t - \theta)] \ddot{x}$

Resultando:

$$F_d d - M_d g\overline{OA}\sin\theta - (M_b - M_m)gb\sin\theta - mg[r\sin(\varphi-\theta) + \overline{OA}\sin\theta] - F_{Coriolis}d$$

$$-m_J\,\overline{AJ}\,\cos\theta\;\ddot{x} - m_O\,\overline{AO}\,\cos\theta\,\ddot{x} - m_H\,[\overline{AO}\,\cos\theta - r\,\cos(\omega t-\theta)]\,\ddot{x} =$$

$$= \left(\frac{1}{2}\,M_d\,r^2 + M_d\,\overline{OA}^2 + M_m\,\overline{OA}^2 + I^A_{barra} + m\,a^2\right)\frac{d^2\theta}{dt^2}$$

3.5. Ecuaciones diferenciales correspondientes al modelo de laboratorio

Los datos correspondientes al sistema pendular y a la caja son los siguientes:

$OA = 85\ mm$

$B = AJ = 47{,}4\ mm$

$R = 35{,}8\ \ mm$

$M_d = 139{,}9\ g$

$M_{barra} = 319{,}28\ g$

$M_m = 178{,}9\ g$

$M = 121{,}5\ g$

$M_{caja} = 4302{,}76\ g$

$\omega = 30\ vueltas/10\ segundos = 18{,}85\ \ rad/s$

Sustituyendo en la ecuación diferencial que describe al sistema pendular:

$$0{,}13137\ \sin(18{,}85\ t) - 0{,}4485\ \sin\theta - 0{,}04227\ \sin(18{,}85\ t - \theta) =$$
$$= [0{,}00473945 - 0{,}00074639\ \cos(18{,}85\ t)]\ \frac{d^2\theta}{dt^2} + 0{,}0139386\ \sin(18{,}85\ t)\ \frac{d\theta}{dt}$$

Resolviendo esta ecuación diferencial se puede calcular el valor de la máxima separación de la barra $(\theta_{máx})$, el ángulo que le queda por recorrer a la masa m, así como la velocidad angular $\dot{\theta}_0$ antes del choque. Con estos resultados y teniendo en cuenta que $\mu = 0{,}35$ y que $e = 0{,}7$, se deduce $\dot{\theta}_1$ y $\dot{x} = v_0$. Estos datos sirven para saber las condiciones iniciales para la

resolución de la segunda ecuación diferencial, así como el intervalo de tiempo $\Delta t = \frac{v_0}{\mu g}$ durante el que se ejecuta. Llegando a completar un ciclo completo.

$$0{,}13137\,\sin(18{,}85t) - 0{,}4485\,\sin\theta - 0{,}04227\,\sin(18{,}85t - \theta) - 0{,}4485\mu\cos\theta$$

$$+0{,}04227\mu\cos(18{,}85t - \theta) = [0{,}00473945 - 0{,}00074639\ \cos(18{,}85t)]\frac{d^2\theta}{dt^2} +$$

$$0{,}0139386\,\sin(18{,}85t)\ \frac{d\theta}{dt}$$

Con los valores últimos obtenidos se realiza un estudio para un ciclo, un tercero, etc. De esta manera se puede saber cuál es el ángulo máximo de separación de la barra y cuál es la velocidad con la que se mueve la caja cuando está en régimen estabilizado.

3.6. Método y programa utilizado para la resolución de las ecuaciones diferenciales que aparecen en el desarrollo de la teoría del modelo de laboratorio

Las ecuaciones diferenciales que aparecen no tienen solución por los métodos habituales de resolución. Se resuelven por diferencias finitas utilizando un programa en *BASIC* que hubo que elaborar, dando unos resultados que concordaban muy bien con los resultados experimentales observados.

Método utilizado:

Ecuación diferencial (1):

$$0{,}13137\ \sin(18{,}85\ t) - 0{,}4466645\ \sin\theta - 0{,}04227\ \sin(18{,}85\ t - \theta) =$$
$$= [0{,}00473945 - 0{,}00074639\ \cos(18{,}85\ t)]\ \frac{d^2\theta}{dt^2} + 0{,}0139386\ \sin(18{,}85\ t)\ \frac{d\theta}{dt}$$

Ecuación diferencial (2):

$$0{,}13137\sin(18{,}85t) - 0{,}4465664\sin\theta - 0{,}04227\sin(18{,}85t - \theta) - 0{,}4485\mu\cos\theta$$
$$+0{,}04227\mu\cos(18{,}85t - \theta) = [0{,}00473945 - 0{,}00074639\ \cos(18{,}85t)]\frac{d^2\theta}{dt^2} +$$
$$0{,}0139386\sin(18{,}85t)\ \frac{d\theta}{dt}$$

Se resuelve la ecuación diferencial (1) mediante el programa elaborado tomando los valores iniciales: $\theta = 0;\ \dot{\theta} = 0;\ \ddot{\theta} = 0$.El programa se detiene cuando $\theta \leq 0$, obteniéndose los datos de la última fila, por ejemplo en la fila $\mathrm{i} = 321$ obteniéndose: $\theta_{321};\ \dot{\theta}_{321};\ \ddot{\theta}_{321}$.Designando por $\theta_0 = \theta_{321}$ la velocidad angular con la que llega la barra, se cambia $\dot{\theta}_{321}$ por $-e\,\dot{\theta}_{321}$ como nuevo valor de la velocidad angular rebotada.

La velocidad con la que la base arranca es: $v_0 \approx \frac{4{,}15(1+e)\,\dot{\theta}_0}{4{,}3}$

Durante un intervalo de tiempo $\Delta t = \frac{v_0}{\mu g}$ se considera que va existir deceleración de la base (μg). Durante ese intervalo se considera la ecuación diferencial (2), la cual se ejecuta durante el intervalo de tiempo indicado. Si los pasos de tiempo son una milésima, el número de pasos será $1000\,\Delta t$.

Los valores iniciales para esta ejecución son: $\theta_{321}; \dot{\theta}^*_{321} = -e\,\dot{\theta}_{321};\ \ddot{\theta}_{321}$.Se llegaría así al final de esta ejecución, obteniéndose los valores finales de $\theta_n;\ \dot{\theta}_n;\ \ddot{\theta}_n$. Estos serían ahora los valores iniciales para otra ejecución donde se pasaría a la ecuación diferencial (1), la cual se vuelve a ejecutar hasta que $\theta < 0$, volviéndose a reiniciar el proceso. Con esos valores últimos obtenidos se realiza un estudio para un segundo ciclo, un tercero, etc., con el fin de saber cuál es el ángulo máximo de separación de la barra y cuál es la velocidad con la que se mueve la caja cuando está en régimen estabilizado. En este caso se estabiliza con aproximadamente una velocidad $v_0 = 9{,}3\ cm/s$. Avanzando la caja un $\Delta x \cong 0{,}13\ cm/choque$. El ángulo máximo es de aproximadamente $19°$.

Nota: En todo el proceso el tiempo sigue aumentando milésima a milésima y se aplica,

$$\dot{\theta}_i = \dot{\theta}_{i-1} + \ddot{\theta}_{i-1}\,\Delta t$$

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \dot{\theta}_{i-1}\,\Delta t + \frac{1}{2}\ddot{\theta}_{i-1}\,\Delta t^2$$

El programa elaborado para la resolución de las ecuaciones diferenciales correspondientes al modelo de laboratorio es el siguiente:

```
10 REM
20'***************+Cálculo de la ecuación diferencial
+*****************
30 '       Condiciones iniciales
40 CLEAR: CLS
45 INPUT "Introduce el valor inicial de T ";T
50 T1=T: SW=0:SW1=0
60 INPUT "Introduce el valor inicial de FI "; AO
70 INPUT "Introduce el valor inicial de 1DFI "; BO
80 INPUT "Introduce el valor inicial de 2DFI "; CQ
90 J=1
95 MAX=A0
110 FOR I=J TO 10000
115 RR=I
120 B1=B0+(C0*T)
130 A1=A0+ (B0*T) + (.5*C0* (T^2))
140Cl= (((.13137*SIN (6*3.14*T1))-(.4465664*SIN (A1))-(.04227*SIN (6*3.14*T1-
A1)))-(Bl*.0139386*SIN (6*3.14*T1)))/(4.73945E-O3-7.4639O1E-O4*COS(6*314*T1))
145 IF SW=1 THEN 160
150 IF A1>MAX THEN MAX=A1:GOTO 160 ELSE LPRINT TAB(1);I;:LPRINT
TAB(10);A1;:LPRINT TAB(30);B1;:LPRINT TAB(50);C1:SW=1
160 A0=A1:B0=B1:C0=C1
170 T1=T1+T
180 IF A1<0 THEN J=I:SW=0:LPRINT TAB(1);I;:LPRINT TAB(10);A1;:LPRINT
TAB(30);B1;:LPRINT TAB(50) ;C1:I=10000
190 NEXT I
195 IF RR>=10000 THEN COTO 450
200 POP=0
210 LPRINT:LPRINT
220 CLS
225 IF SW1=1 THEN 250
230 INPUT "Introduce el valor de e"; E
240 INPUT "introduce el valor de mu"; MU
245 SW1=1
250 V0=-(4.15* (1+E) *B1)/4.3
260 DT=(V0)/(MU*980)
270 B1=(-E) *B1:
280 LPRINT "La velocidad con la que la base arranca es "; VO
290 LPRINT "Valor del intervalo de tiempo"; DT
295 LPRINT
300 FOR I=J TO 10000
310 IF I=J THEN GOTO 340
320 B1=B0+(C0*T)
330 A1=A0+(B0*T)+(.5*C0* (T^2))
340Cl=((.13137*SIN(6*3.14*T1)-.4465664*SIN(A1)-.04227*SIN(6*3.14*T1-
A1)-
.36O987*MU*COS (A1)+.04227*MU*COS (6*314*T1-A1))-
(B1*0139386*SIN(6*314*T1)))/(4.73945E-03-7.463901E-04*COS(6*3.14*T1))
350IFI=J THEN LPRINT TAB(1);I;:LPRINT TAB(10);A1;:LPRINT
TAB(30);B1;:LPRINT TAB(50);C1
```

```
360 A0=A1:B0=B1:C0=C1
370 T1=T1+T
380 POP=POP+T
390 IF POP>DT THEN J=I:LPRINT TAB(1);I;:LPRINT TAB(10);A1;:LPRINT
TAB(30);B1;:LPRINT TAB(50);C1:I=10000:C1=0
400 NEXT I
410 CLS
420 'INPUT "Desea continuar [S] o [N] ";S$
430 'IF S$="S" THEN LPRINT CHR$(12):GOTO 110
440 'IF S$="S" THEN LPRINT CHR$(12):GOTO 110
445 GOTO 95
450 LPRINT CHR$(12)
460 END
```

Capítulo 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1. Resultados experimentales correspondientes al modelo de laboratorio para realizar movimiento por planos horizontal e inclinado

Los resultados experimentales observados en el laboratorio se pueden resumir de la siguiente manera:

El modelo diseñado y construido, una caja con el sistema pendular de $4{,}3Kg$ consigue moverse por un plano horizontal a una velocidad media de $4{,}1\,{}^{mm}/_{S}$. Además, al moverse por un plano inclinado $5°$ respecto a la horizontal adquiere una velocidad de $0{,}7\,{}^{mm}/_{S}$.

Los resultados teóricos, valores que se habían calculado resolviendo las ecuaciones diferenciales que resultaban tras realizar el estudio dinámico del sistema pendular, son los siguientes:

La velocidad que adquiere la caja justo después de producirse cada choque es: $v_0 = 9{,}3\ cm/s$.

La caja avanza en cada choque una distancia: $\Delta x = 0{,}139\dfrac{cm}{choque}$.

Se producen tres choques en un segundo, así que la velocidad media será: $v_m = \dfrac{3.0{,}139}{1}00{,}417\dfrac{cm}{s} = 4{,}17\dfrac{mm}{s}$

Los resultados experimentales concuerdan perfectamente con los calculados teóricamente.

La caja está totalmente cerrada y no posee ni ruedas ni tubos de escape. Si se coloca sobre un plano inclinado, figura 4.1., sube por él con una cierta velocidad; además situando un objeto de $3\,Kg$ delante de la caja, dicho objeto es empujado por el plano inclinado [46]. La energía consumida es la energía eléctrica necesaria para que el motor gire con esa velocidad angular.

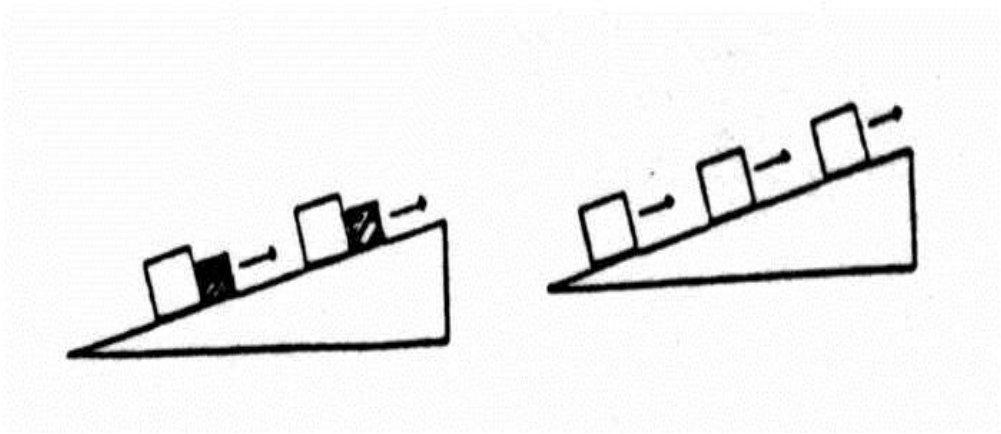


Figura 4.1. Modelo de laboratorio subiendo por un plano inclinado. En la izquierda arrastrando un obstáculo y en la derecha si él

4.2. Resultados experimentales correspondientes a los modelos de laboratorio para impulsar un barco

4.2.1. Modelo de laboratorio para impulsar un barco I

Para el primer sistema diseñado con este propósito, se construye un modelo de laboratorio con dos sistemas pendulares similares al empleado en el modelo para moverse por un plano horizontal o por un plano inclinado, al que posteriormente se suma otro sistema pendular para mejorar el impulso y conseguir un movimiento un poco más continuo. Este primer modelo, así como el siguiente consiste en un barco que no posee hélice ni ningún otro sistema conocido para su propulsión. Al colocarlo sobre el agua y accionar su funcionamiento, el barco es impulsado y se mueve por el agua.

Inicialmente se diseña y construye un modelo de laboratorio con dos sistemas pendulares similares al utilizado en el modelo anteriormente estudiado, consiste en un pequeño barco de forma rectangular de dimensiones ($119x18x24\ cm$) y de masa total $18{,}36\ kg$, con sus sistemas pendulares [27].

Eslora: $119cm$

Manga: $18cm$

Puntal: $24cm$

Se construyó tanto el barco como el conjunto de los sistemas pendulares. Los esquemas correspondientes vienen representados en la figura 4.2.

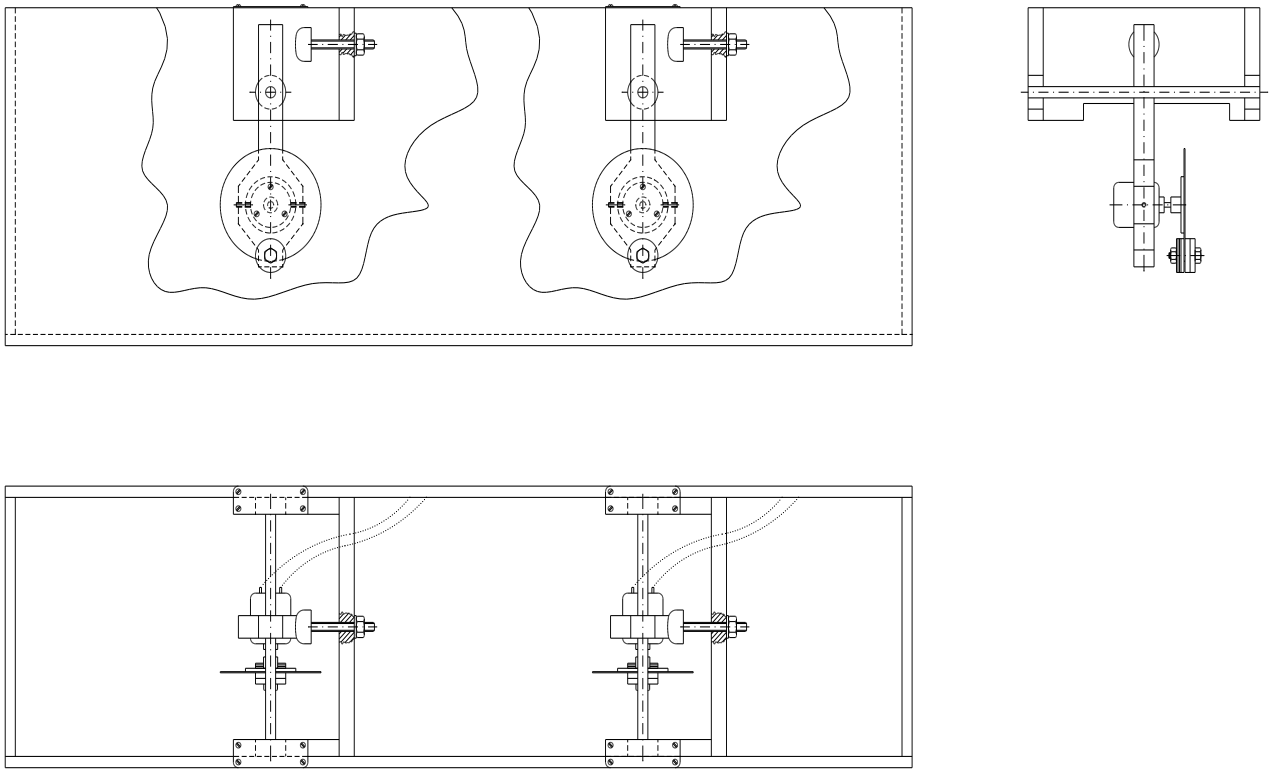


Figura 4.2. Esquemas del sistema de propulsión del barco I

La propulsión de este barco se consigue a través de los sistemas pendulares como el representado en la figura 4.3.

Dentro de él hay una masa $m = 121{,}5\ g$ situada casi en la periferia de un disco de radio $r = 35{,}8\ mm$, el cual gira con una velocidad angular de rotación $\omega = 30\ vueltas/10\ segundos = 18{,}85\ rad/s$.

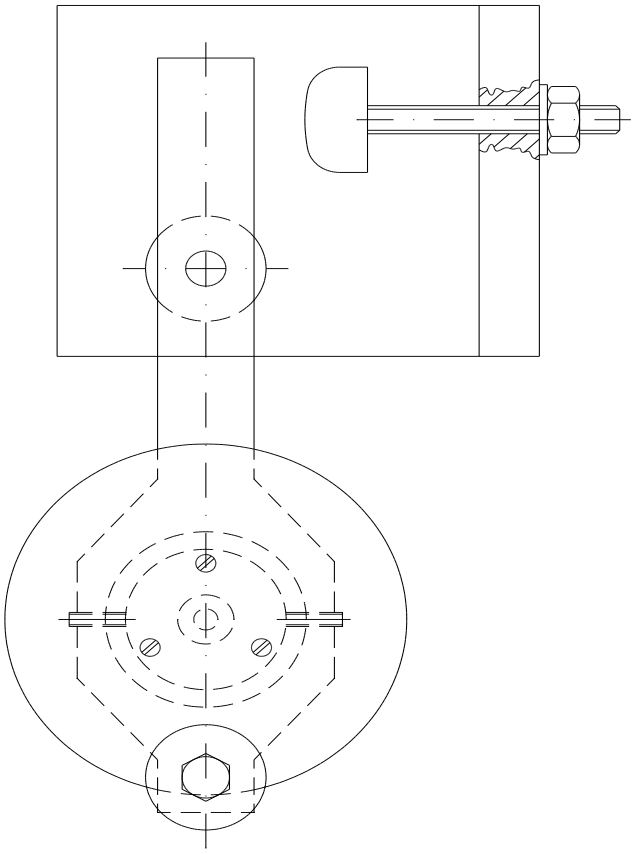


Figura 4.3. Esquema de cada sistema pendular

Este disco está acoplado al sistema pendular y éste está situado dentro de la caja de madera que forma el barco. Mediante dicho sistema se consigue, por una parte, que la masa m actúe sobre todo el sistema sólo en un ángulo; y, por otra, acumula energía sobre el péndulo que ayudará en el impulso conseguido. La energía que se utiliza es la energía eléctrica que necesita el motor para girar.

El barco no posee hélice ni ningún otro sistema conocido para su propulsión. Si se coloca éste flotando en el agua y se arranca , el barco es impulsado y navega por la piscina.

Debido a que la propulsión con este sistema es a impulsos, se colocan dos unidades desfasadas en cuanto al impulso para conseguir que cuando un péndulo esté chocando con el freno cinético, el otro esté preparado para hacerlo; consiguiendo así un impulso más continuo [25].

Para calcular teóricamente el avance del barco se puede utilizar el mismo estudio realizado en el modelo de laboratorio anterior.

Posteriormente se añade otro sistema pendular para mejorar el impulso y conseguir un movimiento un poco más continuo. En las fotos que a continuación se presentan se ven todos los detalles de este modelo.

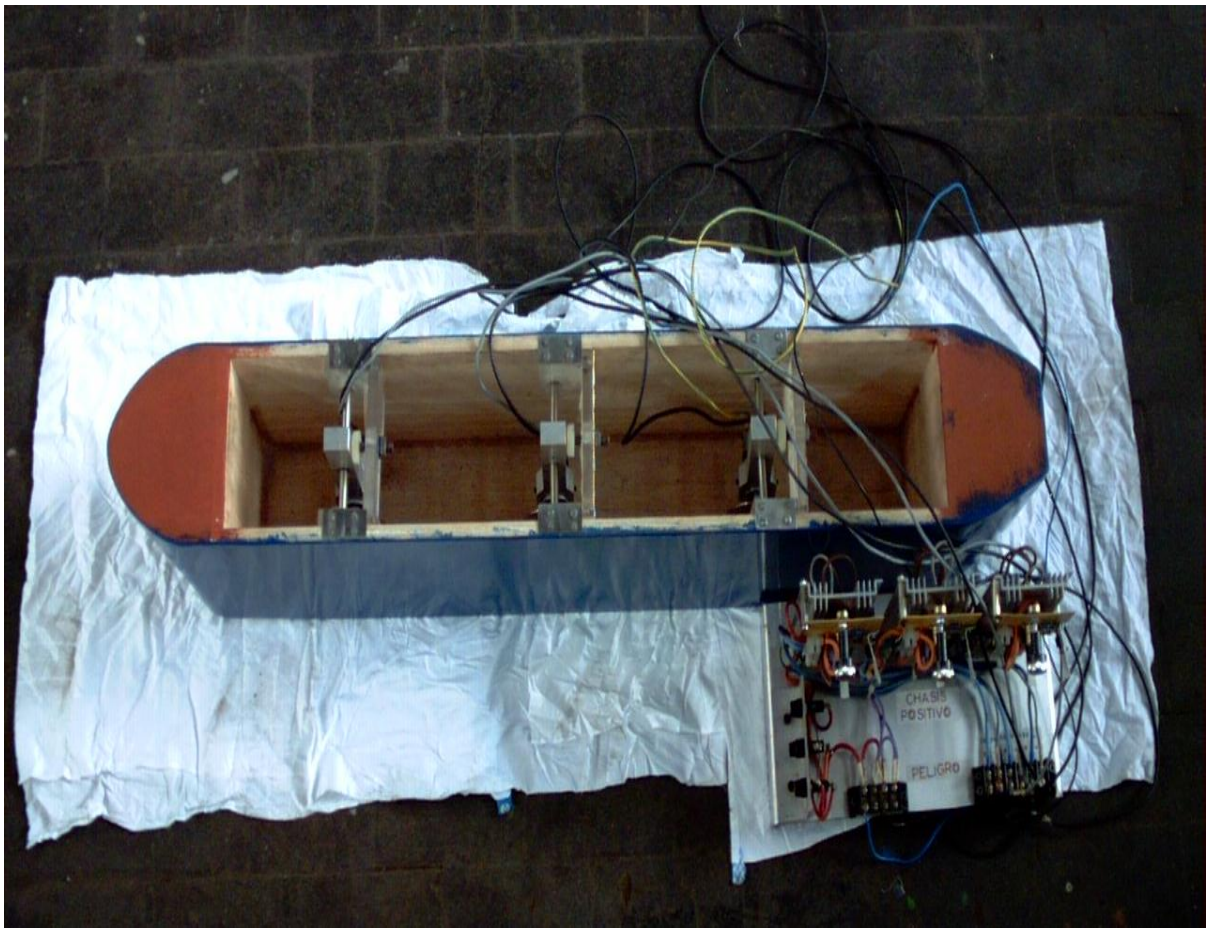


Figura 4.4. Fotografía del barco con sus sistemas de propulsión y la fuente de alimentación



Figura 4.5. Fotografía del barco en el sentido estribor-babor

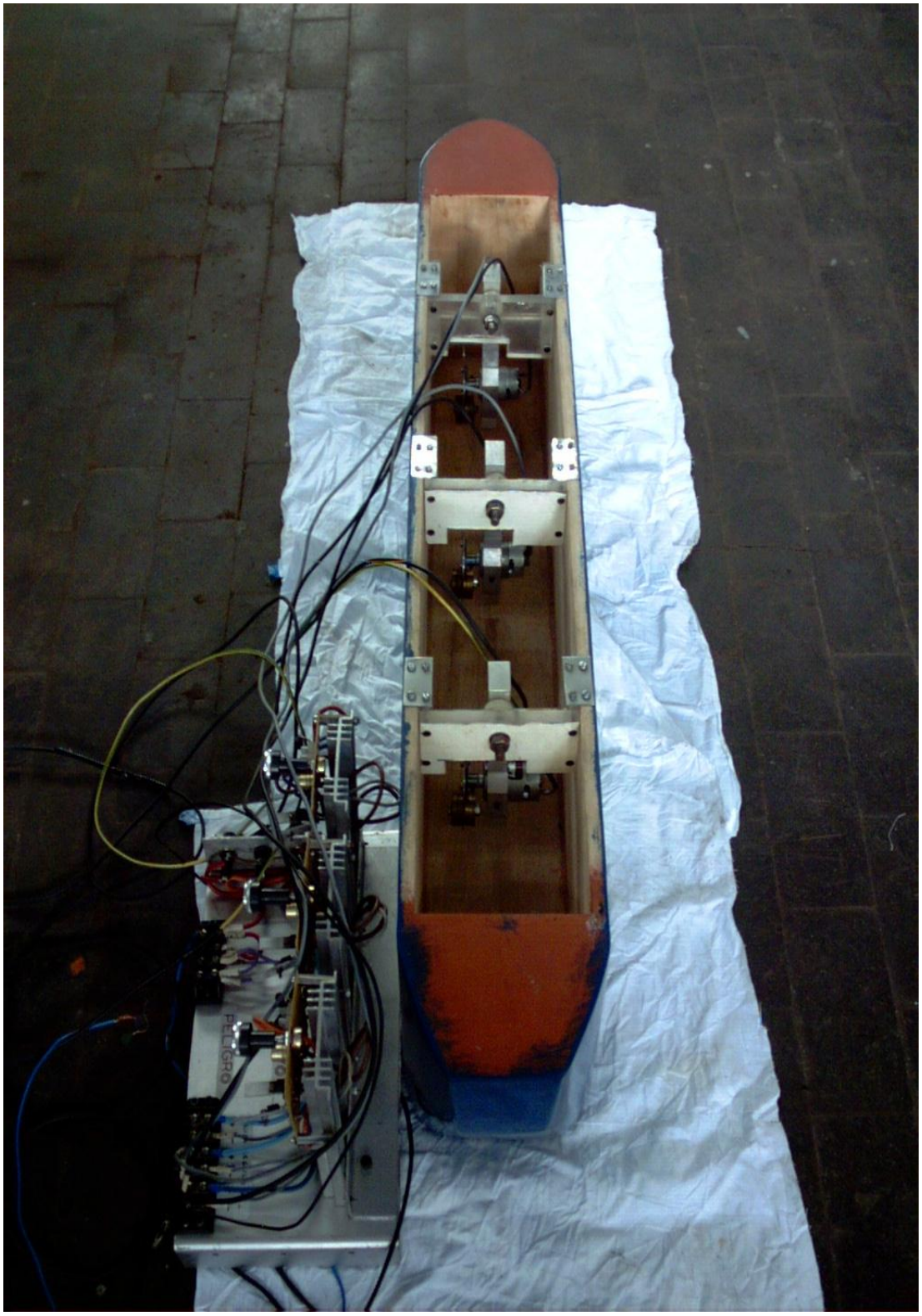


Figura 4.6. Fotografía del barco en el sentido popa-proa

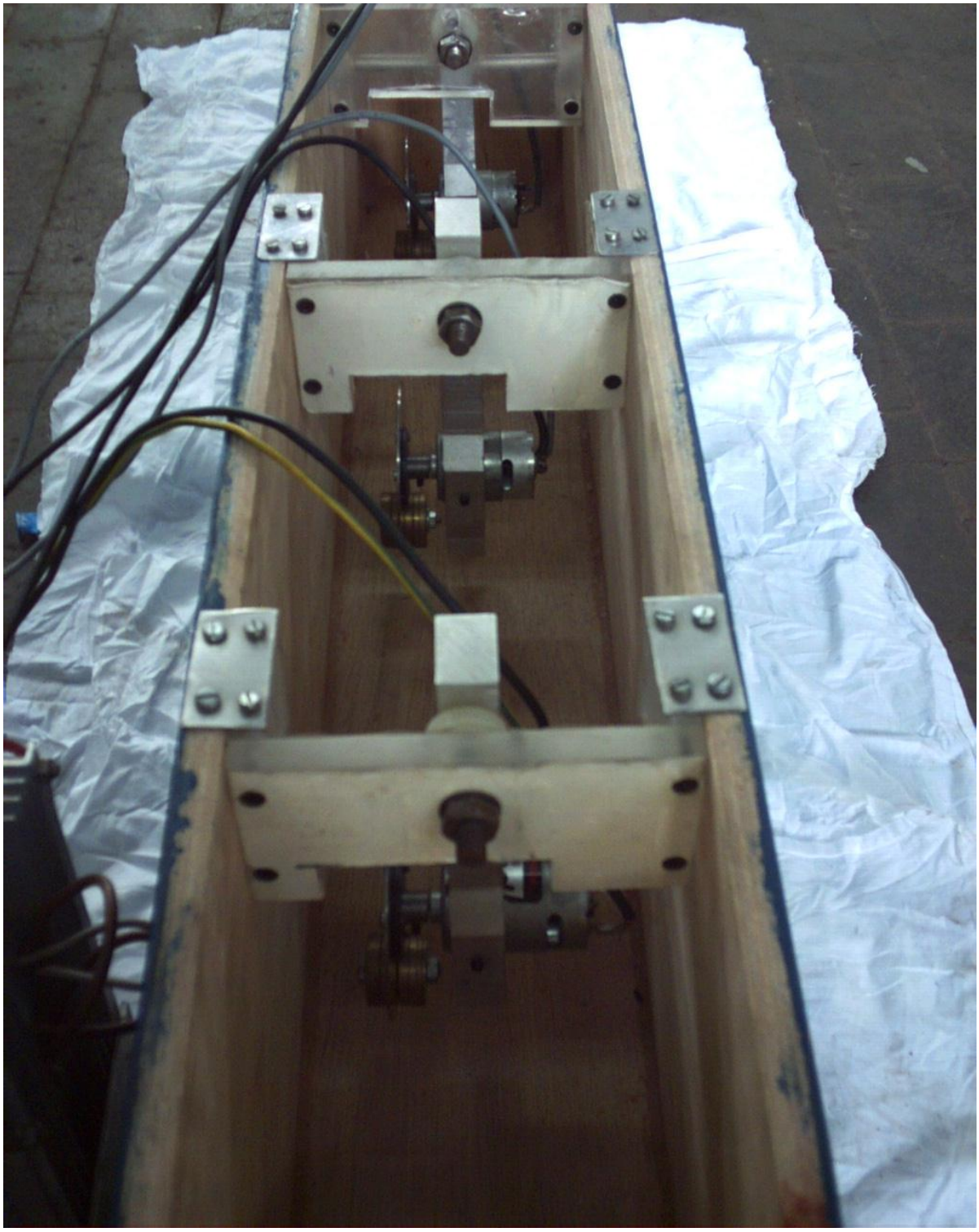


Figura 4.7. Fotografía de los sistemas pendulares

Se diseña y construye la fuente de alimentación necesaria para mover los tres motores que accionaban cada sistema pendular. El esquema de dicha fuente se representa en la figura 4.8.

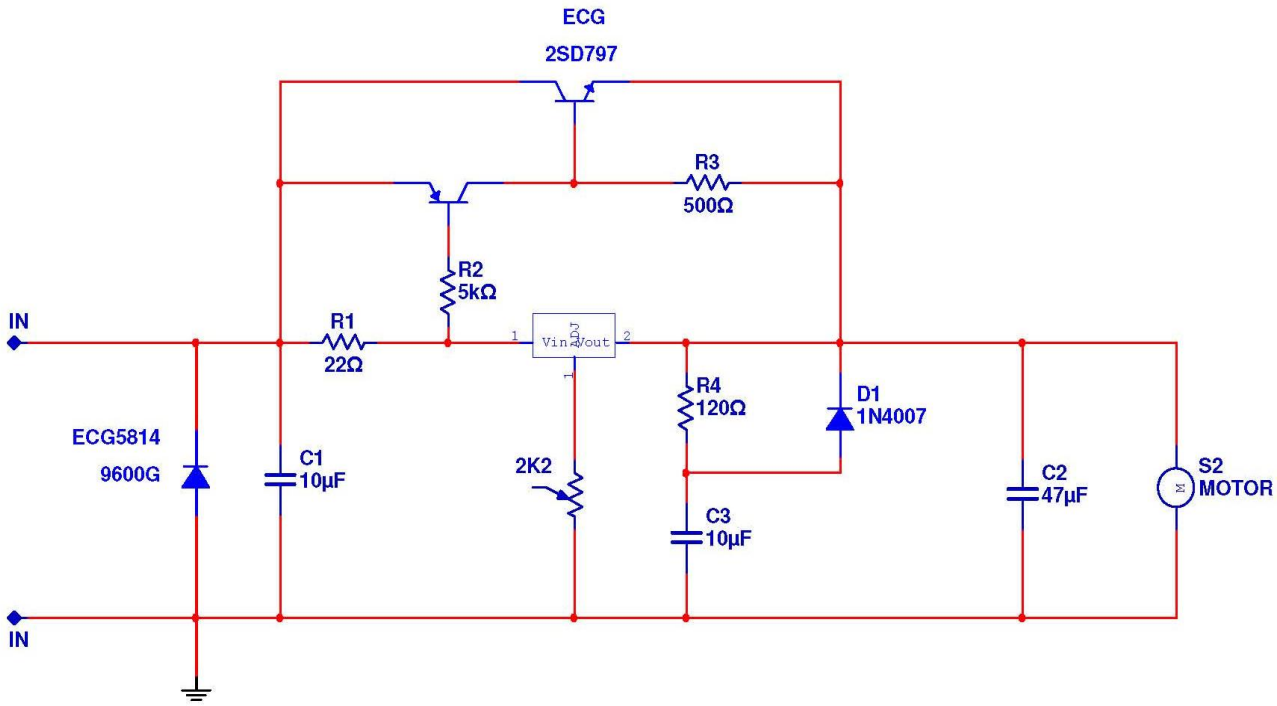


Figura 4.8. Esquema de la fuente de alimentación del barco I

Los resultados experimentales observados con los tres sistemas pendulares anteriores fueron buenos ya que se logra mover al barco por el agua. No obstante, no se conseguía una velocidad muy considerable y, además, la fuente de energía diseñada ocasionó muchos problemas por la grandísima intensidad de corriente eléctrica que se necesitaba para el arranque, llegando a quemarse e incluso dañando los motores. Por esta razón se recurre al diseño de un nuevo dispositivo para impulsar al barco.

4.2.2. Modelo de laboratorio para impulsar un barco II

Se realiza un nuevo diseño del modelo de laboratorio para impulsar el barco. Este modelo está compuesto por tres sistemas pendulares moviéndose a la vez y sincronizadamente gracias a un mecanismo conformado por dichos sistemas y unos engranajes, y utilizando sólo un motor. Se diseñó y construyó una nueva fuente eléctrica para hacer desaparecer el problema anterior de la intensidad de corriente necesaria. Se construye el nuevo conjunto de los sistemas pendulares y se adaptó el barco anterior a este nuevo modelo. En el nuevo diseño se tuvieron que cambiar algunas partes del barco inicial, por ejemplo se tuvo que construir una sobre estructura y las nuevas características quedaron:

Eslora total: $119cm$

Eslora de la sobre estructura: $53cm$

Manga: $18cm$

Manga de la sobre estructura: $28cm$

Puntal: $24cm$

Se construye el nuevo conjunto de los sistemas pendulares y se adapta el barco anterior a este nuevo modelo. Con el nuevo sistema de péndulos sube considerablemente el centro de gravedad, quedando el metacentro por debajo de él. Por lo tanto se decidió poner dos sistemas de flotación a cada lado y así conseguir que el barco navegue de manera estable.

Las fotografías y los esquemas correspondientes vienen representados a continuación.

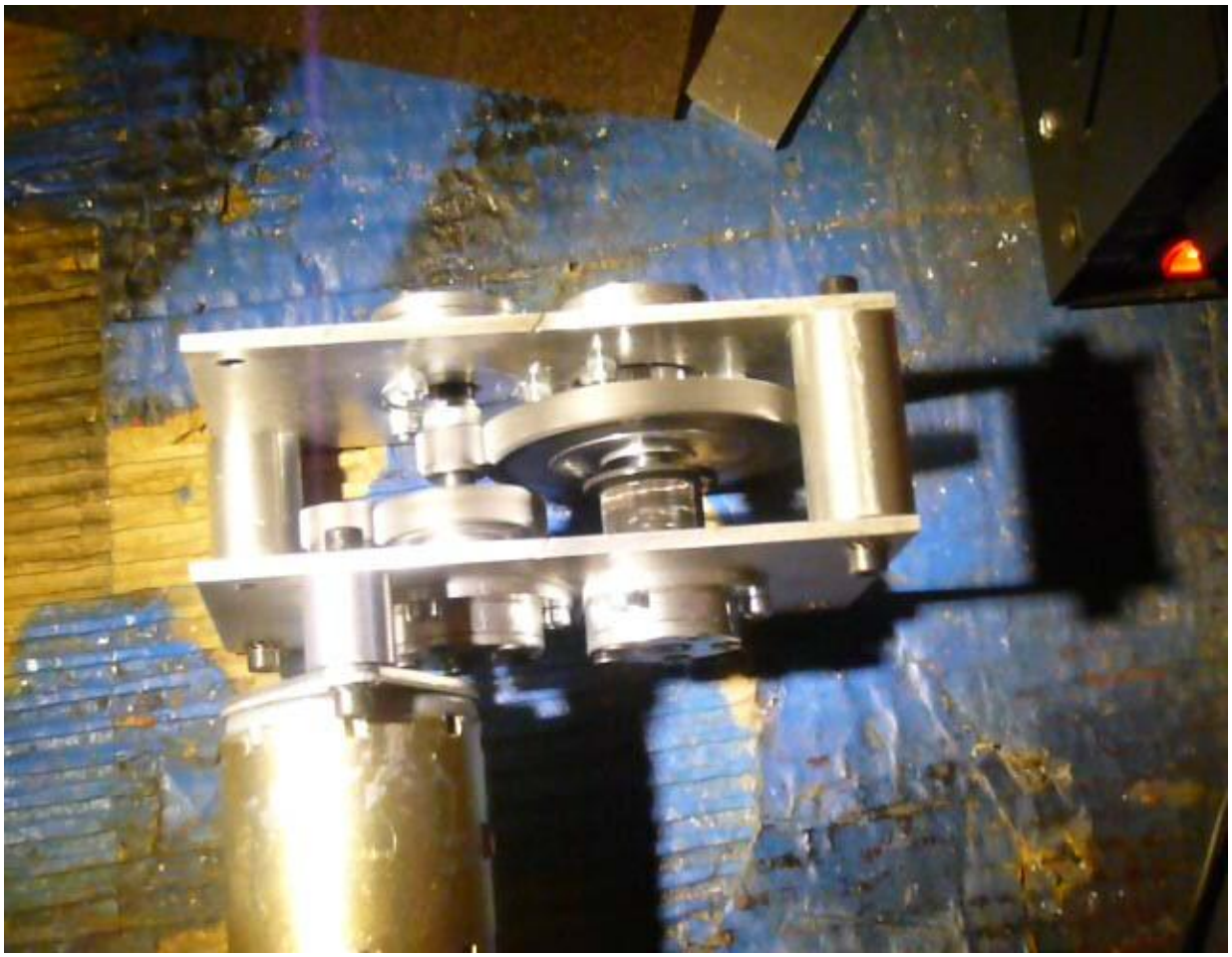


Figura 4.9. Fotografía del motor eléctrico con su reducción de velocidad

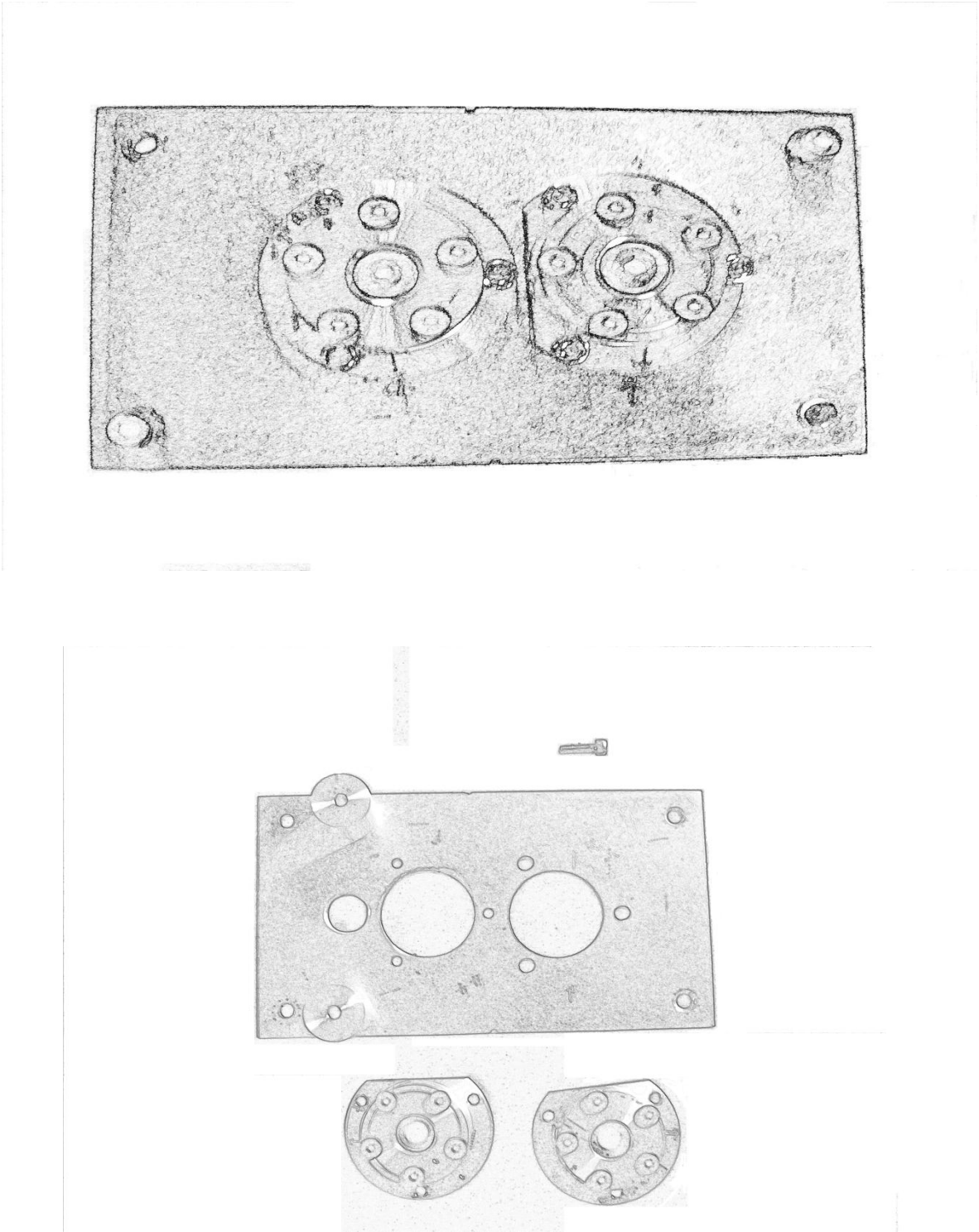


Figura 4.10. Esquemas de la construcción del sistema de regulación



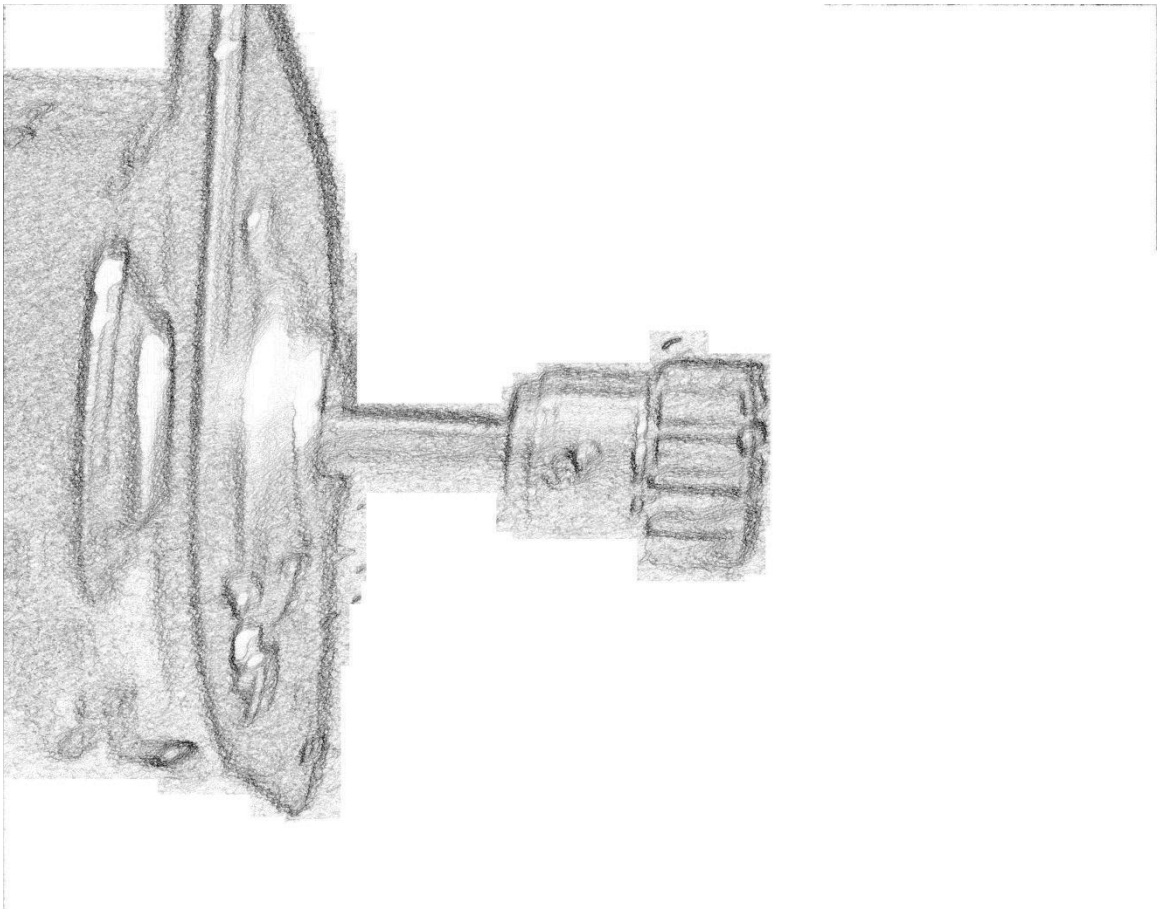


Figura 4.11. Fotografía y esquema correspondientes al ajuste especial del eje del motor al sistema de engranajes



Figura 4.12. Fotografía del sistema de reducción de velocidad



Figura 4.13. Fotografía del conjunto de los tres sistemas pendulares

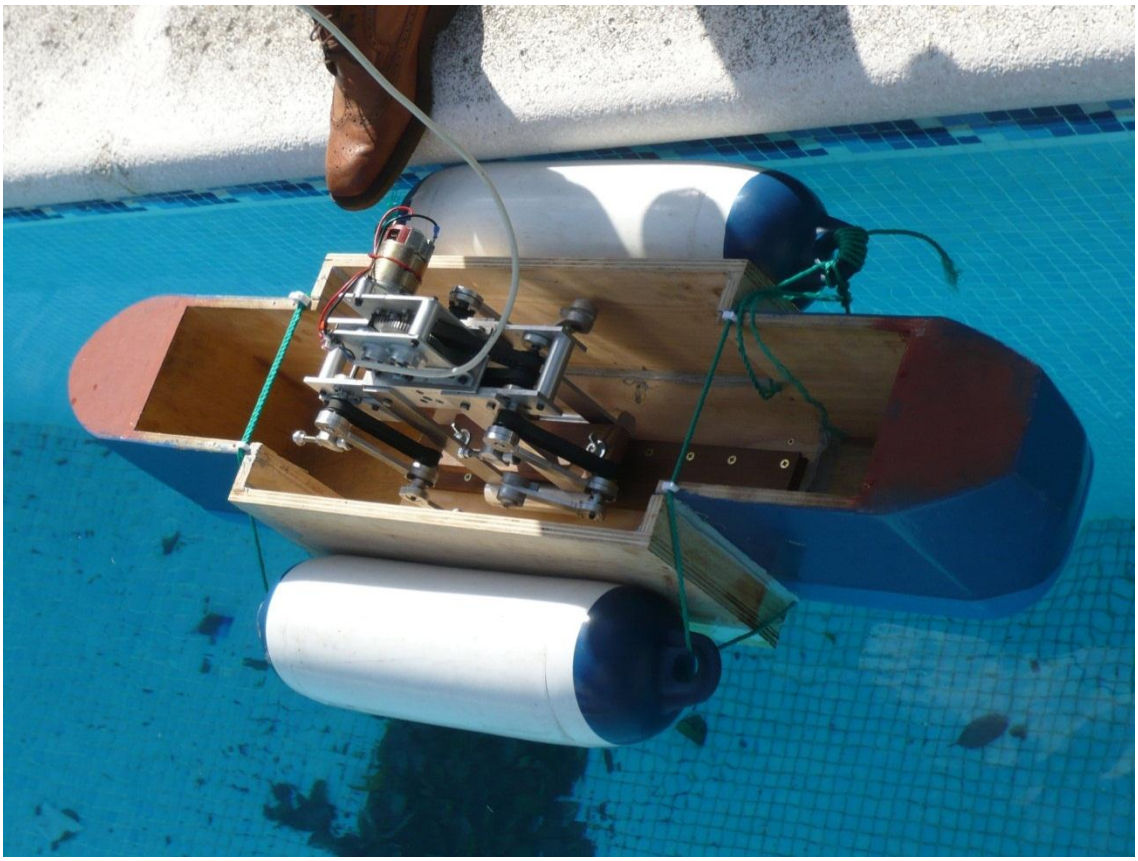


Figura 4.14. Fotografía del modelo de laboratorio para impulsar un barco II con el sistema de propulsión montado

También se diseña y construye la fuente alimentación necesaria para el nuevo sistema de propulsión, cuyas fotografías y esquema se indican a continuación.





Figura 4.15. Fotografías de la fuente de alimentación

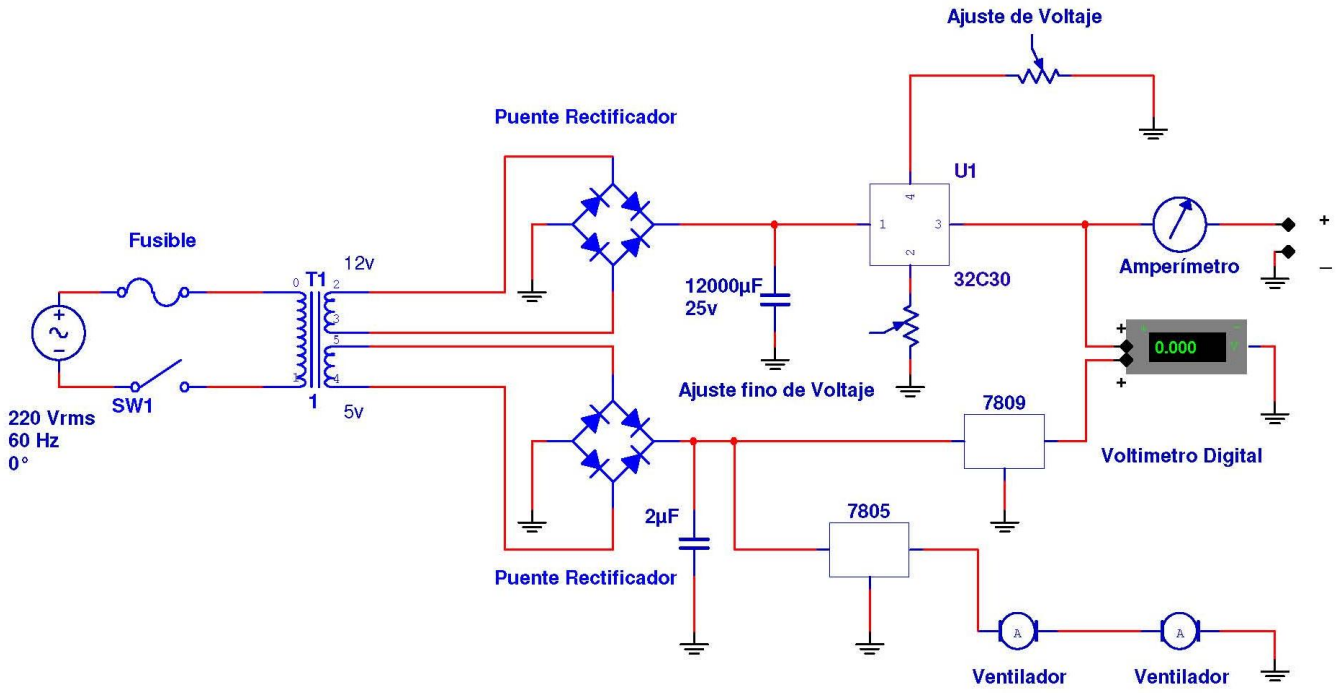


Figura 4.16. Esquema de la fuente de alimentación del barco II

Se mide la fricción del barco con el agua y resulta un valor de $0{,}13\,N$. Experimentalmente se logra mover un barco de $19{,}8\,Kg$ con una velocidad de $1{,}52\ {}^{cm}/_{s}$. El consumo observado en la fuente es de $4\,W$ y la potencia con la que se mueve el barco es $P = 19{,}8 \cdot 9{,}8 \cdot \frac{1{,}52}{100} = 2{,}95\,W$ resultando un rendimiento del $73{,}7\%$.

El movimiento del barco por el agua se produce de una manera perfectamente observable, lo que se puede presenciar a través del seguimiento de las fotografías de las figuras 4.17., 4.18. y 4.19., que se presentan a continuación.

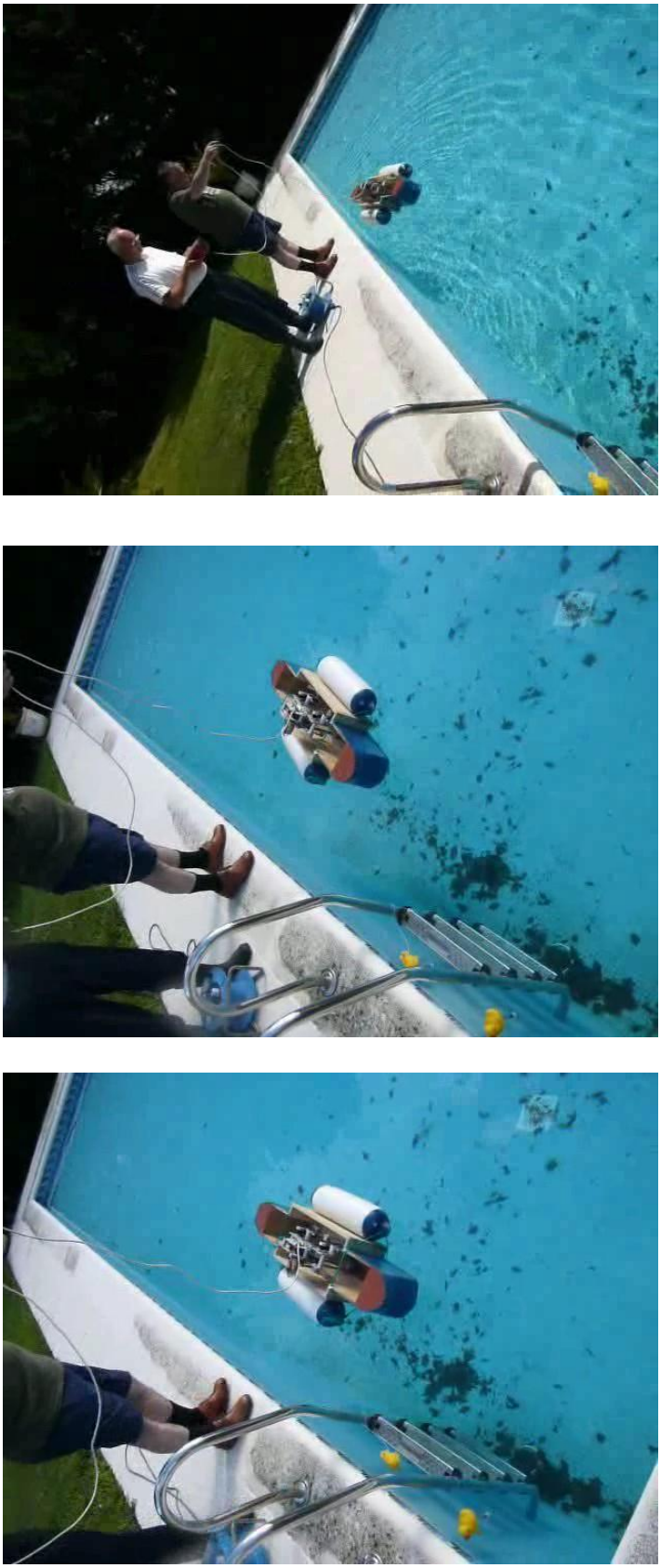


Figura 4.17. Fotografías en las que se indica el movimiento del barco en la piscina

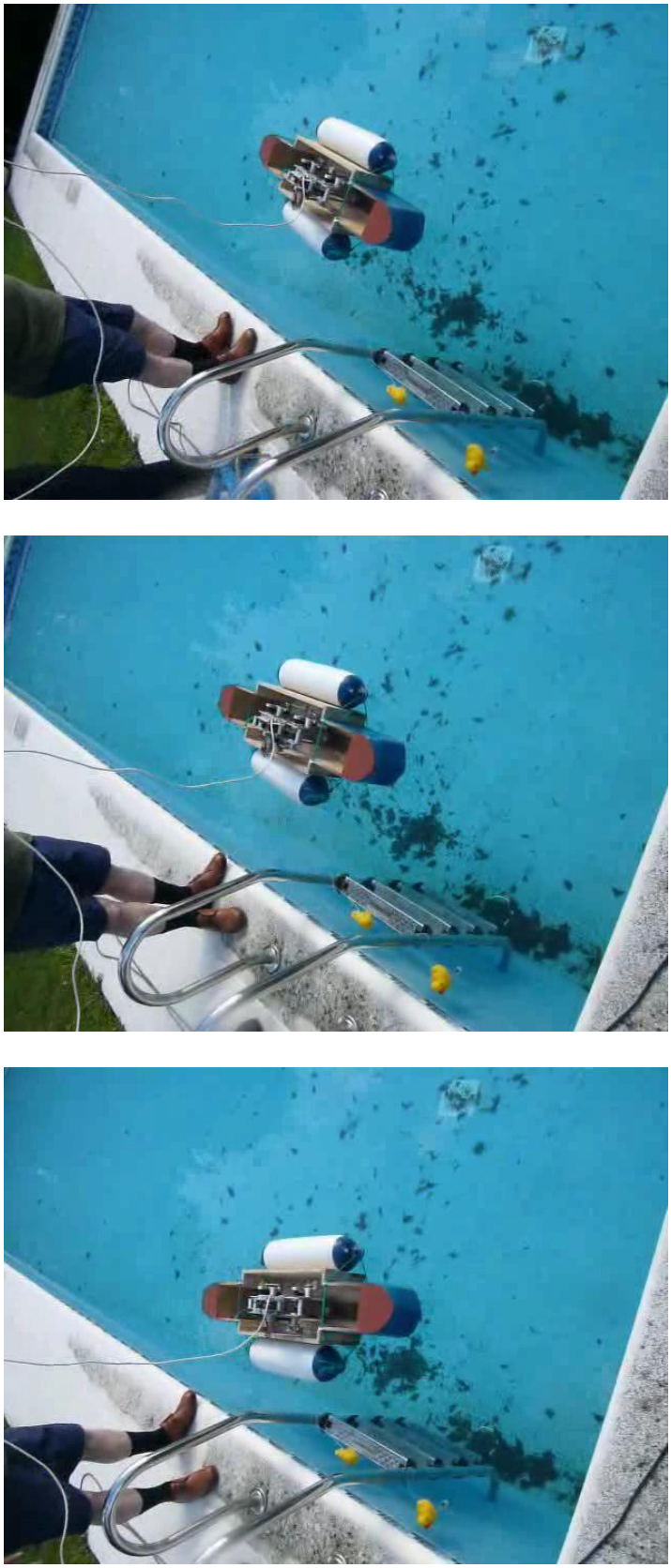


Figura 4.18. Otras fotografías en las que se indica el movimiento del barco en la piscina

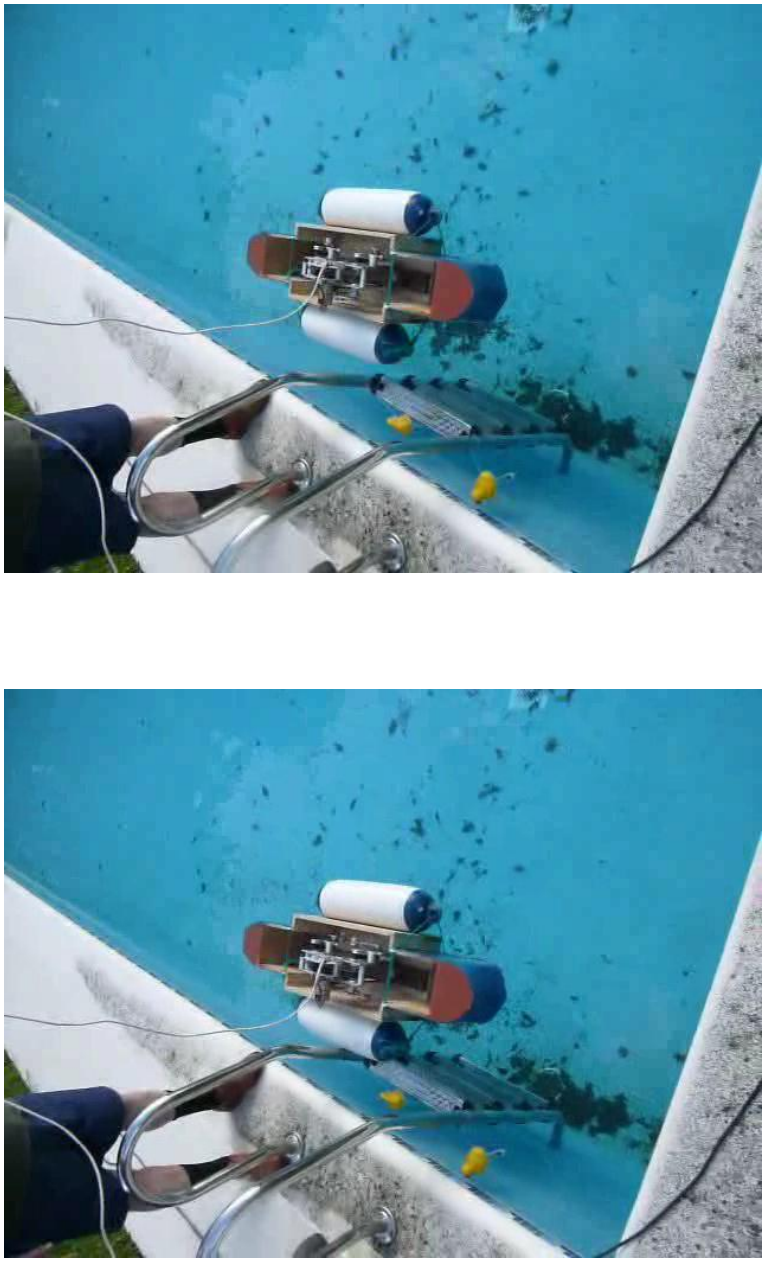


Figura 4.19. Fotografías en las que se indica el movimiento del barco en la piscina terminando su recorrido

También se realizan maniobras de atraque muy interesantes, detalladas en las fotografías siguientes.

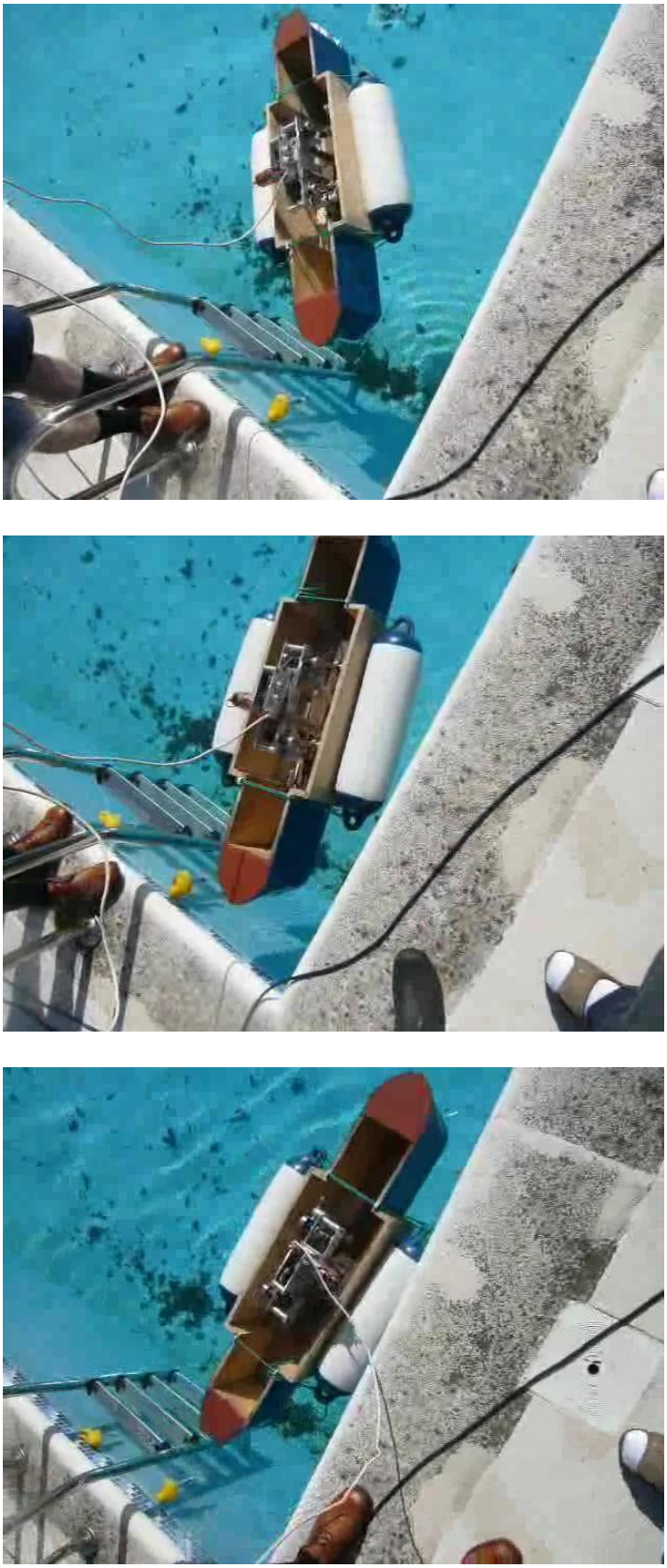


Figura 4.20. Fotografías en las que se indica la maniobra de atraque

Capítulo 5. MODELO A CONSTRUIR Y SUS APLICACIONES

Previamente al estudio del modelo compuesto por una serie de tubos girando, se propone la base que puede servir de introducción para el estudio del sistema propuesto.

5.1. Base de introducción

Un disco de gramófono, de radio R, gira a una velocidad ω. Un insecto que se halla sobre él marcha a lo largo del disco, desde el centro hacia el borde, con una velocidad constante relativa al mismo v. Si la masa del insecto es m, calcular el trabajo que tiene que desarrollar el motor del gramófono para conservar la velocidad angular constante desde que el insecto pasa por el centro hasta que llega al extremo. ¿Qué parte de este trabajo es absorbido por el insecto? ¿En qué se ha transformado la diferencia? [22], [23].

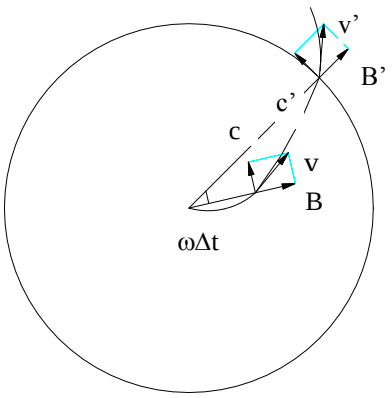


Figura 5.1. Disco girando con el insecto caminando sobre él

Se divide el radio en un número grande n de partes iguales. Mientras el insecto recorre una de dichas partes, por ejemplo, la de orden p, el disco lo desplazará tangencialmente un espacio,

$$e_t = r\ \omega\ \Delta t$$

$$\Delta r = v\ \Delta t \ \rightarrow\ \Delta t = \frac{\Delta r}{v}$$

Como,

$$r = p\ \frac{R}{n};\ \Delta r = \frac{R}{n}$$

Entonces,

$$e_t = p\ \frac{R}{n}\ \omega\ \frac{R}{n\ v} = p\ \frac{\omega\ R^2}{n^2\ v}$$

y el trabajo realizado por el motor del gramófono será igual al producto de la fuerza tangencial por ese camino, o sea,

$$W_p = F_t\ l_t$$

Donde

$$F_t = F_{Coriolis} = 2\ m\ v\ \omega$$

$$W_p = 2\ m\ v\ \omega\ \frac{\omega\ R^2}{n^2\ v}\ p = 2\ m\ \omega^2\ \frac{R^2}{n^2\ v}\ p$$

El trabajo total hasta que llega al borde será, por tanto,

$$W = 2\,m\,\omega^2\,\frac{R^2}{n^2}\sum_{O}^{n} p = 2\,m\,\omega^2\,\frac{R^2}{n^2}\,\frac{n^2}{2} = m\,\omega^2\,R^2$$

La energía cinética del insecto ha variado desde cero en el centro del disco hasta $\frac{1}{2}m\omega^2R^2$ cuando llega al borde.

$$\Delta E_c = \frac{1}{2}\,m\,\omega^2\,R^2$$

La otra mitad se habrá transformado en vibraciones del disco, al andar el insecto sobre él, y, por tanto, en definitiva, en calor. En realidad se ha transformado en el trabajo realizado por la fuerza centrífuga (vector unidireccional rotatorio F_d) sobre el disco,

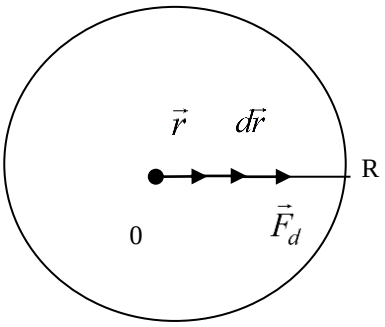


Figura 5.2. Vectores utilizados en el cálculo del trabajo

$$F_d = m\,\omega^2\,r$$

$$W_{F_d} = \int_O^R \vec{F}_d\ d\vec{r} = \int_O^R F_d\ dr = \int_O^R m\,\omega^2\,r\ dr = \frac{1}{2}\,m\,\omega^2\,R^2$$

5.2. Modelo compuesto por una serie de tubos girando

Sea un disco cilíndrico de radio k y que tiene pegado un tubo cilíndrico de radio r y altura R, cerrado por la parte superior A y abierto por la parte inferior B [45]. Haciendo girar a todo el sistema en un plano vertical con una velocidad angular ω se introduce un líquido de densidad ρ a través de B, de tal manera que en un instante dado, dicho líquido se encuentra presionando A tal y como se indica en la figura siguiente, ocupando desde R_1 hasta R dentro del tubo.

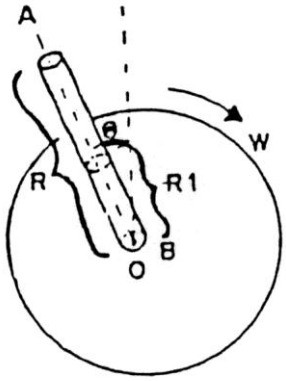


Figura 5.3. Tubo girando con el disco

Para calcular la fuerza originada, se supone un elemento infinitesimal de masa dm situado a una distancia x del centro O y de altura dx.

$$dm = \rho\, dv = \rho\, \pi\, r^2\, dx$$

$$dF_d = dm\, \omega^2\, x = \rho\, \pi\, r^2\, \omega^2\, x dx$$

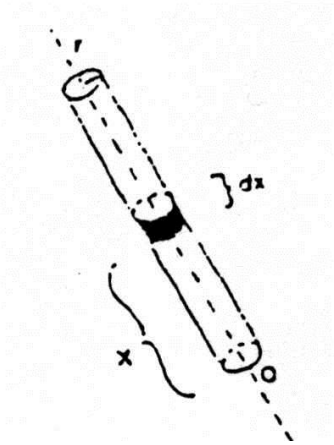


Figura 5.4. Líquido en el tubo

$$F_d = \int_{R_1}^{R} \rho\, \pi\, r^2\, \omega^2\, x dx = \rho\, \pi\, r^2 \omega^2 \left(\frac{R^2 - R_1^2}{2} \right)$$

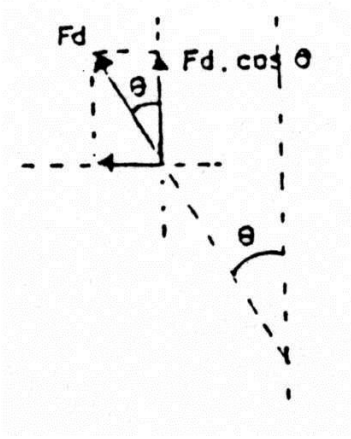


Figura 5.5. Descomposición de la fuerza correspondiente al vector unidireccional rotatorio

La fuerza en dirección vertical será,

$$F_{vertical} = F_d \cos\theta = \rho\, \pi\, r^2 \omega^2 \left(\frac{R^2 - R_1^2}{2}\right) \cos\theta$$

Como en el dispositivo θ va a ser muy pequeño $\Rightarrow cos\ \theta \cong 1 \Rightarrow$

$$F_{vertical} = F_d \cos\theta = \rho\, \pi\, r^2 \omega^2 \left(\frac{R^2 - R_1^2}{2}\right)$$

En este dispositivo se desea que el líquido se encuentre presionando A durante el tiempo transcurrido entre las posiciones 1 y 2. Dicho tiempo vale,

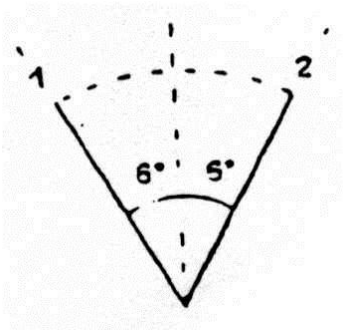


Figura 5.6. Ángulo ideal para conseguir el máximo impulso

$$t = \frac{\varphi}{\omega} = \frac{\frac{12 \cdot 2\pi}{360}}{\omega}$$

Para $\omega = 1000\, rpm. \Rightarrow t_{1000} = 0{,}002\, s.$ Para $\omega = 6000\, rpm. \Rightarrow t_{6000} = 0{,}003\, s.$ Al ser el tiempo tan pequeño, se puede suponer que aproximadamente la fuerza es instantánea.

Luego,

$$F_{vertical} = \rho\, \pi\, r^2\, \omega^2 \left(\frac{R^2 - R_1^2}{2}\right)$$

A continuación se procede al cálculo de la energía consumida para conseguir esta fuerza. Para ello se divide el radio en un número grande de partes iguales. Mientras la masa de líquido recorre una de dichas partes, por ejemplo la de orden p, el disco la desplazará tangencialmente un espacio,

$$e_t = x\, \omega\, \Delta t = x\, \omega\, \frac{\Delta x}{v} = \omega\, p\, \frac{R}{n}\, \frac{R}{n\, v} = \frac{\omega\, R^2}{n^2\, v}\; p$$

y el trabajo realizado por el motor será igual al producto de la fuerza tangencial por ese camino, o sea,

$$W_p = 2\, m\, \omega\, v\, \frac{\omega\, R^2}{n^2\, v}\, p = 2\, m\, \omega^2\, \frac{R^2}{n^2}\, p$$

El trabajo total hasta que llega al borde será, por tanto,

$$W = 2\, m\, \omega^2\, \frac{R^2}{n^2} \sum_0^n p = m\, \omega^2\, R^2$$

Para el caso en estudio,

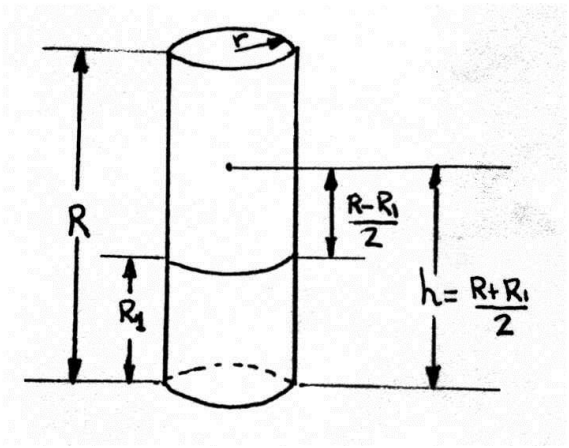


Figura 5.7. Volumen ocupado por el líquido

Luego en lugar de R hay que tomar $(R + R_1)/2$, con lo que,

$$W = m\,\omega^2 \left(\frac{R + R_1}{2}\right)^2$$

Como la masa es,

$$m = \rho\,\pi\,r^2\ \ (R - R_1)$$

Entonces,

$$W = \frac{1}{4}\,\rho\,\pi\,r^2\omega^2\,(R + R_1)^2\,(R - R_1)$$

De esta cantidad la mitad se gasta en la variación de la energía cinética de rotación, y la otra mitad en el trabajo que realiza F_d sobre el disco (en el caso propuesto, sobre el sistema de tubos).

$$W_{total} = \Delta E_c + \Delta E_p$$

Siendo,

$$\Delta E_c = W_{F_d} = \frac{1}{8}\,\rho\,\pi\,r^2\omega^2\,(R+R_1)^2\,(R-R_1)$$

Aunque sea despreciable el valor de la variación de la energía potencial, al calcular este valor se percibe que es muy pequeño en comparación con el trabajo total.

$$\Delta E_p = m\,g\,h$$

Teniendo en cuenta que $h = \frac{R+R_1}{2}$ y que m toma el valor anteriormente calculado, se obtiene,

$$\Delta E_p = \frac{1}{2}\,\rho\,\pi\,r^2\,g\,(R^2 - R_1^2)$$

Si el disco gira en un plano horizontal, entonces no habría que considerar esta variación de energía potencial.

El mejor sistema consta de 6 tubos situados en un disco (aunque no es necesario el disco), girando con velocidad angular ω, de manera que cuando el líquido está saliendo después de haber girado un cierto ángulo ya está llenando otro tubo y así sucesivamente, de esta manera se logra el movimiento prácticamente continuo.

Con el propósito de determinar la fuerza conseguida gracias al dispositivo así como la energía consumida, se considera un ejemplo ($R = 30\,cm, R1 = 10\,cm, r = 15\,mm, w = 1500\,rpm$, siendo el líquido mercurio de densidad $13{,}6\ g/cm^3$), la fuerza para un tubo es,

$$F = 9487\ N = 968{,}115\ Kp$$

La energía consumida vale $1897{,}58\,J$, y la debida a la variación de energía potencia $3{,}768\,J$. Aceptando que se podría haber despreciado este último valor. Luego el valor de la energía consumida para un tubo es aproximadamente,

$$W = 1900\,J$$

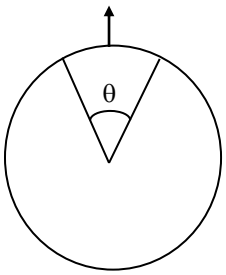
Por tanto, se alcanza una fuerza de $9487{,}92\,N$ por un gasto energético de $1900\,J$.

El rendimiento teórico del sistema es del 50%, aunque en la práctica, teniendo en cuenta las pérdidas, se acercará al $42{,}5\%$.

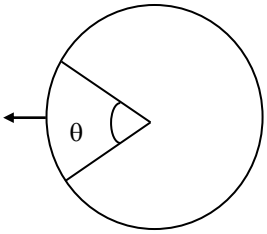
5.3. Aplicaciones de este modelo

Lo que se está proponiendo es una unidad de fuerza, impulso, potencia que puede cambiar el vector F_d en cualquier parte de los $360°$ [26].

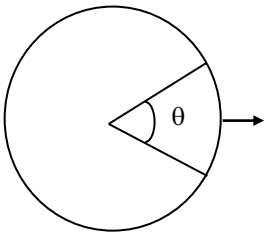
(1) Levitación



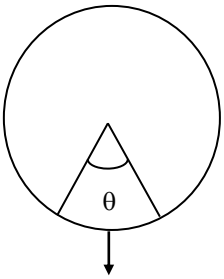
(2) Vector de Impulso horizontal izquierdo



(3) Vector de impulso horizontal derecho



(4) Suma de $|\gamma_d|$ y gravedad



(5) cualquier dirección distinta en los $360°$

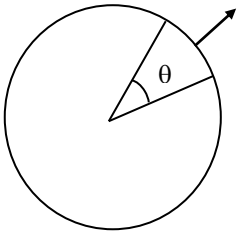


Figura 5.8. Distintas posibilidades de impulsos

Entre las aplicaciones, según las posibilidades de impulsos de la figura 5.8., se pueden indicar las siguientes:

Posición (4) ..... Prensas y todo lo que requiera una gran presión hacia abajo.

Posiciones (2) y (3) ..... Impulsos de cualquier clase de carga, así como transporte terrestre y marítimo.

Posiciones (1) y (5)…….. Como pistones autopropulsados para bombeo o transporte de sólidos, líquidos, gases, o la producción de presión o vacío.

Posiciones (2), (3), (4) y (5)……. Para submarinos o cualquier uso oceanográfico o en medios líquidos.

Como aplicación más importante está el uso en toda clase de nave aérea y espacial, con la utilización de uno o más generadores de F_d. A continuación se incide de forma más detallada en algunas de las posibles aplicaciones.

5.4. Vehículos terrestres

Una unidad F_d puede ser aplicada en cualquier clase de vehículo, sea éste de cuatro ruedas o de mayor número, tractor (cadenas) o cualquier cosa que ruede sobre la superficie terrestre, siempre y cuando tenga las características necesarias en su construcción para un equipo F_d. A continuación se ilustran los requerimientos necesarios para su funcionamiento. Como ejemplo se utiliza un vehículo de cuatro ruedas.

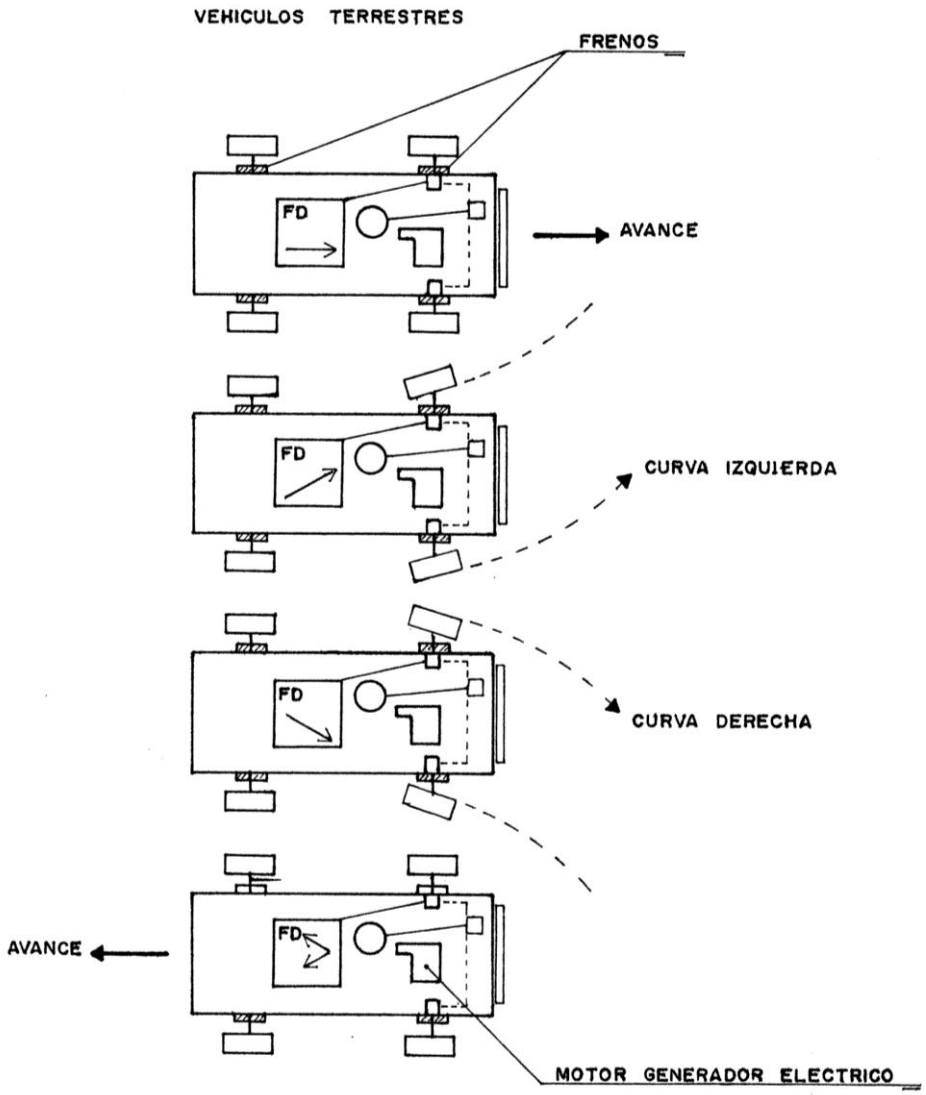


Figura 5.9. Aplicaciones en vehículos terrestres

Téngase en cuenta que esto es aplicable para automóviles, vehículos todoterreno, camiones, autobuses, vehículos tractores, cargadoras, etc. Una de las grandes ventajas del sistema F_d es que la potencia de tracción no depende del contacto de las ruedas o cadenas al terreno, por ejemplo el vehículo conocido como $4\,x\,4$ todoterreno no se quedará patinando en el lodo, no derrapará puesto que el impulso se crea sobre toda la masa del vehículo, siendo la función de las ruedas o cadenas de un artilugio sólo para eliminar el rozamiento y repartir la carga del equipo, aparato o vehículo que utilice el sistema F_d. De hecho, existe un modelo de laboratorio de $5\,Kg$ que sube una rampa sin ruedas ni otro medio que facilite el deslizamiento.

5.5. Vehículos para medios acuáticos

Se sobreentiende que los principios para una canoa sirven para un trasatlántico, la única diferencia sería la sofisticación de la utilización del vector en un trasatlántico que no sería rentable en una canoa. El principio es idéntico a los vehículos terrestres ya explicados, donde el timón sustituye a la dirección de las ruedas con modificación sincronizada del vector de empuje. Además el vector, para empuje de proa o popa, se puede variar para que empuje también de estribor a babor, lo que facilitaría las maniobras de atraque del buque.

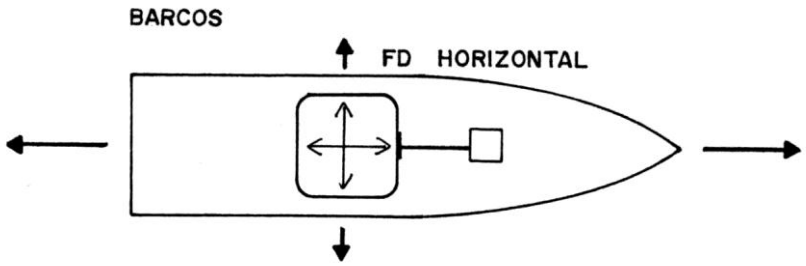


Figura 5.10. Utilización en buques

En el caso de naves para funcionar bajo la superficie del agua, submarinos, batiscafos, vehículos de investigación submarina, sistemas especializados submarinos para tender cables, tuberías, etc.; esta aplicación de los vectores F_d será más versátil puesto que estos vehículos tienen un campo de acción similar al aéreo o espacial, con una notable diferencia, que se tiene que desplazar el vehículo hacia las profundidades, lo cual es una aplicación similar a la prensa.

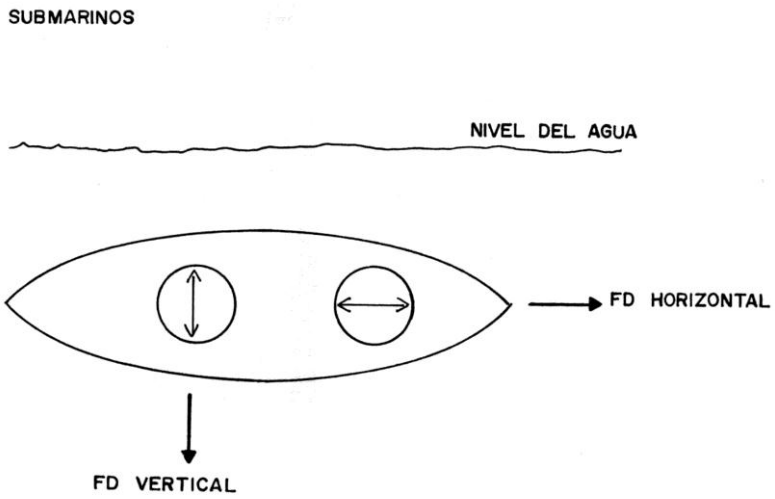


Figura 5.11. Aplicación en submarinos

El vector F_d permite una extremada complejidad de traslaciones, se puede explicar mejor en una esfera donde el vehículo estaría en punto central.

5.6. Vehículos aéreos y espaciales

La aeronavegación se divide básicamente en dos modalidades: helicópteros y aviones de ala. Además de un montón de intermedios. El helicóptero levanta su propio peso por las alas rotantes (palas) usando una aerodinámica similar a la hélice y con un consumo energético mayor que la otra modalidad. Los aviones de ala se basan en perfiles y superficies aerodinámicas (sustentación por alas clásicas) en el aire. Por otra parte se deben considerar los vehículos espaciales, que serían vehículos de elevación vertical; en cierto modo los helicópteros se basarán en el mismo sistema F_d que los espaciales.

Para los vehículos espaciales, la configuración ideal se muestra en la figura 5.12.

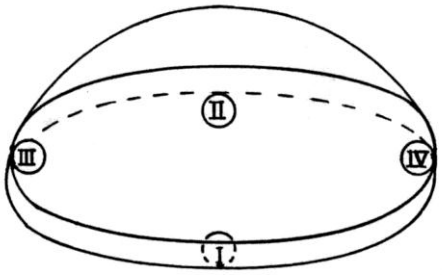


Figura 5.12. Aplicación espacial

Esta configuración sería ideal para viajes espaciales, en la que la planta productora de energía eléctrica para los equipos F_d no consuma oxígeno y proporcione por un largo período lo necesario para la propulsión. Para un helicóptero sería similar pero sin necesidad de la presurización necesaria de los vehículos espaciales, tampoco es necesario que la planta de energía

no consuma oxígeno y la estructura en general de la nave sería más liviana, lo que redundaría en costos de producción.

En las naves aéreas convencionales, aviones de ala, los propulsores actuales en las alas serían sustituidos por equipos vectores F_d con planta generadora energética y sistemas para variar el ángulo y el empuje, similar al caso de los vehículos terrestres.

Capítulo 6. CONCLUSIONES

De la investigación desarrollada se han obtenido las conclusiones siguientes:

CONCLUSIÓN 1ª. A partir del modelo de laboratorio diseñado y construido, y del estudio energético y dinámico realizado para entender su funcionamiento, se ha constatado el concepto teórico del impulso que se puede generar mediante un movimiento circular.

CONCLUSIÓN 2ª. Los resultados experimentales del modelo para el desplazamiento por tierra resultan muy similares a los calculados a través del desarrollo teórico, en ambos casos se aproximan a un desplazamiento con una velocidad promedio de $4{,}1\ mm/s$.

CONCLUSIÓN 3ª. En relación con el modelo naval construido, con el nuevo diseño de propulsor propuesto, se han obtenido resultados muy satisfactorios que hacen aventurar sistemas óptimos en un futuro cercano, se consigue mover un barco de $19{,}8\ Kg$ aproximadamente con una velocidad de $1{,}52\ cm/s$.

CONCLUSIÓN 4ª. No sería necesaria la hélice propulsora del buque, debido a la naturaleza del impulso que implica una fuerza generada por una masa desbalanceada girando. Eliminando, a la vez, todo el sistema de conversión de energía mecánica en empuje.

CONCLUSIÓN 5ª. Con el sistema desarrollado se alcanza una mejora manifiesta en las maniobras del barco, debido a la multitud de direcciones que puede adoptar el vector unidireccional. Como consecuencia, se podría eliminar el sistema clásico de gobierno, incluida la pala del timón, y sus accesorios.

CONCLUSIÓN 6ª. El sistema propuesto supone una gran reducción de las resistencias a la propulsión respecto a los sistemas utilizados actualmente. Se evitan las pérdidas debidas al funcionamiento de la hélice, al rozamiento del árbol con la bocina y el prensaestopas, chumaceras de sujeción del árbol, etc.

CONCLUSIÓN 7ª. El sistema planteado se puede adecuar a las exigencias de la industria actual. Con tal finalidad se ha realizado el estudio teórico de un sistema de propulsión con el propósito de alcanzar un movimiento continuo y una potencia mayor, observando perspectivas futuras viables.

BIBLIOGRAFÍA

1) AGUDO, T. ... [et al.]. "Física aplicada a la navegación: Mecánica y Fluidos". Servicio de publicaciones de la E. T. S. de Ingenieros Industriales y de Ingenieros de Telecomunicación. Bilbao, 1995

2) ALONSO, M. y FINN, E. J. "Física Volumen I: Mecánica". Addison-Wesley Iberoamericana. Wilmington, 1986

3) ALONSO, M. y ROJO, O. "Física: Mecánica y Termodinámica". Addison-Wesley Iberoamericana. Wilmington, 1979

4) ARNTZ, F. "One directional centrifugal excentric force applicator". United States Patent PCT/US83/01723, 1982

5) ARRUZ, J. "Odisea marina". Revista del Ministerio de Fomento. Enero 2010 p. 62-65

6) BASKIS, P.T. y MULLINIX, F.D. "Inertial motor for driving vehicle converts circular kinetic energy into linear kinetic energy, comprises circulating weights converted into unidirectional series of impulses that drive vehicle forward". United States Patent Nº US20011035059-A1, 2001

7) BAUMEISTER, T. y AVALLONE, E. "Marks Manual del Ingeniero Mecánico". McGraw-Hill. USA, 1978

8) BIRD, D.E. " Centrifugal inertial propulsion system for generating into a linear force has single axiom with equal masses on either side and pivoted about a center of axis and made to slide in a controlled manner". GB Patent Nº GB2343937-A; GB2343937-B, 2000

9) BRONISLAVOVICH, J. "Method of converting the rotary motion of a solid body into the method, and a device for applying said method". Patente Rusa PCT/RU94/00242, WO 96/12891, 1994

10) BROWN, D.K. "A Century of Naval Construction". Conway. London, 1983

11) BUECHE, F. J. "Física General". McGraw-Hill. México, 1991

12) CARIOU, L.M. "Inertial propulsion system, e, g. for marine craft has primary shaft with asymmetrical gears meshing with others connected to gears with weights". Patente francesa. Nº FR2846725-A1, 2004

13) CARLTON, J. "Marine propellers and propulsion". Elsevier Ltd. UK, Junio de 2007

14) CARLTON, J.S. "The Propulsion of a 12 500 teu Container Ship. Trans". I. Mar E.S.T. Abril de 2006

15) CASANOVA RIVAS, E. "Máquinas para la propulsión de buques". Servicio de Publicacións Universidade da Coruña. A Coruña, 2001

16) CASANUEVA GONZALEZ, J. F. "Elementos para una Historia de la Navegación a Vapor". Servicio de Publicaciones Universidad de Cádiz. Cádiz, 1996

17) CATALÁ, J. "Física General". SABER- Entidad Española de Librería y Publicaciones. Valencia, 1975

18) COHEN, H.; ROGERS, G.F.C. y SARAVANAMUTTOO, H.I.H. "Teoría de las Turbinas de Gas". Marcombo S.A. Barcelona, 1983

19) COLIGNON, M. "Dispositif de type rotor à destabilization provoquée permettant d'assurer le déplacement d'un mobile". Patente Francesa Nº 9212670, 1994

20) CONRADIS, H. … [et al.]. "El Gran Libro de los Océanos". Reader's Digest. Capítulo "Barcos y descubridores". Madrid, 1971

21) CORCHÓN, F. "Física". Tomo I. Escuelas Universitarias. Santander, 1976

22) CUESTA, M. … [et al.]. "Física I: Mecánica y Fluidos". Servicio de Publicaciones de la E. T. S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Santander, 1994

23) DAVALILLO, A. … [et al.]. "Problemas de Física Aplicada a la Navegación". Sección de Publicaciones de la E. T. S. de Ingenieros Industriales y de Ingenieros de Telecomunicación. Bilbao, 1998

24) DAVALILLO, A. ... [et al.]. "Naval application to the Kolb-Vila propulsion system". Proceedings 1st International Congress on Maritime Technological Innovations and Research, pp. 227-242. Barcelona, 1999

25) DE LA LLANA, I. … [et al.]. "Behaviour of the Kolb Vila propulsion system mounted in a ship model". Proceedings of 2nd International Congress on Maritime Technological Innovations and Research, pp. 248-254. Cádiz, 2000

26) DE LA LLANA, I. … [et al.]. "The study and applications of a propelling system based in rotative movement". Proceedings of the First International Congress on Maritime Transport, pp. 249-262. Barcelona, 2001

27) DE LA LLANA, I.; VILA, J. y ARGUINCHONA, J. "Naval propulsion system based on a rotary movement". Journal of Maritime Research. Spanish Society of Maritime Research, Vol. VI Nº 3, pp. 3-14. Santander, 2009

28) DE MAZARREDO BEUTEL, L. "Evolución de la Propulsión Naval Mecánica". Fondo Editorial de Ingeniería Naval. Madrid, 1992

29) ENGEL, A.B. y STIEBITZ, P.H. "The cybernetics of inertial propulsion". Kybernetes. Emerald Group Publishing Limited, Vol. 38 Nº1-2, PP. 141-157. 2009

30) ERRICSSON, J. "1803–1899". RINA Affairs. Octubre de 2004

31) ESTRADE, F. "Vorrichtung zum Antrieb von auff einer Unterlage beweglichen Köpern". Germany patent p2216931.9. 1973

32) FIALA, H.E. y FIALA, J.E. "Inertial propulsion device (IPD) e.g. vertical motion by mass transfer (VMT) IPD for e.g. amusement park rides, has electric motor for driving spinning rotor that is moved horizontally and vertically with respect to pivot point". United States Patent Nº US2009183951-A1. 2009

33) FORBES, J. R. "Historia de la técnica". Fondo de Cultura Económica. México, 1957

34) GABERSON, H.A. "Vibratory locomotion means". United States Patent Nº 3,916,704. 1973

35) GAMOW, G. y CLEVELAND, J. M. "Physics: Foundations and Frontiers". Prentice-hall, Inc. New Jersey, 1960

36) GLASSTONE, S. y SESONSKE, A. "Ingeniería de reactores nucleares". Ed. Reverté. Barcelona, 1990

37) GÓMEZ, J.C. "Mecánica". Editorial Paraninfo. Madrid, 1995

38) GRIFFITHS, D. "Steam and sea. Two centuries of steam-powered ships". Conway Maritime Press. London, 1997

39) GUTSCHE, G.J. "Self contained inertial vehicular propulsion device, has supporting frame supporting components of device, and flywheel co-centrically contained on central shaft rotational bearing flywheel free wheeling freedom of rotation". United States Patent Nº US2008223626-A1. 2008

40) HERNÁNDEZ MOLINA, R. "Antecedentes Históricos de la Propulsión Mecánica". Departament de Geografía i Historia (Universitat de Lleida). Lleida, 1992

41) HAYT, W. "Teoría electromagnética", 5ta Edición. McGraw-Hill. USA, 1991

42) INGLIS, J. W. "Physics: an ebb and flow of ideas". John Wiley & Sons, Inc. New York, 1970

43) IWATA, A. "Superconducting electromagnetic propulsion system". Bull. of Mar. Eng. Soc., 18(1). 1990

44) KOLB, A. y VILA, J. "Vectores unidireccionales gravitatorios". Cienciatel: revista de ciencias aplicadas y telecomunicaciones. Volumen 1, pp. 1-4. 1997

45) KOLB, A. y VILA, J. "Vorrichtung und verfahrem zum erseugen einer gerichteten kraft au seiner drehbewegung". Germany patent number DE 19712542 A1, PCT/EP98/01755, WO 98/42982. 1999

46) KOLB, A. y VILA, J. "El campo gravitatorio y las aplicaciones industriales del vector unidireccional gravitatorio". Tecnosuministros. Quito, 2000

47) KOLB, A., VILA, J. "Nuevo sistema de propulsión basado en un movimiento rotativo". Revista I+D de Petroecuador. Volumen 7, pp. 67-106. 2000

48) KRUK, R. "Antrieb zum Beschleunigen und Manövrieren von Weltraumfahrzeugen". Germany patent DE 4411259 A1. 1994

49) LAMBERT, A.D. "The Royal Navy and the Introduction of the Screw Propeller". History of Technology. 21, Continuum. 1999

50) LASZLO, B.M. "Propulsion apparatus". United States Patent Nº 3,584,515. 1971

51) LASHERAS, A. L. y CARRETERO, M. P. "Física y Química. Spin". Editorial Vicenç-Vives. Barcelona, 1984

52) LUCINI, M. "Turbomáquinas de Vapor y de Gas". Ed. Labor. Barcelona, 1956

53) LE MAUFF, P. "Propulseur centrifuge". Patente Francesa Nº 70.15217. 1972

54) MARTÍNEZ, J. J. "Mecánica Newtoniana". Ediciones UPC. Barcelona, 2001

55) MARTÍNEZ-HIDALGO, J. M. "Del Remo a la Vela". Editorial Juventud S. A. Barcelona, 1948

56) MERRIEN, J. "Historia de los Buques". Aymá Editora S. A. Barcelona, 1960

57) MESNY, M. "Generación del vapor". Ed. Marymar. Buenos Aires, 1976

58) MCMAHON, J.C. "Energy transfer device". United States Patent Nº 5,167,163. 1991

59) MORLEY, A. "Mecánica para ingenieros". Editorial Labor. Barcelona, 1943

60) MORLEY, A. e INCHLEY, B. "Tratado elemental de Mecánica Aplicada". Editorial Labor. Barcelona, 1943

61) PÉREZ DEL RÍO, J. "Tratado general de máquinas marinas". Ed. Planeta. Barcelona, 1969

62) RUPP, O. "Gerät zur Umwandlung desdrehmomentes in ein freies Schubmoment". Germany patent DE 2841962 A1. 1980

63) SCHMITT, H. "Antriebsvorrichtung, vozugsweise für Raum-, Luft-, Wasser- oder Unterwasserfahrzeuge". Germany patent DE 3423976 A1. 1986

64) SEPÚLVEDA, A. "Historia de la Física". Fondo Editorial Corporativo. Medellín, 1995

65) SERWAY, R. A. "Física". Nueva editorial Interamericana. México, 1987

66) SMITH, D. W. "Marine Auxiliary Machinery". Butterworths Ltd. London, 1983

67) VILA, J. … [et al.]. "Física: teoría, problemas, cuestiones, prácticas". Editorial Edicumbre. Quito, 1998

68) VILA, J. … [et al.]. "Can the propeller from a ship disappear?" Proceedings of MARIND'98, pp.57-66. Varna, 1998

69) VILA, J. … [et al.]. "Demostración de la existencia del vector unidireccional gravitatorio". Cienciatel: revista de ciencias aplicadas y telecomunicaciones. Volumen 2, pp. 1-4. 1998

70) VILA, J. … [et al.]. "Comprobación Teórica-Práctica del vector unidireccional gravitatorio". Cienciatel: revista de ciencias aplicadas y telecomunicaciones. Volumen 3, pp. 7-12. 1998

71) VILA, J. … [et al.]. "Modelo de laboratorio, basado en un movimiento rotativo, para la enseñanza de la Física". DIDACFISU'2002. III Taller internacional sobre Didáctica de la Física Universitaria. pp. 125-136. Universidad de Matanzas, 2002

72) ZACHYSTAL, G. "Device for obtaining a directional centrifugal force". United States Patent Nº 4,884,465. 1989

73) "Enciclopedia Salvat de la Ciencia y Tecnología". Salvat Editores S. A. Barcelona, 1964

74) http://rucool.marine.rutgers.edu/atlantic/status_updates.html

75) http://wilmerruperti.blog.com.es/2010/01/07/scarlet-knight-el-minisubmarino-planeador-7707975/

TRABAJOS DERIVADOS DE LA TESIS

Durante el desarrollo de la presente Tesis Doctoral se han realizado diversos trabajos entre los que merecen ser destacados los siguientes:

Tres ponencias en Congresos Internacionales,

- DE LA LLANA, I. "Behaviour of the Kolb Vila propulsion system mounted in a ship model". Second International Congress on Maritime Technological Innovations and Research. Cádiz, 2000

- DE LA LLANA, I. "The study and applications of a propelling system based in rotative movement". First International Congress on Maritime Transport. Barcelona, 2001

- VILA, J. y DE LA LLANA, I. "Modelo de laboratorio, basado en un movimiento rotativo, para la enseñanza de la Física". DIDACFISU'2002. III Taller internacional sobre Didáctica de la Física Universitaria. Universidad de Matanzas (Cuba), 2002

y, siete publicaciones,

- VILA, J.; KOLB, A. y DE LA LLANA, I. "Comprobación Teórica-Práctica del vector unidireccional gravitatorio". Cienciatel: revista de ciencias aplicadas y telecomunicaciones. Volumen 3, pp. 7-12. 1998

- VILA, J.; DE LA LLANA, I. y KOLB, A. "Can the propeller from a ship disappear?" Proceedings of second International Conference on Marine Industry (MARIND'98), pp.57-66. Varna, 1998

- VILA, J.; DAVALILLO, A. y DE LA LLANA, I. "Naval application to the Kolb-Vila propulsion system". Proceedings 1st International Congress on Maritime Technological Innovations and Research, pp. 227-242. Barcelona, 1999

- DE LA LLANA, I.; VILA, J. y DAVALILLO, A. "Behaviour of the Kolb Vila propulsion system mounted in a ship model". Proceedings of second International Congress on Maritime Technological Innovations and Research, pp. 248-254. Cádiz, 2000

- DE LA LLANA, I.; VILA, J. y DAVALILLO, A. "The study and applications of a propelling system based in rotative movement". Proceedings of the First International Congress on Maritime Transport, pp. 249-262. Barcelona, 2001

- VILA, J.; DE LA LLANA, I. y DAVALILLO, A. "Modelo de laboratorio, basado en un movimiento rotativo, para la enseñanza de la Física". DIDACFISU'2002. III Taller internacional sobre Didáctica de la Física Universitaria. pp. 125-136. Universidad de Matanzas, 2002

- DE LA LLANA, I.; VILA, J. y ARGUINCHONA, J. "Naval propulsion system based on a rotary movement". Journal of Maritime Research. Spanish Society of Maritime Research, Vol. VI Nº 3, pp. 3-14. Santander, 2009